



“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

ANÁLISIS DEL EFECTO AÑO SOBRE LA DOSIS VARIABLE DE NITROGENO EN MAÍZ

Espósito, G.^{1,*}; Robledo, W.^{2,3}; Bongiovanni, R.^{3,4}; Ruffo, M.⁵; Diez, E.¹; Balboa, G.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, Río Cuarto (5800), Córdoba, Argentina; 54-358-4676504

RESUMEN

El ajuste de dosis nitrogenadas económicamente óptimas (DOE) se relaciona con la función de producción, la cual es afectada por la disponibilidad hídrica del maíz. El objetivo de este trabajo fue evaluar la interacción entre el efecto año, por las precipitaciones septiembre-febrero, con la función de respuesta a la fertilización nitrogenada por ambiente en maíz y con ello evaluar modificaciones en la dosis variable, económicamente óptima, empleando estadística espacial. A partir de ensayos de fertilización nitrogenada en el sur de Córdoba en dos campañas, se construyeron funciones de producción por ambiente a través de análisis de regresión espacial con las dosis de N como variable independiente y el rendimiento de maíz como variable dependiente. Para obtener la DOE se realizó una optimización tradicional de las funciones de respuesta de tipo cuadrática. Se calculó la eficiencia de uso de nitrógeno (EUN) a través de la Eficiencia Agronómica para relacionar la respuesta en rendimiento con la cantidad de nutriente aplicado y compararlo con la relación de precios insumo/producto considerada. Los resultados muestran que para las campañas secas la DOE para cada zona de manejo es menor que para las mismas en las campañas húmedas y los valores de EUN demuestran una variación que acompaña el cambio en la condición hídrica entre campañas y cambios en el tipo de suelo entre sitios. Se concluye que las precipitaciones septiembre-febrero interactúan significativamente con los parámetros lineales y cuadráticos de la función de respuesta a la fertilización nitrogenada por ambiente.

PALABRAS CLAVE

clima; fertilización; sitio-específico

INTRODUCCIÓN

El nitrógeno (N) es uno de los insumos de mayor impacto en el resultado económico de la producción de maíz en Argentina, además de ser un nutriente móvil dentro del suelo y ser esencial para optimizar el rendimiento de grano. Debido a la variabilidad edáfica espacial intra lote, la aplicación de N en forma uniforme puede resultar en un exceso de N en algunos sitios, mientras sea escaso en otros puntos del mismo terreno (Scharf *et al.*, 2005). El uso de la fertilización diferencial por zonas de manejo (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). El ajuste de dosis nitrogenadas económicamente óptimas se relaciona con la función de producción, la cual es afectada por la disponibilidad hídrica del maíz (Espósito *et al.*, 2006). Gregoret *et al.* (2006) sugieren que los contenidos de agua del suelo en condiciones de secano afectan los rendimientos alcanzados en forma directa por su disponibilidad para el cultivo e

indirectamente por sus efectos sobre procesos del ciclo del N. Por ello, para la determinación de la dosis económicamente óptima, estos autores, han propuesto modelos que incluyen la disponibilidad hídrica inicial del cultivo. Estas argumentaciones, explican el comportamiento diferencial del maíz ante diferencias en la disponibilidad de agua de cada campaña, especialmente en las etapas en donde se definen los principales componentes del rendimiento (Salvagiotti *et al.*, 2002). Por otro lado, 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). No obstante, al momento de elaborar la función de producción se puede corregir esta limitación con métodos de estadística espacial o geoestadística (Bongiovanni 2002, Griffin *et al.*, 2005). En este sentido, el objetivo de este trabajo fue evaluar la interacción entre el efecto año, por sus características hídricas, con la función de respuesta a la fertilización nitrogenada por ambiente en maíz y con ello evaluar modificaciones en la dosis variable, económicamente óptima, empleando estadística espacial.

MATERIALES Y MÉTODOS

Los datos utilizados provienen de ensayos de fertilización nitrogenada, sembrados en fecha temprana (fines de Septiembre a principios de Octubre) bajo condiciones de secano, en cercanías a cuatro localidades del centro-sur de Córdoba: Chaján, Las Vertientes (Departamento Río Cuarto) Bengolea y Alejandro Roca (Departamento Juárez Celman). Se realizaron durante dos campañas agrícolas, entre 2008/09 y 2009/10, haciendo un total de 8 ensayos. En cada uno se probaron entre 3 y 7 dosis de N, alcanzando el máximo un rango de 115 – 300 kg N ha⁻¹. La fuente de N fue urea aplicada con incorporación en 6° hoja.

De acuerdo a las precipitaciones (PP) ocurridas entre los meses de Septiembre a Febrero se clasificó a las campañas como secas o húmedas si el índice de precipitaciones (IPP, ecuación 1) para ese período arrojaba valores un 10% por debajo o 10% por encima del promedio histórico de cada localidad respectivamente. De este modo se registraron cuatro ensayos bajo condición hídrica seca y cuatro bajo húmeda (Tabla 1).

$$IPP(\text{Sep} - \text{Feb}) = \frac{PP \text{ campaña}}{PP \text{ media Sep} - \text{Feb}} \quad [1]$$

Tabla1. Clasificación de los ensayos según condición hídrica de cada campaña.

| Sitio | Campaña | Condición |
|----------------|-----------|-----------|
| Bengolea | 2008/2009 | Húmedo |
| Bengolea | 2009/2010 | Seco |
| Chaján | 2008/2009 | Húmedo |
| Chaján | 2009/2010 | Seco |
| Alejandro | 2008/2009 | Húmedo |
| Alejandro | 2009/2010 | Húmedo |
| Las Vertientes | 2008/2009 | Seco |
| Las Vertientes | 2009/2010 | Húmedo |

De acuerdo a lo propuesto por Inman *et al.* (2005) el ajuste de las dosis económicamente óptima puede ser determinado por zonas de manejo sectorizadas mediante análisis de la productividad espacial. En cada ensayo se realizó una zonificación ambiental a nivel de lote en zonas de manejo (ZM), empleando para ello mapas de rendimiento de al menos tres campañas anteriores y el índice topográfico compuesto (CTI, ecuación 2) obtenido de mapa digital de elevación proveniente de un GPS diferencial (DGPS) (Tarboton, 1997).

$$CTI = \ln \left(\frac{SCA}{slope} \right) \quad [2]$$

donde SCA: área de cuenca específica, slope: pendiente.

Los datos de rendimiento fueron recolectados con monitor de rendimiento y georeferenciados mediante GPS. La zonificación se realizó empleando el programa de computación Management Zone Analyst (MZA), el cual divide al campo en grupos naturales a partir de clasificaciones o número de zonas especificados, mediante la elaboración de dos índices el FPI (índice de borrosidad) y el NCE (clasificación entrópica normalizada) mediante un análisis clúster (Fridgen *et al.*, 2004).

El diseño experimental utilizado en cada ensayo fue en bloques completos aleatorizados con tres repeticiones espaciales por tratamiento. El tipo de diseño fue en franjas atravesando zonas de manejo delimitadas previamente, consistiendo los tratamientos en dosis crecientes de fertilización nitrogenada (constante para cada franja) y un testigo sin fertilización.

Análisis estadístico

Las funciones de producción por ambiente se construyeron a través de análisis de regresión espacial con las dosis de N como variable independiente, mientras que rendimiento de maíz, la variable dependiente. Los parámetros del modelo se estimaron mediante máxima verisimilitud, considerando todas las variables como de efectos fijos. El análisis estadístico espacial de los datos emplea el modelo de error espacial, en el cual la variable dependiente no está correlacionada por sí misma sino que es el error de muestreo aleatorio el correlacionado, según la ecuación 3:

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

Donde μ es el error de muestreo aleatorio con una especificación auto regresiva espacial (SAR) y coeficiente " λ ". La matriz " W " de ponderadores espaciales tiene una estructura "Queen" de 8 vecinos, estandarizada por fila. Los coeficientes del modelo son estimados empleando el programa de estadística espacial OpenGeoDA 0.9.9.6 (Anselin, 2011). El desarrollo del modelo en cada experimento fue un polinomio de 2º grado para la dosis de N, en cada zona de manejo las cuáles fueron incorporadas al mismo mediante variables dummy. En el análisis de los datos propiamente dicho, se modeló la respuesta al N del fertilizante (Nf) por cada ZM según la ecuación 4:

$$Y_{ij} = \beta_0 + \beta_1 Nf + \beta_2 Nf^2 + \beta_3 ZM + \beta_4 Nf \times ZM + \beta_5 Nf^2 \times ZM + \varepsilon_{ij} \quad [4]$$

donde Y_{ij} es el rendimiento del maíz (kg ha^{-1}) por cada punto ij del monitor de rendimiento, β_0 , β_1 , β_2 , β_3 , β_4 y β_5 , son los parámetros de la ecuación de regresión, Nf es la dosis de fertilizante (kg ha^{-1}), ZM se refiere a las variables "dummy" para zonas de manejo, y ε_{ij} 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 que la estimación del efecto de las diferentes ZM dentro del lote y de los términos de la interacción con la dosis Nf puedan ser comparados con la respuesta media (Bongiovanni, 2002).

Optimización de las funciones

Para obtener en cada ZM las dosis óptimas económicas (DOE) o cantidad de N necesaria para alcanzar el máximo retorno económico al fertilizar, se realizó una optimización tradicional de las funciones de respuesta de tipo cuadrática (Dillon & Anderson, 1990) según las ecuaciones 5 y 6:

$$\pi = py(\alpha + \beta N + \gamma N^2) - pN N - F \quad [5]$$

$$DOE = \frac{\left(\frac{pN}{py} \right) - \beta}{2\gamma} \quad [6]$$

donde, p_y : precio del maíz ($\$ \text{ kg}^{-1}$), p_N : precio del nitrógeno elemental (urea) ($\$ \text{ kg}^{-1}$), F : son los costos fijos. Los precios utilizados de maíz y nitrógeno fueron de 0,417 y 3,461 $\$ \text{ kg}^{-1}$ respectivamente, en moneda constante Enero 2002 – Octubre 2009, ajustado por el índice de precios internos al por mayor (IPIM) nivel general (AACREA, 2011).

Esta optimización debe ser interpretada como el punto de equilibrio en el que el valor del producto obtenido es igual al costo de la última unidad de insumo agregada, de modo que el uso de una menor cantidad de insumo estaría sobre pagando ese insumo, y que una mayor cantidad de insumos no alcanzaría a cubrir su costo (Bongiovanni & Lowenberg-Deboer, 2006).

Eficiencia de uso de nitrógeno

Si bien la eficiencia puede ser estudiada desde los rendimientos de los cultivos, la recuperación en planta y la extracción de nutrientes por el sistema, Dobermann (2007) y Snyder & Bruulsema (2007) han descrito varios índices agronómicos útiles para describir la eficiencia de uso de los nutrientes para diversas situaciones. De ellos, en este trabajo se utilizó la eficiencia agronómica (EA). La EA es un índice utilizado frecuentemente que incluso permite una rápida evaluación económica de la práctica de fertilización, ya que relaciona la respuesta en rendimiento con la cantidad de nutriente aplicado, el que a su vez puede compararse con la relación de precios insumo/producto. Para el cálculo de la EA se utilizó la ecuación 7:

$$EUN = \frac{R - R_0}{D} \quad [7]$$

donde: EUN: eficiencia de uso de nitrógeno ($\text{kg}_{\text{grano}} \text{ kg N}^{-1}$), R: rendimiento en grano fertilizado (kg ha^{-1}), R_0 : rendimiento en grano sin fertilizar (kg ha^{-1}), D: dosis de fertilizante usada en para R (kg ha^{-1})

En este trabajo se utilizó la dosis óptima económica como parámetro “D” de la ecuación 7.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Del proceso de zonificación realizado mediante el MZA se estableció la presencia de dos zonas claramente definidas en los 8 sitios experimentales, AP (alta producción) y BP (baja producción).

Los resultados del cálculo de función de producción y dosis óptimas económicas para cada sitio y ambiente se presentan en la Tabla 2. Los valores de DOE máximos se obtuvieron en Las Vertientes 2009/2010 con 134 y 119 kg N ha^{-1} para las zonas BP y AP, respectivamente. La única campaña para la cual se obtuvieron DOE iguales a cero fue Chaján 2009/10 en ambas zonas, siendo ésta una campaña considerada seca. En este sentido, se puede apreciar cómo, para las campañas secas, es decir, en Bengolea 2009/2010, Chaján 2009/2010 y Las Vertientes 2008/2009, la DOE para cada zona de manejo es menor que para las mismas en las campañas húmedas. El efecto más marcado se evidencia en la zona BP de Las Vertientes, donde se pasa de una DOE=0 para el año seco a una DOE de 134 kg ha^{-1} para el año húmedo. Alejandro Roca es un caso especial, puesto que, a pesar de haber resultado ser ambas campañas húmedas, la campaña 2008/2009 recibió 170 mm más de precipitaciones que 2009/2010.

Para los casos en donde la DOE se hace igual a cero se interpreta que la respuesta en rendimiento del cultivo al agregado de nitrógeno, teniendo en cuenta la relación de precios nitrógeno/maíz utilizada, no es suficiente para pagar los costos de aplicación del fertilizante.

En la Tabla 2 también se incluyen los valores de EUN para cada sitio, campaña y zona de manejo. Dado que la DOE fue utilizada como el parámetro “D” para el cálculo de la EUN, para las situaciones en las que la primera es cero, la última arroja un valor nulo. Para los demás casos, se puede apreciar cómo los valores de EUN demuestran una variación que acompaña el cambio en la condición hídrica entre campañas y cambios en el tipo de suelo entre sitios. También se destaca la influencia del parámetro lineal de la función de producción sobre el valor de EUN en

cada situación. Las cifras obtenidas caen dentro del rango de 10 a 30 kg_{grano} (kg N)⁻¹ y están de acuerdo a lo propuesto por Snyder & Bruulsema (2007).

Tabla 2. Funciones de producción de maíz, dosis de N económicamente óptima (DOE) (kg ha⁻¹) por zonas de manejo (ZM) de baja (BP) y alta (AP) producción y eficiencia en el uso del N (EUN) obtenidas de ensayos de fertilización del Sur de Córdoba.

| Sitio | Campaña | ZM | Función de producción | DOE | EUN |
|----------------|-----------|----|--|-----|-----|
| Bengolea | 2008/2009 | BP | 8594 + 29,04 N - 0,111 N ² | 93 | 19 |
| | | AP | 10919 + 29,04 N - 0,095 N ² | 109 | 19 |
| Bengolea | 2009/2010 | BP | 6519 + 22,11 N - 0,089 N ² | 78 | 15 |
| | | AP | 7093 + 34,04 N - 0,141 N ² | 91 | 21 |
| Chaján | 2008/2009 | BP | 7469 + 13,83 N - 0,067 N ² | 41 | 11 |
| | | AP | 8218 + 18,62 N - 0,106 N ² | 49 | 13 |
| Chaján | 2009/2010 | BP | 6553 + 4,78 N - 0,014 N ² | 0 | 0 |
| | | AP | 7469 + 2,71 N - 0,003 N ² | 0 | 0 |
| Alejandro Roca | 2008/2009 | BP | 8799 + 12,98 N - 0,039 N ² | 60 | 11 |
| | | AP | 10328 + 16,47 N - 0,039 N ² | 105 | 12 |
| Alejandro Roca | 2009/2010 | BP | 6303 + 12,98 N - 0,039 N ² | 60 | 11 |
| | | AP | 8087 + 12,98 N - 0,039 N ² | 60 | 11 |
| Las Vertientes | 2008/2009 | BP | 6529 + 3,32 N - 0,008 N ² | 0 | 0 |
| | | AP | 6999 + 23,32 N - 0,073 N ² | 103 | 16 |
| Las Vertientes | 2009/2010 | BP | 5917 + 51,91 N - 0,163 N ² | 134 | 30 |
| | | AP | 8207 + 37,61 N - 0,123 N ² | 119 | 23 |

La interpretación estadística del análisis de correlación espacial indica que los valores de probabilidad, en Bengolea, Chaján y Las Vertientes de los efectos zona (BP, AP) y año (Año 1: 2008/2009, Año 2: 2009/2010), entendidos como corrimientos de los parámetros de la función de producción, fueron estadísticamente significativos, con las excepciones de los parámetros Z2xN en la zona de alta producción de Bengolea en 2008/2009 y A2Z2 en la AP de Chaján en 2009/2010. El caso de Alejandro Roca muestra que, excepto por el parámetro constante y sus corrimientos, no se halló efecto año estadísticamente significativo. Sí se encontró efecto zona sobre el parámetro constante y sobre el lineal de AP en 2008/2009. La existencia de poco efecto zona/año en esta localidad refuerza el concepto de que, al ser las dos campañas analizadas húmedas, las características hídricas de la campaña de producción modifican la función de respuesta a la fertilización nitrogenada en maíz.

Tabla 3. Valores de probabilidad estadística del análisis de correlación espacial por zonas de manejo de baja (BP) y alta (AP) producción, para dos años en cuatro localidades en Córdoba.

| | | Alejandro Roca | Bengolea | Chaján | Las Vertientes |
|----------------|----------------------|----------------|----------|--------|----------------|
| Año 1 BP | Constante | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| | N | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| | N ² | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Año 1 AP | Z2 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| | Z2xN | 0,02 | 0,32 | 0,00 | 0,00 |
| | Z2xN ² | 0,21 | 0,04 | 0,00 | 0,00 |
| Año 2 BP | A2 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| | A2xN | 0,06 | 0,02 | 0,00 | 0,00 |
| | A2xN ² | 0,37 | 0,02 | 0,00 | 0,00 |
| Año 2 AP | A2xZ2 | 0,00 | 0,00 | 0,67 | 0,00 |
| | A2xZ2xN | 0,3 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| | A2xZ2xN ² | 0,76 | 0,04 | 0,00 | 0,00 |
| LAMBDA | | 0,73 | 0,55 | 0,81 | 0,63 |
| R ² | | 0,917 | 0,868 | 0,824 | 0,777 |

Constante, N y N², parámetros de la función de producción en el año 1 (2008/09) en la zona BP. Z2, Z2xN y Z2xN², corrimiento de los parámetros para la zona AP, año 1. A2, A2xN y A2xN², corrimiento de los parámetros para la zona BP en el año 2 (2009/10). A2xZ2, A2xZ2xN y A2xZ2xN², corrimiento de los parámetros para la zona BP en el año 2.

Finalmente se destaca que las características hídricas de la campaña de producción interfieren en DOE de N por zona de manejo, con mayor influencia en la zona BP donde la DOE promedio para los cuatro ensayos en 52 kg N ha⁻¹ en las campañas secas, mientras que en la zona AP esta reducción fue de 24 kg N ha⁻¹. Además en años húmedos las diferencias entre zonas de manejo son inferiores que en años secos con valores promedios del 14 y 149 % como diferencias entre AP y BP para años húmedos y secos, respectivamente.

CONCLUSIÓN

Para las condiciones en que llevó a cabo este trabajo, en todos los sitios en los que se contó con campañas secas y húmedas se produjo un cambio estadísticamente significativo en los parámetros lineales y cuadráticos de la función de respuesta a la fertilización nitrogenada por ambiente. Estos resultados evidencian una interacción entre esta última y las precipitaciones ocurridas de Septiembre a Febrero en la campaña de producción de maíz. También se concluye que el efecto año redujo en un 198% la DOE en la zona BP, mientras que en la zona AP esta reducción fue solo del 37%.

BIBLIOGRAFÍA

- AACREA. 2011. Series de precios agropecuarios. Area de Economía de AACREA. Capital Federal, Argentina.
- 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. 2011. OpenGeoDa, A software program for the analysis of spatial data, Version 0.9.9.6. Spatial analysis laboratory, Department of Agricultural and Consumer Economics, University of Illinois, Urbana-Champaign, Urbana, IL (EUA). <http://geodacenter.asu.edu/>
- 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.
- Bongiovanni, R & J Lowenberg-Deboer. 2006. Viabilidad económica. *En: agricultura de precisión: Integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable*. Editorial: PROCISUR. Cap.9. p: 171-184. <http://www.procisur.org.uy/images/biblioteca/135050.pdf>
- Dobermann, A. 2007. Nutrient use efficiency – measurement and management. *En: Fertilizer Best Management Practices: General Principles, Strategy for their Adoption and Voluntary Initiatives vs Regulations*. 259 pp. Proc. IFA International Workshop on Fertilizer Best Management Practices. 7-9 March 2007. Brussels, Belgium. International Fertilizer Industry Association. Paris, France. pp. 1-28.
- Dillon, J & J Anderson. 1990. The analysis of response in crop and livestock production. Pergamon Press, New York (EUA), 250 p.
- 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.
- Fridgen, JJ; NR Kitchen; KA Sudduth; ST Drummond; WJ Wiebold & CW Fraisse. 2004. Management zone analyst (MZA): software for subfield management zone delineation. *Agron. J.* 96: 100-108.
- Gregoret, MC; J Dardanelli; R Bongiovanni & M Díaz-Zorita. 2006. Modelo de respuesta sitio-específica del maíz al nitrógeno y agua edáfica en un haplustol. *Cl Suelo* (Argentina) 24:147-159.
- 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 21/04/11.
- 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 15/03/11.
- Inman, D.J., R. Khosla, and D.G. Westfall. 2005. Nitrogen uptake across site-specific management zones in irrigated corn production systems. *Agron. J.* 97. 169–176.
- Salvagiotti, F; HM Pedrol; J Castellarín; A Vernizzi & O Rosso. 2002. Maíz Zona Núcleo: Efecto de la fertilización balanceada con nitrógeno y azufre sobre el rendimiento y sus componentes y sobre la rentabilidad. EEA INTA Pergamino. *Revista Fertilizar* Año 7. Nº 27.
- Scharf, PC; NR Kitchen; KA Sudduth; JG Davis; VC Hubbard & JA Lory. 2005. Field-scale variability in optimal nitrogen fertilizer rate for corn. *Agron. J.* 97:452–461.
- Snyder, CS & TW Bruulsema. 2007. Nutrient Use Efficiency and Effectiveness in North America: Indices of Agronomic and Environmental Benefit. International Plant Nutrition Institute. June 2007. Ref # 07076. 4 pp. International Plant Nutrition Institute. Norcross, GA, USA. <http://www.ipni.net>.
- Tarboton, DG. 1997. A new method for the determination of flow directions and upslope areas in digital elevation models. *Water Resources Research*. 33:309–319.