

## UTILIZACIÓN DE MODELOS DE SIMULACIÓN PARA EL MANEJO SITIO-ESPECÍFICO

*Ing Agr (M.Sc.) Julio L. Dardanelli  
EEA INTA Manfredi*

### INTRODUCCIÓN

La agricultura de precisión es una práctica que se va extendiendo en el área pampeana, en cultivos como maíz y soja entre otros. Por medio de la técnica de monitoreo satelital y el uso de diferentes sensores, se obtienen mapas de rendimiento y de otras variables del cultivo y lote, que pueden ser interpretadas para aplicar el conocimiento de las variabilidades resultantes, en prácticas tales como la determinación de densidades de siembra y de fertilización sitio-específicas. Sin embargo la interpretación de mapas de rendimiento y mapas de otras variables de interés de cultivo y suelo, con el propósito aplicar tecnología sitio-específica, necesita herramientas de apoyo para interpretar los numerosos factores ambientales que producen variaciones en los rendimientos, tanto en su variación espacial como temporal. Las investigaciones recientes han demostrado que los modelos de simulación son una herramienta útil para elucidar las complejas interacciones que determinan el rendimiento dado que pueden reproducir el crecimiento diario de las plantas en función del clima, la disponibilidad de agua y nutrientes, el manejo y la variedad utilizada. Una vez calibrados, los modelos pueden ser utilizados con series meteorológicas históricas para evaluar la respuesta del cultivo en su ambiente a determinada práctica y condición inicial, y su impacto económico (Mavromatis et al., 2001). Para cultivos de importancia en la región semiárida central de Córdoba, como son la soja y el maíz, modelos de simulación de amplia difusión en el mundo como CROPGRO-Soybean (Boote et al., 1998) y CERES-Maize (Jones and Kiniry, 1986), pueden ser útiles para apoyo a las decisiones de manejo. Estos modelos han sido desarrollados para simular la interacción temporal de variedad, manejo, suelo, clima y enfermedades con el crecimiento diario del cultivo y su rendimiento. En ellos, el balance de agua y nitrógeno se computa diariamente considerando las propiedades físicas del suelo y del contenido inicial de agua y nitrógeno mineral. Estas condiciones son asumidas como uniformes en cada caso analizado, de tal manera que solo se analiza la variabilidad temporal (pero no la espacial), del efecto de la interacción de factores de manejo con el ambiente sobre el rendimiento. El lote es considerado entonces un área homogénea.

Recientemente, se ha comenzado a adaptar los modelos anteriormente mencionados para predecir la variabilidad espacial de los rendimientos (Seidl, 2000), con aplicaciones específicas para maíz (Paz et al, 1997; Garrison et al., 1999) y para soja (Shen et al. (1998), entre otros cultivos. Sin embargo, la implementación de las modificaciones necesarias a los modelos corrientemente en uso requiere un trabajo adicional de obtención de parámetros, calibración y validación. Por otra parte, para el usuario están disponibles solamente los modelos en sus versiones que asumen condiciones homogéneas. En muchas regiones del mundo donde el factor limitante principal es el agua, la variabilidad espacial de los rendimientos está asociada al balance de agua, y este último a la topografía del lote (Basso et al., 2000). Estudios realizados en la región central de Córdoba por M. Bragachini, A. von Martini y A. Méndez (en Dardanelli et al, 2002), indican que los rendimientos de soja dependen de la ubicación en el lote, pudiendo definirse tres sectores: loma (L), media loma (ML) y bajo (B), en donde los rendimientos se diferencian claramente entre sí, aumentando desde L hasta B. Este estudio muestra también que la siembra directa incrementa la captación de agua por el suelo, y ocasiona un aumento sustancial de los rendimientos y disminución de su variabilidad en cada uno de los tres sectores mencionados, en comparación con los obtenidos utilizando prácticas de labranza convencional. Sin embargo, el gradiente de rendimiento entre sectores se mantiene indicando que la dinámica del agua conserva patrones

diferenciales entre ellos. Bajo estas condiciones, una solución de compromiso para usar los modelos CROPGRO-Soybean y CERES-Maize para apoyo al manejo sitio-específico, consiste en aplicarlos separadamente para B, ML y B, una vez definida el área de cada sector y obtenidos los valores de algunos parámetros de suelo que permitan expresar la respuesta del cultivo en dichos sectores.

Para el cultivo del maíz en la región central de Córdoba, la aplicación de fertilizante nitrogenado constituye un insumo crítico en el manejo sitio-específico. La combinación de variabilidad temporal y espacial de los rendimientos dificulta la toma de decisión en cuanto a dosis a aplicar. Dados dos factores críticos a considerar: la variabilidad sitio-específica en la dinámica del agua, y el costo del insumo fertilizante junto con el deterioro ambiental que puede ocasionar su aplicación en exceso, se plantearon como objetivos del presente trabajo: (i) determinar para un suelo típico de la región central de Córdoba los parámetros diferenciales que permitan simular la dinámica del agua de un lote en sectores bajo, media loma y loma, y (ii) utilizar un modelo de simulación calibrado para maíz para analizar la respuesta de la aplicación de diferentes dosis de fertilizante nitrogenado, en los sectores diferenciados de un lote.

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

### **Lote experimental**

Los estudios se realizaron en un lote experimental ubicado en la EEA INTA Manfredi (Córdoba), Argentina (31° 49' S, 63° 48' W, altitud 292 m) durante la campaña agrícola 2001/2002. El suelo es un haplustol éntico correspondiente a la serie Oncativo, con alrededor de 70% de limo en todo el perfil, presentando horizontes A, AC y C, sin limitaciones físicas para el crecimiento y proliferación de raíces, y el movimiento vertical de agua y nutrientes. El lote de cultivo, de 44 ha (660 x 660 m), fue subdividido en dos partes iguales; una parte fue sembrada con maíz variedad DK 696 Bt el 11 de octubre de 2001 y otra con soja variedad DM 4800 RR el día 12 de octubre de 2001. El cultivo de maíz recibió una aplicación a la siembra de 55 kg ha<sup>-1</sup> de N como urea. Las prácticas de manejo cultural de los dos cultivos fueron las recomendadas habitualmente en la región. Datos meteorológicos diarios de radiación solar, velocidad de viento, temperaturas máxima y mínima y temperatura del punto de rocío fueron obtenidos en la estación agrometeorológica de Manfredi, situada a unos 1000 metros del lote, en tanto que las lluvias se midieron diariamente en un pluviómetro contiguo al mismo.

### **Calibraciones en soja**

En el lote sembrado con soja se seleccionaron sectores de muestreo en una grilla de 100 x 100 m, donde se realizaron determinaciones del contenido de agua en el suelo (hasta 2,40 m), a la siembra, floración y madurez. Sobre estos mismos puntos se determinó la biomasa a floración y madurez, y el rendimiento con sus componentes a cosecha. También se determinaron las fechas de ocurrencia de los eventos fenológicos necesarios para la aplicación del modelo CROPGRO-Soybean. Los datos obtenidos fueron utilizados para verificar si la dinámica del agua y el rendimiento respondían a patrones espaciales asociados con la topografía, y para modificar algún parámetro del modelo que permitiese expresar esos diferentes patrones. El parámetro que se consideró fue el número de curva (SLRO), que determina la partición de la lluvia diaria entre infiltración y escurrimiento superficial, aunque estrictamente en los casos analizados en este estudio, SLRO en cada punto expresa no sólo la pérdida neta de agua resultante de limitaciones a la infiltración, sino también el balance neto entre el aporte por escurrimiento desde partes mas altas del lote y las pérdidas por escurrimiento hacia las partes mas bajas. El parámetro SLRO surgió de una metodología propuesta por el Servicio de Conservación de Suelos de los EE.UU. (1972), y que fue adaptada a los modelos de simulación usados en el presente estudio. La escala de SLRO va de 0 (infiltración 100%) a 100 (escurrimiento 100%). Los suelos de Manfredi tienen un elevado potencial de escurrimiento, con valores típicos de SLRO cercanos a 90.

## Calibraciones en maíz

En el lote sembrado con maíz, además de las determinaciones indicadas para soja, se realizó un seguimiento de la dinámica del contenido de nitrógeno de nitratos y nitrógeno de amonio presente en el suelo hasta 2,10 m, en sitios seleccionados a partir de una grilla predeterminada de 200 x 100 m. En estos mismos puntos se determinó además, el contenido de nitrógeno en la biomasa vegetativa y en los granos. De esta manera, aplicando un balance de nitrógeno se pudo cuantificar la mineralización del suelo en el período floración-madurez, en el cual no se aplicó fertilizante, como la resultante de la diferencia entre el N absorbido por el cultivo en ese período y el decrecimiento del N mineral presente en el suelo. La magnitud de la diferencia sobre un valor cero, indica el aporte por mineralización. Este dato fue utilizado para verificar si el parámetro de mineralización incluido en el modelo representaba las condiciones edafoclimáticas de Manfredi. Por otra parte, los coeficientes genéticos de la variedad DK 696 Bt, que expresan la respuesta específica del genotipo al ambiente (temperatura, fotoperíodo y radiación), y la habilidad genotípica de determinar peso y número de granos, fueron obtenidos calibrando el modelo CERES-Maize con los datos observados de fecha de ocurrencia de estadios fenológicos, y de producción de biomasa, y rendimiento y sus componentes.

### Simulaciones con datos meteorológicos históricos.

Una vez calibrado el modelo para maíz, se efectuaron corridas con datos meteorológicos históricos (serie 1969-1999) y sin limitaciones de nitrógeno con el objeto de verificar la concordancia entre los rendimientos simulados y los rangos de rendimientos de un maíz bien provisto de N que se estiman factibles en la región.

Finalmente, se corrió el modelo con los datos históricos de Manfredi y con diferentes tratamientos de fertilización que incluyeron una variante sin aplicación, y dosis crecientes de 30 kg ha<sup>-1</sup> hasta 180 kg ha<sup>-1</sup>. Se asumió como condición de agua inicial la información obtenida previamente a la siembra de maíz para la campaña 2002/2003, en un punto representativo de B, ML y L. Se corrió el modelo asumiendo cuatro contenidos de N mineral inicial (suma de N de nitratos y de amonio) de 75, 115, 155 y 200 kg ha<sup>-1</sup>, en la profundidad de 0-210 cm. Estos contenidos de N abarcan el rango usual de contenidos determinados a la siembra del maíz en suelos de la región (Salas, com. pers.). A partir de la información de las salidas de las corridas realizadas, se analizó el efecto de diferentes dosis de N aplicado, sobre los rendimientos simulados en cada sector diferenciado.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Dinámica del agua

El agua útil y los rendimientos de soja agrupados por sectores se pueden observar en el Cuadro 1., Pudo observarse una dinámica diferencial del agua en los sectores L, ML y B del lote, aunque la pendiente es sólo 0,45 % y se realiza manejo conservacionista desde el año 1999, que disminuye los contrastes entre sectores. La diferencia máxima de cota del lote, sobre una transecta de 470 m, indicó 2,15 m de desnivel. Se observaron diferencias de rendimiento entre sectores aún cuando las condiciones hídricas al inicio del cultivo, y durante su ciclo, fueron superiores a las condiciones medias.

**Cuadro 1.** Contenido de agua útil (AU) hasta los 2,40 m de profundidad en un lote sembrado con soja variedad DM 4800 RR en Manfredi (Córdoba), durante la campaña 2001/2002, a la siembra (S), floración (F) y madurez fisiológica (MF) del cultivo, para sectores de loma (L), media loma (ML) y bajo (B). Se muestra también el rendimiento de soja en los mismos sectores, y el contenido de agua inicial hasta 2,10 m de profundidad, en un punto representativo de cada sector previo a la siembra de maíz (PSM), para la campaña 2002/2003.

Sector	AU (S) * mm	AU (F) * mm	AU (MF)* mm	Rend. Soja * kg ha <sup>-1</sup>	AU PSM Mm
L	305±9	164±7	32±4	3957±145	164
ML	322±16	202±12	70±9	4461±216	228
B	413±20	295±28	184±19	4738±211	263

\* Valores medios y su error estándar (EE)

Las diferencias encontradas en la dinámica del agua asociadas al relieve del lote, permitieron realizar la calibración del modelo separadamente en cada sector, obteniéndose la mejor predicción de la dinámica del agua y del rendimiento de la soja, empleando SLRO de 85, 88 y 90, para B, ML y L, respectivamente. Estos valores de SLRO tienen relación con el valor de 87 utilizado previamente por Dardanelli (1998), para calibrar soja en Manfredi en suelos sometidos a labranzas conservacionistas, pero considerando una condición de lote homogénea. Cabe acotar que los estudios de Dardanelli (1998) mostraron que SLRO se redujo de valores superiores a 90 a alrededor de 87 aplicando sistemas de labranzas reducida o siembra directa en lugar de labranza convencional. Valores más bajos de SRNO indican mayor de precipitación infiltrada.

### Respuesta del maíz a la fertilización sitio-específica

Previamente a la evaluación del efecto de diferentes dosis de nitrógeno aplicado sobre los rendimientos simulados de maíz en B, ML y L, teniendo en cuenta los valores de SRNO encontrados para cada sector, se verificó si la mineralización de N era simulada correctamente por el modelo CERES-Maize. Este modelo posee un parámetro cuyo valor puede reducirse para limitar la mineralización en caso de que el suelo presente factores limitantes no contemplados en las correspondientes subrutinas del modelo. La mineralización resultante de la aplicación del balance de N, considerando la variación de su contenido en suelo y planta entre pre-floración (12 de diciembre) y pre-madurez (6 de febrero), (y estimando con el modelo la variación en ese mismo período del contenido de N en raíces), indicó una mineralización de 57 kg ha<sup>-1</sup>. Este valor se ubica dentro del rango estimado de 50-70 kg ha<sup>-1</sup> (Bachmeier, com. pers.), para estos suelos en condiciones de adecuada disponibilidad de agua. Para predecir esta mineralización, el parámetro del modelo debió ser mantenido en su valor máximo, lo que indica la ausencia de limitaciones a la mineralización más allá de las previstas por las condiciones ambientales y el contenido de materia orgánica. La calibración posterior del modelo para maíz se vio facilitada porque las condiciones hídricas y de disponibilidad de N de la campaña 2001/2002 no limitaron la expresión del rendimiento potencial del cultivo.

Como resultado de las corridas del modelo calibrado utilizando la serie meteorológica 1969/1999, los rendimientos promedios simulados sin limitación de N, fueron de 9.171, 8.300 y 6.469 kg ha<sup>-1</sup> en B, ML y L, respectivamente. Estos resultados se consideran aceptables de acuerdo a información obtenida en la región para cultivos de manejo cultural adecuado. Las diferencias de rendimiento simulado resultaron de la combinación entre el contenido de agua inicial (ver PSM en Cuadro 1) y el escurrimiento durante el ciclo de cultivo, que presentó una media de 109, 136 y 158 mm para B, ML y L, respectivamente. Teniendo en cuenta que la precipitación promedio de la serie fue de

485 mm, se destaca la importancia del escurrimiento, que representó en las simulaciones de 22 a 33 % de la lluvia caída durante el ciclo del cultivo.

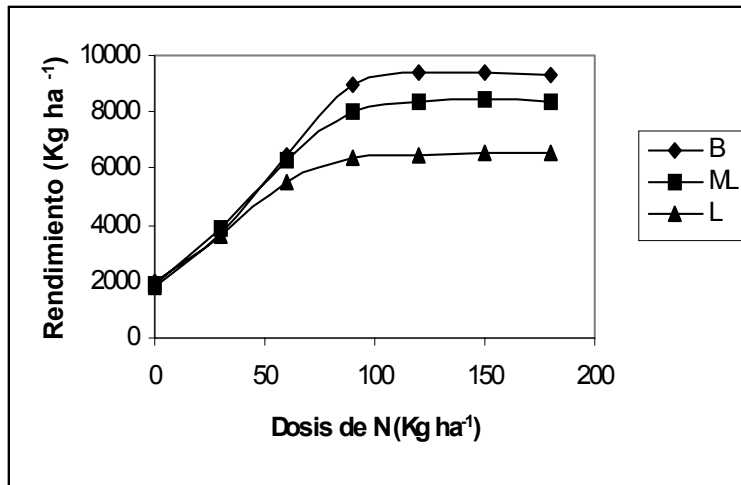
Los resultados de la simulación con diferentes combinaciones de condiciones iniciales de fertilidad, y dosis de N, indicaron respuesta a la aplicación de N excepto cuando el contenido inicial fue de 200 kg ha<sup>-1</sup>, en las tres situaciones de relieve estudiadas. Para cada contenido de N a la siembra las dosis máximas que presentaron respuesta no difirieron entre L, ML y B, pero se presentaron diferencias en el incremento relativo de rendimiento (Cuadro 2).

**Cuadro 2:** *Incremento adicional (IAR), kg ha<sup>-1</sup>, en el rendimiento simulado de maíz cv DK 696 Bt, en sectores de loma (L), media loma (ML) y bajo (B), incrementando la dosis de N (IDN) en 30 kg ha<sup>-1</sup>, para distintos contenidos de nitrógeno inicial (NI) en el suelo. Datos obtenidos para Manfredi (Cba.), utilizando la serie meteorológica 1969/99. El valor superior de IDN indica para cada contenido de NI, la dosis máxima a la cual se obtuvieron incrementos significativos de rendimiento.*

Sector	NI 75		NI 115		NI 155	
	IDN	IAR	IDN	IAR	IDN	IAR
L	60 a 90	2482	30 a 60	1839	0 a 30	1242
ML	60 a 90	1759	30 a 60	1655	0 a 30	924
B	60 a 90	894	30 a 60	620	0 a 30	387

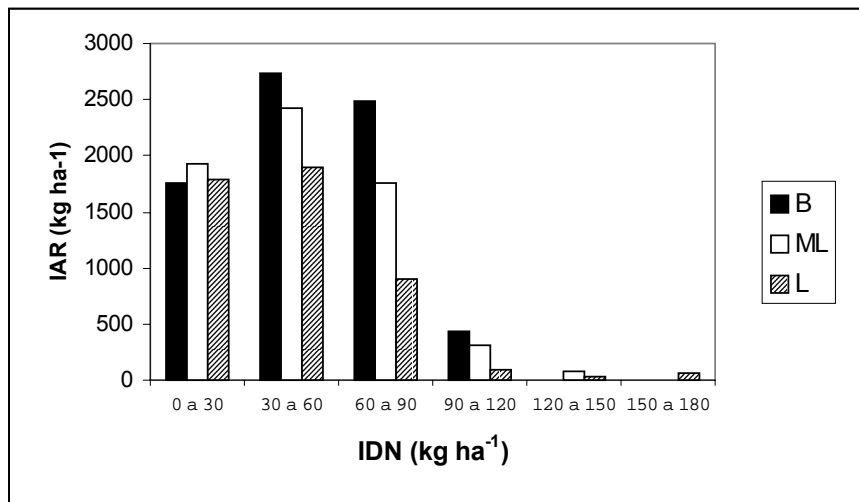
Del Cuadro 2 surge que si bien las dosis hasta donde se obtienen respuestas a la aplicación de N dependen de la fertilidad inicial y no de la posición en el relieve, esta última determina el incremento adicional de rendimiento, consistentemente mayor en B. Un análisis económico debería complementar los resultados de la simulación para la toma de decisión en cuanto a que dosis de N aplicar en cada sector del lote.

La figura 1 muestra los rendimientos simulados cuando el suelo contiene 75 kg ha<sup>-1</sup> de N inicial. Se observa que aplicando una dosis de 30 kg ha<sup>-1</sup>, el N limita los rendimientos sin importar cual es la disponibilidad de agua; con una dosis de 60 kg ha<sup>-1</sup>, el agua y el N limitan conjuntamente el rendimiento, mientras que con una dosis de 90 kg ha<sup>-1</sup> o mas la limitación es exclusivamente por agua disponible. Aplicaciones de bajas dosis de N no permitirán entonces aprovechar las ventajas de la mayor acumulación de agua que se produce en los sectores bajos del lote..



**Figura 1:** Rendimientos simulados,  $\text{kg ha}^{-1}$ , para maíz cv DK 696 Bt, en sectores de loma (L), media loma (ML) y bajo (B), aplicando diferentes dosis de N, y considerando  $75 \text{ kg ha}^{-1}$  de nitrógeno inicial en el suelo a la siembra. Datos obtenidos para Manfredi (Cba.), utilizando la serie meteorológica 1969/99.

En la figura 2 se observa la respuesta de la adición de dosis crecientes de  $30 \text{ kg ha}^{-1}$  sobre los rendimientos simulados en cada sector del lote.



**Figura 2:** Incremento adicional en el rendimiento simulado (IAR),  $\text{kg ha}^{-1}$ , de maíz cv DK 696 Bt, en sectores de loma (L), media loma (ML) y bajo (B), aumentando la dosis de N (IDN) en  $30 \text{ kg ha}^{-1}$ , para  $75 \text{ kg ha}^{-1}$  de nitrógeno inicial (NI) en el suelo. Datos obtenidos para Manfredi (Cba.), utilizando la serie meteorológica 1969/99.

Se puede observar una respuesta similar en incremento de rendimiento aumentando la dosis de  $60 \text{ a } 90 \text{ kg ha}^{-1}$  en el sector B, y de  $30 \text{ a } 60 \text{ kg ha}^{-1}$  en ML. Incrementos similares entre sí, aunque sensiblemente menores a los anteriores, resultan de incrementar las dosis de  $30 \text{ a } 60 \text{ kg ha}^{-1}$  y de  $0 \text{ a } 30 \text{ kg ha}^{-1}$  en los sectores ML y L, respectivamente. Los incrementos adicionales se mantienen cerca de sus valores máximos aumentando la dosis de  $60 \text{ a } 90 \text{ kg ha}^{-1}$ , solamente en el sector B. Será necesario complementar los resultados obtenidos con un análisis económico para definir hasta donde convendría incrementar las dosis de aplicación en cada sector del lote.

## CONCLUSIONES

Se pudieron diferenciar en un lote sectores en función de su cota relativa como loma, media loma y bajo. Se pudieron parametrizar en cada sector los patrones diferenciales de dinámica del agua causadas por una diferencia en la infiltración neta resultante de diferente balance entre infiltración y escurrimiento superficial neto, usando el modelo de simulación CROPGRO-Soybean. A su vez, el modelo CERES-Maize pudo capturar el efecto de las diferencias de cada sector sobre los rendimientos de maíz, utilizando series meteorológicas históricas. La simulación de aplicación de dosis a diferentes niveles de nitrógeno a la siembra, indicó que con contenidos inferiores a 200 kg hay respuesta en todas las posiciones del relieve, y que estas respuestas se producen dentro de cada contenido de N inicial hasta similares dosis de N aplicado, cualquiera sea el sector considerado. Sin embargo la magnitud de las respuestas decrece desde la condición mas favorable (B), hacia la menos favorable (L).

## BIBLIOGRAFÍA

- Basso, B., J.T. Ritchie, J.C. Gallant. 2000. Modeling Surface and Subsurface Water Flow in a Spatially Variable Terrain. In P.C. Robert, R.H. Rust, W.E. Larson (eds.), Precision Agriculture. Proceedings of the International Conference on Precision Agriculture, Bloomington, MN, USA.
- Boote, K.J., J.W. Jones, G. Hoogenboom, and N.B. Pickering, 1998. The CROPGRO for grain legumes. Pp 99-128 in G.Y. Tsuji, G. Hoogenboom, and P.K. Thornton (eds.) Understanding options for agricultural production. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht
- Dardanelli, J.L. 1998. Eficiencia en el uso del agua según sistemas de labranzas. En: Siembra Directa. J.L. Panigatti – H. Marelli – D. Buschiazzo – R. Gil (Eds.) INTA-SAGyP, pp. 107-115.
- Dardanelli, J.; Collino, D.J.; Otegui, M.E. y V. Sadras. 2002. Bases funcionales para el manejo del agua en los sistemas de producción". En: Satorre, E.H.; Benez, R.L.; Slafer, G.A.; De la Fuente, E.B.; Miralles, D.J.; Otegui, M.E. y R. Savin. "Producción de cultivos de grano: bases funcionales para su manejo. Ed. Facultad de Agronomía, U.B.A. (En prensa).
- Garrison, M.V., W.D. Batchelor, R.S. Kanwar and J.T. Ritchie, 1999. Evaluation of the CERES-Maize water and nitrogen balances under tile-drained conditions. *Agricultural Systems*, 62 (3): 189-200
- Jones, C.A., and J.R. Kiniry. 1986. CERES-Maize: A simulation model of maize growth and development. Texas A&M University Press, College Station, Texas.
- Mavromatis, T., Boote, K.J., Jones, J.W., Irmak, A., Shinde, D., Hoogenboom, G., 2001. Developing genetic coefficients for crop simulation models with data from crop performance trials. *Crop Sci.* 41 (1): 40-51.
- Paz, J.O., W.D. Batchelor, T.S. Colvin, S.D. Logsdon, T.C. Kaspar, and D.L. Karlen. 1997. Calibration of a crop growth model to predict spatial yield variability. ASAE Pap. 97-1031. ASAE, St. Joseph, MI.
- Seidl, M. S. 2000. Applications of crop growth models in precision agriculture through a GIS linkage and remote sensing. MS Thesis, Agricultural and Biosystems Engineering Dept., Iowa State University, Ames, IA 50011. 49 p
- Shen, J., W.D. Batchelor, R. Kanwar, J.T. Ritchie, and J.W. Jones, 1998. Validation of the water balance model in CROPGRO-Soybean. *Transactions of the ASAE* 41(5):1305-1313
- Soil Conservation Service, U.S. Department of Agriculture. 1972. Hydrology. In National Engineering Handbook. Washington D.C., EEUU.