



“Latinoamérica unida protegiendo sus suelos”

XIX CONGRESO LATINOAMERICANO DE LA CIENCIA DEL SUELO

XXIII CONGRESO ARGENTINO DE LA CIENCIA DEL SUELO

Mar del Plata, Argentina – 16 al 20 de abril de 2012
contribuciones@congresodesuelos.org.ar

DOSIFICACION VARIABLE DE NITROGENO EN MAIZ SEGUN EL INDICE TOPOGRAFICO COMPUESTO

Espósito *G. ¹; W. Robledo ²; R. Bongiovanni ³⁻⁴; M. Ruffo ⁵ & G. Balboa ¹

¹ Fac. Agronomía y Veterinaria, Univ. Nac. de Río Cuarto; ² Fac. de Ciencias Agrarias, Univ. Nac. de Córdoba; ³ Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Católica de Córdoba; ⁴ INTA, EEA Manfredi; ⁵ University of Illinois

* Autor de contacto: gesposito@ayv.unrc.edu.ar; Ruta Nacional 36, km 601, 5800-Río Cuarto, Córdoba, Argentina; 54-358-467650

RESUMEN

Con mapas digitales de elevación (DEM) se pueden determinar atributos espaciales de terreno. El objetivo del trabajo fue generar y evaluar a campo un método de dosificación variable de N que incluya el índice topográfico compuesto (CTI), para ello se utilizaron datos de ensayos de fertilización nitrogenada realizados entre 1998 y 2006 y distribuidos en el oeste de Córdoba. En cada uno se determinó el DEM con DGPS. Se utilizó un modelo econométrico mixto espacial (MEME) que considera variables de efectos fijos (N y CTI) y de efectos aleatorios (localidad y año). Durante 2010/11 se evaluó éste modelo a campo, realizando un nuevo experimento de dosificación variable ajustado por CTI, sobre un lote de producción dividido en dos zonas de manejo, AP (alta producción) y BP (baja producción). Los resultados indican que la función de producción, estimada con el modelo MEME, fue estadísticamente significativa con un ajuste del 86,12%. La evaluación a campo determinó que las DOEN obtenidas a cosecha por zona de manejo (ex post) fueron de 64,05 y 42,57 kg ha⁻¹ (AP y BP), mientras que el promedio de las DOEN determinadas con el modelo MEME (ex antes) fueron de 60,00 y 46,84 kg N ha⁻¹ (AP y BP), lo cual implica una diferencia del -6,32 % y 10,03% respecto de las primeras. Por lo tanto se concluye que el uso del modelo MEME propuesto, para la dosificación variable de N, presentó un adecuado grado de ajuste resultando conveniente ampliar su validación a campo con nuevos experimentos.

PALABRAS CLAVE

sitio-específico; rendimiento; mapas

INTRODUCCIÓN

En el oeste de Córdoba (Argentina), la condición hídrica de los cultivos depende fuertemente del relieve del suelo, como consecuencia de la distribución espacial del agua. De este modo el rendimiento de maíz, queda fuertemente determinado por la topografía del terreno (Cantero *et al.*, 1999). A su vez, en esta región se destaca que la respuesta al agregado de nitrógeno en maíz es afectada por la disponibilidad hídrica durante su estación de crecimiento (Espósito *et al.*, 2006).

La topografía de los lotes de producción puede ser modelada a través de mapas digitales de elevación (DEM), los cuales son herramientas de disponibilidad creciente en la agricultura Argentina, como consecuencia del aumento de maquinaria de agricultura de precisión provistas con GPS (MINAGRI, 2011). A partir de estos DEM se pueden determinar atributos espaciales de

terreno (AE) mediante el empleo de sistemas de información geográfica (Tarboton, 1997), los cuáles pueden relacionarse con los mapas de rendimiento de los cultivos (Ruffo *et al.*, 2006).

Espósito *et al.* (2010) han encontrado, en el oeste de Córdoba, que entre los distintos AE evaluados el índice topográfico compuesto es uno de los más apropiados a utilizar en esa región por estar asociado al movimiento superficial del agua. Además, estos autores han definido que la inclusión de variables sitio específica como el CTI, permitirían mejorar el ajuste de la función de producción del maíz dependiente de la fertilización nitrogenada.

Como estos atributos se determinan a una escala espacial similar a los mapas de rendimiento (Ruffo *et al.*, 2006), se pueden generar funciones de producción de maíz que incluyan el efecto del CTI y su interacción con la fertilización nitrogenada, de tal forma que la optimización económica de la dosis de N también dependa de las características del relieve.

Por lo tanto, el objetivo del presente trabajo fue generar y evaluar a campo un método de dosificación variable de N que incluya el CTI.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se utilizaron datos de fertilización nitrogenada realizados entre 1998 y 2006, bajo siembra directa en la Provincia de Córdoba. La zona de experimentación abarca un área desde la localidad de Río Primero al Norte y Alejandro Roca al Sur (200 km) y entre Manfredi y Alta Gracia (100 km). En esta zona se realizaron un total de doce ensayos, los cuáles fueron identificados para este trabajo mediante numeración correlativa del 1 al 12 (Bomgiovanni 2002 y proyecto PICTO-INTA 12931). La codificación de los ensayos fue 1-2 en Manfredi, 3-4 en Bengolea, 5-9-10 en Alejandro, 6 en Río Cuarto, 7 en Alta Gracia, 8 en Río Primero y 11-12 en Las Peñas Sud. En cada ensayo se probaron entre 4 y 6 dosis de N y un testigo sin fertilizar, alcanzando el máximo un rango de 125 – 225 kg N ha⁻¹. La fuente de N fue urea aplicada en 4°-6° hoja. Los datos de rendimiento fueron recolectados con monitor de rendimiento y georeferenciación mediante GPS. En cada ensayo se determinaron mapas digitales de elevación de terreno mediante DGPS, los cuales fueron interpolados en una grilla regular de 9 m usando el comando TOPOGRID de ArcGIS (ESRI, 2007) para generar un mapa digital de elevación (DEM). A partir de este último, se calculó el índice topográfico compuesto (CTI), empleando la ecuación $CTI = \ln(SCA/\tan(\text{slope}))$, donde SCA es el área de cuenca específica y slope es la pendiente obtenidos mediante la herramienta TAUDEM de ArcGIS (Tarboton, 1997).

Con los mapas de rendimiento de los ensayos de fertilización nitrogenada, enumerados anteriormente, se procedió a estimar los parámetros de la función de producción del maíz dependiente de la dosis de N y del CTI planteada en la ecuación I.

$$RTO = \beta_0 + \beta_1 N + \beta_2 N^2 + \beta_3 CTI + \beta_4 CTIN \quad [I]$$

Donde RTO es el rendimiento de maíz, N son las dosis de nitrógeno, $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$ y β_4 , son los parámetros. CTI es el índice topográfico compuesto y CTIN es el efecto interactivo de la dosis de N con CTI. Los parámetros β_{0-4} fueron estimados mediante máxima verosimilitud utilizando un modelo econométrico mixto espacial (MEME) que considera variables de efectos fijos (dosis de N y atributos de terreno) y variables de efectos aleatorios (localidad y año), ecuación II.

$$Y = X\beta + Zb + \varepsilon \quad [II]$$

Donde, X y β , son la matriz de incidencia y el vector de parámetros de factores de efectos fijos, Z y b , son la matriz de incidencia y el vector de factores de efectos aleatorios, ε es el vector de errores aleatorios que asume la forma $\lambda W\varepsilon + \mu$, donde μ es el error de muestreo aleatorio con una especificación auto regresiva espacial (SAR) y coeficiente autoregresivo λ . La matriz de ponderadores espaciales (W) tiene una estructura Queen de 8 vecinos. Los coeficientes del

modelo fueron estimados empleando el programa de estadística R (R Development Core Team, 2011), al 1% de probabilidad. La generación de un modelo mixto que incluya el efecto año y localidad como factores de efectos aleatorios, permite obtener parámetros que pueden ser empleados en otros años y localidades y así, generar recomendaciones de fertilización para otras campañas agrícolas y/o en otros sitios (pertenecientes a la población evaluada).

El cálculo de la dosis óptima económica de N, se realizó una optimización tradicional de las funciones de respuesta de tipo cuadrática (Dillon & Anderson, 1990) según las ecuaciones III y IV:

$$\pi = py(\beta_0 + \beta_1N + \beta_2N^2 + \beta_3CTI + \beta_4CTIN) - pN - F \quad [III]$$

$$DOEN = \frac{\left(\frac{pN}{py}\right) - \beta_1 - \beta_4CTI}{2\beta_2} \quad [IV]$$

Donde, py : precio del maíz (\$ kg⁻¹), pN : precio del nitrógeno elemental (urea) (\$ kg⁻¹), F : son los costos fijos. Los precios utilizados de maíz y nitrógeno fueron de 0,504 y 4,185 \$ kg⁻¹ respectivamente.

Evaluación a campo

Durante la campaña 2010/11 se evaluó el modelo MEME a campo, realizando un nuevo experimento de dosificación variable ajustado por CTI. Para ello se eligió un lote de producción, previamente zonificado por mapas de rendimiento de años anteriores en dos zonas de manejo, AP (alta producción) y BP (baja producción). En AP la productividad media fue un 6,64% superior al promedio del lote con un CV (%) del 7,57%, mientras que en BP la productividad fue un 7,49% inferior a la media con un 11,78% de CV. En este sitio se probaron cuatro franjas fijas de N cruzando zonas de manejo (0, 59, 119 y 178 kg N ha⁻¹) y una dosis de N variable según modelo MEME. El diseño experimental fue en bloques completos aleatorios con 3 repeticiones espaciales por tratamiento (Figura 1).

Con las franjas fijas se estimó una función de producción por zonas de manejo (Bongiovanni, 2002), la cual permitió obtener la dosis económicamente óptima de nitrógeno (DOEN) por zona. Estas dosis se calculan a cosecha (ex post), mientras que el promedio de dosis variable por zona de manejo, dependiente del CTI (modelo MEME), fue calculada antes de la siembra del maíz (ex antes). La diferencia entre dosis observada y simulada por zona se utilizó como grado de ajuste del modelo propuesto.

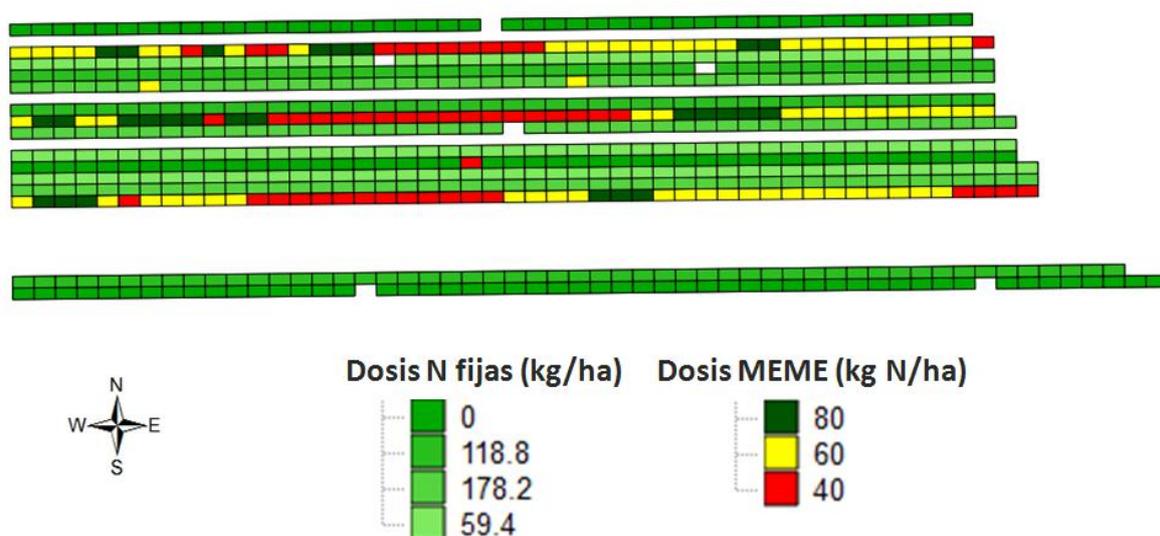


Figura 1. Plano del ensayo a campo con dosis de N fijas en franjas y dosis variable según el MEME (Modelo econométrico mixto espacial).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Determinación de la función de producción según CTI (modelo MEME)

La función de producción del maíz en relación a las dosis de N y su interacción con el CTI presentó parámetros estadísticamente significativos al 1% de probabilidad, como se puede observar en la Tabla 1. Además, este análisis explica que los datos de rendimiento tienen una estructura espacial dada por el valor del coeficiente autor regresivo espacial ($\lambda=0,93$) y su nivel de significancia (menor al 1% de probabilidad). Estos resultados coinciden con los encontrados por Bongiovanni (2002), puesto que el análisis de datos de rendimiento proveniente de los monitores de las máquinas cosechadores presenta autocorrelación espacial y heterocedasticidad.

Tabla 1. Análisis de regresión espacial del rendimiento de maíz según dosis N, CTI e interacción N por CTI

	Parámetros	p-valor
Intercepto (β_0)	6617	<0,001
N (β_1)	15,95	<0,001
N ² (β_2)	-0,025	<0,001
CTI (β_3)	47,89	<0,001
CTIN (β_4)	-0,63	<0,001

β_0 , β_1 , β_2 , β_3 y β_4 , son los parámetros del modelo MEME. CTI, índice topográfico compuesto

Es importante destacar que el parámetro β_3 presentó signo positivo, lo cual permite interpretar que los sitios con mayores valores de CTI aumentan el rendimiento del maíz a razón de 47,89 kg ha⁻¹ por cada unidad del AE. Este efecto puede atribuirse a que los sitios con mayor CTI son sectores de acumulación hídrica en la toposecuencia. Similares resultados fueron encontrados por Ruffo *et al.* (2006) en Illinois (EEUU).

Por el contrario, la interacción entre el CTI y la respuesta al N (parámetro β_4) es negativa, lo cual sugiere que en los sitios con mayor índice la dosis de N a aplicar debiera ser inferior, posiblemente por una mayor disponibilidad nutricional de estos sitios.

Finalmente, se destaca que el ajuste obtenido con el modelo MEME fue del 86,12%, entre valores observados y simulados de rendimiento (Figura 2). A partir de esta función de producción se procedió a establecer la dosis óptima económica de N según la relación de precios y el valor de CTI (ecuación V).

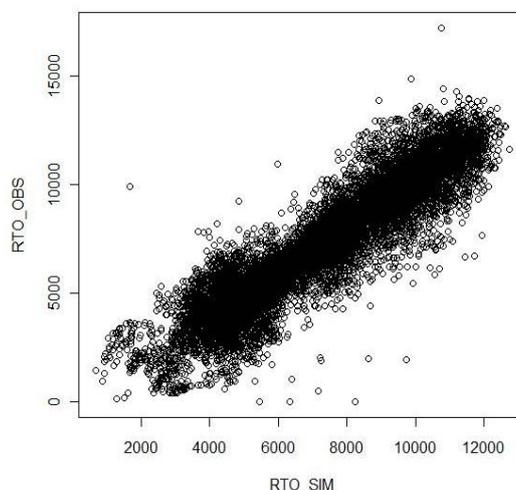


Figura 2. Relación entre el rendimiento observado a campo (RTO_OBS) y el rendimiento simulado (RTO_SIM) con el modelo MEME (Modelo econométrico mixto espacial).

$$DOEN_{CTI} = \frac{\left(\frac{P_N}{P_{MAIZ}} \right) - 15.95 + 0.6273CTI}{-0.0506} \quad [V]$$

Evaluación a campo de la DOEN según CTI (modelo MEME)

Los valores de CTI determinados en el lote de producción oscilaron entre 2,62 y 29,87. En las franjas donde se realizó el ensayo los mismos fueron entre 4,73 y 13,08. A los fines operativos de la maquinaria disponible se propuso dividir la población de valores de CTI en tres cuantiles, con valor central en 5,5 – 7,0 – 9,5, para el tercil inferior, medio y superior, respectivamente. Finalmente, con la una relación de precios de 8,30 (4,185 \$ kg⁻¹ de N sobre 0,504 \$ kg⁻¹ de maíz) se calcularon tres dosis de N, a saber: 40 – 60 – 80 kg N ha⁻¹ (Figura 1). Estas dosis fueron distribuidas espacialmente según las características de CTI, las cuales promediaron por zona de manejo 60,00 y 46,84 kg N ha⁻¹, en la zona AP y BP, respectivamente

Las funciones de producción por zonas de manejo, obtenida luego de la cosecha del maíz, a partir de franjas fijas de fertilización nitrogenada cruzando ambientes, fueron estadísticamente diferentes entre zonas, según puede observarse en la Tabla 2.

Tabla 2. Parámetros de la función de producción por zona de manejo.

Zona de Manejo	Parámetros	SE
AP	β_0	9395 **
	β_1	14,47 **
	β_2	-0,05 **
BP	β_0	9210 **
	β_1	11,95 **
	β_2	-0,04 **

AP y BP, alta y baja productividad. SE, significancia estadística. $\beta_0, \beta_1, \beta_2$, parámetros de la función de producción

Los rendimientos de maíz obtenidos en las franjas fertilizadas con el modelo MEME fueron de 10869 y 9463 kg ha⁻¹ (AP y BP), mientras que los rendimientos estimados con las funciones por zonas de manejo (Tabla 2), fueron de 10124 y 9650 kg ha⁻¹ (AP y BP), lo cual implica diferencias entre el 7,35% ó -1,93% entre métodos de cálculo de dosificación óptima (Figura 2)

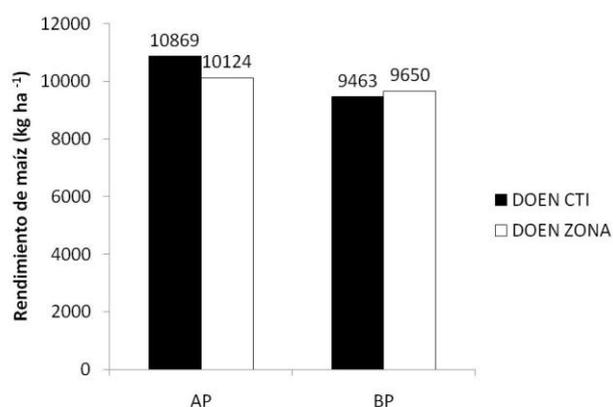


Figura 3. Rendimientos de maíz (2010/11) obtenidos con el modelo econométrico mixto espacial (barras negras) y con las funciones de producción por zonas de manejo (barras blancas), en zonas AP y BP (alta y baja productividad).

Las DOEN determinadas (ex post), mediante el uso de las funciones de producción por zona de manejo (Tabla 2), fueron de 64,05 y 42,57 kg ha⁻¹, para AP y BP respectivamente, mientras que las dosis definidas con el modelo MEME (ex antes), fueron de 60,00 y 46,84 kg N ha⁻¹. De

este modo, las diferencias entre ambos métodos de dosificación fueron un 6,32 % inferior y un 10,03% superior para AP y BP, respectivamente.

Esta similitud entre dosis óptimas de N, permite suponer que el modelo propuesto presenta un adecuado grado de ajuste con la ventaja de establecerse previo a la aplicación de fertilizantes. No obstante se resalta la importancia de extender esta evaluación hacia otras localidades y/o años para validar esta metodología.

CONCLUSIONES

La función de producción generada mediante el modelo MEME que incluye al índice topográfico compuesto (CTI) explicó en un 86% los rendimientos de maíz obtenidos en 12 experimentos de fertilización con N.

La evaluación a campo de este modelo permitió definir la DOEN variable con una diferencia menor al 10% en relación a la dosificación óptima calcula a la cosecha del maíz. Por lo tanto, sería conveniente ampliar su validación a campo con nuevos experimentos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a los Ing. Agr. Martín Artigue, Federico Espina y Martín Cavanagh por su apoyo incondicional para el desarrollo de este trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

- Bongiovanni, R. 2002. A Spatial Econometric Approach to the Economics of Site-Specific Nitrogen Management and Corn Production. PhD Dissertation, Department of Agricultural Economics, Purdue University, West Lafayette, IN.
- Cantero A; EM Bricchi; J Cisneros; V Becerra & H Gil. 1999. Un índice de aptitud relativa de tierras con fines catastrales. Aplicación al Departamento Río Cuarto (Córdoba, Argentina). *Invest. Agr.: Prot. Veg.* Vol 14 (1-2):259-272.
- Dillon, J & J Anderson. 1990. The analysis of response in crop and livestock production. Pergamon Press, New York (EUA), 250 p.
- Espósito GP; W Robledo; R Bongiovanni; M Ruffo & G Balboa. 2010. Manejo sitio específico del nitrógeno ajustado por atributos espaciales del terreno. XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Rosario. Santa Fe. Argentina.:140.
- Espósito, G; C Castillo & R Balboa. 2006. Calibración y validación de un método de diagnóstico de fertilización nitrogenada en maíz para el sur de Córdoba (Argentina). *Revista de Investigación Agraria. RIA*, 35(3):45-63.
- ESRI, 2007. ArcMap ver. 9.2. ESRI, Redlands, CA, USA.
- MINAGRI. 2011. Red Agricultura de precisión. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca. Actualización técnica N° 9. 15 pp.
- R Development Core Team (2011). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL. <http://www.R-project.org/>.
- Ruffo M; G Bollero, DS Bullock & DG Bullock. 2006. Site-specific production functions for variable rate corn nitrogen fertilization. *Precision Agric.* 7:327-342.
- Tarboton DG. 1997. A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. *Water Resources Research.* 33(2):. 309–319.