

# MODELO DE RESPUESTA SITIO-ESPECÍFICA DEL MAÍZ AL NITRÓGENO Y AGUA EDÁFICA EN UN HAPLUSTOL

MARÍA CELESTE GREGORET<sup>1</sup>; JULIO DARDANELLI<sup>2</sup>; RODOLFO BONGIOVANNI<sup>3</sup>  
& MARTÍN DÍAZ-ZORITA<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Proyecto PICTO 12931 INTA Ruta 9 Km 636 (5988) Manfredi, Córdoba, Argentina.+54-3572-493039 cgregoret@yahoo.com

<sup>2</sup>INTA. Ruta 9 km 636 (5988) Manfredi, Córdoba, Argentina. +54-3572-493058. jdardanelli@correo.inta.gov.ar

<sup>3</sup>Proyecto PICTO 12931 INTA. Ruta 9 km 636 (5988) Manfredi, Córdoba, Argentina. +54-3572-493058.

rbongiovanni@correo.inta.gov.ar

<sup>4</sup>CONICET-FAUBA y Nitragin Argentina S.A. Calle 10 y 11 Parque Industrial Pilar, 1629, Pilar, Bs.As. Argentina +54-02322 421679. mdzorita@agro.uba.ar

Recibido: 04/06/06

Aceptado: 11/12/06

## RESUMEN

En ambientes semiáridos, donde frecuentemente la disponibilidad de agua y de nutrientes es limitante para la producción, la aplicación de fertilizantes nitrogenados en cultivos de maíz (*Zea mays* L.) es un elemento central de manejo. El uso de prácticas de agricultura de precisión, al implementar estrategias de manejo sitio-específico, permitirían mejoras en la rentabilidad del cultivo al definir dosis de fertilización según tipos de suelo y otras condiciones de ambiente definidas en zonas de manejo dentro de un mismo lote. Los objetivos de este trabajo fueron: *i*) establecer un modelo de respuesta sitio-específica de cultivos de maíz según niveles de nitrógeno y de agua disponibles, y *ii*) determinar las disponibilidades óptimas económicas y agronómicas de nitrógeno según zonas de manejo en ambientes de regiones semiáridas. Durante la campaña 2004-2005, en un sitio aledaño a Manfredi (Córdoba, Argentina) se identificaron dos ambientes de secano con diferente potencial de productividad, uno de alto y otro de bajo potencial productivo. Además con la finalidad de evaluar la respuesta potencial del cultivo sin limitaciones de agua ni de nitrógeno se establecieron parcelas de riego. En estos ambientes se estableció un ensayo en franjas continuas de fertilización con 6 niveles fijos de N (0, 32, 64, 96, 129 y 161 kg ha<sup>-1</sup> en las zonas en secano y 0, 64, 137, 212, 279 y 351 kg ha<sup>-1</sup> bajo riego). El análisis de los datos se realizó teniendo en cuenta su estructura espacial según técnicas de estadística espacial. La interacción entre el nitrógeno (N) del fertilizante y las zonas de manejo sugirió que la respuesta del cultivo depende de variables sitio-específicas no homogéneas en el lote; lo que justificó la modelización con variables sitio específicas, que predijeron significativamente al rendimiento. Los rendimientos de maíz variaron según zonas de manejo y se relacionaron con la disponibilidad de agua, y de N del suelo, y con los niveles de fertilización a la siembra. Esta variación estuvo comprendida entre 6.632 y 9.735 kg ha<sup>-1</sup> en la zona de baja productividad, 6.981 y 10.434 kg ha<sup>-1</sup> en la de alta productividad y 8.330 y 14.258 kg ha<sup>-1</sup> en las parcelas con riego.

El N disponible óptimo agronómico (DOA) considerando para N el perfil hasta 60 cm y hasta 200 cm para el agua útil inicial en cada zona manejo, fue de 285, 184 y 162 kg ha<sup>-1</sup> para las zonas de mayor a menor productividad. Por otra parte el N disponible óptimo económico (DOE) fue de 171, 111 y 90 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente.

Se concluye que la inclusión del agua y N inicial en un suelo Haplustol permitió en principio la obtención de un único modelo de respuesta al N disponible en las diferentes zonas de manejo en secano, y en riego excluyendo el agua inicial como variable, dado que en este caso no fue factor limitante. Este único modelo fue obtenido utilizando como variables N inicial a 200 cm o a 60 cm y agua inicial hasta 200 cm, lo que permitiría la aplicación de recomendaciones de fertilización con dosis variable, maximizar el beneficio económico y/o minimizar riesgos de contaminación del ambiente por la aplicación de sobredosis de insumos. Las conclusiones son preliminares ya que provienen de un solo experimento que no cubrió el rango de todas las condiciones iniciales posibles, siendo necesarios más escenarios para validar el modelo propuesto.

**Palabras clave.** Agricultura de precisión, disponibilidad de agua, zonas de manejo, dosis variable, manejo sitio-específico, Argentina.

## SITE-SPECIFIC CORN NITROGEN AND SOIL WATER RESPONSE MODEL IN HAPLUSTOLLS

### ABSTRACT

Appropriate strategies for nitrogen fertilization in corn production is specially important in semi-arid regions, where soil water and nutrients are limiting factors. Precision agriculture has the potential to adjust fertilizer rates according to soil types and/or other defined conditions within management zones. The objectives were: *i*) to determine the site-

specific response of corn to nitrogen and available water at planting, and ii) to determine the economic and agronomic optimal levels of nitrogen and water. Three management zones with different production potential were identified: rainfed high and low potential and high potential with irrigation. The data are from on-farm trials for the 2004-2005 crop season, in Manfredi (Córdoba) with a uniform N rate along strips (0, 32, 64, 96, 129 and 161 kg N ha<sup>-1</sup> in the dry land and 0, 64, 137, 212, 279 and 351 kg N ha<sup>-1</sup> in the irrigated area) and a randomized complete block design to estimate site-specific crop response functions. Spatial autocorrelation is taken into account in regression estimation of N response functions by landscape position, in the form a spatial autoregressive error structure. Results suggest that N response differs significantly by landscape position and by soil water availability. Yields ranged from 4.914 to 11,346 kg ha<sup>-1</sup> in the zone of low productivity, between 4,956 and 12,204 kg ha<sup>-1</sup> in the one of high productivity and between 7,830 and 14,387 kg ha<sup>-1</sup> in irrigated plots. The agronomical (DOA) and economically (DOE) optimal N rates also differed among management zones, being DOA= 285, 184 and 162 kg ha<sup>-1</sup> for the zones from greater to smaller productivity, meanwhile DOE values were 171, 111 and 90 kg ha<sup>-1</sup>, respectively.

Initial soil nitrogen and available water inclusion allowed us to build a single N response model for the rainfed management zones. Besides, irrigated experiment maize performance was well predicted by the same model type but excluding available water (non-limiting factor), as input. The model performed well using either available N at 60 or 200 cm soil depth, and available water at 200 cm depth. This model allowed us to recommend fertilization rates using variable rate application, maximizing net return to N, and minimizing environment contamination risks, by over dose input (i.e. N fertilization) application. Our conclusions are preliminary because they come from a single year experiment, which did not include the whole range of expected initial conditions. More scenarios are needed in order to validate the proposed model.

**Key words.** Precision agriculture, water availability, management zones, variable rate, site-specific management, Argentina.

## INTRODUCCIÓN

En ambientes semiáridos, donde frecuentemente la disponibilidad de agua y de nutrientes en el suelo son limitantes para la producción (Jarsún *et al.*, 2003), la rotación con cultivos de gramíneas, tales como maíz (*Zea mays* L.) o trigo (*Triticum aestivum* L.) es una práctica agronómica recomendable para mantener los niveles de materia orgánica y la fertilidad de los suelos (Ruffo *et al.*, 2004; Thomas, 2001; Domínguez *et al.*, 2001); para ello es conveniente lograr mejoras en su productividad y rentabilidad. En este sentido la Agricultura de Precisión permite implementar estrategias de manejo sitio-específico para abordar la variabilidad espacio-temporal de la producción agrícola (Pierce & Nowak, 1999), que favorecerían incrementos en rentabilidad al ajustar por ejemplo las dosis de fertilizantes según el tipo de suelo y otras condiciones del ambiente.

Según Hatfield (2000), la variabilidad de los rendimientos dentro de un lote se debe a la interacción entre distintas fuentes de variabilidad, que generan efectos que no siempre están en concordancia con los límites establecidos para un lote. Una de las finalidades de la agricultura de precisión es identificar diferentes ambientes con cualidades semejantes, determinadas principalmente por topografía y características edáficas, que se denominan zonas de manejo (ZM). Cada ZM tendría características homogéneas manifestadas en similares rendimientos, que permitiría optimizar la eficiencia en la utilización de insumos, maximizar el beneficio económico; minimizando riesgos de contaminación del ambiente por

la aplicación de sobredosis de insumos (Dampney & Moore, 1998; Luchiari *et al.*, 2000; Zubillaga *et al.*, 2006a y Zubillaga *et al.*, 2006b).

La aplicación de fertilizantes nitrogenados en el cultivo del maíz es una de las estrategias de manejo más relevantes en la zona semiárida de la Argentina, además el nitrógeno (N) es uno de los nutrientes con importante respuesta sitio-específica (Bongiovanni, 2002). Para optimizar la fertilización con N es importante determinar relaciones sitio-específicas entre variables del suelo y la respuesta del cultivo. El uso de la fertilización diferencial por ZM requiere la comprensión de las necesidades de N por el cultivo; de la eficiencia de su utilización; de la capacidad del suelo de suministrar N; y de los patrones temporales de consumo y utilización del maíz en relación a la oferta de N (Hatfield, 2000).

Los principios generales del manejo sitio-específico son transferibles entre regiones, pero las estrategias de fertilización con dosis variable (FDV) deben ser modelados localmente porque las condiciones edáficas y climáticas son variables (Bongiovanni, 2002; Bravo *et al.*, 2004; Vieira *et al.*, 2006 y Siqueira *et al.*, 2006). Trabajos realizados con anterioridad en regiones semiáridas en secano o bajo riego mostraron resultados poco consistentes, sugiriendo la necesidad de mejorar los métodos de diagnóstico de fertilización. Por ejemplo, Bragachini *et al.* (2004) estimaron la dosis de N en maíz, utilizando un balance entre la oferta de N desde el suelo y el requerimiento del cultivo para alcanzar un cierto rendimiento esperado, considerando tanto cada ZM por separado como

el promedio del lote. Para un ambiente de alto potencial donde el rendimiento esperado era de 18 t ha<sup>-1</sup>, se necesitarían 263 kg de N ha<sup>-1</sup>, para uno de potencial intermedio y rendimiento esperado de 14 t ha<sup>-1</sup>, se requerirían 180 kg de N ha<sup>-1</sup> y para el de bajo potencial, con rendimiento esperado de 11 t ha<sup>-1</sup>, 167 kg de N ha<sup>-1</sup>. Considerando el promedio del lote, el rendimiento esperado era de 13 t ha<sup>-1</sup> y las necesidades de fertilización de 193 kg de N ha<sup>-1</sup>. Los resultados mostraron que convenía económicamente la dosis por ambientes a la promedio en la zona de bajo rendimiento potencial, evitando la aplicación de una sobredosis de fertilizante. Sin embargo la zona de alto potencial no mostró ventajas derivadas de la aplicación diferencial, sugiriendo la necesidad de un modelo matemático de respuesta sitio-específica. Además pocos estudios han considerado que los datos obtenidos con monitores de rendimiento no son independientes, sino que se correlacionan con las observaciones vecinas originando auto-correlación espacial y heterocedasticidad (Anselin *et al.*, 2004), limitación que se corrige con métodos de estadística espacial o geoestadística (Griffin *et al.*, 2005).

La oferta de N mineral en el suelo a la siembra es un factor relevante en modelos predictivos de respuesta a la fertilización. Esta respuesta está asociada a la disponibilidad de agua, a la dinámica del N del suelo, y al crecimiento del cultivo (González Montaner, 1997; Ruffo, 2004). Usando una metodología de análisis espacial del rendimiento en un ensayo con franjas de N en maíz, Anselin *et al.* (2004) estimaron para cada ZM (definidas por topografía), la respuesta al N agregado con modelos polinomiales de segundo orden. Este modelo no incluyó al N mineral del suelo ni el agua útil inicial, ni la posible interacción de estas variables con el N aplicado, sino que asumió que esas variables son inherentes a la posición en el relieve (ZM). Por lo tanto, la variabilidad en la oferta de N y de agua entre las distintas ZM, quedaría incluida en el término error. Reformular el modelo propuesto por Anselin *et al.* (2004), incluyendo como variables sitio-específicas al contenido inicial de N y agua permitiría un mejor diagnóstico de FDV con N en maíz en diferentes ambientes de regiones semiáridas.

La hipótesis general fue que la respuesta del maíz a la fertilización nitrogenada en Haplustoles de la región semiárida pampeana es diferente según ZM, y podría ser explicada empleando un modelo de respuesta que incluya al N y al agua inicial. Por lo tanto, los objetivos de este trabajo fueron (i) determinar en un suelo Haplustol un modelo de respuesta sitio-específica del maíz considerando el N y agua disponible a la siembra, y (ii) estimar las disponibilidades óptimas económicas y agronómicas de nitrógeno según zonas de manejo

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Condiciones experimentales

El estudio se desarrolló durante la campaña agrícola 2004-2005 en Manfredi (63°42'57.1"W 31°51'11.4"S, provincia de Córdoba, Argentina). Los suelos son predominantemente Haplustoles. Los sectores ligeramente cóncavos son de la serie Manfredi (Mf), suelos profundos y bien drenados, clasificados como Haplustoles Típicos y en lomas muy extendidas casi planas son de la serie Oncativo (Ot), que también son profundos, algo excesivamente drenados, y clasificados como Haplustoles Énticos. El manejo del ensayo fue similar al empleado en lotes de producción de la región (i.e. fecha de siembra, híbrido, control de malezas, etc.), realizándose en siembra directa y con soja como cultivo antecesor. La siembra fue realizada el 15 de octubre de 2004 con una densidad de 77.000 plantas ha<sup>-1</sup>, con surcos a 0,52 m, utilizando el híbrido DK 682 BT. En todo el lote, además de los tratamientos de fertilización con N, para evitar limitaciones de fósforo (P) se aplicaron 100 kg ha<sup>-1</sup> de un fertilizante mezcla (35% SPT-75% SPS) = 0 N, 30 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 8 S, 22 Ca.

Se identificaron ZM como distintos ambientes presentes en el lote según el análisis de rendimientos del cultivo de soja previo y el mapa elevación digital con el programa "Management Zone Analyst" (Mizzou-ARS, 2000) que permite hacer una agrupación difusa no supervisada de dicha información (siendo **no supervisada** porque no requiere conocimientos previos de las variables a clasificar, sino que produce las agrupaciones naturales de los datos; y **difusa** por que permite que se compartan datos en distintos grupos). Este análisis mostró dos ambientes, i) alta productividad (AP): cota relativa 0,84 m inferior a la media del lote, y con mayor proporción de suelos de serie Manfredi, donde el cultivo de soja antecesor había rendido hasta un 10% más que la media del lote, ii) baja productividad (BP): cota relativa 1,09 m superior a la media del lote, con predominancia de suelos de la serie Oncativo, y con un rendimiento del cultivo de soja antecesor un 11% menor a la media. Además con la finalidad de evaluar la respuesta potencial del cultivo sin limitaciones de agua ni de N se establecieron parcelas de riego, que en adelante denominamos de alta productividad con riego (APR). Los tratamientos fueron seis niveles fijos de N. La dosis de N fue constante en cada franja a través de las distintas ZM en las que el terreno fue dividido. La dosis más alta de N aplicada tanto en secano como en las parcelas regadas fue la que se esperaba que superara a la dosis que maximizaría el rendimiento de acuerdo a información previa de la zona. El ensayo fue dividido en tres bloques, y dentro de cada bloque, se aleatorizaron los tratamientos de N. El ancho de las franjas fue el del ancho de la sembradora (6,3 m) y el largo fue el del lote (475 m). Las dosis de N usadas fueron: 0, 32, 64, 96, 129 y 161 kg N ha<sup>-1</sup> en secano, y 0, 64, 137, 212, 279 y 351 para las parcelas regadas. La fuente de N utilizada fue urea (46-0-0) incorporada con la siembra. Las parcelas bajo riego fueron delimitadas por bordos, que incluyeron 5 surcos de 10 m de largo (26 m<sup>2</sup>) regadas por inundación, manteniendo el perfil con contenidos de agua sobre el 60% del contenido de agua útil durante todo el ciclo de crecimiento del cultivo.

Previo a la siembra en cada ZM se tomaron 3 muestras compuestas a su vez por 7 submuestras (21 puntos de muestreo por ZM) de la capa de 0 a 20 cm de profundidad. En cada una se determinó: materia orgánica (M.O) por Walkley-Black (Nelson & Sommers, 1996), nitrógeno total (Nt) por Kjeldhal (Bremner,

1996), fósforo extractable (Pe) por Bray y Kurtz 1 (Kuo, 1996). La densidad aparente (DA) fue determinada por el método de Blake & Harge (1986) en las capas de 0 a 10 y de 10 a 20 cm. También a la siembra se determinó  $N\text{NO}_3$  (Mulaney, 1996), en las capas de 0 a 20, 20 a 40, 40 a 80, 80 a 140 y 140 a 200 cm, en las mismas muestras compuestas por cada ZM. El contenido de  $N\text{-NO}_3$  se expresó en  $\text{kg ha}^{-1}$  según el producto entre la DA determinadas en este estudio para las capas superficiales y la información existente de esta variable a mayor profundidad para los mismos tipos de suelos. También antes de la siembra se determinó el contenido de agua por gravimetría en capas de 20 cm de espesor hasta los 200 cm de profundidad. Los valores fueron expresados en términos de humedad volumétrica (H. Vol) ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ) considerando los mismos valores de DA empleados en el cálculo anterior. El contenido de agua en capacidad de campo (CC) fue determinada “*in situ*” (Bachmeier & Dardanelli, 1991) y en el punto de marchitez permanente (PMP) sobre muestras disturbadas a una succión de -1,5 MPa en membranas de Richard. A partir de los contenidos de agua observados y los determinados en el PMP se calcularon las láminas de agua útil (AU) (mm) integrando los valores de humedad volumétrica disponible obtenidos hasta la profundidad de 200 cm, como:

$$AU \text{ (mm)} = [\text{H. Vol.} - (\text{PMP} \cdot \text{DA})] \cdot 200 \cdot 10 \quad [1]$$

La variación de almacenaje (VA) entre siembra y madurez fisiológica se calculó como la diferencia de láminas de agua útil final (AUF) - agua útil inicial (AUI), y el consumo aparente (CA) se determinó como:

$$CA \text{ (mm)} = pp \pm VA \quad [2]$$

siendo pp las precipitaciones entre siembra y cosecha.

En las franjas de 0 y 96  $\text{kg ha}^{-1}$  de N de las ZM “BP” y “AP”, y en las de 0 y 212  $\text{kg ha}^{-1}$  de N de “APR” a los 32, 53 y 130 días desde la siembra con los cultivos en estadios de v6, de prefloración (preF) y en madurez fisiológica (MF), respectivamente, se determinaron el contenido de agua en el suelo y el de  $N\text{-NO}_3$  hasta 200 cm utilizando los procedimientos descriptos para el muestreo en la siembra. Además se determinó la biomasa final incluyendo al grano seco y rendimiento en grano corregido al 14,5% de humedad.

Se registraron las precipitaciones diarias entre siembra y cosecha, registros que se compararon con la serie desde 1931 a 2005 registrada en la estación agrometeorológica de la Estación Experimental Agropecuaria del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria Manfredi ubicada a menos de 2 km del sitio experimental.

Se agruparon los datos originales del monitor de rendimiento (2.111 observaciones), en una grilla cuadrada de polígonos de 6 x 6 para evitar errores causados por desuniformidad entre plantas, promediándose las observaciones dentro de cada polígono para que las distancias entre las observaciones fueran equivalentes. De este modo se obtuvo una capa de 1.297 polígonos cuadrados para todo el ensayo, y así luego fue posible calcular una matriz de ponderadores espaciales. Por otro lado como la resolución o densidad espacial de las distintas capas de información no es la misma, los datos del monitor de rendimiento son los más densos y los del muestreo del suelo para el análisis son los datos más escasos, es necesario para el análisis una agregación de datos. Para ello se interpolaron los datos de suelo por el método de vecinos cercanos, (Griffin *et al.*, 2005). Los datos fueron organizados en el sistema de información geográfica SSTtoolbox (SST, 2006).

## Análisis estadístico

Se hizo un análisis estadístico espacial de los datos. El primer análisis fue un diagnóstico de heterocedasticidad y de dependencia espacial, a partir del cual se decidió la utilización del modelo de error espacial donde la variable dependiente no está correlacionada por sí misma sino que es el error de muestreo aleatorio, que está correlacionado según:

$$Y = X\beta + \varepsilon \quad \text{dónde} \quad \varepsilon = \lambda\omega\varepsilon + \mu \quad [3]$$

dónde  $\mu$  es el error de muestreo aleatorio que sigue una especificación auto regresiva espacial (SAR) con un coeficiente auto regresivo  $\lambda$ . La matriz de ponderadores espaciales utilizada tiene una estructura “queen” de 8 vecinos, es decir bordes y esquinas en común. Los coeficientes del modelo son estimados por el modelo SAR, estimado por máxima verosimilitud, empleando el programa de estadística espacial “GeoDa” (Anselin, 2004).

En el análisis de los datos propiamente dicho, en primer lugar se modeló la respuesta al N del fertilizante (Nf) por cada ZM según el siguiente modelo:

$$Y_i = \alpha + \beta_1 Nf + \beta_2 Nf^2 + \delta ZM + \varphi Nf \times ZM + \varepsilon_{ii} \quad [4]$$

dónde  $Y_i$  es el rendimiento del maíz ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) por cada punto  $i$  del monitor de rendimiento (monitor con sistema de posicionamiento global o GPS),  $\alpha$ ,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ , son los parámetros de la ecuación de regresión. Nf es la dosis de fertilizante ( $\text{kg ha}^{-1}$ ),  $\delta ZM$  se refiere a las variables “dummy”, y  $\varepsilon_{ii}$  es el término de error de la regresión por cada ubicación. Una restricción impuesta a las variables “dummy” es que su sumatoria debe ser igual a cero; lo que permite la estimación del efecto de las diferentes ZM dentro del lote y de los términos de la interacción  $N_f \times ZM$ .

En segundo lugar se estimó una función de respuesta sitio-específica por una regresión múltiple, según la siguiente ecuación:

$$Y_i = \alpha + \beta_1 Nd + \beta_2 Nd^2 + \gamma_1 AUI + \gamma_2 AUI^2 + \delta Nd \times AUI + \varepsilon_{ii} \quad [5]$$

dónde  $Y_i$  es el rendimiento del maíz ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) por cada punto  $i$  del monitor de rendimiento (monitor con GPS),  $\alpha$ ,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ ,  $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$  y  $\delta$  son los parámetros de la ecuación de regresión, Nd es el N disponible al inicio (N del fertilizante + el  $N\text{-NO}_3$  del suelo hasta 60 cm o hasta 200 cm de profundidad) y AUI es el agua útil en el momento de la siembra hasta 200 cm de profundidad. En ambas ecuaciones (4) y (5) el número de observaciones fue de 1.239.

## Optimización de las funciones

Para obtener en cada ZM las disponibilidades óptimas de N agronómicas (DOA) o cantidad de N necesaria para alcanzar el rendimiento máximo y económicas (DOE) o cantidad de N necesaria para alcanzar el máximo retorno económico al fertilizar, se realizó una optimización tradicional de las funciones (Dillon & Anderson, 1990). La DOA se calculó a partir de la ecuación [5], como:

$$\frac{dY}{dNd} = \beta_1 + 2\beta_2 Nd + \delta AUI \quad [6]$$

$$Nd = \frac{-(\beta_1 + \delta AUI)}{(2\beta_2)} \quad [7]$$

dónde Ndes el N requerido para la DOA. La DOE se calculó también a partir de la ecuación [5] como:

$$\pi = P_m \times (\alpha + \beta_1 Nd + \beta_2 Nd^2 + \gamma_1 AUI + \gamma_2 AUI^2 + \delta Nd \times AUI) - P_n \times Nd \quad [8]$$

$$\frac{d\pi}{dNd} = P_m \times (\beta_1 + 2\beta_2 Nd + \delta AUI) - P_n \quad [9]$$

$$Nd = \left( \left( \frac{P_n}{P_m} \right) - \beta_1 - \delta AUI \right) \times \left( \frac{1}{2\beta_2} \right) \quad [10]$$

dónde  $\pi$  es retorno económico al uso de N (\$ ha<sup>-1</sup>), P<sub>m</sub> es el precio del maíz en el mes de la cosecha, menos 15% por comercialización, siendo en este estudio 0,16 \$ kg<sup>-1</sup> y P<sub>n</sub> es el precio del N elemental en el mes de la siembra más intereses por 6 meses a una tasa del

15% anual y 2,87 \$ kg<sup>-1</sup> de N. Además, para este cálculo se le asignó al N del suelo el mismo valor que el N del fertilizante al considerarlo como un servicio del medio ambiente (Viglizzo, 2005). Los valores de AUI que se usaron para el cálculo de la DOE fueron los promedios de cada ZM.

**RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

**Propiedades del suelo**

Las condiciones iniciales del suelo (Tabla 1) y la distribución en el perfil del contenido de N-NO<sub>3</sub> (Figura 1 a y b) en cada ZM muestran que hubo diferencias entre éstas, principalmente en términos de la disponibilidad de N-NO<sub>3</sub> (mayor en la ZM “AP” que en “BP”), Ntotal, M.O y Pe. Si bien las diferencias en el N disponible al inicio entre ZM son pequeñas, 5,4 y 10,4 kg de N ha<sup>-1</sup> para 0-60 y 0-200 cm respectivamente, estas diferencias, asociadas a diferencias en el contenido de agua inicial (Tabla 2), mostraron ser suficientes para generar ambientes

Tabla 1. Análisis de suelo según zona de manejo (ZM) de baja productividad (BP), de alta productividad (AP) en un lote de producción de maíz en Manfredi (Córdoba, Argentina). Valores medios ± error estándar.

Table 1. Soil analysis by management zone (ZM) of low productivity (BP), and high productivity (AP) in a farm of maize production in Manfredi, (Córdoba, Argentina). Average values ± standard error.

ZM	Profundidad d (cm)	Nt (g kg <sup>-1</sup> )	pH en agua	C.E (dSm <sup>-1</sup> )	M.O (g kg <sup>-1</sup> )	P (mg kg <sup>-1</sup> )
“BP”	0 - 20	1,17 ± 0,05	6,89 ± 0,06	0,77 ± 0,03	20 ± 0,93	15,2 ± 0,002
“AP”	0 - 20	1,26 ± 0,04	7,08 ± 0,07	0,98 ± 0,06	27,5 ± 4,99	31,7 ± 0,001

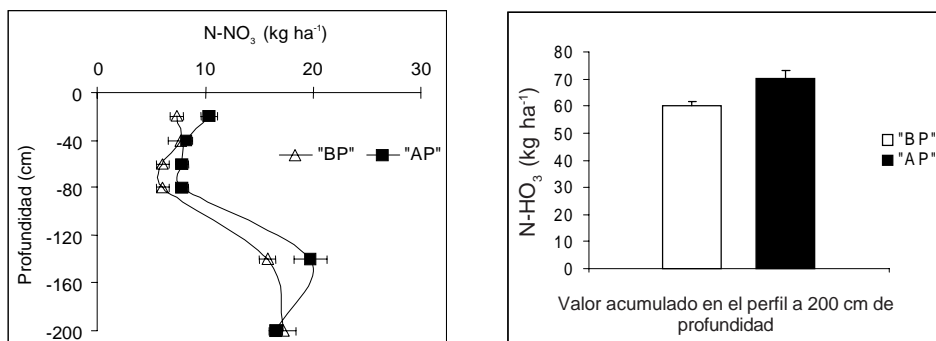


Figura 1. Perfil de distribución (a) y perfil acumulado (b) del contenido de N-NO<sub>3</sub> (kg ha<sup>-1</sup>) en el momento de la siembra de maíz según zonas de manejo (ZM) de baja productividad (BP) y alta productividad (AP) en Manfredi (Córdoba, Argentina). Valores medios ± error estándar.

Figure 1. Profile of distribution (a) and accumulated profile (b) of the initial content of N-NO<sub>3</sub> (kg ha<sup>-1</sup>) according to management zones (ZM) of low productivity (BP) and high productivity (AP) in a farm of maize production in Manfredi, (Córdoba, Argentina). Average values of three repetitions ± standard error.

productivos diferentes. Resultados similares fueron reportados por Zubillaga *et al.* (2006b) quienes encontraron que la distribución espacial de algunas variables edáficas no fue aleatoria, sino que los sitios de mayor productividad coincidieron con los de mayores concentraciones de Ntotal, y humedad inicial.

La dinámica del agua del suelo resultante tanto de la partición del agua de lluvia entre infiltración y escurrimiento, como de la posterior absorción de agua infil-

trada por parte del sistema radical del cultivo mostró diferentes patrones según ZM y dosis de N, en los estadios avanzados del cultivo, cuando el sistema radical estaba completamente establecido (Figura 2). En concordancia con nuestro estudio, Siquiera *et al.*, (2006) y Vieira *et al.*, (2006), reportaron diferencias espaciales en el almacenamiento de agua de suelo, la infiltración tridimensional y conductividad hidráulica saturada, asociadas a la cota relativa del lote. Algunos parámetros

**Tabla 2.** Contenidos de agua útil inicial (AUI), agua útil final (AUF), variación de almacenaje (VA) y consumos aparente (CA) según zonas de manejo (ZM) de baja productividad (BP) y de alta productividad (AP) y dosis de fertilización con N en cultivos de maíz en un lote de Manfredi (Córdoba, Argentina). Valores medios  $\pm$  error estándar. Letras mayúsculas distintas indican diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) entre zonas. Letras minúsculas distintas indican diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) entre dosis dentro de cada zona.

**Table 2.** Initial available water (AUI), Final useful water (AUF), variation of storage (V.A) and apparent consumption (CA) by management zone (ZM) of low productivity (BP), and high productivity (AP) and N rates in a farm of maize production in Manfredi, (Córdoba, Argentina). Average values  $\pm$  standar error. Different capital letters indicate significant differences ( $p < 0.05$ ) between zones. Different very small letters indicate significant differences ( $p < 0.05$ ) between N rates within each zone.

ZM	AUI	AUF	VA	CA
"BP"			mm	
0 kg N	55 $\pm$ 3,29 A	111 $\pm$ 8,53 A a	56 $\pm$ 9,47 A a	619 $\pm$ 9,47 A a
96 kg N	55 $\pm$ 3,29 A	84 $\pm$ 6,92 A b	29 $\pm$ 6,76 A b	646 $\pm$ 6,76 A b
"AP"				
0 kg N	90 $\pm$ 6,08 B	162 $\pm$ 12,41 B a	72 $\pm$ 12,17 A a	603 $\pm$ 12,17 A a
96 kg N	90 $\pm$ 6,08 B	130 $\pm$ 7,22 B a	40 $\pm$ 9,25 A a	635 $\pm$ 9,25 A a

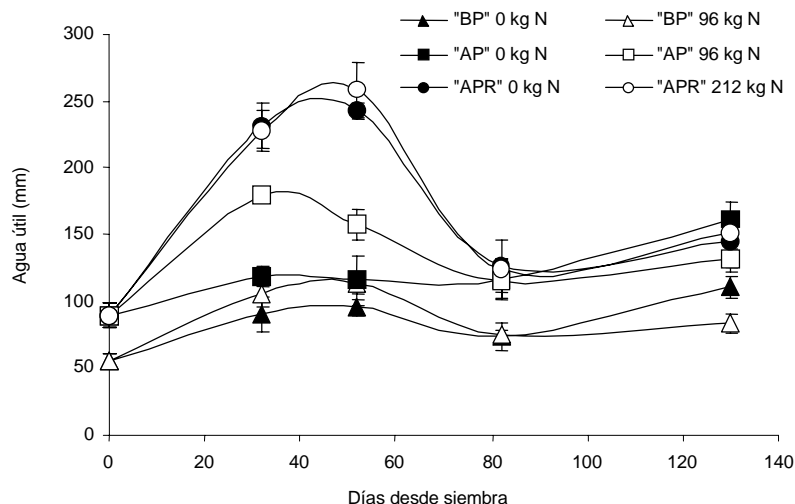


Figura 2. Evolución del contenido de agua útil del suelo hasta 200 cm de profundidad determinados en zonas de manejo de secano, de baja productividad (BP), y de alta productividad (AP) y de alta productividad con riego (APR) según niveles de fertilización con N en un cultivo de maíz en Manfredi (Córdoba, Argentina).

Figure 2. Evolution of the soil moisture content up to 200 cm depth, by management zones (ZM) of rainfed low productivity (BP), rainfed high productivity (AP) and high yield potential with irrigation (APR), by N rates in a farm of maize production in Manfredi, (Córdoba, Argentina).

hídricos muestran diferentes patrones de disponibilidad y utilización del agua según ZM (Tabla 2). El AUI fue un 63% mayor ( $p < 0,05$ ) en la ZM “AP” que en la “BP” debido a una mayor recarga hídrica durante el barbecho dado que dentro de un mismo lote la distribución espacial del agua en el suelo está fuertemente influenciada por la topografía (Moore *et al.*, 1993; Western *et al.*, 1999; Siqueira *et al.*, 2006 y Vieira *et al.*, 2006). También se encontraron diferencias en los contenidos de AUF entre ZM ( $p < 0,05$ ) (Tabla 2), pero el consumo aparente (CA), que incluye el consumo del cultivo y las pérdidas del sistema por escorrentía, no presentó diferencias significativas. Lo mismo ocurrió con la variación de almacenaje (VA), aunque se observa una tendencia a menor VA (menor recarga por mayor absorción) cuando la disponibilidad de N fue más alta, en ambas ZM. Siendo la VA una variable resultante

de procesos de recarga y absorción que interactúan, es difícil esperar diferencias en esta variable entre ZM, que suponen diferente recarga del perfil.

**Relaciones entre propiedades del suelo y productividad del maíz**

Los rendimientos en biomasa aérea y granos fueron mayores en la ZM “AP” que en “BP” ( $p < 0,05$ ) (Tabla 3). La eficiencia en el uso del agua del sistema (cociente entre la producción de biomasa o grano y CA;  $EUA_B$  o  $EUA_G$ , respectivamente) mostraron diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) entre ZM, en buena proporción atribuibles a la diferente disponibilidad de agua inicial (Tabla 2) y presumiblemente a mayor precipitación efectiva durante el cultivo, en la ZM “AP” como resultante de su menor

**Tabla 3.** Rendimiento en grano, producción de materia seca aérea, eficiencia de uso del agua según la biomasa aérea ( $EUA_B$ ) o el rendimiento en grano ( $EUA_G$ ) según zonas de manejo (ZM) de baja productividad (BP), de alta productividad (AP) y dosis de nitrógeno (N) en un cultivo de maíz en Manfredi (Córdoba, Argentina). Valores medios  $\pm$  error estándar. Letras mayúsculas distintas indican diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) entre zonas de secano. Letras minúsculas distintas indican diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) entre dosis dentro de cada zona.

**Table 3.** Grain yield, production of biomass, water use efficiency of the system considering the aerial biomass ( $EUA_B$ ) and the grain yield ( $EUA_G$ ) by management zone (ZM) of low productivity (BP), high productivity (AP) and N rates in a farm of maize production in Manfredi, (Córdoba, Argentina). Average values  $\pm$  standard error. Different capital letters indicate significant differences ( $p < 0.05$ ) between rainfed zones. Different very small letters indicate significant differences ( $p < 0.05$ ) between N rates within each zone.

	Rendimiento	Biomasa aérea	$EUA_B$	$EUA_G$
	(kg ha <sup>-1</sup> )		kg mm <sup>-1</sup>	
<b>ZM “BP”</b>				
0 kg ha <sup>-1</sup> N	6.632 $\pm$ 483 A a	12.499 $\pm$ 455 A a	20 $\pm$ 0,86 A a	11 $\pm$ 0,85 A a
32 kg ha <sup>-1</sup> N	7.759 $\pm$ 132 A a b			
64 kg ha <sup>-1</sup> N	8.382 $\pm$ 385 A b c			
96 kg ha <sup>-1</sup> N	8.776 $\pm$ 202 A b c	17.778 $\pm$ 1.280 A b	27 $\pm$ 1,87 A b	14 $\pm$ 0,37 A b
129 kg ha <sup>-1</sup> N	9.224 $\pm$ 254 A b c			
161 kg ha <sup>-1</sup> N	9.735 $\pm$ 264 A c			
<b>ZM “AP”</b>				
0 kg ha <sup>-1</sup> N	6.981 $\pm$ 162 B a	14.205 $\pm$ 1.215 B a	23 $\pm$ 2,35 B a	12 $\pm$ 0,32 B a
32 kg ha <sup>-1</sup> N	8.327 $\pm$ 88 B b			
64 kg ha <sup>-1</sup> N	9.155 $\pm$ 102 B c			
96 kg ha <sup>-1</sup> N	9.739 $\pm$ 129 B c d	20.211 $\pm$ 1.118 B b	31 $\pm$ 1,86 B b	15 $\pm$ 0,32 B b
129 kg ha <sup>-1</sup> N	9.972 $\pm$ 227 B d e			
161 kg ha <sup>-1</sup> N	10.434 $\pm$ 115 B e			
<b>ZM “APR”</b>				
0 kg ha <sup>-1</sup> N	8.330 $\pm$ 239 a			
64 kg ha <sup>-1</sup> N	12.890 $\pm$ 404 b			
137 kg ha <sup>-1</sup> N	13.328 $\pm$ 303 b			
212 kg ha <sup>-1</sup> N	13.767 $\pm$ 395 b			
279 kg ha <sup>-1</sup> N	14.076 $\pm$ 189 b			
351 kg ha <sup>-1</sup> N	14.258 $\pm$ 187 b			

cota relativa. Además las  $EUA_B$  y  $EUA_G$  fueron significativamente superiores ( $p < 0,05$ ) en el tratamiento con mayor N disponible, diferencias atribuibles a incrementos en la expansión foliar o a demoras de su senescencia por una mayor intercepción de la radiación cuando la disponibilidad de N fue mayor (Andrade *et al.*, 1996). Asimismo, la aplicación de N habría favorecido un mayor desarrollo radical, que en las condiciones ambientales de este ensayo se reflejó en una mayor absorción neta de agua del perfil en los tratamientos con 96 kg N aplicados, particularmente desde las capas más profundas (Figura 3). Por otra parte, se observó que a un mismo nivel de dis-

ponibilidad de N una mayor absorción neta de agua edáfica en el período v6 - postfloración en la ZM "AP" (Figura 4). La ZM "AP" absorbió agua hasta 180 cm, mientras que en la ZM "BP" la absorción ocurrió hasta 140 cm de profundidad, sugiriendo un mayor desarrollo de raíces por mayor disponibilidad de agua en el perfil. Las Figuras 3 y 4 en conjunto constituyen evidencias del comportamiento diferencial de las ZM respecto del efecto combinado del agua y N sobre el cultivo ante similar oferta ambiental.

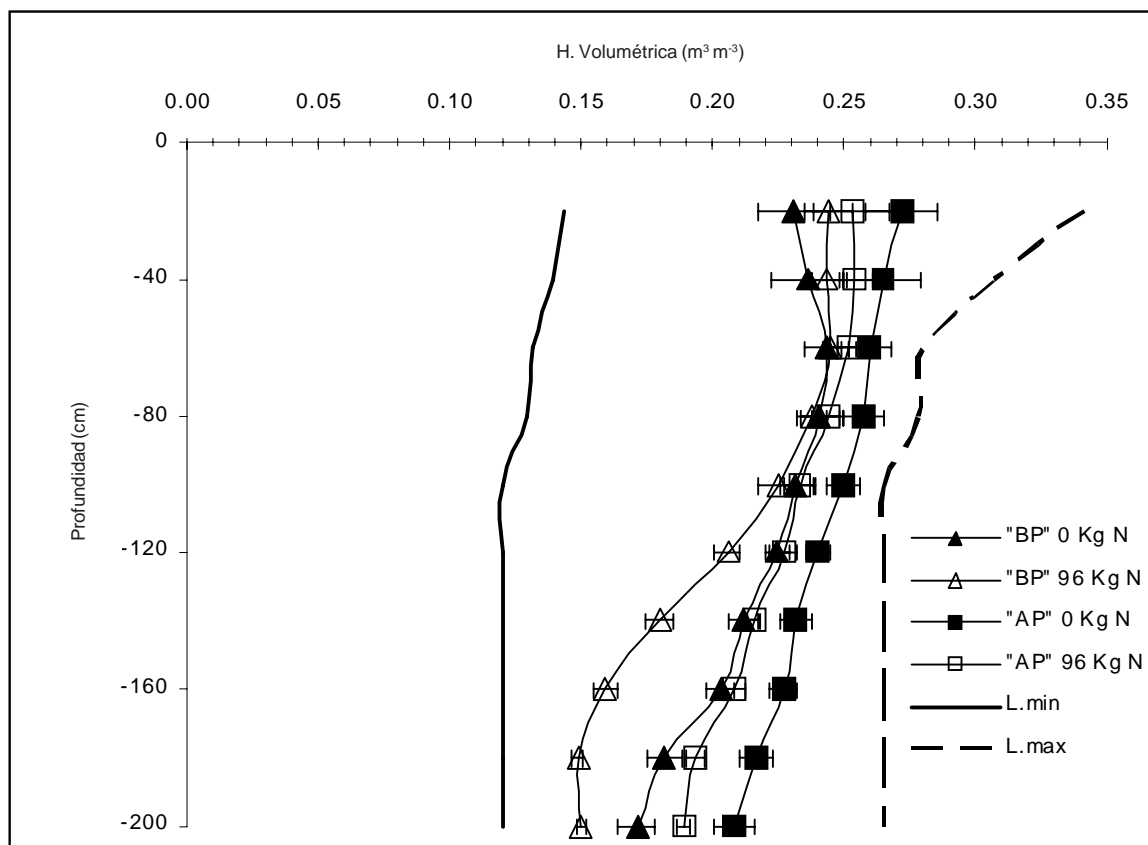


Figura 3. Contenidos de humedad volumétrica del suelo en estadios de madurez fisiológica de maíz en zonas de manejo de secano con baja productividad (BP), y de secano con alta productividad (AP) en las franjas de 0 y 96 kg N ha<sup>-1</sup> en un cultivo de maíz en Manfredi (Córdoba, Argentina). Valores medios de las 3 repeticiones  $\pm$  error estándar. Se indican también los límites máximos y límites mínimos hídricos.

Figure 3. Volumetric soil moisture at physiological maturity in the management zones (ZM) rainfed low productivity (BP), rainfed high productivity (AP), in the strips of 0 and 96 kg N ha<sup>-1</sup> in a farm of maize production in Manfredi, (Córdoba, Argentina). Average values of three repetitions  $\pm$  standard error. The upper and lower limits are also indicated.



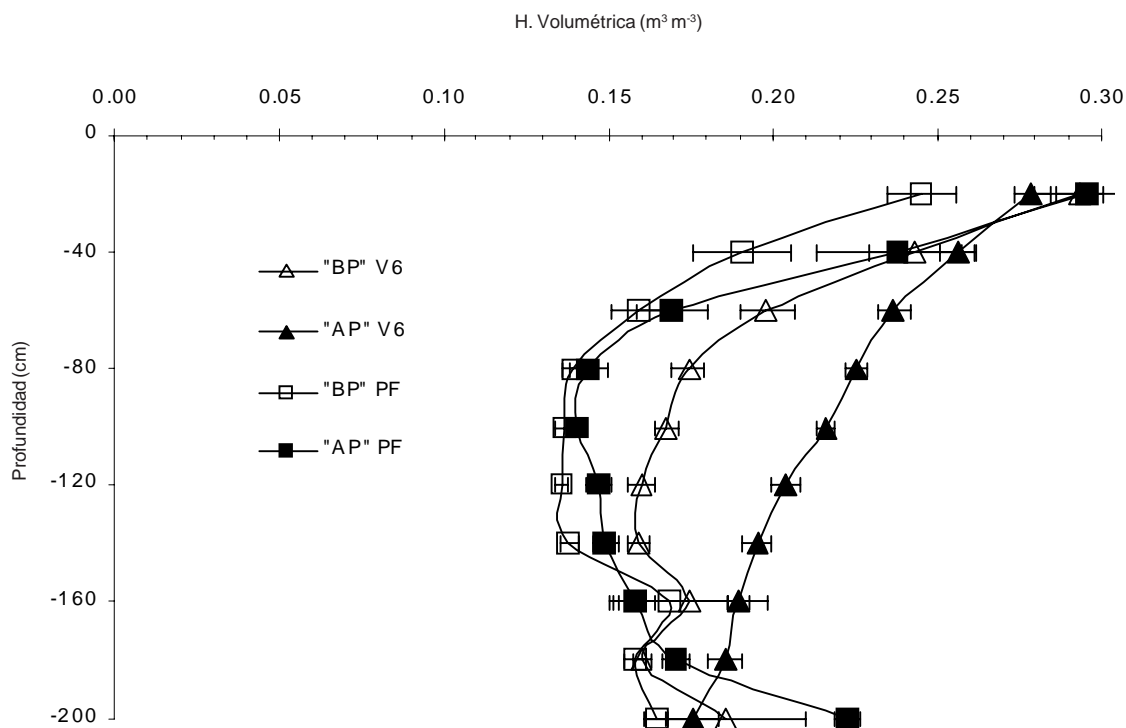


Figura 4. Contenido de humedad volumétrica del suelo en el período v6 - postfloración de maíz según zonas de manejo de secano de baja productividad (BP), y de alta productividad (AP) con 96 kg N ha<sup>-1</sup> de fertilización en Manfredi (Córdoba, Argentina) Valores medios de 3 repeticiones ± error estándar.

Figure 4. Volumetric soil moisture in the between the stages of v6 - Post flowering determined in the management zones (ZM) rainfed low productivity (BP), rainfed high productivity (AP), in the strip of 96 kg N ha<sup>-1</sup> in a farm of maize production in Manfredi, (Córdoba, Argentina). Average values of the three repetitions ± standard error

**Modelos de respuesta a N según ZM**

A partir del ajuste de la regresión espacial de la respuesta del maíz al Nf y las ZM (ecuación [4]) se observó que la respuesta al Nf difirió según ZM (p<0,01). Teniendo en cuenta los coeficientes resultantes del ajuste de este modelo (Tabla 4) se describió que la respuesta al Nf es diferente con un 99% de confianza según ZM (variables “dummies”), especialmente porque las ordenadas al origen, según ZM, son diferentes al promedio del lote (p<0,01), siendo mayores en “AP” que en “BP”. Esta diferencia significativa entre variables ZM sugiere la existencia de variables sitio-específicas que interactúan con el Nf, tales como el N y agua al a la siembra, y que no son homogéneas en todo el lote. Resultados similares, cuando se utiliza solamente el Nf como variable,

fueron descriptos por Ruffo (2003) en un estudio realizado en la región sur y central de Illinois (EUA) quien encontró interacciones entre ZM y Nf. A similares conclusiones también arribaron Bongiovanni (2002), Anselin *et al.* (2004) y Mamo *et al.* (2003)

Al ajustarse la ecuación [5], que considera de forma explícita la variabilidad entre las ZM con las variables sitio-específica incluidas en el modelo se obtuvo un único modelo de respuesta para las ZM “AP” y “BP”, tanto si se utiliza como variable el Nd hasta los 60 cm o hasta 200 cm del perfil (Tabla 5) En las parcelas bajo riego el modelo no incluyó como variable regresora el agua inicial dado que no fue un factor limitante en esta situación (Tabla 5). Los contenidos de agua del suelo en condiciones de secano afectan los rendimientos alcanzados en forma directa por su disponibilidad para el cultivo e in-

Tabla 4. Coeficientes de la regresión de respuesta del cultivo al Nf según la ecuación [1] con variables dummies por zonas de manejo (ZM) de baja productividad (BP), de alta productividad (AP) en un cultivo de maíz en Manfredi (Córdoba, Argentina).

Table 4. Fertilizer coefficients of crop response to Nf according to the equation [1], with variable dummies by management zones (ZM) of low productivity (BP), high productivity (AP) in a farm of maize production in Manfredi (Córdoba, Argentina).

	Coeficientes	Error Std.	z-value	P
Constante	6.894,61	60,31	114,32	0,00000
Nf	37,04	1,30	28,54	0,00000
Nf <sup>2</sup>	-0,13	0,01	-17,31	0,00000
“BP”	-164,07	58,13	-2,82	0,00477
“AP”	164,07	1,30	-0,47	
Nf x “BP”	-0,61	0,01	-1,54	0,63974
Nf x “AP”	0,61	0,04	14,49	
Nf <sup>2</sup> x “BP”	-0,01	0,00	0,00	0,12400
Nf <sup>2</sup> x “AP”	0,01	0,00	0,00	
Lambda	0,52	0,00	0,00	0,00000

Tabla 5. Coeficientes estimados de la respuesta al N disponible al inicio (N del fertilizante + el N-NO<sub>3</sub> del suelo hasta 60 cm o hasta 200 cm de profundidad) y el agua útil al inicio hasta 200 cm de profundidad según la ecuación [2] para las zonas de manejo de secano, y para las parcelas de riego con N disponible al inicio a 60 o 200 cm de profundidad, en un cultivo de maíz en Manfredi (Córdoba, Argentina).

Table 5. Estimated response coefficients to initial supply of N (N fertilizer + soil N-NO<sub>3</sub> of the ground up to 60 cm or 200 cm depth) and initial useful water up to 200 cm depth, according to equation [2] for the rainfed management zones (ZM) and to initial supply of N until 60 cm or 200 cm of depth for ZM with irrigation, in a farm of maize production in Manfredi, (Córdoba, Argentina).

	Secano				Parcelas regadas			
	N disponible a 60 cm		N disponible a 200 cm		N disponible a 60 cm		N disponible a 200 cm	
	Coeficiente	P	Coeficiente	P	Coeficiente	P	Coeficiente	P
Constante	1.742,54	0,00051	673,60	0,19118	7.924,99	0,00000	5501,64	0,00000
Nd	30,63	0,00000	37,47	0,00000	45,24	0,00000	53,07	0,00000
Nd <sup>2</sup>	-0,12	0,00000	-0,12	0,00000	-0,08	0,00000	-0,08	0,00000
AUI	115,59	0,00000	107,42	0,00000				
AUI <sup>2</sup>	-0,74	0,00000	-0,80	0,00000				
Nd <sup>2</sup> X AUI	0,16	0,00000	0,21	0,00000				
Lambda	0,41	0,00000	0,40	0,00000	0,02	0,93197	0,02	0,93197

directamente por sus efectos sobre procesos del ciclo del N (ej.: mineralización del N orgánico, desnitrificación y lavado de N). Como se observa en la Tabla 5, la variables propuestas en el modelo tuvieron una contribución significativa tanto si se consideró Nd a 60 o a 200 cm. Teniendo en cuenta que los muestreos hasta 200 cm, pro-

fundidad que exploran las raíces del maíz en este tipo de suelos (Dardanelli *et al.*, 1997) no son sencillos e incrementan los costos de análisis de laboratorio, habría que tomar una decisión de compromiso hacia que profundidad mínima se puede considerar, sin modificar la precisión en la estimación de la disponibilidad de N-NO<sub>3</sub> para

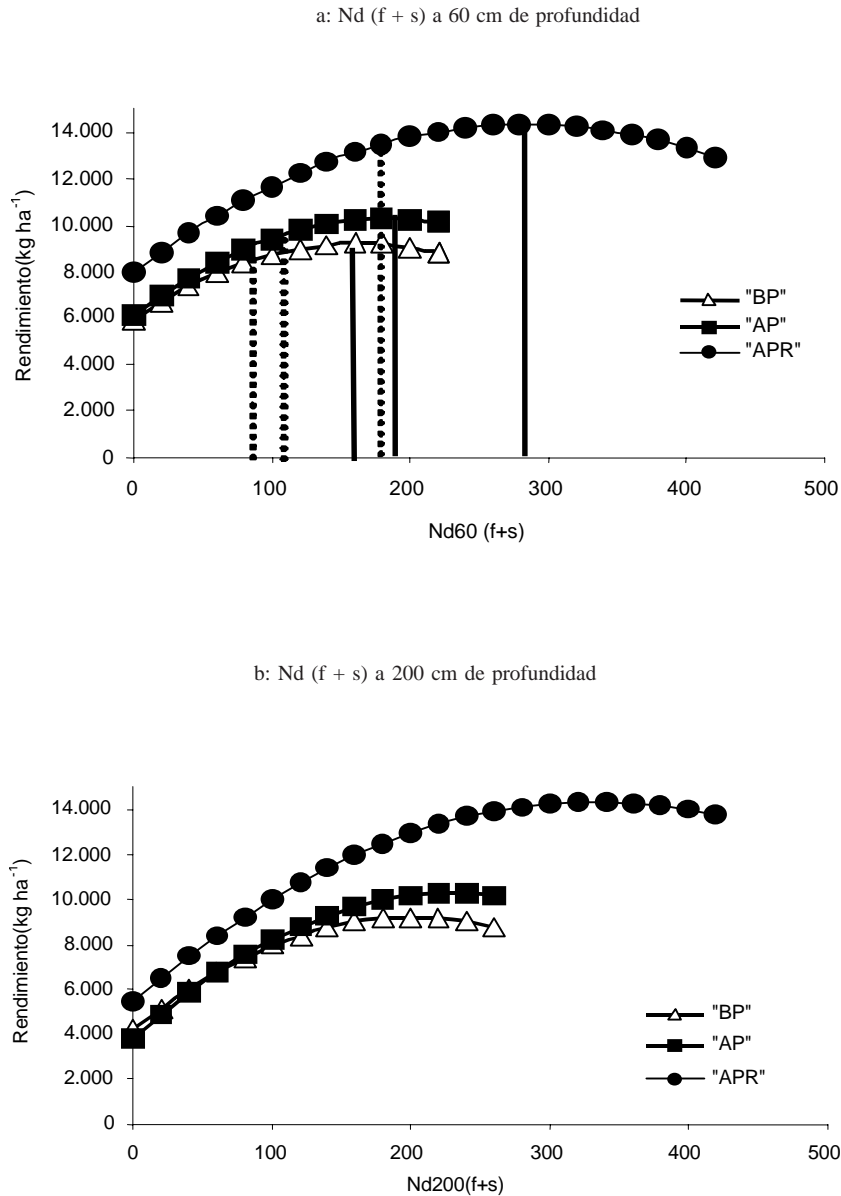


Figura 5. Curvas de respuesta estimada al N disponible al inicio (N del fertilizante + el N-NO<sub>3</sub> del suelo hasta 60 cm (5-a) o hasta 200 cm (5-b) de profundidad) y el agua útil al inicio hasta 200 cm de profundidad, según zonas de manejo (ZM) de secano de baja productividad (BP), de secano alta productividad (AP) y alta productividad con riego (APR) en un cultivo de maíz en Manfredi (Córdoba, Argentina). Se marcan las disponibilidades óptimas agronómicas (DOA) con (-) y disponibilidades óptimas económicas (DOE) (...) según zonas de manejo (ZM) para el Nd hasta 60 cm de profundidad.

Figure 5. Estimated crop response curves to initial supply of N (N fertilizer + soil N-NO<sub>3</sub> up to 60 cm (5-a) or 200 cm (5-b) of depth) and initial available water up to 200 cm of depth, according to management zones (ZM) of rainfed low productivity (BP), rainfed high productivity (AP) and high productivity with irrigation (APR) in a farm of maize production in Manfredi, (Córdoba, Argentina). The agronomic (-) and economic (...) optimal levels of nitrogen by management zones (ZM) for the Nd up to 60 cm of depth are also indicated.

una adecuada predicción del Nd para la recomendación de fertilización nitrogenada (Álvarez *et al.*, 2001). Gregoret *et al.*, (2006). encontraron que con contenidos de N-NO<sub>3</sub> determinados hasta 60 cm de profundidad se pueden predecir adecuadamente los contenidos de Nd en profundidad.

Las curvas de respuesta para las tres ZM consideradas, para Nd a 60 y 200 cm de profundidad se presentan en la Figuras 5a y 5b. A partir de esta relación se estimó el Nd óptimo agronómico (DOA) según la ecuación [7] considerando el Nd hasta 60 cm de profundidad y el AUI hasta 200 cm en cada ZM, dando como resultado 285, 184 y 162 kg ha<sup>-1</sup> para las ZM “APR”, “AP” y “BP”, respectivamente. Los cálculos de la DOE según la aplicación de la ecuación [10] resultaron en dosis de 171, 111 y 90 kg ha<sup>-1</sup> para las ZM “APR”, “AP” y “BP”, respectivamente (Fig. 5a).

Si bien el análisis de las curvas de respuesta es “*ex-post*”, la inclusión de parámetros tales como el agua y N iniciales, fáciles de obtener, aportarían información suficiente para predecir la respuesta del cultivo a la fertilización, sugiriendo su utilidad como método de diagnóstico para la determinación de la dosis de fertilizante a aplicar variable por ZM, construyendo a priori curvas de respuesta que permitan según la diferencia entre la disponibilidad de N objetivo (DOA o DOE) y la disponibilidad del suelo (N-NO<sub>3</sub>) de la campaña en cuestión (Álvarez *et al.*, 2003).

## CONCLUSIONES

Se concluye que la inclusión del agua y N inicial en un suelo Haplustol permitió la obtención de un único modelo de respuesta al N disponible en las diferentes zonas de manejo en secano, y en riego excluyendo el agua inicial como variable, dado que en este caso no fue factor limitante. Este modelo único fue obtenido utilizando como variables N inicial a 200 cm o a 60 cm y agua inicial hasta 200 cm. La aplicación de este modelo permitió la estimación de la disponibilidad óptima agronómica y económica distintas entre zonas de manejo, con variables iniciales relativamente sencillas de obtener, que justificarían la aplicación de recomendaciones de fertilización con dosis variable, lo que permitiría maximizar el beneficio económico y/o minimizar riesgos de contaminación del ambiente por la aplicación de sobredosis de insumos.

Se debe tener en cuenta que estas conclusiones son preliminares ya que son producto de un solo sitio experimental y de un solo año de estudio y no cubre el rango de todas las condiciones iniciales posibles. Creemos que es necesario contar en el futuro con mayor cantidad de

escenarios para validar el modelo propuesto, lo que esta contemplado en el trabajo de tesis de maestría del primer autor.

## APOYO FINANCIERO Y AGRADECIMIENTOS

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

## BIBLIOGRAFÍA

- Andrade, F; A Cirilo; S Uhart & ME Otegui. 1996. Ecofisiología del cultivo de maíz. 1º Ed. Buenos Aires. Editorial LaBarrosa, (Balcarce, Buenos Aires, Argentina.) 289 p.
- Álvarez, R; C Álvarez & H Steinbach. 2001. Predictions of available nitrogen content in soil profile depth using available nitrogen concentration in surface layer. *Commun. Soil Sci Plant Anal.* 32 (5&6), 759-769.
- Álvarez R. 2003. Recomendaciones para la fertilización nitrogenada de trigo y maíz en la pampa ondulada. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur* 18: 14-20.
- Anselin, L; R Bongiovanni & J Lowenberg-DeBoer. 2004. A spatial econometric approach to the economics of site-specific nitrogen management in corn production. *American Journal of Agricultural Economics* 86(3): 675-687.
- 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 23/08/004.
- Bachmeier OA & JL Dardanelli. 1991. Relaciones entre el límite máximo de agua útil determinado en campo y estimado en laboratorio. *En: Actas XIIIª Reunión Argentina de la Ciencia del Suelo.* San C. de Bariloche, Río Negro (Argentina)
- Blake, GR & KH Harge. 1986. Bulk Density. *In: A. Klute (ed.). Methods of Soil Analysis. Part 1 Physical and Mineralogical Methods* 2th Ed. Soil Science Society of America. Madison, WI (EUA).
- 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.
- Bragachini, M; A. Mendez & F Scaramuzza. 2004. Siembra de ensayos de maíz, año 2003/2004. Establecimiento “El Paraíso”, Pilar Córdoba. Informe Técnico de divulgación. Disponible en <http://www.agriculturadeprecision.org/articulos/articulos.htm> Consultado el 20/06/04.
- Bravo, O; N Amiotti; JPRhollausser & PZalva. 2004. Variabilidad de suelos y su incidencia en el rendimiento de trigo a nivel de predio. *Actas del XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo Paraná Argentina* (en CD).

- Bray RH & LT Kurtz. 1945. Determination of total, organic and available forms of phosphorous in soil. *Soil Sci.* 59: 39-45.
- Bremner, JM. 1996. Nitrogen-Total. In: DL Sparks (ed). *Methods of Soil Analysis. Part 3 - Chemical Methods.* Chapter 37. ASA, SSSA, CSSA, Madison WI (EUA), 1085-1121.
- Dardanelli, JL; OA Bachmeier; R Sereno & RC Gil. 1997. Potential soil water extraction parameters for several crops in a silty loam soil. *Field Crops Res.* 54: 29-38.
- Dampney, PMR & M Moore. 1998. Precision agriculture in England: Current practice and research-based advice to farmers. In: 4th International Conference on Precision Agriculture, July 19-22, 1998. St. Paul. MN (EUA). 661-674.
- Dillon, J & J Anderson. 1990. The analysis of response in crop and livestock production. Pergamon Press, New York (EUA), 250 p.
- Domínguez, GF; GA Studdert; HE Echeverría & FH Andrade. 2001. Sistemas de cultivo y nutrición nitrogenada en maíz. *Ciencia del suelo* 19(1): 47-56.
- González Montaner, JH; GA Maddonni & MR Di Napoli. 1997. Modeling grain yield and grain response to nitrogen in spring wheat crops in the Argentinean southern pampas. *Field Crop Research* 51: 241-252.
- Gregoret, MC; R Bongiovanni; J Dardanelli & M Díaz Zorita. 2006. Respuesta sitio-específica al nitrógeno en maíz en ambientes semiáridos. *Actas del XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo.* Salta (Argentina). p 338.
- Griffin, TW; J Brown & J Lowenberg-DeBoer. 2005. Yield monitor data analysis: data acquisition, management, and Analysis protocol. Department of Agricultural Economics Purdue University, West Lafayette, IN (EUA). Documento disponible en <http://www.agriculture.purdue.edu/ssmc/Frames/publications.html>. Consultado el 21/04/06.
- Hatfield, J. 2000. Precision Agriculture and Environmental Quality: Challenges for Research and Education. National Soil Tilth Laboratory, Agricultural Research Service, USDA, Ames, IA (EUA). Documento disponible en <http://www.arborday.org>. Consultado el 12/12/04.
- Jarsún, B; A Gorgas; E Zamora; E Bosnero; E Lovera & JL Tassile. 2003. Suelos -Nivel de reconocimiento 1:500.000. En: J Gorgas & JL Tassile (eds), *Recursos naturales de la Provincia de Córdoba.* Córdoba (Argentina), 23-60.
- Kuo, S. 1996. Phosphorus. In: DL Sparks (Editor), *Methods of Soil Analysis. Part 3 - Chemical Methods.* Chapter 32. ASA, SSSA, CSSA, Madison WI (EUA), 869-920.
- Luchiari, A Jr.; J Shanahan; D Francis; M Schlemmer; J Schepers; M Liebig, et al., 2000. Strategies for establishing management zones for site specific nutrient management. In: Proc. 5th International Conference on Precision Agriculture. Precision Agriculture Center, ASA, CSSA and SSSA, MN (EUA). En CD.
- Mamo, M; GL Malzer; DJ Mulla; DR Huggins & J Strock. 2003. Spatial and temporal variation in economically optimum nitrogen rate for corn. *Agron. J.* 95: 958-964.
- Mizzou-ARS 2000. (University of Missouri-Columbia & Agricultural Research Service of the United States Department of Agriculture). Management Zone Analyst Version 1.0.1. Programa disponible en <http://www.ars.usda.gov/services/software/download.htm>. Consultado el 28/09/04.
- Moore, ID; PE Gessler; GA Nielsen & GA Peterson. 1993. Terrain analysis for soil specific crop management. In: PC Robert et al. (ed) *Soil specific crop management. A workshop on research and development issues.* ASA, CSSA, SSSA, Madison, WI (EUA), p. 27-55.
- Mulvaney, RL 1996. Nitrogen - Inorganic Forms. In: DL Sparks (ed). *Methods of Soil Analysis. Part 3 - Chemical Methods.* Chapter 38. ASA, SSSA, CSSA, Madison WI (EUA) 1123-1184.
- Nelson, DW & LE Sommers. 1996. Total carbon, organic carbon, and organic matter. In: DL Sparks (ed), *Methods of Soil Analysis. Part 3 - Chemical Methods.* Chapter 34. ASA, SSSA, CSSA, Madison WI (EUA), 961-1010.
- Pierce, FJ & P Nowak. 1999. Aspects of precision agriculture. In: D Spark (ed) *Advance in Agronomy Academic Press* 67: 1-85.
- 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.
- Ruffo, M & A Parsons. 2004. Cultivos de cobertura en sistemas agrícolas. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur* N° 21: 13-16.
- Siqueira, G; RG Grego; S Vieira; & M Ceddia. 2006. Variabilidad espacial y temporal de la permeabilidad del suelo en el cultivo de *Triticale* en sistemas de siembra directa. *Actas del XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo.* Salta (Argentina). p. 179.
- SST Development Group, Inc. 2006. 824N Country Club Rd. Stillwater, OK (EUA) [www.SSTsoftware.com](http://www.SSTsoftware.com)
- Thomas, E. 2001. Evolución de carbono orgánico edáfico en las series Hansen y General Baldissera bajo agricultura continua. Aplicación de un modelo de simulación. *Tesis de especialista.* Programa de Especialización "Procesos de los nutrientes y manejo de la fertilización de los cultivos" (Convenio FundAACREA-UIB). Área de Postgrado en Producción Vegetal. Facultad de Ciencias Agrarias - Universidad Nacional de Mar del Plata. Estación Experimental Agropecuaria de Balcarce-INTA. Balcarce (Argentina) 43 pp.
- Viglizzo, E. 2005. La sustentabilidad de los sistemas de producción ante la expansión agrícola. *Jornada de Soja 2005 con sustentabilidad,* Córdoba (Argentina). p.6-10.
- Vieira, SR; CR Grego; GM Siqueira; FM Miguel & FA 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.
- Western, AW; RB Grayson; G Blöschl; GR Willgoose & TA McMahon. 1999. Observed spatial organization of soil moisture and its relation to terrain indices. *Water Resour. Res.* 35: 797-810.
- Zubillaga MM; PA Cipriotti & MJ Barros. 2006a. Asociaciones espaciales entre el N mineralizado y otras variables edáficas a nivel de lote. *Actas del XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo.* Salta (Argentina). p. 247.
- Zubillaga MM; M Carmona; A Latorre; M Falcon & MJ Barros. 2006b. Estructura espacial de variables edáficas a nivel de lote en Vedia-Provincia de Buenos Aires. *Actas del XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo.* Salta (Argentina). p.288.