

## DOSIS ÓPTIMA ECONÓMICA DE NITRÓGENO EN MAÍZ SEGÚN POTENCIAL DE PRODUCCIÓN Y DISPONIBILIDAD DE NITRÓGENO EN LA REGIÓN PAMPEANA NORTE

FERNANDO SALVAGIOTTI \*; JULIO MANUEL CASTELLARÍN; FACUNDO JAVIER FERRAGUTI & HUGO MIGUEL PEDROL

Recibido: 21-01-11

Recibido con revisiones: 15-08-11

Aceptado: 17-08-11

### ECONOMIC OPTIMAL NITROGEN RATE AS AFFECTED BY YIELD POTENTIAL AND NITROGEN SUPPLY IN THE NORTHERN PAMPAS

#### ABSTRACT

Maize is the most important summer cereal in the Northern Pampas of Argentina where soils present severe nitrogen (N) deficiency. N fertilization in maize must optimize available N at planting ( $N_{ds} = N_{ds_{mic}} + \text{fertilizer}$ ) in order to assure maximum profitability and avoid excessive applications that may harm the environment. The objectives of the present study were to: i) test the capability of the quadratic-plateau (CP) and spherical (Esf) models for estimating crop yield response to N fertilization; ii) determine critical thresholds of Nds (UCNds) in crops that showed high (AR) and low (BR) grain yield. Finally, in these situations, economical optimal N rate (DOE) and N use efficiency at DOE ( $EA_{DOE}$ ) were calculated at different Nds. The analysis of 39 N fertilization experiments (site-year-SA) showed that CP and Esf, accurately fitted the relationship between fertilizer N and grain yield analyzing the whole network. However, CP showed some limitations for representing the asymptotic shape of the response curve in some particular SA. UCNds were 137 and 161 kg N ha<sup>-1</sup> for BR and AR, respectively. Using a 10:1 maize:N price ratio, DOE was 99 and 78 kg N ha<sup>-1</sup> and  $EA_{DOE}$  was 28 and 17 kg grain kg N<sup>-1</sup> in AR when  $N_{ds_{mic}}$  was 40 and 80 kg N ha<sup>-1</sup>. On the other hand, in BR, for the same  $N_{ds_{mic}}$ , DOE was 71 and 49 kg N ha<sup>-1</sup> while  $EA_{DOE}$  was 15 and 8 kg grain kg N<sup>-1</sup>. When maize: price ratios were more unfavorable, DOE and  $EA_{DOE}$  decreased, but with a greater magnitude in BR. The results of this study highlight the importance of defining crop potential productivity in maize for diagnosing crop N fertilization in addition to soil analysis for achieving larger profitability with greater fertilizer use efficiency.

**Key words.** Spherical model, Quadratic-plateau model, Response thresholds, Nitrogen use efficiency.

#### RESUMEN

El maíz es el principal cereal de verano en la Región Pampeana norte de la Argentina donde los suelos presentan una deficiencia crónica de nitrógeno (N). La fertilización nitrogenada en maíz debe optimizar los niveles de N disponible a la siembra ( $N_{ds} = N_{ds_{mic}} + \text{N fertilizante}$ ) para asegurar la máxima rentabilidad y evitar altas dosis que perjudiquen el ambiente. Los objetivos de este trabajo fueron: i) comparar la capacidad de los modelos cuadrático-plateau (CP) y esférico (Esf) para estimar la respuesta a la fertilización con N; ii) determinar umbrales críticos de Nds (UCNds) en cultivos de alto (AR) y bajo (BR) rendimiento, y iii) calcular en estas situaciones la dosis óptima económica de N (DOE) y la eficiencia en el uso del N en la DOE ( $EA_{DOE}$ ) con distinto Nds. Se analizaron 39 experimentos de fertilización nitrogenada (sitio-año-SA), los modelos CP y Esf ajustaron con precisión la relación entre rendimiento y Nds en toda la red, pero el modelo CP presentó dificultades para representar la forma asintótica de la curva de respuesta en algunos SA en particular. Los UCNds fueron de 137 y 161 kg N ha<sup>-1</sup> en BR y AR. Utilizando una relación de precios maíz: N de 10:1, la DOE fue de 99 y 78 kg N ha<sup>-1</sup> y la  $EA_{DOE}$  de 28 y 17 kg grano kg N<sup>-1</sup> para AR cuando  $N_{ds_{mic}}$  fue 40 y 80 kg N ha<sup>-1</sup>. En cambio para BR, para las mismas  $N_{ds_{mic}}$ , la DOE fue de 71 y 49 kg N ha<sup>-1</sup> con una  $EA_{DOE}$  de 15 y 8 kg grano kg N<sup>-1</sup>. Al cambiar la relación de precios a situaciones más desfavorables, la DOE y la  $EA_{DOE}$  disminuyeron, pero con mayor magnitud en BR. Los resultados de este trabajo remarcan que, para un correcto diagnóstico de la fertilización nitrogenada en maíz, es importante definir el potencial de rendimiento del cultivo que permitirá alcanzar mayor rentabilidad haciendo un uso eficiente del fertilizante.

**Palabras clave.** Modelo esférico, Modelo cuadrático Plateau, Umbrales de respuesta, Eficiencia del uso del nitrógeno.

## INTRODUCCIÓN

La producción de maíz en la Región Pampeana norte se ha venido incrementando en los últimos años a pesar de que la superficie cultivada se ha mantenido relativamente constante (ca. 20%), como consecuencia del aumento en el rendimiento por unidad de superficie (MinAgri, 2011). Los suelos de esta área presentan una deficiencia crónica de nitrógeno (N) debido a la disminución de los contenidos de materia orgánica, consecuencia del intenso uso de labranzas no conservacionistas, y a los procesos de erosión que caracterizaron a la producción de cultivos hasta la última década del siglo pasado, sumado a la alta frecuencia del monocultivo de soja y el bajo aporte de C al sistema (Díaz Zorita & Buschiazzi, 2006). Por otra parte, la intensificación de la agricultura en esta región mediante el empleo de genotipos con mayor potencial de rendimiento y adaptabilidad ha incrementado la demanda de nutrientes, lo que hace que la fertilización del cultivo cumpla un rol esencial para maximizar la rentabilidad del mismo.

El manejo racional de la fertilización nitrogenada del cultivo en un marco de buenas prácticas agrícolas implica el desarrollo de metodologías de diagnóstico que: i) optimicen los niveles de N en el canopeo y mantengan la capacidad fotosintética del cultivo para asegurar la máxima producción (Sinclair & Horie, 1989) y ii) eviten excesivas aplicaciones de fertilizante nitrogenado que sean potencialmente perjudiciales para el ambiente (Robertson & Vitousek, 2009). La metodología de recomendación de fertilización con nitrógeno en los cultivos debe estimar con la mayor exactitud posible las cantidades de N a aplicar, pero al mismo tiempo debe ser práctica para poder ser aplicada a campo. En la Región Pampeana, el método del balance de N fue utilizado en un principio para estimar la cantidad de fertilizante nitrogenado a aplicar (Melchiori & Papparotti, 1996; Salvagiotti *et al.*, 2000). Si bien en este balance se pueden cuantificar los diferentes compartimentos del ciclo del N, el uso generalizado de esta metodología presenta ciertas limitantes y pierde precisión al aplicarla en cada caso en particular, debido a la imposibilidad de contar con valores de la cantidad de N aportado por la mineralización de la materia orgánica o de las eficiencias de utilización de los diferentes pools de N.

En trigo, González Montaner *et al.* (1991) propusieron estimar la cantidad de N disponible a la siembra ( $N-NO_3$  a 60 cm + N fertilizante) (Nds) necesario para lograr la máxima producción en un ambiente o conjunto de ambientes determinado. Estos autores propusieron un umbral de 125 kg N ha<sup>-1</sup> por encima del cual la respuesta a la fertilización

disminuía. Este método presenta la simplicidad de hacer mediciones a la siembra de nitratos, pero dada la naturaleza empírica del mismo, necesita de calibraciones locales. En maíz, Pagani *et al.* (2008) encontraron umbrales de Nds de 150 kg N ha<sup>-1</sup> para la región Sudeste de Bs. As., llegando a 190 kg N ha<sup>-1</sup> en condiciones de mayor potencial de producción. Sin embargo, en la Región Pampeana norte, donde las temperaturas medias son mayores y el contenido de materia orgánica de los suelos es menor, no se ha informado de calibraciones de este tipo en la literatura científica. La naturaleza empírica de este modelo de recomendación hace que los parámetros de las funciones puedan cambiar en función de las condiciones ambientales en las cuales fueron calibrados. Calviño *et al.* (2002) observaron cambios en las curvas de respuesta en función del potencial de rendimiento de variedades de trigo. Dado que habrá una mayor demanda de N en situaciones de mayor productividad, es esperable que los umbrales de disponibilidad de N sean superiores en la medida que el cultivo tenga un mayor potencial de rendimiento. En la Región Pampeana norte existe mayor probabilidad de obtener rendimientos de maíz superiores a los obtenidos en el SE de Bs. As. (Cirilo, 2004), por lo que los umbrales de respuesta a la fertilización con N serían mayores a los informados en esta región.

La dosis óptima económica de N (DOE), es aquel nivel de N por encima del cual mayores aplicaciones de N no redundarán en un beneficio económico (Nelson *et al.*, 1985). En situaciones reales de producción, se combinan diferentes escenarios de potencial de producción con suelos con diferente capacidad para proveer N. Estos escenarios mostrarán distintas respuestas a la fertilización con N, y en consecuencia, distintas DOE. La forma más común de estimar la DOE es mediante el ajuste de curvas de respuesta entre dosis de N y rendimiento, para posteriormente utilizar la primera derivada de esa función (eficiencia en el uso del Nds (EUN), kg grano por kg Nds) para calcular la respuesta económica en cada nivel de N aplicado. Es esperable que al aumentar los niveles de fertilización con N la respuesta disminuya progresivamente y la EUN se reduzca porque este nutriente deja de ser el factor limitante (de Wit, 1992). Esto puede ser representado por modelos de tipo asintótico. Cerrato & Blackmer (1990) mostraron que los modelos de tipo cuadrático y exponencial tienden a estimar mayores respuestas y máximos rendimientos, y por ende a sobreestimar la DOE. El modelo lineal-plateau también ha sido evaluado para estimar la DOE, sin embargo tiene la desventaja de tener la misma pendiente en todos los niveles de N aplicado (Cerrato & Blackmer, 1990) existiendo una única DOE, que es el punto de quiebre de la curva, no res-

pondiendo a una curva de incrementos decrecientes. El modelo cuadrático-plateau (CP, Ecuación 1) ha sido uno de los más aceptados (Cerrato & Blackmer, 1990; Bullock & Bullock, 1994):

$$R = R_{0CP} + b_{CP} N + c N^2 \quad \text{si } x < N_{critCP}$$

$$R = P \quad \text{si } x \geq N_{critCP} \quad (\text{Ecuación 1})$$

donde R es el rendimiento ( $\text{kg ha}^{-1}$ ), N es la dosis de N aplicada ( $\text{kg N ha}^{-1}$ ),  $R_{0CP}$  es el rendimiento cuando el cultivo no recibió fertilización nitrogenada, b es el incremento lineal del rendimiento por unidad de superficie, c es el coeficiente cuadrático,  $N_{critCP}$  es el nivel crítico de N por encima del cual no es esperable aumentos en el rendimiento y P es el rendimiento plateau. Pagani *et al.* (2008), en una red de fertilización nitrogenada en el Sudeste de Buenos Aires determinaron que el modelo CP era el más adecuado para poder estimar la DOE. Recientemente Dobermann *et al.* (2011) propusieron la función esférica (Esf) (Ecuación 2):

$$R = R_{0Esf} + \Delta \left[ \left( 3 N / 2 N_{critEsf} \right) - \left( 1/2 \left( N / N_{critEsf} \right)^3 \right) \right] \quad \text{si } 0 \leq N_{critEsf}$$

$$R = R_{0Esf} + \Delta \quad \text{si } 0 > N_{critEsf}$$

(Ecuación 2)

donde R es el rendimiento ( $\text{kg ha}^{-1}$ ), N es la dosis de N aplicada ( $\text{kg N ha}^{-1}$ ),  $R_{0Esf}$  es el rendimiento cuando el cultivo no recibió fertilización nitrogenada,  $N_{critEsf}$  es el nivel crítico de N en donde ocurre el máximo rendimiento y  $\Delta$  es el incremento del rendimiento para la dosis de N más alta (i.e. la diferencia entre el rendimiento obtenido con una dosis de N igual a  $N_{critEsf}$  y el rendimiento obtenido sin fertilización nitrogenada). En este modelo, se necesita la calibración de tres parámetros en contraposición a los cuatro que son necesarios para calibrar el modelo CP, entonces la estimación de los mismos tendría menos problemas de cálculo y sería más precisa (Makowski *et al.*, 2006).

Utilizando una red de 39 ensayos (sitio-año-SA) de fertilización nitrogenada conducidos en la región pampeana norte, se propusieron los siguientes objetivos: i) comparar la performance de los modelos CP y Esf para estimar la respuesta a la fertilización con N, ii) establecer umbrales de respuesta a la fertilización nitrogenada y estimar la EUN de acuerdo al potencial de producción del cultivo y iii) calcular la DOE en distintas condiciones de potencial de producción teniendo en cuenta la disponibilidad de N en el suelo.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Características generales de los experimentos

Los experimentos fueron realizados entre las campañas 1998/99 y 2009/10 en lotes de producción en el centro-sur de Santa Fe (entre  $32^{\circ}25'$  y  $33^{\circ}31'$  Lat. S). Todos fueron conducidos en siembra directa con antecesor soja sobre suelos Argiudol típico o vértico (Tablas 1 y 2). La información permitió definir 210 situaciones de Nds como resultado de la combinación de SA y niveles de N aplicados a la siembra (Tabla 1). Los ensayos se dispusieron en bloques completos al azar, con dos a cuatro repeticiones. En todos los casos se sembraron híbridos de maíz con alto potencial de rendimiento según lo recomendado para cada sitio en los años estudiados, y se aseguraron condiciones no limitantes de fósforo y azufre, aplicando entre 80 a 100 kg de superfosfato triple de calcio o fosfato diamónico y 100 kg de sulfato de calcio, respectivamente.

### Mediciones realizadas

En cada experimento se realizó el análisis de nitratos a la siembra a tres profundidades (0-20, 20-40 y 40-60 cm) y se cuantificó Nds en kg por ha utilizando una densidad aparente de 1,25, 1,3 y 1,3 para los estratos 0-20, 20-40 y 40-60 cm, respectivamente. Además, en cada ensayo se determinó el contenido de P Bray, C orgánico y pH (Tabla 2). A cosecha, se determinó el rendimiento cosechando una superficie de entre 7 y 10  $\text{m}^2$  en cada unidad experimental y fue ajustado a una humedad de 0,14  $\text{kg H}_2\text{O}$  por kg de grano.

### Análisis de los datos

#### Descripción general de la red de ensayos

Para caracterizar la red de ensayos, se realizó un análisis descriptivo de la distribución del máximo rendimiento alcanzado en cada SA (MaxRend), el rendimiento sin fertilización nitrogenada en cada SA (RendTest) y de la disponibilidad inicial de nitratos a 60 cm ( $N_{ds, inic}$ ). MaxRend fue utilizado como un índice ambiental que representa la potencialidad de producción en cada SA (Hildebrand & Russell, 1996; Tollenaar & Lee, 2002; Wilhelm & Wortmann, 2004). En base a la distribución de esta variable, se separaron dos poblaciones de datos, por encima (Alto rendimiento - (AR) y por debajo (Bajo rendimiento - BR) del percentil 50. La variable RendTest se utilizó como un indicador de la capacidad del suelo de proveer N nativo (Cassman *et al.*, 1996).

#### Comparación de los modelos de respuesta a la fertilización con N

Para comparar la performance de los modelos CP y Esf, se ajustaron las ecuaciones 1 y 2 a la relación entre el rendimiento y el Nds en cada uno de los SA estudiados utilizando

Tabla 1. Descripción de los sitios-año (SA) y experimentos de fertilización nitrogenada bajo estudio.  
Table 1. Description of site-year (SA) and N fertilization experiments under study.

SA	Localidad	Campaña	CA <sup>1</sup>	Niveles de N (kg ha <sup>-1</sup> )	Híbrido
1	Oliveros	1998/99	Sj	14-94-174	Ax 952
2	Oliveros	1999/00	Sj	0-80-160	DK 752
3	Oliveros	1999/00	Sj	0-50-100	DK 752
4	Chañar Ladeado	2000/01	Sj	0-120	Titanium F1
5	Las Rosas	2000/01	Sj	0-120	DK757
6	Oliveros	2000/01	Sj	0-120	Ax888IT
7	San Jerónimo	2000/01	Sj	0-90-120-150-300	DK752
8	Totoras	2000/01	Sj	0-60-120	DK752
9	C. Gómez	2000/01	Tr/Sj	0-60-90-120-150	Titanium F1
10	Bouquet	2001/02	Tr/Sj	0-60-120	Titanium F1
11	Oliveros R	2001/02	Sj	0-60-90-120-150-180	Ax888
12	Correa	2001/02	Tr/Sj	0-60-120	DK 682 MG
13	Fúnes	2001/02	Sj	0-60-90-120	P32G62
14	Totoras	2001/02	Sj	0-60-120	DK 696
15	Oliveros EEA	2001/02	Sj	0-60-120	Ax884
16	Cnel. Bogado	2001/02	Sj	0-60-120	M 10
17	Correa	2002/03	Tr/Sj	0-60-90-120-150 - 180	DK 682 MG
18	Carcarañá	2002/03	Tr/Sj	0-60-90-120-150 - 180	M10
19	Bouquet	2002/03	Sj	0-60-90-120-150 - 180	Titanium F1
20	Maciel	2002/03	Sj	0-60-90-120-150 - 180	Pucara
21	Oliveros Lote I	2002/03	Sj	0-60-90-120-150 - 180	Ax888
22	Oliveros 2da	2002/03	Sj	0-60-90-120-150 - 180	Ax 840
23	Cnel. Bogado	2002/03	Sj	0-60-90-120-150 - 180	M10
24	Totoras	2002/03	Sj	0-60-90-120-150 - 180	Ax882
25	C. Gómez	2003/04	Tr/Sj	0-60-90-120-150 - 180	DK 682 MG
26	Oliveros	2003/04	Sj	0-60-90-120-150 - 180	Siroco TDMax
27	Totoras	2003/04	Sj	0-60-90-120-150 - 180	DK 682 MG
28	Cnel. Bogado	2003/04	Tr/Sj	0-60-90-120-150 - 180	Ax 882
29	Los Molinos	2003/04	Sj	0-60-90-120-150 - 180	Titanium F1
30	Bouquet	2003/04	Tr/Sj	0-60-90-120-150 - 180	DK 682 MG
31	Carcarañá	2003/04	Sj	0-60-90-120-150 - 180	DK 682
32	Cañada Rica	2005/06	Sj	0-50-100-150	Ax 882 MG
33	Maciel	2005/06	Sj	0-50-100-150	NK900TD
34	Cañada Gómez	2006/07	Sj	0-60-90-120-150 - 180	DK 747
35	Oliveros Secano	2007/08	Sj	0-60-120-180 - 240	DK 747
36	Oliveros Riego	2007/08	Sj	0-60-120-180 - 240	DK 747
37	Oliveros EEA	2008/09	Sj	0-60-120-180 - 240	Ax 886
38	Oliveros EEA	2009/10	Sj	0-60-120-180 - 240	Ax 886
39	Oliveros	2004/05	Sj	0-60-90-120-150 - 180	Ax 886

<sup>1</sup>CA: Cultivo antecesor. Tr= Trigo, Sj= Soja.

un software de optimización de ajuste por mínimos cuadrados (TBL Curve, Jandel Scientific, CA). Debido a las restricciones para el ajuste de cada modelo, se incluyeron aquellos experimentos en que se estudiaron al menos 4 niveles de N para ajustar el modelo Esf y 5 niveles de N para el modelo CP. Se utilizaron dos aproximaciones para evaluar la performance

de los modelos: i) relacionando los residuales con la variable independiente, *i.e.* desviaciones de los valores observados respecto de los estimados por el modelo (Cerrato & Blackmer, 1990; Bullock & Bullock, 1994); ii) relacionando la dispersión de los residuales del rendimiento en función de la desviación de la dosis de N estudiadas en cada SA con respecto a la DOE

Tabla 2. Carbono orgánico, Fosforo Bray I y pH en los 20 cm superficiales y contenido de N-NO<sub>3</sub> en el estrato 0-60 cm de los suelos en los diferentes sitio-año (SA) donde se establecieron los ensayos de fertilización nitrogenada.

Table 2. Organic carbon, phosphorus Bray I and pH in the upper 20 cm and N-NO<sub>3</sub> contents in the 0-60 cm layer of soils in the different site-years (SA) where N fertilization experiments were performed.

SA	Tipo suelo	Serie suelo	C Orgánico <sup>1</sup>	pH <sup>2</sup>	N-NO <sub>3</sub> <sup>3</sup>	P Bray <sup>4</sup>
			g kg <sup>-1</sup>		mg kg <sup>-1</sup>	
1	AT	Maciel	14,2	5,6	6,1	20
2	AT	Maciel	13,4	5,5	5,8	14
3	AT	Maciel	13,4	5,5	5,8	14
4	AT	Hansen	18,0	6,1	9,3	20
5	AT	Los Cardos	15,1	6,1	8,1	42
6	AA	Oliveros	14,2	5,6	5,9	23
7	AV	Peyrano	15,1	5,8	4,3	9
8	AT	Classon	15,2	6,0	7,5	20
9	AT	Correa	15,4	6,2	4,7	14
10	AT	Marcos Juárez	18,1	5,9	12,4	65
11	AT	Maciel	14,7	5,9	5,1	20
12	AT	Correa	12,5	5,8	7,3	8
13	AV	Roldan	18,7	5,5	9,1	8
14	AT	Classon	17,0	5,9	9,8	12
15	AT	Maciel	15,8	5,7	8,4	17
16	AV	Peyrano	13,0	5,7	6,5	12
17	AT	Correa	14,5	6,0	7,9	7
18	AV	Peyrano	15,6	5,9	15,8	22
19	AT	Los Cardos	14,8	5,8	10,5	25
20	AT	Maciel	13,3	5,9	7,2	14
21	AT	Maciel	15,6	5,4	15,8	33
22	AT	Maciel	13,1	5,3	17,2	15
23	AV	Peyrano	12,9	5,7	8,3	25
24	AT	Classon	17,4	5,8	13,0	36
25	AT	Correa	16,5	6,0	7,2	22
26	AT	Maciel	13,8	5,9	4,7	12
27	AT	Classon	17,1	6,0	9,3	29
28	AV	Peyrano	13,7	5,6	4,7	26
29	AT	Casilda	14,7	5,9	6,3	23
30	AT	Marcos Juárez	14,8	6,1	2,6	20
31	AV	Peyrano	16,7	5,9	7,3	10
32	AV	Peyrano	15,8	6,0	5,7	11
33	AT	Maciel	13,4	5,8	6,1	5
34	AA	Armstrong	16,9	6,0	6,3	13
35	AT	Maciel	14,5	5,8	6,3	11
36	AT	Maciel	14,5	5,8	3,8	11
37	AT	Maciel	14,4	6,0	6,7	28
38	AT	Maciel	13,3	6,0	6,5	8
39	AT	Maciel	14,7	5,9	5,0	20

<sup>1</sup> Walkley & Black (1934); <sup>2</sup> glass electrode in suspension 1:25 soil: water ratio (Reed & Cummings, 1945); <sup>3</sup> Bremner (1965); <sup>4</sup> Bray & Kurtz (1945); <sup>5</sup> contenido promedio de NO<sub>3</sub> en el estrato.

de cada uno de ellos (Cerrato & Blackmer, 1990). El cálculo de la DOE en cada SA para efectuar esta comparación se realizó utilizando una relación de precios 10:1 como se describe más abajo.

### Determinación de umbrales de respuesta

Se determinaron umbrales de respuesta a la fertilización con N para conocer el nivel de Nds por encima del cual no se observaron incrementos en la respuesta a la fertilización. Este umbral representa la cantidad de N necesaria para que el rendimiento del cultivo no esté limitado por este nutriente. En cada ensayo, la respuesta a la fertilización nitrogenada en cada nivel de N fue cuantificada a través del rendimiento relativo (RR), que se calculó como la relación entre el rendimiento de cada tratamiento y el rendimiento obtenido en el tratamiento con la mayor dosis de N. Para determinar los umbrales se ajustó la relación entre Nds y RR a una función lineal-plateau:

$$\begin{aligned} RR &= a + b_{LP} \cdot Nds & \text{si } x < UCNds \\ RR &= b_{LP} * UCNds & \text{si } x \geq UCNds \end{aligned} \quad (\text{Ecuación 3})$$

donde  $a$  es el RR promedio cuando Nds es 0 (i.e. el RR con el aporte del N nativo del suelo),  $b_{LP}$  es la pendiente de la curva que indica el incremento en el RR por unidad de incremento de Nds, UCds es el nivel de Nds por encima del cual no hay incrementos en el RR. Este ajuste fue realizado en forma separada para AR y BR. Se realizó un análisis de la distribución de los residuales de esta regresión para observar la presencia de alguna tendencia que pudiera afectar la normalidad y/o homogeneidad de varianzas, como fuera indicado por Álvarez *et al.* (2008).

### Determinación de la DOE y la EUN

Se consideró a la DOE como aquella que tiene el máximo retorno económico neto (RN). Se calculó el RN para tres relaciones de precio (RelPr) (\$ N/\$ grano maíz): 20:1, 10:1 y 5:1, considerando los valores extremos y el más frecuente de la serie histórica de la relación de precios (Pagani *et al.*, 2008), manteniendo constante el precio del grano (PGr, U\$S kg grano<sup>-1</sup>) de maíz a U\$S 110 por tonelada:

$$RN \text{ (U$S ha}^{-1}\text{)} = IB - CF \quad (\text{Ecuación 4})$$

donde IB es el ingreso bruto (U\$S ha<sup>-1</sup>) y CF es el costo del fertilizante (U\$S ha<sup>-1</sup>). El IB fue estimado como:

$$IB \text{ (U$S ha}^{-1}\text{)} = N_f \cdot EUN \cdot PNG \quad (\text{Ecuación 5})$$

donde  $N_f$  es la dosis de N (kg N fertilizante ha<sup>-1</sup>), EUN es la eficiencia en el uso del N (kg grano kg Nds<sup>-1</sup>) estimada a partir de la primera derivada de las funciones ajustadas para la relación entre rendimiento y Nds, y PNG es el precio neto del grano

(U\$S kg grano<sup>-1</sup>). Se calculó PNG descontando un 35% en concepto de gastos de comercialización al PGr (Márgenes agropecuarios, 2011). Por otra parte, el costo del fertilizante fue calculado para las tres relaciones de precio como:

$$CF \text{ (\$/ ha)} = N * PNG * RelPr \quad (\text{Ecuación 6})$$

El costo del N así calculado, incluiría el costo del nutriente más los intereses de capital inmovilizado (Álvarez *et al.*, 2005).

Las DOE fueron estimadas en AR y BR para dos escenarios de Nds<sub>inic</sub>: 40 y 80 kg N ha<sup>-1</sup>. Para calcular el RN,  $N_f$  fue calculado como la diferencia entre Nds y Nds<sub>inic</sub>. En cada escenario, en la DOE se estimaron dos indicadores de la eficiencia de uso del fertilizante nitrogenado (Cassman *et al.*, 2002):

i) la eficiencia agronómica de uso del fertilizante (EA<sub>DOE</sub>)

$$EA_{DOE} = (R_{DOE} - R_{Ndsinic}) / (DOE - Nds_{inic}) \quad (\text{Ecuación 7})$$

donde  $R_{DOE}$  y  $R_{Ndsinic}$  son los rendimientos obtenidos con la DOE y la Nds<sub>inic</sub>, respectivamente (kg ha<sup>-1</sup>), y

ii) la productividad parcial del factor en la DOE (PPF<sub>DOE</sub>):

$$PPF_{DOE} = R_{DOE} / DOE \quad (\text{Ecuación 8})$$

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Respuesta del cultivo de maíz a la fertilización con nitrógeno en la red de ensayos

La red de ensayos bajo estudio exploró un amplio rango de oferta de N edáfico y potencialidad de producción de maíz. MaxRend osciló entre 3.640 y 15.722 kg ha<sup>-1</sup>, y el valor del percentil 50 de la distribución de esta variable, que separó las poblaciones AR y BR fue de 9.520 kg ha<sup>-1</sup>. El rango de RendTest estuvo entre 3.209 y 11.921 kg ha<sup>-1</sup> (Tabla 3). Los valores de Nds<sub>inic</sub> estuvieron comprendidos entre 19 y 127 kg N ha<sup>-1</sup> en AR y entre 28 y 117 kg N ha<sup>-1</sup> en BR. Nds<sub>inic</sub> se asoció positivamente a RendTest, aunque con diferente pendiente según fuera BR ( $y=30,7x + 3941$ ,  $r^2=0,53$ , siendo  $x$  la Nds<sub>inic</sub>) o AR ( $y=60,5x + 4183$ ,  $r^2=0,58$ ). Esta asociación indicaría indirectamente la relación entre Nds<sub>inic</sub> y la disponibilidad de N a lo largo del ciclo (i.e. bajo Nds<sub>inic</sub> indicaría un suelo con baja capacidad de proveer N a lo largo del ciclo). La mayor pendiente en AR mostró la mayor eficiencia de uso en la medida que aumentó el potencial de producción del cultivo. En términos absolutos, la respuesta promedio a la fertilización nitrogenada fue de 3.168 kg ha<sup>-1</sup>, presentando un rango

Tabla 3. Estadísticos descriptivos para el Máximo rendimiento por sitio-año (MaxRend), Rendimiento sin fertilización nitrogenada en cada sitio-año (RendTest) y Nitrógeno disponible del suelo (N-NO<sub>3</sub>, Nds<sub>mic</sub>) a la siembra en los 60 cm superficiales. Datos provenientes de la red de ensayos de fertilización nitrogenada bajo estudio (n=39).

Table 3. Descriptive statistics of Maximum grain yield per site-year (MaxRend), grain yield without N fertilization (RendTest) and available N (N-NO<sub>3</sub>, Nds) at planting (Nds) in the upper 60 cm of soil. Data from the N fertilization trial network under study (n=39).

Variable	Percentiles			Máximo	Mínimo	Promedio	
	25	50	75				
MaxRend	7.964	9.520	11.611	15.722	3.640	10.064	
RendTest	kg ha <sup>-1</sup>	8.276	6.273	5.415	11.921	3.209	6.838
Nds <sub>mic</sub>		47	57	78	127	19	63

entre 252 y 6.822 kg ha<sup>-1</sup> en AR y entre 342 y 4.266 kg ha<sup>-1</sup> en BR. En términos relativos (expresados como rendimiento relativo), estas respuestas absolutas representaron entre 0 y 55% de incremento en el rendimiento (Fig. 4).

**Comparación de los modelos Cuadrático-plateau y Esférico**

Los dos modelos estudiados ajustaron consistentemente la relación entre rendimiento y dosis de fertilizan-

te N aplicado en cada SA, con valores de r<sup>2</sup> superiores al 90% (datos no presentados). Esto sugiere que utilizar el coeficiente de determinación como criterio de selección para elegir el mejor modelo no es suficiente, tal como también observaron Cerrato & Blackmer (1990). En la Figura 1a y 1b, se observa la relación de los residuales con la variable independiente (i.e. dosis de N) para los modelos CPy Esf, respectivamente. No se observa ninguna tendencia de que alguno de los modelos sobre o sub estime el rendimiento,

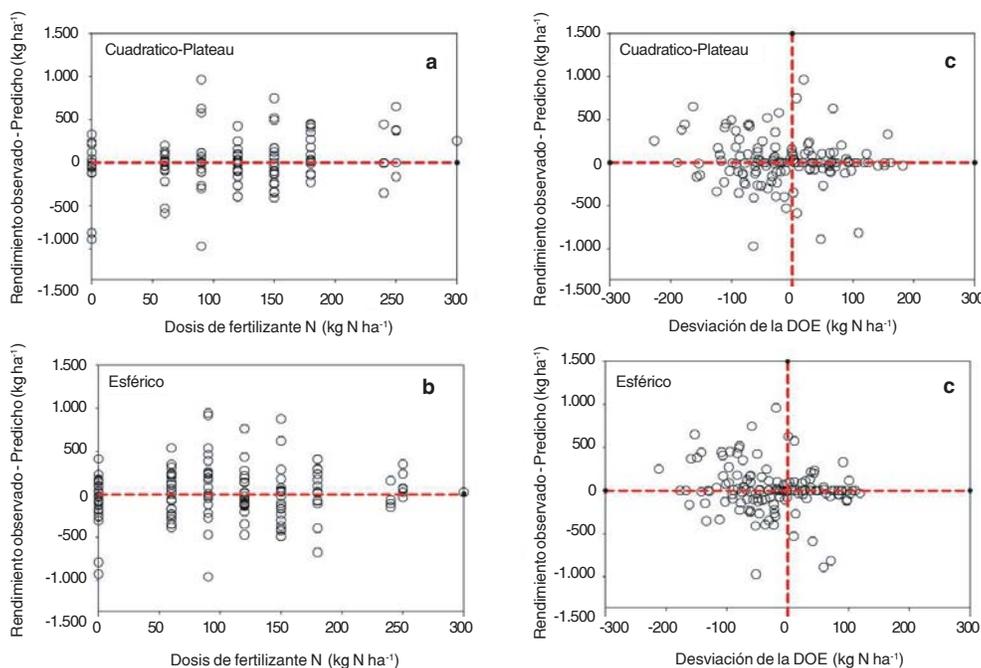


Figura 1. Valores residuales (rendimiento observado-rendimiento predicho) en función de la dosis de fertilizante nitrogenado aplicado en cada sitio-año (a y b). Los paneles c y d muestran los puntos de cada sitio-año posicionados en relación a la dosis óptima económica (DOE) con un relación grano maíz: precio N de 10:1 que están localizados en el centro de la Figura. Cada punto representa el promedio de cada tratamiento en cada sitio-año.

Figure 1. Residuals values (observed grain yield-predicted grain yield) in relation to N fertilizer rate for each individual site-year (Figures a and b). In Figures c and d, points from each site-year were positioned relative to the predicted economic optimum rates of fertilization (DOE) at a maize: fertilizer ratio of 10:1 which is located at the center of the Figure. Each point represents a treatment mean for a site-year

ya que la dispersión de los datos alrededor de 0 (línea horizontal) fueron similares. Sin embargo, se puede observar que a dosis altas de fertilizante nitrogenado (*i.e.* por encima de 200 kg N ha<sup>-1</sup>) el modelo CP tiende a subestimar los rendimientos (observado > predicho). Esto podría estar explicado por la naturaleza del modelo, que por encima de un nivel crítico no estimara cambios en el rendimiento del cultivo.

En la Figura 1c y d se muestra la dispersión de los residuales del rendimiento en función de la desviación de la dosis de N estudiadas en cada sitio-año en relación a la DOE de cada uno de ellos (Cerrato & Blackmer, 1990). Un modelo tendrá mayor precisión para estimar la DOE cuando los valores residuales de rendimiento disminuyan en la medida que el eje x tiende a 0 (*i.e.* la dosis de N se aproxima a la DOE). La distribución de puntos en la Figura 3 tampoco arrojó un resultado claro sobre la ventaja de la utilización

entre CP y Esf. En promedio, los valores de los residuales para desviaciones de la DOE más cercanos a 0 fue de 533 kg ha<sup>-1</sup> para el modelo Esf, siendo levemente superior para el modelo CP (746 kg ha<sup>-1</sup>), indicando que CP mostraría más variaciones en estimar el rendimiento en la DOE.

Los parámetros estimados, tanto en CP como en Esf, representan valores que tienen significancia biológica similares. Ambos modelos simularon con igual precisión el rendimiento del cultivo sin fertilización ( $RO_{CP}$  y  $RO_{Esf}$  para CP y Esf, respectivamente, Figura 2a). De la misma manera, el incremento en el rendimiento en la dosis más alta estimada con el parámetro D en el modelo Esf y calculada con los parámetros b y c del modelo CP (*i.e.*  $b_{CP} * N_{critCP} + c * N_{critCP}^2$ ) también mostraron resultados similares (Fig. 2b). El valor del parámetro D osciló entre 1.196 y 6.601 kg ha<sup>-1</sup>, mientras que en el modelo CP el resultado estuvo en un rango de 1.102 y 6.317 kg ha<sup>-1</sup>. Las mayores diferencias

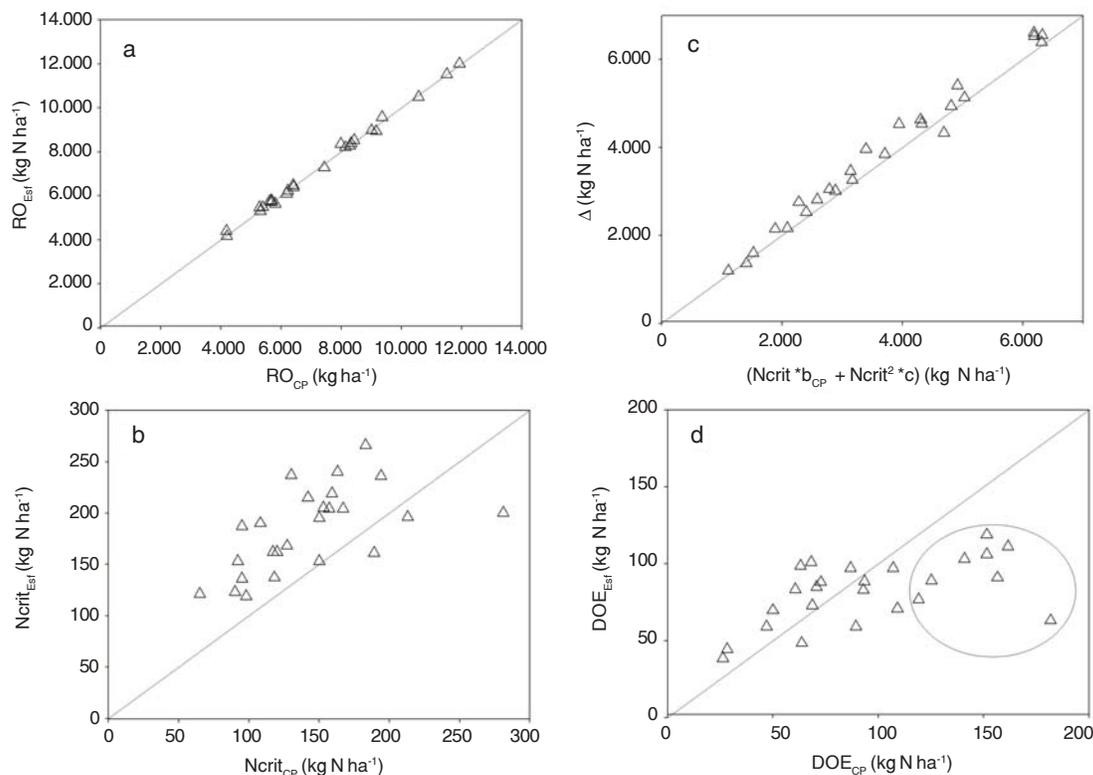


Figura 2. Relaciones entre los parámetros con la misma significancia biológica estimados por los modelos cuadrático-plateau y esférico. Los parámetros representan: a) Rendimiento del cultivo sin fertilización N, b) Dosis de N crítica por encima de la cual no aumenta el rendimiento; c) Incremento del rendimiento en la dosis de N más alta y d) Dosis óptima económica estimada con un relación grano maíz: precio N de 10:1. Los puntos marcados con un círculo en la Figura 4d son aquellos en los que el modelo CP no pudo representar los incrementos decrecientes.

Figure 2. Relationship between parameters with similar biological meaning estimated from the quadratic-plateau and spherical models. The parameters represent: a) Grain yield without N fertilization, b) Critical N rate above which a ceiling in grain yield is observed, c) Grain yield increment at the greatest N rate and d) Predicted economic optimum rates of fertilization (DOE) at a maize: fertilizer ratio of 10:1. Data points highlighted with a circle in Figure 4d are those that could not represent decreasing increments with the CP model.

entre modelos se observaron al comparar el parámetro que indica el nivel crítico de N por encima del cual no hay incrementos en el rendimiento ( $N_{critCP}$  y  $N_{critEsf}$ ) ya que el modelo esférico mostró valores superiores a los estimados por el modelo CP (Fig. 2c). El rango de  $N_{crit}$  para el modelo CP osciló entre 65 y 281 kg N ha<sup>-1</sup>, mientras que el rango fue menor para Esf, entre 119 y 266 kg N ha<sup>-1</sup>. En consecuencia, cuando se evalúa una dosis de N cercana al  $N_{critCP}$  con el modelo Esf, los rendimientos se seguirían incrementando. Es decir que el modelo Esf sería capaz de capturar pequeños incrementos en el rendimiento cuando las dosis de N estén entre  $N_{critCP}$  y  $N_{critEsf}$ . Este aspecto tendrá mayor impacto cuando se estimen DOE con relaciones favorables entre el precio del grano y el precio del N (i.e. bajos costos de N o altos ingresos por el precio del grano) ya que la DOE tendera a ser similar a  $N_{crit}$ . Sin embargo, en condiciones normales de manejo del cultivo de maíz y utilizando relaciones de precio históricas estas situaciones ocurrirán con menor probabilidad. El modelo CP tuvo dificultades para estimar una curva que simulara incrementos decrecientes en 7 de 25 SA, ya que el parámetro c mostró valores positivos (datos no presentados). Es decir que cuando el modelo estimó el parámetro  $N_{critCP}$  en estos SA, la curva de respuesta cuadrática todavía no había empezado a declinar (fase lineal de la función). En consecuencia, el uso de CP en estos SA no podría utilizarse para la estimación de la DOE, ya que no se puede capturar la disminución de la EUN cuando la dosis de N aumenta, i.e. la DOE siempre será igual a  $N_{critCP}$

como ocurre con el modelo lineal-plateau, lo cual no es agronómicamente correcto. En la Figura 2d, se muestra que en estos SA las DOE estimadas con CP fueron superiores a las estimadas por el modelo Esf. Estas limitaciones mostradas por el modelo CP en determinados SA puede diluirse si el modelo se ajusta a un set de datos que incluyan un conjunto de experimentos, como se observa en la Figura 5.

**Umbrales de respuesta a la fertilización con N, EUN y DOE**

Aquellos SA que tuvieron un índice ambiental más grande mostraron en conjunto un UCNds mayor. En BR el UCNds fue de 137 kg N ha<sup>-1</sup>. En cambio en AR, este umbral se incrementó significativamente en un 18%, alcanzando un valor de 161 kg N ha<sup>-1</sup> (Fig. 3). Estos resultados confirman observaciones realizadas en otras redes de ensayos de fertilización nitrogenada, como las informadas por Ruiz *et al.* (2001), que determinaron un umbral de respuesta de 148 kg N ha<sup>-1</sup> en una red de ensayos en el N de Buenos Aires pero observando variabilidad en la respuesta por la condición de sitio. En el O de la provincia de Entre Ríos, Mistrorigo & Valentinuz (2004) establecieron umbrales de 81 kg N ha<sup>-1</sup> para rendimientos menores a 9.000 kg ha<sup>-1</sup>, llegando hasta 137 kg N ha<sup>-1</sup> en cultivos de maíz de hasta 12.000 kg ha<sup>-1</sup>, aunque midiendo nitratos sólo en los 20 cm de profundidad. En el SE de Buenos Aires, en sitios con

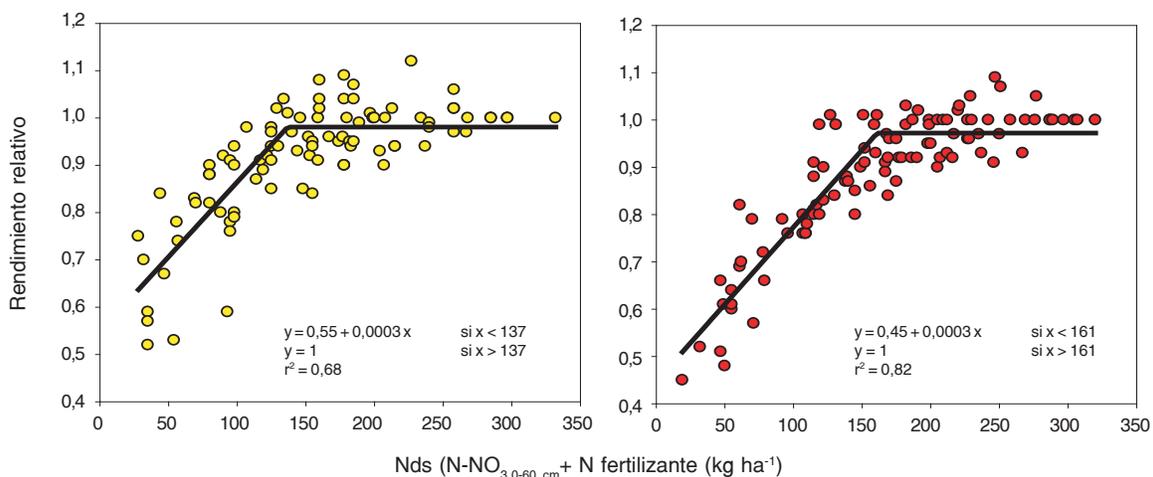


Figura 3. Relación entre el nitrógeno disponible a la siembra (Nds) hasta los 60 cm de profundidad (N-NO<sub>3</sub> + N fertilizante) y el rendimiento relativo en maíz, en ambientes con rendimientos máximos inferiores (izquierda) y superiores a los 9.520 kg ha<sup>-1</sup> (derecha).

Figure 3. Relationship between available N at planting (Nds) to a 60 cm depth (N-NO<sub>3</sub> + Fertilizer N) and relative maize grain yield for experiments that yielded below (left panel) and above (right panel) 9,520 kg ha<sup>-1</sup>.

menor potencial de rendimiento, García *et al.* (1998) habían detectado un umbral de 135 kg N ha<sup>-1</sup>. Estudios más recientes en esta región con rendimientos mayores (*i.e.* hasta ca. 12.000 kg ha<sup>-1</sup>), el umbral de respuesta observado estuvo alrededor de los 150 kg N ha<sup>-1</sup> (Pagani *et al.*, 2008). En el presente trabajo, el umbral de 161 kg N ha<sup>-1</sup>, ligeramente superior a los umbrales descriptos, ha sido ajustado con ambientes que llegaron a una producción máxima de ca. 16.000 kg ha<sup>-1</sup> (Tabla 3).

Álvarez (2008) plantea los inconvenientes de utilizar RR como variable regresora, ya que se estarían violando algunos supuestos del análisis de regresión (normalidad, homogeneidad de varianzas). La forma en que fue calculado el RR en el presente trabajo (haciendo la relación con el rendimiento de la mayor dosis de N y no con el mayor rendimiento observado en cada ensayo) permitió tener una distribución más homogénea de los residuales (Fig. 4), y evitar que alguno de los supuestos del análisis de regresión sea violado. Por otra parte, tal como señala Cottingham *et al.* (2005), una ligera desviación en la normalidad de la distribución de la variable no sería significativo, a menos que los errores tengan una distribución muy sesgada, situación que no ocurre con los datos del presente trabajo.

En base a estos resultados, es esperable diferentes DOE según el potencial de producción del cultivo de maíz. En la Figura 5 se pueden observar los ajustes por modelos CP y Esf para AR y BR de la relación entre rendimiento y Nds, incluyendo todos los ensayos de la red. En AR, el parámetro

D fue 7.560 kg ha<sup>-1</sup>, un 89% superior al observado para BR, mostrando el efecto del potencial de producción del cultivo (cuantificado por medio del índice ambiental). El mismo parámetro calculado para el modelo CP (utilizando los coeficientes  $b_{cp}$  y  $c$ ), mostró valores de 8.416 y 4.343 kg ha<sup>-1</sup> para AR y BR, respectivamente. Estos resultados confirman lo ya observado por Pagani *et al.* (2008), quienes también habían observado que el potencial de producción del cultivo tenía un fuerte impacto en la magnitud de la respuesta a la fertilización nitrogenada y en la DOE.

Dado que las comparaciones de los modelos CP y Esf realizadas en este trabajo no ofrecen evidencias que justifiquen inequívocamente la elección por uno de ellos, para los cálculos económicos se promedió la DOE estimada por ambos modelos, para de esta manera evitar errores asociados a la elección de un modelo en particular (Dobermann *et al.*, 2011).

En la Tabla 4 se pueden ver las DOE calculadas para diferentes relaciones de precio grano: N fertilizante y para dos  $Nds_{inic}$  (40 y 80 kg N ha<sup>-1</sup>). Utilizando una relación de precios 10:1, la DOE en AR fue de 99 y 78 kg N ha<sup>-1</sup> para  $Nds_{inic}$  de 40 y 80 kg N ha<sup>-1</sup>, respectivamente, mientras que osciló entre 71 y 49 kg N ha<sup>-1</sup> en BR, para las mismas  $Nds_{inic}$ . Para esta relación de precios,  $R_{DOE}$  representó ca. 83 y 88% del rendimiento máximo para  $Nds_{inic}$  de 40 y 80 kg N ha<sup>-1</sup>, respectivamente. Esta brecha fue disminuyendo en la medida que la relación de precios fue más favorable (*e.g.* 5:1). Al cambiar la relación de precios a situaciones más desfa-

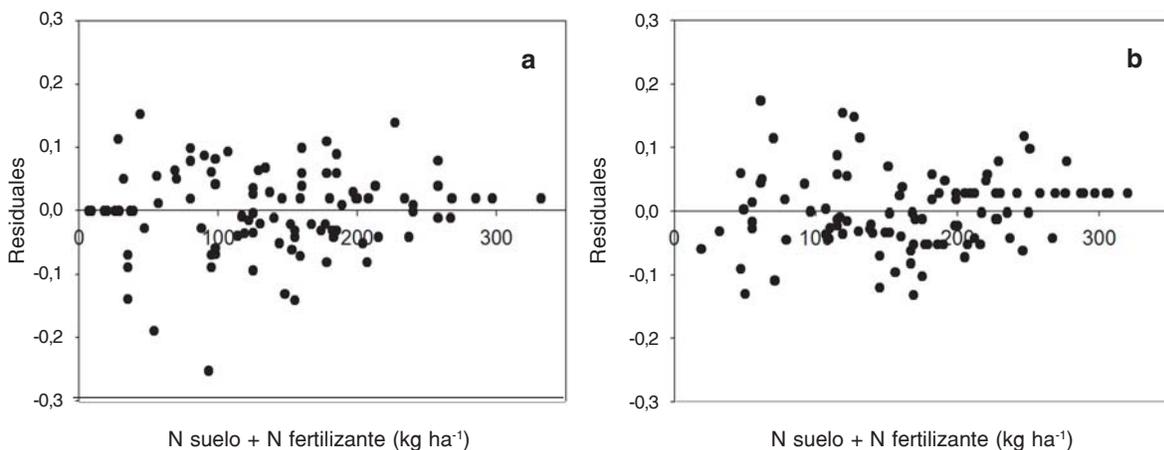


Figura 4. Distribución de los residuales de los ajustes del rendimiento relativo y nitrógeno disponible a la siembra ( $Nds$ ) hasta los 60 cm de profundidad ( $N-NO_3 + N$  fertilizante) para ensayos cuyo índice ambiental fue menor (a) y mayor (b) a 9.520 kg ha<sup>-1</sup>.

Figure 4. Residual distribution of the fit between relative yield and available N at planting ( $Nds$ ) to a 60 cm depth ( $N-NO_3 + Fertilizer N$ ) for experiments that presented an environmental index below (a) or above (b) 9,520 kg ha<sup>-1</sup>.

vorables (i.e. pasa de relación 10:1 a 20:1), la DOE disminuyó, pero con diferente magnitud según el ambiente. Así en AR, este cambio en la relación de precios provocó una disminución de la DOE en un 23 y 28% para  $Nds_{inic}$  de 40 y 80 kg N ha<sup>-1</sup>, mientras que en BR la disminución fue de alrededor del 52 y 71%, para las mismas  $Nds_{inic}$ , respectivamente. La DOE para la relación de precios 10:1 fue un 13 y 19% más baja que el UCNds estimado para AR y BR, respectivamente. La diferencia entre la DOE y UCNds disminuyó a un 8 y 7% cuando la relación de precios fue 5:1, para AR y BR, respectivamente (Tabla 4).

Teniendo en cuenta la naturaleza curvilínea de los modelos estudiados, la respuesta a la fertilización dentro de AR y BR, y en consecuencia la eficiencia de uso del N del fertilizante fue distinta de acuerdo a la  $Nds_{inic}$ . En AR, para  $Nds_{inic}$  de 40 y 80 kg N ha<sup>-1</sup>, los modelos estimaron un rendimiento de 6.745 y 8.475 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente. El incremento en el rendimiento hasta la DOE para una relación de precios 10:1, fue respectivamente de 3.891 y 2.675 kg ha<sup>-1</sup>. En BR la respuesta fue más baja, 1.697 y 1.011 kg ha<sup>-1</sup> para las mismas  $Nds_{inic}$ . En consecuencia, las mayores  $EA_{DOE}$  se observaron cuando se combinaron baja disponibilidad de N a la siembra y alto potencial de rendimiento. Cuando  $Nds_{inic}$  fue de 40 kg N ha<sup>-1</sup>, en AR se

observaron incrementos en la  $EA_{DOE}$  de 75 a 125% respecto de BR, incrementándose la brecha en la medida que la relación de precios era más desfavorable. Cuando  $Nds_{inic}$  se duplicó, las diferencias en  $EA_{DOE}$  entre AR y BR fueron mayores, hasta 3 veces en la relación de precios más desfavorable (Tabla 4). Los valores de  $EA_{DOE}$  en AR y BR se encuentran por encima y debajo de la media del meta-análisis realizado por Ladha *et al.* (2005). Wortmann *et al.* (2011) observaron valores de  $EA_{DOE}$  entre 29 y 30 kg grano por kg de N aplicado, similares a los valores observados en este trabajo para AR (Tabla 4). En línea con estos autores, también se observaron los valores más bajos de  $EA_{DOE}$  cuando la respuesta a la fertilización nitrogenada fue de menor magnitud (i.e. BR y  $Nds_{inic}$  = 80). Para la relación de precios 10:1, el PPF<sub>DOE</sub> que indica el rendimiento en relación al total de N aplicado tuvo valores de 107 y 143 kg grano por kg de N aplicado en AR para  $Nds_{inic}$  de 40 y 80 kg de N ha<sup>-1</sup>, respectivamente. EN BR los valores disminuyeron un 9 y 5% para las mismas  $Nds_{inic}$ , respectivamente. Es decir que hubo mayores diferencias en PPF<sub>DOE</sub> por modificaciones en la disponibilidad de N que por el potencial de producción. Wortmann *et al.* (2011) utilizando una relación de precios 7:1, encontró valores de PPF<sub>DOE</sub> entre 117 y 131 kg grano por kg de fertilizante, cuando el cultivo antecesor

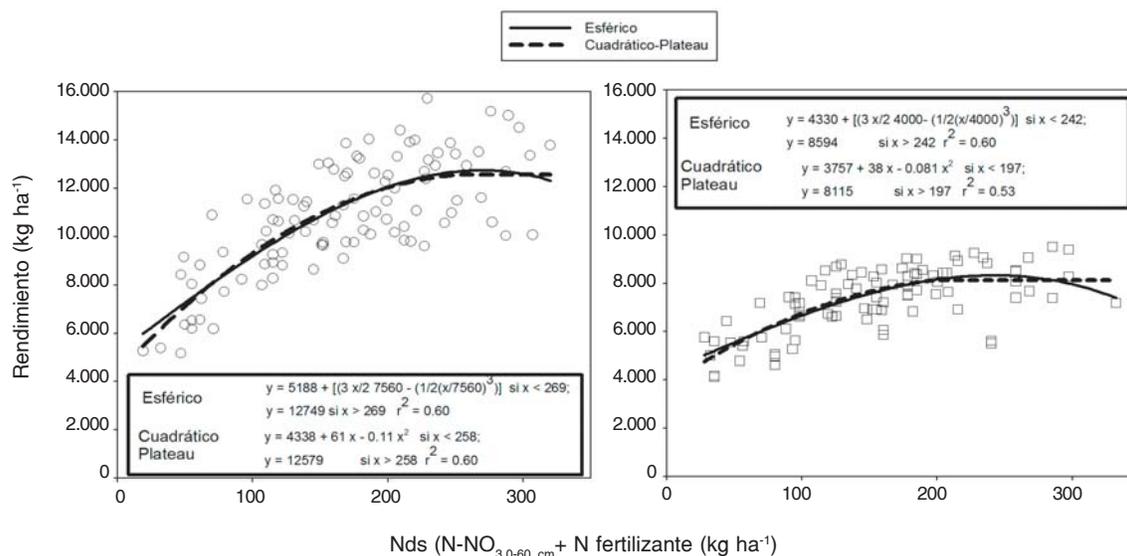


Figura 5. Relación entre el nitrógeno disponible a la siembra ( $Nds$ ) hasta los 60 cm de profundidad ( $N-NO_3 + N$  fertilizante) y el rendimiento en maíz, en ambientes con rendimientos máximos inferiores (BR) y superiores (AR) a los 9.600 kg ha<sup>-1</sup>. Las líneas son los ajustes del modelo esférico (Panel izquierdo) y cuadrático plateau (Panel derecho).

Figure 5. Relationship between available N at planting ( $Nds$ ) to a 60 cm depth ( $N-NO_3 + Fertilizer N$ ) and maize grain yield for experiments that yielded below (BR) and above (AR) 9,600 kg ha<sup>-1</sup>. Lines represent the fit of the spherical (Right panel) and quadratic plateau (Left panel) models.

Tabla 4. Dosis óptima económica (DOE, kg N ha<sup>-1</sup>), Rendimiento con la DOE (R<sub>DOE</sub>, kg ha<sup>-1</sup>), Eficiencia Agronómica en la DOE (EA<sub>DOE</sub>, D kg grano kg N fertilizante<sup>-1</sup>) y productividad parcial del factor en la DOE (PPF<sub>DOE</sub>, kg grano kg N fertilizante<sup>-1</sup>).

Table 4. Economic optimal N rate (DOE, kg N ha<sup>-1</sup>), Grain yield at DOE (R<sub>DOE</sub>, kg ha<sup>-1</sup>), Agronomic Efficiency at DOE (EA<sub>DOE</sub>, D kg grain kg fertilizer N<sup>-1</sup>) and partial factor productivity at DOE (PPF<sub>DOE</sub>, kg grain kg fertilizer N<sup>-1</sup>).

		Relación \$ Nitrógeno : \$ Grano Maíz											
Nds <sub>inic</sub>		5:1				10:1				20:1			
(kg N ha <sup>-1</sup> )		DOE	R <sub>DOE</sub>	EA <sub>DOE</sub>	PPF <sub>DOE</sub>	DOE	R <sub>DOE</sub>	EA <sub>DOE</sub>	PPF <sub>DOE</sub>	DOE	R <sub>DOE</sub>	EA <sub>DOE</sub>	PPF <sub>DOE</sub>
40	AR	110	10.902	28	99	99	10.636	28	107	78	9.955	27	128
80		88	11.455	18	130	78	11.150	17	143	56	10.451	15	187
40	BR	88	7.281	16	83	71	6.938	15	98	35	6.123	12	175
80		67	7.578	9	113	49	7.281	8	149	14	6.618	4	473

a maíz fue soja o poroto. Estimaciones realizadas a nivel nacional de la PPF (García & Salvagiotti, 2009) mostraron que los valores inferiores a los observados en el presente estudio (87 kg grano por kg N aplicado), indicando que la PPF a nivel nacional puede ser mejorada.

Los RN promedio para AR y BR para las dos Nds<sub>inic</sub> analizadas se muestran en la Figura 6. Para una disponibilidad inicial de 40 kg N ha<sup>-1</sup> y tomando una relación de precios 10:1, el máximo retorno en AR fue de 140 U\$S ha<sup>-1</sup> aplicando 99 kg N ha<sup>-1</sup> como fertilizante (*i.e.* Nds=139 kg

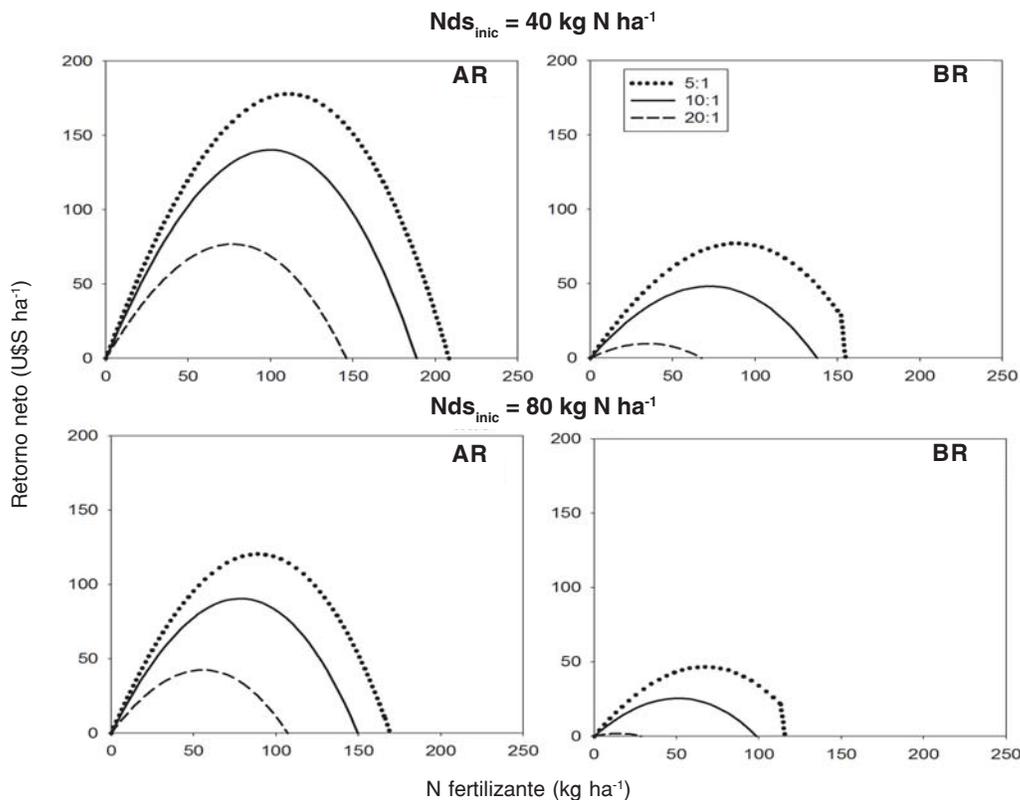


Figura 6. Retorno neto de la fertilización nitrogenada en maíz en función de la dosis de N aplicada para tres relaciones de precio nitrógeno: maíz en ambientes con rendimientos máximos inferiores (BR) y superiores (AR) a los 9,520 kg ha<sup>-1</sup> y dos escenarios de disponibilidad de N a la siembra.  
Figure 6. Net return to N fertilization in maize in relation to N fertilizer rate for three maize: nitrogen ratio in environments that yielded below (BR) and above (AR) 9,520 kg ha<sup>-1</sup> and two scenarios of N availability at planting.

N ha<sup>-1</sup>), mientras que en BR el máximo retorno para la misma relación de precios fue 2.9 veces menor (48 U\$S ha<sup>-1</sup>), aplicando 71 kg N ha<sup>-1</sup>. Ante una mayor disponibilidad de N a la siembra, el RN disminuyó a 90 y 25 U\$S ha<sup>-1</sup> en AR y BR, respectivamente.

## CONCLUSIONES

El modelo esférico tuvo una mejor performance para representar la curva de incrementos decrecientes en cada sitio-año en particular, sin embargo los dos modelos tuvieron un comportamiento similar en estimar la respuesta a la fertilización nitrogenada al analizar la red en conjunto.

El umbral de respuesta a la fertilización nitrogenada y la eficiencia en el uso del N fue mayor cuando se incrementó potencial de rendimiento del cultivo. En consecuencia, para definir la dosis de N a aplicar y hacer un manejo más eficiente del fertilizante es necesario establecer la capacidad de producción real de cada ambiente, incluyendo no sólo la capacidad del suelo de brindar N, sino también las características de cada ambiente de alcanzar un determinado rendimiento, tanto desde el punto de vista climático (precipitaciones, radiación, temperaturas) como de manejo del cultivo que determina la capacidad del mismo de capturar los recursos ambientales (densidad, fecha de siembra, elección del cultivar). La mayor eficiencia en el uso del nitrógeno y las DOE se observaron en condiciones de alta producción, por lo que el manejo del cultivo para altos rendimientos tendrá como correlato una mayor eficiencia en el uso del fertilizante nitrogenado.

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a los Ings. Agrs. Gabriel Prieto, Fernando Martínez, Guillermo Gerster, Silvina Bacigaluppo, José María Méndez, Julia Capurro, Néstor Trentino, Juan Carlos Felizzia, y Damián Dignani por su colaboración en la elección de los sitios en donde se implantaron los ensayos. Este trabajo fue financiado por INTA.

## BIBLIOGRAFÍA

Álvarez, R. 2008. Problemas en el uso del rendimiento relativo como variable respuesta de redes experimentales de fertilización. Actas XXI Congreso Argentino Ciencia del Suelo. San Luis. Argentina.

Álvarez, R; F Gutiérrez Boem & G Rubio. 2005. Recomendación de fertilización. En: Álvarez, R. (eds.) Fertilización de cultivos de granos y pasturas. Diagnóstico y recomendación en la región pampeana Editorial Facultad de Agronomía Pp 37-54.

Bray, RH & LT Kurtz. 1945. Determination of total, organic, and available forms of phosphorus in soils. *Soil Science* 59:39-45.

Bremner, JM. 1965. Inorganic forms of nitrogen. In: CA Black (ed.) Methods of soil analysis. Part 2: Chemical and Microbiological properties. Pp 1179-1232. ASA. Madison-Wisconsin-USA.

Bullock, DG & DS Bullock. 1994. Quadratic and quadratic-plus-plateau models for predicting optimal nitrogen rate of corn: a comparison. *Agronomy Journal* 86(1): 191-195.

Calviño, PA; H Echeverría & M Redolatti. 2002. Diagnóstico de nitrógeno en trigo con antecesor soja bajo siembra directa en el Sudeste bonaerense. *Ciencia del Suelo* 20(1): 36-42.

Cassman, KG. 1999. Ecological Intensification of Cereal Production Systems: Yield Potential, Soil Quality, and Precision Agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 96: 5952-5959.

Cassman, KG; A Dobermann; PCS Cruz; GC Gines; MI Samson; JP Descalzo; JM Alcantara; MA Dizon & DC Olk. 1996. Soil organic matter and the indigenous nitrogen supply of intensive irrigated rice systems in the tropics. *Plant and Soil* 182: 267-278.

Cassman, KG; A Dobermann & DT Walters. 2002. Agro-ecosystems, nitrogen-use efficiency, and nitrogen management. *Ambio* 31:132-140.

Cerrato, ME & AM Blackmer. 1990. Comparison of models for describing corn yield response to nitrogen fertilizer. *Agronomy Journal* 82(1): 138-143.

Cirilo, A. 2004. Fecha de siembra y Rendimiento en Maíz. IDIA XXI 6:122-127.

de Wit, CT. 1992. Resource use efficiency in agriculture. *Agricultural Systems* 40: 125-151.

Díaz Zorita, M & DE Buschiazzi. 2006. The potential for soil carbon sequestration in the Pampas. In: R Lal, CC Cerri, M Bernoux, J Etchevers & E Cerri (eds.) Carbon sequestration in soils of Latin America. Pp 369-382

Dobermann, A; CS Wortmann; RB Ferguson; GW Hergert; C Shapiro; DD Tarkalson & DT Walters. 2011. Nitrogen Response and Economics for Irrigated Corn in Nebraska. *Agronomy Journal* 103(1): 67-75.

Duvick, DN & KG Cassman. 1999. Post-Green Revolution Trends in Yield Potential of Temperate Maize in the North-Central United States. *Crop Science* 39: 1622-1630.

García, F & K Fabrizzi. 1998. Fertilización de trigo y maíz bajo siembra directa en el sudeste de Buenos Aires. *Boletín Técnico-Estación Experimental Agropecuaria, Balcarce* 150: 1-12.

García, F & F Salvaggiotti. 2009. Eficiencia de uso de nutrientes en sistemas agrícolas del Cono Sur de Latinoamérica. En: Espinosa, J. & García, F. (eds.) Uso eficiente de nutrientes. IPNI. Pp 37-48

González Montaner, JH; GA Maddonni; N Mailland & M Posbog. 1991. Optimización de la respuesta a la fertilización nitrogenada en el cultivo de trigo a partir de un modelo de decisión para la subregión IV (Sudeste de la provincia de Buenos Aires). *Ciencia del Suelo* 9: 41-51.

- Hildebrand, PE & JT Russell. 1996. Adaptability Analysis. A Method for the Design, Analysis and Interpretation of On-Farm Research-Extension. 189 pp.
- Ladha, JK; H Pathak; J Krupnik; J Six & C van Kessel. 2005. Efficiency of Fertilizer Nitrogen in Cereal Production: Retrospects and Prospects. *In: DL Sparks (ed.) Advances in Agronomy*. Pp 85-156. Academic Press
- Makowski, D; H Hillier; D Wallach; B Andrieu & MH Jeuffroy. 2006. Parameter estimation for crop models. *In: D Wallach, D Makowski, & JW Jones (eds.) Working with Dynamic Crop Models Evaluation, Analysis, Parameterization, and Applications*. Pp 101-150. Elsevier
- Melchiori, R & O Paparotti. 1996. Fertilización nitrogenada en maíz: Uso del método del balance. Serie Extensión 11. INTA Parana.
- MinAgri. 2010. Estimaciones agrícolas. Ministerio de Agricultura Ganadería y Pesca de la Nación [www.minagri.gob.ar](http://www.minagri.gob.ar)
- Mistrorigo, D & O Valentinuz. 2004. Fertilización de maíz en siembra directa en suelos Molisoles y Vertisoles del oeste de Entre Ríos. *Revista Científica Agropecuaria - Facultad Ciencia Agropecuarias - UNER* 8: 99-107.
- Nelson, LA; RD Voss; & J Pesek. 1985. Agronomic and statistical evaluation of fertilizer response. *In: OP Engelstad (ed.) Fertilizer technology and use*. Pp 53-90. ASA. Madison – Wisconsin – USA.
- 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(2): 179-188.
- Reed, JF & RW Cummings. 1945. Soil reaction-glass electrode and colorimetric methods for determining ph values of soils. *Soil Science* 59: 97-105.
- Robertson, GP & PM Vitousek. 2009. Nitrogen in Agriculture: Balancing the Cost of an Essential Resource. *Annual Review of Environment and Resources* 34: 97-125.
- Ruiz, RA; EH Satorre; GA Maddonni; J Carcova & ME Otegui. 2001. Umbrales de decisión para la fertilización nitrogenada en maíz. Actas VII Congreso Nacional de Maíz.
- Salvagiotti, F; JM Castellarín; HM Pedrol & O Rosso. 2000. La mineralización neta de nitrógeno durante el ciclo del cultivo de trigo y su uso en el balance de nitrógeno. Actas XVIII Congreso Argentino Ciencia del Suelo.
- Sinclair, TR & T Horie. 1989. Leaf nitrogen, photosynthesis, and crop radiation use efficiency: a review. *Crop Science* 29: 90-98.
- Tollenaar, M & EA Lee. 2002. Yield potential, yield stability and stress tolerance in maize. *Field Crops Research* 75: 161-169.
- Walkley, A & IA Black. 1934. An examination of Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science* 37: 29-37.
- Wilhelm, WW & C Wortmann. 2004. Tillage and Rotation Interactions for Corn and Soybean Grain Yield as Affected by Precipitation and Air Temperature. *Agronomy Journal* 96: 425-432.
- Wortmann, C; DD Tarkalson; CA Shapiro; AR Dobermann; RB Ferguson; GW Hergert & D Walters. 2011. Nitrogen Use Efficiency of Irrigated Corn for Three Cropping Systems in Nebraska. *Agron J* 103: 76-84.