

# MODELO REGIONAL DE RESPUESTA DE MAÍZ AL NITRÓGENO CON VARIABLES SITIO-ESPECÍFICAS EN AMBIENTES SEMIÁRIDOS

Maria C. Gregoret<sup>1</sup>, Martín Díaz Zorita<sup>3</sup>, Julio Dardanelli<sup>2</sup>, y Rodolfo Bongiovanni<sup>1,2</sup>  
 (1) Proyecto PICTO 12931, (2) INTA Manfredi, Córdoba, Argentina, (3) CONICET-FAUBA y  
 Merck Crop Bioscience Argentina.  
 cgregoret@yahoo.com

Resumen de la presentación realizada en el XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Potrero de los Funes, San Luis, Argentina. 13-16 de mayo de 2008.

## Introducción

La aplicación de fertilizantes nitrogenados en el cultivo de maíz es una práctica esencial de su manejo. Las estrategias de manejo sitio-específico (o manejo localizado), denominadas de "agricultura de precisión" (AgP), podrían ser una alternativa para lograr mejoras en la producción y rentabilidad de los sistemas agrícolas al ajustar las dosis de fertilizantes según el tipo de suelo y otras condiciones de ambiente definidas en "zonas de manejo" (ZM). La combinación de variabilidad temporal y espacial de los rendimientos dificulta la toma de decisión en cuanto a las dosis a aplicar, requiriéndose el desarrollo de herramientas de diagnóstico adaptadas para el manejo eficiente de la fertilización nitrogenada según ZM (Bianchini et al., 2004). Si bien abundan los estudios que han abordado la problemática planteada (Bongiovanni, 2002; Liu et al 2006; entre otros), hay pocas evidencias de haber logrado un modelo de respuesta sitio-específica regional para Haplustoles, donde la variabilidad de las diferentes ZM existentes sea explicada con variables sitio-específicas como nitrógeno (N) y agua disponible al inicio del cultivo (AUI). Esta información permitiría mejorar los criterios de diagnóstico de dosis variable de fertilización (DVF) con N en maíz al incorporar información de variables espaciales y temporales de diagnóstico y recomendación. El objetivo de este estudio fue ajustar un modelo zonal de respuesta sitio-específica que contemple la variabilidad de ZM según niveles de disponibilidad inicial de N y de agua, considerando observaciones de monitores de rendimiento y usando análisis estadístico espacial, para ambientes semiáridos de la región pampeana.

## Materiales y métodos

El estudio se desarrolló a partir de los resultados de rendimientos durante las campañas agrícolas 2004-2005 y 2005-2006, considerando niveles de fertilización nitrogenada en 4 lotes con suelos Haplustoles representativos de la región semiárida central de la provincia de Córdoba, Argentina. Dos de ellos se sembraron en la campaña 2004-05 ("UCC" en Manfredi y "El Rodeo" en Río Primero)

y los otros dos en la campaña 2005-06 (Estación Experimental Agropecuaria Manfredi del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria "EEA INTA" y "Los Cerrillos" en Alta Gracia).

En cada sitio experimental se identificaron ZM como distintos ambientes presentes en cada lote según el análisis de mapas de elevación digital, eligiéndose esta característica debido a que hay información previa sobre el comportamiento de variables edáficas y por productividad, que están influenciadas por el clima y la topografía (Moore et al., 1993; Vieira et al., 2006). Esta identificación se realizó según el programa "Management Zone Analyst" (Mizzou-ARS, 2000) que permite hacer una agrupación difusa no supervisada de la información. "No supervisada" porque no requiere conocimientos previos de las variables a clasificar sino que produce las agrupaciones naturales de los datos y "difusa" porque permite que los datos que se están clasificando pertenezcan a distintos grupos. Como resultado de este análisis, en cada uno de los lotes, se definieron ambientes de alta productividad (AP) y de baja productividad (BP).

El diseño experimental consistió en 3 bloques completos aleatorizados, con los tratamientos de distintos niveles de fertilización de N dispuestos en franjas continuas atravesando las ZM identificadas en cada uno de los lotes. Los tratamientos incluyeron 6 niveles fijos de N: 0, 32, 64, 96, 129 y 161 kg N ha<sup>-1</sup>. Previo a la siembra, se tomaron muestras independientes de suelo en cada ZM determinándose el contenido de N de nitratos (N-NO<sub>3</sub>) hasta los 60 cm y el contenido de agua hasta los 200 cm de profundidad. Los datos fueron organizados en SStoolbox (SST, 2006) y para el análisis estadístico espacial de los resultados (Anselin, 1988), se utilizó el software "GeoDa" (Anselin, 2004). Este análisis fue dividido en 2 etapas: en la primera se evaluó si es posible integrar en una única función de respuesta a todos los sitios experimentales, estimando si la respuesta al N disponible (Nd), que presumimos va a ser distinta en las ZM en cada sitio experimental, será dependiente de su ubicación geográfica o si las ZM con diferentes productividades pueden alcanzar respuestas similares independientemente del sitio experimental en que se encuentren.

Este análisis se hizo según el siguiente modelo:

$$Y_{ij} = \alpha + \beta_1 Nd + \beta_2 Nd^2 + \gamma_1 AUI + \gamma_2 AUI^2 + \delta C + \phi Nd \times C + \kappa AUI \times C + \nu Nd \times AUI \times C + \varepsilon_{ij}$$

[1]

donde  $Y_{ij}$  es el rendimiento del maíz ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) por cada punto del monitor de rendimiento promediado,  $\alpha$ ,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ ,  $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$ ,  $\delta$ ,  $\phi$ ,  $\kappa$  y  $\nu$  son los parámetros de la ecuación de regresión,  $Nd$  es el N disponible al inicio (N del fertilizante + el  $\text{N-NO}_3$  del suelo hasta 60 cm de profundidad) ( $\text{kg ha}^{-1}$ ),  $\delta C$  es una variable "dummy" por sitio experimental (C1: "Los Cerrillos", C2: "UCC", C3: "EEA INTA" y C4: "El Rodeo"),  $\phi Nd \times C$  es la interacción del  $Nd$  con los sitios experimentales,  $\kappa AUI \times C$  es la interacción del AUI con los sitios experimentales,  $\nu Nd \times AUI \times C$  es la interacción triple entre las variables regresoras y las dummies por cada sitio experimental y  $\varepsilon_{ij}$  es el término de error de la regresión por cada ubicación.

Tabla 1. Coeficientes estimados de la respuesta al N disponible al inicio (N del fertilizante + el  $\text{N-NO}_3$  del suelo hasta 60 cm de profundidad) y el agua útil al inicio hasta 200 cm de profundidad con variables "dummies" para cada sitio experimental para todas las zonas de manejo en cultivos de maíz de secano en Córdoba (Argentina) durante las campañas 2004-05 y 2005-06. \*\*\*, \*\*, \* y †: representan significancia a 0.001, 0.01, 0.1 y 0.15 nivel de probabilidad, respectivamente.

Parámetros	Coefficiente
Constante	8.417,65 NS
Nd	33,93 ***
Nd <sup>2</sup>	-0,07 ***
AUI	-25,43 NS
AUI <sup>2</sup>	0,06 NS
C1 (Los Cerrillos)	1.584,30 NS
C2 (UCC)	-4.482,31 NS
C3 (EEA INTA)	10.934,40 NS
C4 (El Rodeo)	-8036,48
Nd x C1	-19,65 ***
Nd x C2	0,64 NS
Nd x C3	10,51
Nd x C4	8,49
Nd <sup>2</sup> x C1	0,05 ***
Nd <sup>2</sup> x C2	-0,05 ***
Nd <sup>2</sup> x C3	0,04 ***
Nd <sup>2</sup> x C4	0,04
AUI x C1	-23,65 NS
AUI x C2	83,02 NS
AUI x C3	-122,20 NS
AUI x C4	62,83
AUI <sup>2</sup> x C1	0,07 NS
AUI <sup>2</sup> x C2	-0,42 NS
AUI <sup>2</sup> x C3	0,47 NS
AUI <sup>2</sup> x C4	-0,10
Nd x AUI x C1	0,01 NS
Nd x AUI x C2	0,10 ***
Nd x AUI x C3	-0,18 ***
Nd x AUI x C4	0,06
$\lambda$ (Lambda)	0,57 ***
R <sup>2</sup> Ajustado	0,69

Para poder comparar el efecto de los diferentes sitios experimentales (C) y de los términos de la interacción con la media de los C, se impuso la restricción que la sumatoria de las variables "dummy" sea igual a cero (Bongiovanni, 2002). Si los coeficientes individuales de las respuestas por sitios experimentales no son significativamente diferentes, sería factible la segunda etapa, que consiste en el diseño de un modelo unificado de respuesta para la región a partir de las variables sitio-específicas:

$$Y_i = \alpha + \beta_1 N_d + \beta_2 N_d^2 + \gamma_1 AUI + \gamma_2 AUI^2 + \delta N \times AUI + \varepsilon$$

[2]

donde nuevamente  $N_d$  es N disponible al inicio (N del fertilizante + el  $\text{N-NO}_3$  del suelo a 60 cm de profundidad) y AUI es el agua útil al inicio a 200 cm de profundidad. En ambas etapas se utilizó el modelo de "error espacial" con una matriz de ponderadores espaciales "Queen" (estructura de 8 vecinos con bordes y esquinas en común).

## Resultados y discusión

Los coeficientes de la regresión ajustados según Ec. [1] muestran que la información disponible no es suficiente para describir efectos significativos asociados a las variables "dummies" y sus interacciones con las variables sitio-específicas (Tabla 1). Este comportamiento sugiere que las respuestas de los cultivos al  $Nd$  en cada una de las ZM no fueron diferentes entre sitios experimentales, o sea que tuvieron más influencia en el rendimiento las variables sitio-específicas que elegimos para caracterizar a cada ZM que el sitio experimental al que pertenecían. Por lo tanto, sería factible intentar el diseño de un modelo unificado de respuesta según Ec.[2] a partir de las variables sitio-específicas seleccionadas para diagnosticar la dosis de fertilizante a aplicar según ZM predeterminadas por su productividad esperable (Tabla 2).

A partir del modelo unificado descrito en la Tabla 2,

Tabla 2. Coeficientes estimados de la respuesta al N disponible al inicio (N del fertilizante + el  $\text{N-NO}_3$  del suelo hasta 60 cm de profundidad) y el agua útil al inicio hasta 200 cm de profundidad según la ecuación [2] para todos los sitios experimentales y todas las zonas de manejo (ZM), en cultivos de maíz en las campañas 2004-2005 y 2005-2006 (Córdoba, Argentina). \*\*\*, \*\*, \* y †: representan significancia a 0.001, 0.01, 0.1 y 0.15 nivel de probabilidad respectivamente.

Parámetros	Coefficientes
Constante	4.860 ***
Nd	39.69 ***
Nd <sup>2</sup>	-0.10 ***
AUI	16.18 ***
AUI <sup>2</sup>	-0.06 ***
Nd x AUI	0.01 ***
$\lambda$ (Lambda)	0.74 ***
R <sup>2</sup> Ajustado	0.63

se representaron las curvas de respuesta al Nd según el contenido de AUI de las ZM de cada sitio experimental y niveles de Nd hasta 60 cm de profundidad (Fig. 1). Bianchini et al. (2004), por medio de una relación cuadrática entre rendimientos y disponibilidad de N en el momento de la siembra de maíz en Córdoba (Argentina), si bien no diferenció entre ZM, describió similares niveles de disponibilidad de N a los observados en este estudio (Figs. 1a y 2b). En su estudio estimó una disponibilidad de 130 kg ha<sup>-1</sup> de N-NO<sub>3</sub> a 0-60 cm de profundidad a la siembra para alcanzar rendimientos de maíz de 10000 kg ha<sup>-1</sup>. Dada la interacción positiva entre Nd y AUI, la respuesta esperada en kg de maíz al primer kg de aumento en la disponibilidad de N tendió a ser mayor en las ZM de AP que en las de BP; 36,0 y 35,4 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente (Tabla 2). En general, las DOA y DOE no mostraron diferencias relevantes entre ZM (Figura 2).

Ruffo (2003), en un estudio en la región sur y central de Illinois (EUA), también describió similares resultados, reuniendo en un mismo modelo campos de dos localidades y utilizando diferentes variables sitio-específicas, algunas relacionadas con la topografía y otras con propiedades de los suelos tales como el índice de disponibilidad de N y las precipitaciones. A partir de la información disponible, se planteó el análisis estimado de la contribución aparente de dosificaciones variables de N según ZM con respecto a dosis de fertilización uniformes dentro de cada lote. Estas últimas se estimaron sin discriminar entre ZM, utilizando el promedio de la información de AUI y de Nd. En ambas estimaciones se consideraron los niveles del contenido de agua y de Nd hasta 200 cm y 60 cm de profundidad, respectivamente (Tabla 3). Al comparar las estrategias estimadas de fertilización variable o promedio y considerando a cada sitio experimental como una repetición, se observa que en promedio para las condiciones evaluadas, la información disponible no sería suficiente para determinar diferencias significativas en cuanto a las dosis de N de fertilizante (Nf) a aplicar para alcanzar máximos rendimientos, en los rendimientos máximos estimados o en la eficiencia de utilización del Nf (EUNf) (Tabla 4). Los resultados de rendimientos, DOA, Nf a aplicar o

EUNf no mostraron diferencias relevantes entre análisis promedios o ponderados según superficies de ZM entre lotes. Ruffo (2003) obtuvo resultados similares al estimar la cantidad de N a aplicar en dosis fija en comparación con aplicaciones de dosis variables a partir de calcular las DOE en Illinois (EUA).

## Conclusiones

Los rendimientos de maíz variaron según las ZM, siendo mayores al aumentar la disponibilidad de agua y de N a la siembra. Se ajustó un modelo cuadrático integral de respuesta incluyendo todas las ZM y lotes de producción evaluados en este estudio. La información disponible no fue suficiente para describir diferencias significativas en los niveles de DOA y DOE entre las ZM. Los resultados en rendimientos, DOA, Nf a aplicar o EUNf en estos sitios de la región semiárida del área centro de Córdoba muestran que la variabilidad entre ZM no fue suficiente para detectar diferencias significativas entre aplicaciones de dosis de fertilización nitrogenadas uniformes o variables según ZM. Por lo tanto, para alcanzar contribuciones significativas de prácticas de dosis variables de fertilización, sería necesario encontrar condiciones de heterogeneidad en términos de oferta inicial de Nd y de agua mayores a las descriptas en este

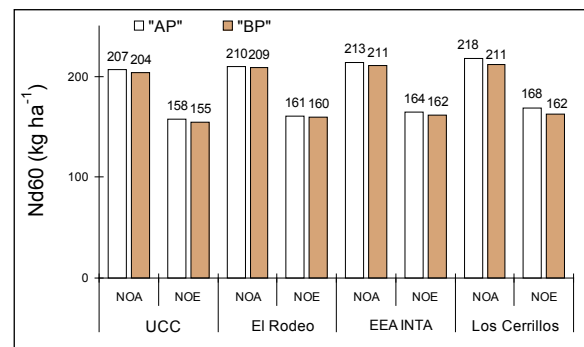


Figura 2. Disponibilidad óptima agronómica (DOA) y económica (DOE) de N (fertilizante + suelo) hasta los 60 cm de profundidad según zonas de manejo de baja productividad ("BP") y de alta productividad ("AP") de maíz en Córdoba (Argentina) en las campañas 2004-05 y 2005-06.

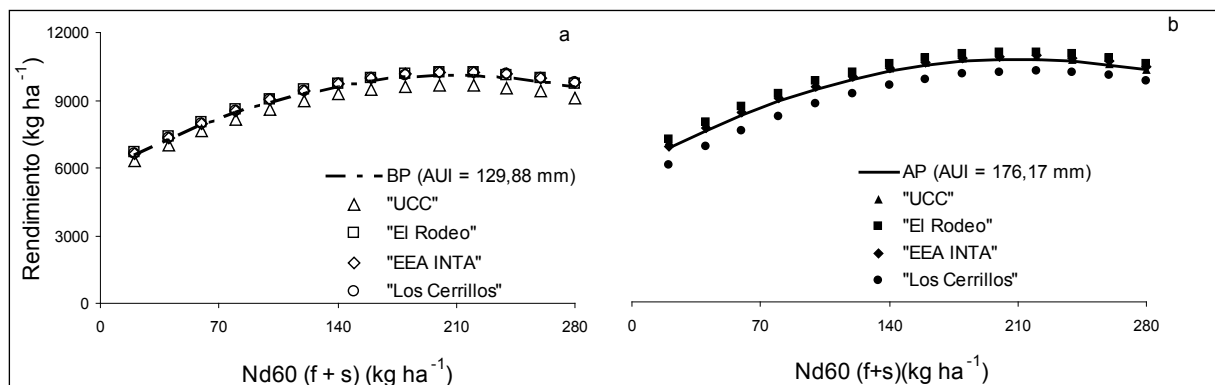


Figura 1. Rendimientos de maíz estimados según el N disponible (N del fertilizante + N-NO<sub>3</sub> del suelo hasta 60 cm de profundidad) y el agua útil al inicio hasta 200 cm de profundidad en la siembra según zonas de manejo (ZM) (a) de baja productividad ("BP") y (b) de alta productividad ("AP") en la campaña 2004-05 y 2005-06 en Córdoba (Argentina).

estudio, que podrían ser generadas bajo condiciones de mayor pendiente a las estudiadas.

## Agradecimientos

Esta investigación se realizó en el marco del proyecto PICTO 12.931 y de la tesis de maestría de la primer autora y fue posible en gran parte gracias al apoyo de profesionales del Proyecto Agricultura de Precisión del INTA.

## Bibliografía

**Anselin L.** 1988. Spatial Econometrics: Methods and Models. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. Netherlands.  
**Anselin L.** 2004. GeoDa, A software program for the analysis of spatial data, Version 0.9.5-i5 (Aug 3, 2004). Spatial analysis laboratory, Department of Agricultural and Consumer Economics, University of Illinois, Urbana-Champaign, Urbana, IL (EUA). Programa disponible en <https://geoda.uiuc.edu/>. Consultado el 23/08/2004.  
**Bianchini A., M.E. Magnelli D. Canova, S. Lorenzatti, D. Peruzzi, J. Rabasa, A. Begnis y F. García.** 2004. "Diagnóstico de fertilización nitrogenada para maíz en siembra

directa" Actas XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo (CD). Paraná, Argentina.

**Bongiovanni R.** 2002. A spatial econometrics approach to the economics of site-specific nitrogen management in corn production. *Ph.D. Thesis*, Department of Agricultural Economics, Purdue University, West Lafayette, IN (EUA), 280 p.

**Liu Y., S.M. Swinton y N.R. Millar.** 2006. Is site specific yield response consistent over time? Does it pay? *American Journal of Agricultural Economics* 88: 471-483.

**Moore I.D., P.E. Gessler, G.A. Nielsen y G.A. Peterson.** 1993. Terrain analysis for soil specific crop management. In P.C. Robert et al. (ed.) Soil specific crop management. A workshop on research and development issues. ASA, CSSA, SSSA, Madison, WI (EUA), p. 27-55.

**Ruffo M.** 2003. Development of site-specific production functions for variable rate corn nitrogen fertilization. *Ph.D. Thesis*. Dept. of Crop Sciences. University of Illinois at Urbana – Champaign, IL (USA), 121 pp.

**Vieira S.R., C.R. Grego, G.M. Siqueira, F.M. Miguel y F.A. Pavlu.** 2006. Variabilidad espacial del almacenamiento de agua del suelo bajo siembra directa. Actas del XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Salta (Argentina). p.178. ■

Tabla 3. Producción de maíz y eficiencia de utilización del N del fertilizante estimados en 4 sitios experimentales y sus zonas de manejo (ZM) con los promedios aritméticos del N disponible al inicio (N del fertilizante + el N-NO<sub>3</sub> del suelo hasta 60 cm y el agua útil al inicio hasta 200 cm de profundidad) para cada sitio experimental a partir del modelo unificado (ecuación [2]) en cultivos de maíz en las campañas 2004-2005 y 2005-2006 en la región central de Córdoba, Argentina.

Sitio experimentales		"UCC"		"El Rodeo"		"EEA INTA"		"Los Cerrillos"	
		"BP"	"AP"	"BP"	"AP"	"BP"	"AP"	"BP"	"AP"
Análisis ponderado por ZM	DOA (kg N ha <sup>-1</sup> )	204	207	209	210	211	213	211	218
	Ns a 60 cm (kg N ha <sup>-1</sup> )	21	26	30	43	88	63	61	57
	Nf a aplicar (kg N ha <sup>-1</sup> )	183	180	179	167	123	150	150	161
	Proporción ZMs (%)	56%	44%	21%	79%	51%	49%	41%	59%
	Nf a aplicar ponderado (kg N ha <sup>-1</sup> )	182		170		137		156	
	Rendimiento ponderado (kg ha <sup>-1</sup> )	9853		10246		10173		10157	
	EUNf (kg grano kg N <sup>-1</sup> )	18.1	17.9	17.7	16.6	12.2	14.9	14.9	15.9
EUNf pond. (kg grano kg N <sup>-1</sup> )	18.0		16.8		13.5		15.5		
Análisis promedio	DOA promedio (kg N ha <sup>-1</sup> )	205		210		212		214	
	Ns a 60 cm promedio (kg N ha <sup>-1</sup> )	24		37		76		59	
	Nf a aplicar promedio (kg N ha <sup>-1</sup> )	182		173		137		155	
	Rendimiento (kg ha <sup>-1</sup> )	9898		10245		10190		9721	
	EUNf (kg grano kg N <sup>-1</sup> )	18.0		17.1		13.6		15.4	

DOA: Disponibilidad óptima agronómica. DOA promedio: Disponibilidad óptima agronómica promedio aritmético de cada sitio experimental. Rendimiento ponderado: Producción lograda ponderada por la superficie de cada ZM con esa DOA. Rendimiento: Producción lograda con esa DOA promedio aritmético de cada sitio experimental. Ns a 60cm: N-NO<sub>3</sub> disponible hasta los 60 cm. Nf a aplicar ponderado: N a aplicar con fertilizante diferencia entre la DOA y el Ns ponderado por la superficie de cada ZM. Ns a 60 cm promedio: N-NO<sub>3</sub> disponible hasta los 60 cm promedio aritmético de cada sitio experimental. EUNf: Eficiencia de utilización del N del fertilizante [(Rendimiento con N DOA – Rendimiento con Ns)/Nf].

Tabla 4. Evaluación de la dosis de N de fertilizante a aplicar (Nf), el rendimiento alcanzado con la dosis óptima agronómica (Rto) y la eficiencia de utilización del N aplicado (EUNf) según estrategias de cálculo variables por ZM (Var.) y promedio (Prom.). NS = no significativo (p<0.05).

Sitio experimental	Nf		Rto		EUNf	
	(kg ha <sup>-1</sup> )		(kg ha <sup>-1</sup> )		(kg gr kg N <sup>-1</sup> )	
	Prom	Var	Prom	Var	Prom	Var
"UCC"	182	182	9898	9853	18.0	18.0
"El Rodeo"	173	170	10245	10246	17.1	16.8
"EEA INTA"	137	137	10190	10173	13.6	13.5
"Los Cerrillos"	152	93	9721	12262	15.4	15.5
Promedio	161	169	10013	10633	16.0	16.7
Nivel de significancia	NS		NS		NS	