

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE RÍO CUARTO**  
**FACULTAD DE AGRONOMÍA Y VETERINARIA**

“Trabajo Final presentado para optar al Grado de  
Ingeniero Agrónomo”

**RELACIÓN ENTRE LA FRACCIÓN DE CUBIERTA  
VEGETAL VERDE Y EL ÓPTIMO ECONÓMICO DE LA  
FERTILIZACIÓN NITROGENADA EN MAÍZ**

Alumno: Eduardo Diez

DNI: 32500739

Director: Ing. Agr. MSc. Gabriel Espósito

Río Cuarto – Córdoba

Mayo/2012

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE RÍO CUARTO**  
**FACULTAD DE AGRONOMÍA Y VETERINARIA**

CERTIFICADO DE APROBACIÓN

**RELACIÓN ENTRE LA FRACCIÓN DE CUBIERTA  
VEGETAL VERDE Y EL ÓPTIMO ECONÓMICO DE LA  
FERTILIZACIÓN NITROGENADA EN MAÍZ**

Autor: Eduardo Diez

DNI: 32500739

Director: Ing. Agr. MSc. Gabriel Espósito

Aprobado y corregido de acuerdo con las sugerencias del Jurado Evaluador:

Ing. Agr. Dr. Alfredo Ohanian\_\_\_\_\_

Ing. Agr. Diego Ramos\_\_\_\_\_

Ing. Agr. MSc. Gabriel Espósito\_\_\_\_\_

Fecha de Presentación: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_.

Aprobado por Secretaría Académica: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_.

\_\_\_\_\_  
Secretario Académico

## ÍNDICE GENERAL

|   |     |
|---|-----|
| <b>ÍNDICE GENERAL</b> .....                             | III |
| <b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....                           | IV  |
| <b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....                          | V   |
| <b>RESUMEN</b> .....                                    | VI  |
| <b>SUMMARY</b> .....                                    | VII |
| <b>INTRODUCCIÓN</b> .....                               | 1   |
| I.1. Caracterización del problema .....                 | 1   |
| I.2. Antecedentes.....                                  | 4   |
| I.3. Importancia del trabajo .....                      | 9   |
| I.4. Hipótesis y objetivos .....                        | 9   |
| I.4.a. Hipótesis .....                                  | 9   |
| I.4.b. Objetivos.....                                   | 9   |
| <b>MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....                       | 10  |
| II.1. Descripción de área de estudio.....               | 10  |
| II.2. Diseño experimental y tratamientos .....          | 11  |
| II.3. Mediciones en V4 y V8.....                        | 12  |
| II.4. Mediciones a cosecha.....                         | 15  |
| II.5. Análisis estadístico .....                        | 16  |
| II.6. Optimización de funciones.....                    | 19  |
| <b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....                     | 20  |
| III.1. Toma de fotografías y procesamiento .....        | 20  |
| III.2. Análisis de cobertura e índice de respuesta..... | 22  |
| III.3. Análisis de mapa de rendimiento .....            | 23  |
| III.4. Dosis óptima económica de N .....                | 26  |
| III.5. Relación DOEN - IR.....                          | 27  |
| <b>CONCLUSIONES</b> .....                               | 29  |
| <b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....                               | 30  |

## ÍNDICE DE TABLAS

|   |    |
|---|----|
| <b>Tabla 1.</b> Registro mensual de precipitaciones de la campaña 2008/2009. ....   | 10 |
| <b>Tabla 2.</b> Porcentajes de cobertura (%) según programa utilizado (ENVI, SisCob),<br>tratamiento, y zona de manejo determinado en V4. ....  | 22 |
| <b>Tabla 3.</b> Porcentajes de cobertura (%) según programa utilizado (ENVI, SisCob),<br>tratamiento y zona de manejo determinado en V8. ....   | 22 |
| <b>Tabla 4.</b> Índice de repuesta (IR) a partir de cobertura según programa utilizado e índice de<br>respuesta a cosecha ( $IR_{cosecha}$ ), para cada zona de manejo determinado en V4. ....  | 22 |
| <b>Tabla 5.</b> Índice de repuesta (IR) a partir de cobertura según programa utilizado e índice de<br>respuesta a cosecha ( $IR_{cosecha}$ ), para cada zona de manejo determinado en V8. ....  | 23 |
| <b>Tabla 6.</b> Salida estadística del análisis de regresión para los modelos: Mínimos Cuadrados<br>Ordinarios (OLS) y Error Espacial Autorregresivo (SAR), sin zonas de manejo. ....   | 24 |
| <b>Tabla 7.</b> Salida estadística del análisis de regresión para los modelos: Mínimos Cuadrados<br>Ordinarios (OLS) y Error Espacial Autorregresivo (SAR), con zonas de manejo. ....   | 25 |
| <b>Tabla 8.</b> Prueba de Fisher para la comparación entre el modelo de autorregresión espacial<br>sin zonas (SAR S/Z) y con zonas (SAR C/Z). ....  | 25 |
| <b>Tabla 9.</b> Función de respuesta del maíz al N, dosis óptima económica de nitrógeno (DOEN)<br>( $kg\ ha^{-1}$ ) y rendimiento esperado ( $R_{to}$ ) ( $kg\ ha^{-1}$ ) para situaciones sin zonificación (S/Z) y alta<br>(AP) y baja (BP) producción. .... | 26 |
| <b>Tabla 10.</b> Análisis económico de retorno de N comparando para una única ZM versus dosis<br>variable en dos ZM (baja (BP) y alta (AP) producción). ....  | 27 |
| <b>Tabla 11.</b> Comparación de la DOEN ( $DOEN_{IR}$ ) obtenida de introducir el $IR_{medio}$ en la<br>función de Melchiori con la DOEN ponderada por zonas de manejo del ensayo ( $DOEN_p$ ). ..  | 28 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 1.</b> Mapa de la provincia de Córdoba y ubicación del ensayo (A) en la misma.....   | 10 |
| <b>Figura 2.</b> Representación gráfica de los índices NCE (izquierda) y FPI (derecha) para evaluar visualmente la cantidad óptima de ambientes a delimitar. ....  | 11 |
| <b>Figura 3.</b> Matriz “Queen” de ponderadores espaciales. ....   | 17 |
| <b>Figura 4.</b> Fotografías inalteradas de los tratamientos sin (a) y con (b) fertilización nitrogenada a la siembra en el estado de V4. ....   | 20 |
| <b>Figura 5.</b> Fotografías inalteradas de los tratamientos sin (a) y con (b) fertilización nitrogenada a la siembra en el estado de V8. ....   | 20 |
| <b>Figura 6.</b> Fotografías procesadas digitalmente con ENVI (a) y con SisCob (b) en V4. ....   | 21 |
| <b>Figura 7.</b> Fotografías procesadas digitalmente con ENVI (a) y con SisCob (b) en V8. ....   | 21 |
| <b>Figura 8.</b> Franjas de refertilización correspondientes a cada tratamiento: (a) Testigo, (b) 16,2, (c) 32,4, (d) 44,8, (e) 64,8 y (f) 97,2 kg N ha <sup>-1</sup> respectivamente, y su ubicación dentro del lote del ensayo (rojo - BP, verde - AP). .... | 24 |
| <b>Figura 9.</b> Curvas de respuesta del maíz al nitrógeno y dosis óptima económica (DOEN) para no zonificación, zona de baja y zona de alta producción (S/Z, BP y AP respectivamente)...  | 26 |

## RESUMEN

La disponibilidad de datos espaciales del rendimiento de maíz sugiere que puede haber suficiente variación espacial intralote, en la dosis óptima económica de nitrógeno (DOEN) para justificar su aplicación a tasa variable y el desarrollo de sistemas remotos de predicción de la necesidad de N en diferentes partes del mismo. El objetivo de este trabajo fue evaluar la relación entre el momento de observación de la fracción cubierta vegetal verde (FCVV) determinada con cámara digital y la respuesta económica en rendimiento de maíz a la fertilización nitrogenada en las cercanías de Río Cuarto. Se realizó una zonificación ambiental a nivel de lote en zonas de manejo (ZM), con el programa Management Zone Analyst. Se calculó la DOEN por zonas de manejo a partir de tratamientos realizados en dosis crecientes de nitrógeno (N) en franjas atravesando las ZMs. En franjas sin y con exceso de N a la siembra, se calculó un índice de respuesta (IR) en los estados de V4 y V8, a partir de valores de FCVV analizando las fotografías cenitales con dos programas de procesamiento ENVI y SisCob, y se comparó ese IR con un IR a cosecha. Los resultados estadísticos destacan la conveniencia de utilizar zonas de manejo respecto de la no zonificación. Se obtuvo un mejor ajuste entre el IR a cosecha y el IR calculado en V8 en comparación con V4. El IR en V8 arrojó una DOEN similar a la DOEN ponderada obtenida de la función de producción por zonas de manejo. Se concluyó que la facilidad con que se hicieron las mediciones de la cobertura del dosel, hacen de la toma de fotografías digitales cenitales un medio conveniente y de gran alcance para determinar los requerimientos de fertilización nitrogenada en el maíz.

**Palabras clave:** dosis óptima, zonas de manejo, agricultura de precisión.

## SUMMARY

**Title:** Relationship between the green vegetation cover fraction and the economic optimum of nitrogen fertilization in maize.

Available spatial maize yield data suggests that there may be sufficient spatial variation in economic optimum nitrogen rate (EONR) within field, to justify variable rate N application and the development of remote systems to predict the amount of N to be applied in different parts of it. The aim of this study was to evaluate the relationship between the times of observation of the green vegetation fraction (GVF) determined with digital camera and the economic response of corn yield to nitrogen fertilization in the area of Rio Cuarto. Environmental zoning in management zones (MZ) was performed at a plot level with the program Management Zone Analyst. EONR was calculated by management zones from treatments performed in increasing rates of nitrogen (N), in strips crossing MZs. A response index (RI) was calculated in the V4 and V8 stages, from values of green vegetation fraction, processing zenith photographs with two programs ENVI and SisCob taken in strips without and with excess N at planting, and compared the IR with a harvest IR. Statistical results highlight the suitability of management zones compared to no zoning. There was a better fit between the IR and harvest IR calculated in V8 compared to V4. V8 IR showed a EONR similar to the weighted EONR obtained from the production function by management zones. It was concluded that the ease with which measurements were made of canopy cover, makes taking zenith digital pictures, a convenient and powerful technique for determining nitrogen fertilizer requirements for maize.

**Keywords:** optimum dose, management zone, precision agriculture

# INTRODUCCIÓN

## I.1. Caracterización del problema

La producción agrícola mundial ha aumentado constantemente durante el último siglo y cada vez menos superficie adicional está disponible para ser incorporada a tierras de cultivo, y otro tanto es la pérdida por la urbanización. Además, dado que la mayor parte de la tierra ya es doble e incluso triplemente cultivada, incrementar la intensidad de cultivo no es una opción posible para aumentar la producción. Por lo tanto, la demanda futura de alimentos tendrá que ser satisfecha principalmente a través de aumentos en la producción por unidad de superficie cosechada. Las preocupaciones se plantean en cuanto a si el deterioro del suelo y los recursos hídricos ponen en peligro la sostenibilidad de los sistemas de producción, y el manejo de la fertilidad tiene un papel clave en el aumento de rendimiento de los cultivos (Ludwig *et al.*, 2011).

Cuando se habla de la sustentabilidad del ambiente se hace referencia a una actividad que permita obtener producciones rentables sin comprometer la capacidad de producción del recurso involucrado, en este caso el suelo, y sin generar efectos negativos en otros componentes del ambiente. En este sentido la rotación de cultivos es la clave tecnológica disponible para armonizar los objetivos de corto y largo plazo y en ella, el cultivo de maíz (*Zea mays* L.) cumple un rol central (Andriulo y Cordone, 1998).

La importancia del maíz en la rotación, reside en que permite diversificar los riesgos productivos, inhibe la proliferación de patógenos, insectos y malezas y evita desequilibrios químicos de importancia. Por el lado de las condiciones físicas de los suelos, mejora estado estructural y distribución de raíces por la alta cantidad y calidad del rastrojo que produce devuelve al suelo porque su sistema radical aumenta la proporción de macroporos en el suelo, condición favorable para el crecimiento de las raíces de los cultivos siguientes (Pedrol *et al.*, 2004).

El rendimiento de maíz está determinado principalmente por el número final de granos logrados por unidad de superficie, el cual es función de su tasa de crecimiento alrededor del período de floración. Por lo tanto, para alcanzar altos rendimientos, el cultivo debe lograr un óptimo estado fisiológico en floración: cobertura total del suelo y alta eficiencia de conversión de radiación interceptada en biomasa. La adecuada disponibilidad de nutrientes, especialmente a partir del momento en que son requeridos en mayores cantidades (aproximadamente 5-6 hojas desarrolladas), asegura un buen desarrollo y crecimiento foliar y una alta eficiencia de conversión de la radiación interceptada. Mientras que aproximadamente el 95 por ciento del peso seco esta en forma de carbono, hidrógeno y oxígeno que provienen del aire y del agua, 14 de otros elementos minerales esenciales son

necesarios en cantidades adecuadas para mantener la fábrica de maíz en marcha y funcionando en todo el ciclo de vida de la de la planta (Sawyer *et al.*, 2006).

La demanda de nutrientes está relacionada directamente con el potencial de rendimiento del ambiente. La cantidad de los mismos no provista por el suelo deberá ser cubierta por la fertilización para lograr una alta eficiencia en el uso de otros recursos como la radiación y el agua. Los nutrientes que con más frecuencia presentan deficiencias en los sistemas de agricultura continua de Argentina son el nitrógeno, fósforo y azufre. Para utilizar dosis correctas de fertilizante es importante realizar un adecuado diagnóstico (García, 2005).

El nitrógeno (N) es quizás el más importante de los nutrientes esenciales para el maíz, debido a las elevadas cantidades en que es demandado durante su crecimiento, a que habitualmente es deficitario en los suelos agrícolas y a la creciente preocupación por la preservación del ambiente (Melchiori *et al.*, 2001).

Algunos de los retos más importantes relacionados con el maíz son, hoy en día, los impactos ambientales adversos asociados con las grandes cantidades de fertilizante nitrogenado aplicado a este cultivo. El N está bien documentado como una de las mejores entradas que un productor puede usar para aumentar la rentabilidad bajo un sistema de gestión apropiado (Teal *et al.*, 2006).

La cantidad de fertilizante nitrogenado recuperado en la biomasa de la planta por encima del nivel del suelo es inferior al 40% de la cantidad aplicada en el mismo año las sobre los cultivos (Cassman *et al.*, 2002). Aplicaciones excesivas de N que superen ampliamente la cantidad requerida por el maíz, generan posibilidades de lixiviación a través del suelo como  $\text{NO}_3$ , aumentando su concentración en las aguas subterráneas y superficiales. Este aumento de concentración, que incrementa los riesgos para la salud humana y la prematura eutrofización de las aguas superficiales, contribuye a una cascada de efectos negativos en la vida acuática, la industria de pesca y turismo, y en la calidad del agua potable (Hong *et al.*, 2007a).

La práctica dominante entre los productores agrícolas es aplicar la misma dosis de fertilizante nitrogenado en todo el lote e incluso en todo el campo. En los campos con necesidades de N variables espacialmente, esta práctica conduce a desajustes frecuentes entre la tasa de fertilización nitrogenada y el N que los cultivos necesitan. La sobre-aplicación es más frecuente ya que los productores tienen el incentivo económico a errar con más frecuencia en esa dirección: el costo de los fertilizantes nitrogenados que no sean necesarios en las áreas de sobre-aplicación es menor que el costo de la pérdida de rendimiento potencial en áreas de sub-aplicación (Scharf *et al.*, 2005).

Mientras que muchos productores utilizan el enfoque mencionado anteriormente, recientemente han habido desarrollos tendientes a generar recomendaciones de N que reflejen mejor el rendimiento económico (Sawyer *et al.*, 2006). El máximo rendimiento,

como rendimiento objetivo, por lo general no tiene total correspondencia con la dosis óptima económica de N (DOEN; Fox y Piekielek, 1995), siendo esta la que representa el mejor rendimiento para el agricultor y se corresponde con un mínimo de pérdidas de N al medio ambiente (Hong *et al.*, 2007a).

La variabilidad de las propiedades físicas y químicas del suelo dentro del paisaje puede resultar en DOEN y rendimiento variables a través de lotes, pero también dentro de cada lote. Por ejemplo, Scharf *et al.* (2002) informaron que la DOEN de maíz varió ampliamente en un ensayo de 55 a 220 kg N ha<sup>-1</sup> dentro de un lote. Según ellos, esta variación no fue debido a la variabilidad en el rendimiento, la cual fue mucho menor, y los rendimientos fueron más altos donde las dosis óptimas de N fueron las más bajas. En cambio encontraron que es más correcto atribuirlo a la variabilidad en la provisión de N por el suelo, que a la variabilidad en la demanda por el cultivo. La variabilidad espacial en la provisión de N puede ser causada por diferentes contenidos de N orgánico, variaciones en la velocidad de liberación del mismo, y tasas de pérdida de N distintas. Todos estos procesos son controlados principalmente por la variabilidad en las relaciones hídricas del suelo: drenaje, conductividad hidráulica, posición del paisaje y vías y velocidades de flujo de agua. En las regiones semiáridas, donde la pérdida de N causada por lixiviación y desnitrificación es baja, los factores del cultivo podrían desempeñar un papel más importante en el control de la variabilidad espacial en la necesidad de fertilizantes nitrogenados.

La cantidad relativamente pequeña de datos que está disponible sugiere que puede haber suficiente variabilidad espacial en DOEN dentro del campo para justificar la tasa variable de aplicación de N y para justificar el desarrollo de sistemas precisos y rentables para la predicción de la cantidad de N a aplicar en diferentes partes del mismo. Sin embargo, estos proyectos son costosos y es necesaria una comprensión más completa de la variabilidad en DOEN dentro del campo antes de que los beneficios claramente superen a los costos. El grado de variabilidad en DOEN así como su escala espacial son determinantes importantes de cuáles de los enfoques de manejo podrían ser exitosos (Scharf *et al.*, 2005).

La práctica comúnmente observada de realizar análisis de suelos para la fertilización nitrogenada en V6 se ve dificultada en gran parte debido al retraso entre tiempo necesario para realizar las pruebas y el momento óptimo de fertilización. Esta es una de las razones por las que en las últimas décadas, se han estado desarrollado nuevos métodos no destructivos para medir la disponibilidad de nutrientes (Lukina *et al.*, 1999).

Históricamente, los sistemas de producción agrícola se han beneficiado de la incorporación de los avances tecnológicos desarrollados principalmente para otras industrias. La era industrial trajo la mecanización y los fertilizantes sintetizados a la agricultura. La era de la tecnología ofrece la ingeniería genética y la automatización. La era de la información, en gran auge en estos años, trae la posibilidad de integrar los avances tecnológicos en la

Agricultura de Precisión (AP) (Whelan *et al.*, 1997). Esta se presenta como una alternativa formidable en la búsqueda de prácticas de manejo que permitan un uso más eficiente de los insumos, aplicándolos en los lugares y en las cantidades que los cultivos los requieren (Melchiori *et al.*, 2001).

La base fáctica de la AP, variabilidad espacial y temporal de los factores de suelo y el cultivo dentro de un campo, ha sido apreciada desde hace siglos. Antes de la finalización de la mecanización agrícola, el pequeño tamaño de los campos permitió a los agricultores aplicar tratamientos variables en forma manual. Sin embargo, con la ampliación de los campos y la mecanización intensiva, se ha hecho cada vez más difícil tener en cuenta la variabilidad dentro del campo sin un desarrollo revolucionario de las tecnologías (Stafford y Evans, 2000).

El concepto de que las necesidades de N de los cultivos a menudo varían sustancialmente entre campos y paisajes está bastante bien establecido. Los principales impedimentos para la adopción de la dosificación variable de N como respuesta al problema antes mencionados son las dificultades técnicas, los costos, y una precisión limitada de los métodos actualmente disponibles para la predicción de la cantidad de N a aplicar y dónde. Aquí la teledetección puede ser una de las mejores herramientas para entender y responder a esta variabilidad espacial. La capacidad de cubrir grandes áreas rápidamente hace de la teledetección una herramienta de retroalimentación ideal para evaluar las decisiones de gestión del N al principio de la campaña (Blackmer y White, 1998).

## **I.2. Antecedentes**

La investigación y los avances tecnológicos en el campo de la teledetección han mejorado enormemente la capacidad de manifestar y cuantificar los factores estresantes físicos y biológicos que afectan la productividad de los cultivos agrícolas (Hong *et al.*, 2007b).

Las principales ventajas de la teledetección para la gestión de N son el detalle espacial de la información que se recoge, la velocidad con que la información puede ser recogida y su estudio, posiblemente, en grandes áreas. Creando así el potencial de suministrar información sobre la variabilidad espacial de la necesidad de N de forma más económica y conveniente que la obtenida de las fuentes que se utilizan actualmente (Scharf *et al.*, 2002).

Hay varios obstáculos que han impedido la adopción de la teledetección como base para la toma de decisiones de manejo del cultivo, incluyendo la disponibilidad de imágenes, los tiempos requeridos, la resolución espacial, la susceptibilidad a las condiciones climáticas, y el conocimiento limitado de cómo traducir las imágenes en las decisiones de gestión (Robert, 2002). En la actualidad, no hay suficientes fuentes de información de teledetección

basada en satélite o avión para poner a disposición de los productores información de sensores remotos en forma fiable. La competencia por las imágenes de satélite está en auge, sobre todo con nuevas generaciones de satélites de alta resolución. El ángulo de captura de imágenes puede ser otro de los problemas con los satélites. Además, los más antiguos pueden tener una resolución espacial que es demasiado grande para ser utilizada con eficacia en el manejo del N (Hunt *et al.*, 2002).

La industria de la teledetección no está acostumbrada a ofrecer las imágenes adquiridas en determinados momentos y entregarlas rápidamente (como sería el caso de manejo de N), y no está actualmente estructurada para proporcionar este tipo de servicio. Los satélites pueden tomar mucho tiempo entre las pasadas sucesivas sobre un área específica para proporcionar información a tiempo para las decisiones de gestión.

Mientras se desarrolla infraestructura adicional y nuevas plataformas se vuelven disponibles, estas barreras poco a poco se reducen. No obstante, aún cuando estos obstáculos sean superados, las dificultades con el clima se mantendrán. Buenas imágenes requieren condiciones casi sin nubes, y aún así las correcciones atmosféricas pueden ser complejas. El limitado conocimiento de cómo traducir las imágenes en las decisiones de gestión sigue siendo una grave limitación para el uso de la teledetección para el manejo del N.

A pesar de que la capacidad para detectar el estrés N con sensores remotos está bien documentada en la literatura científica, un esfuerzo considerable es aún necesario para desarrollar sistemas de manejo y algoritmos de soporte de decisión que esté demostrado que son suficientemente fiables como para justificar la adopción por los productores (Scharf *et al.*, 2002).

Disponer de índices de análisis de suelo en zonas semiáridas suele ser difícil y depende de muchos factores ambientales, mientras que las pruebas en planta, como los índices de reflectancia, se puede utilizar para una evaluación más consistente de la biomasa del cultivo porque se integran todos los factores ambientales y las prácticas de manejo (Schepers, 2001).

Los avances en la aplicación de los principios de la teledetección en la agronomía fueron posibles gracias a una primera comprensión de la respuesta espectral de cada hoja y luego aplicando esos conocimientos al dosel.

El refinamiento del instrumental y el desarrollo de las relaciones entre la reflectancia y la respuesta de las plantas han ampliado la capacidad de cuantificar los parámetros agronómicos. Los principios básicos de la reflectancia de la hoja y del dosel han sido incorporados en los llamados índices de vegetación (IV) relacionando combinaciones específicas de longitud de onda con diversas características de las plantas.

La reflectancia del dosel vegetal integra las contribuciones de las propiedades ópticas de la hoja, la reflectancia de las superficies de subyacentes, tales como el suelo, restos vegetales y malas hierbas, y la arquitectura de la cubierta vegetal (Hatfield *et al.*, 2008).

Sensores terrestres del dosel cultivo como el SPAD-502 (Konica Minolta, Tokyo, Japón) o el Green Seeker (Ntech Industries, Ukiah, California, USA), pueden medir la cantidad de luz reflejada por las superficies cercanas, como el tejido de la hoja o en el suelo, en contraste con las aeronaves o las plataformas vía satélite que generan fotografías o los distintos tipos de imágenes digitales. El IV más utilizado es el Índice Diferencial de Vegetación Normalizada (NDVI), propuesto por Rouse *et al.* (1973), que ahora sirve como una suerte de punto de referencia para los investigadores que desarrollan nuevos IVs. El NDVI utiliza proporciones entre la reflectancia del rojo y del infrarrojo cercano del dosel. La base de esta relación es la fuerte absorción (baja reflectancia) de la luz roja de la clorofila y de baja absorción (alta reflectancia y transmitancia) en el NIR de hojas verdes.

Freeman *et al.* (2007) encontraron que la cantidad de N incorporado por el maíz está altamente correlacionada con el NDVI. Este resultó ser un mejor predictor de la absorción de N que el rendimiento de forraje o la biomasa vegetal. La fuerte correlación entre el NDVI y la absorción de N se explica por la capacidad de NDVI para detectar diferencias en la absorción de rojo y la variación en el contenido de clorofila; la reflectancia de la porción visible del espectro (500-700 nm) se incrementa cuando los síntomas de deficiencia se hacen más pronunciados.

La teledetección no se limita a la utilización de sólo las bandas visible, infrarrojo cercano y térmico. Otras fracciones del espectro de radiación electromagnética, como onda corta infrarroja y microondas ya han sido aplicadas a resolver problemas agrícolas.

Se ha encontrado que índices como el NDVI y otros similares tienen una buena correlación con diferentes parámetros de vegetación incluyendo el índice de área foliar, la biomasa, el porcentaje de cubierta vegetal, la productividad y la actividad fotosintética (Serrano *et al.*, 2000).

Como forma de indicar la respuesta de los cultivos al N aplicado se propuso un índice de respuesta (IR) (Johnson *et al.*, 2000) calculado a partir la relación entre el rendimiento promedio en el tratamiento N y el rendimiento en el tratamiento testigo. No obstante el uso del IR no permite el ajuste de la dosis de fertilizante durante el crecimiento del cultivo, por lo que su valor práctico para la gestión de N es mínimo.

La importancia de la determinación del IR mediante mediciones de cobertura a mitad de estación se pueden resumir en los siguientes escenarios. En primer lugar, si el IR de un lugar es relativamente bajo, lo que significa que las coberturas en el testigo y en el tratamiento fertilizado con N son similares, la probabilidad de una respuesta a N adicional será baja, y, por lo tanto, se requerirá poca o nula fertilización nitrogenada. Por el contrario,

si la cobertura del testigo es baja y la de lo tratamiento fertilizado con N es alta, lo que resulta en un alto IR, la probabilidad de una respuesta a N adicional es buena, y, por lo tanto, es necesario aplicar fertilizante adicional.

La medición con sensores remotos de NDVI durante la campaña y la obtención de un IR a partir del mismo, ha sido comprobado como un método predictivo válido del IR a cosecha (Mullen *et al.*, 2003).

Dada la importancia del NDVI mencionada anteriormente como parámetro capaz de brindar información sobre las condiciones en que se encuentra el cultivo al momento de la medición, se han estudiado correlaciones con otros indicadores y formas de obtenerlo indirectamente. Con el fin de evaluar el impacto de la cobertura de la vegetación en las lecturas de los sensores remotos de NDVI, Lukina *et al.* (2000) evaluaron el porcentaje de cobertura de vegetación en diferentes etapas de crecimiento y distancias entre hileras. Su trabajo ha demostrado una alta correlación (0.8 - 0.97) entre el porcentaje de cobertura vegetal y las mediciones de NDVI. En un estudio con un objetivo similar, pero empleando procesamiento por software de fotografías digitales, Lukina *et al.* (1999) obtuvieron que sus estimaciones del porcentaje de cobertura vegetal estuvieron altamente correlacionadas con el NDVI. El coeficiente de correlación de entre el NDVI y el porcentaje de cobertura vegetal fue superior a 0,80 el primer año de ensayos y mayor a 0,92 el segundo.

White *et al.* (2000), han obtenido la fracción de cobertura vegetal verde por varios métodos y recomiendan el de la cámara fotográfica como el método más fácil y fiable para validar información desde teledetección. La principal ventaja de este método es su carácter no destructivo y por tanto se puede medir la fracción de cubierta, en el mismo punto y simultáneamente al radiómetro. La clasificación explota la respuesta espectral de la vegetación en el visible, el contraste entre el suelo (más brillante en el rojo y verde simultáneamente) y la vegetación (menos brillante en el rojo) (González Piqueras, 2006).

Una de las ventajas de un sistema para determinar la cobertura del dosel basado en imágenes digitales es que el ángulo de la cámara es constante por lo que las mediciones se pueden realizar en cualquier momento del día, independientemente de la cobertura de nubes. Las cámaras digitales se han convertido en dispositivos avanzados y accesibles, la calidad de imagen para la mayoría de cámaras es excelente, y hay potentes aplicaciones de software que permiten el análisis de imágenes basada en la intensidad y/o bandas espectrales específicas (Purcell, 2000).

De modo tal que las mediciones realizadas a través de fotografías u otros métodos empleados en teledetección, reflejen variabilidad espacial de la oferta de N. Es necesario recurrir al uso de herramientas de agricultura de precisión, que permitan en tiempo y forma justa, realizar aplicaciones de N apropiadas a las necesidades de las plantas en los diferentes ambientes del lote (Raun y Johnson, 1999).

La Tecnología de Dosis Variable (TDV) permite a los agricultores, una vez conocido el comportamiento del cultivo en cada sector del lote, calcular las necesidades de insumo en cada zona homogénea más pequeña o subunidad sobre el terreno, y aplicarlos en forma sitio-específica (Bragachini, 2004).

El potencial de mejora de la rentabilidad debido a la aplicación variable de los insumos depende de 1) la identificación de áreas en el campo en el que los aportes adicionales aumentarán los ingresos en una escala mayor que los costos adicionales que genere dicho aporte y/o 2) la identificación de áreas en las que la reducción de los mismos disminuirá los costos en un escala que es mayor que la reducción potencial de ingresos correlacionado con un menor rendimiento de grano (Koch, 2004).

La rentabilidad de la TDV cambia en relación con el cultivo y los insumos, sus precios, el costo de la tecnología de dosis fija (TDF) con respecto a la TDV, la distribución espacial de las sub-unidades en el terreno (zonas de manejo), y las magnitudes de las diferencias de rendimiento entre subunidades (Bragachini *et al.*, 2009).

Dividir un lote en unas pocas zonas de manejo (ZM) relativamente uniformes es un método práctico y rentable para el manejo sitio-específico del cultivo con la tecnología y relaciones de precios actuales. Muchos enfoques para la delineación de ZM se han propuesto y evaluado (Chang *et al.*, 2004). Para que las zonas definidas puedan resultar útiles y prácticas para el manejo sitio-específico, cada zona debería reflejar las diferentes respuestas del cultivo a los aportes de nutrientes, y estas respuestas deberían ser estimadas de manera fiable en forma previa a la toma de decisiones.

Brock *et al.* (2005), comprobaron la utilidad de utilizar software no supervisado en la identificación de áreas dentro de los campos con diferentes productividades, a partir de varios años de datos de monitor de rendimiento. La aplicación empleada fue el Management Zone Analyst (MZA, Mizzou-ARS, 2000). Sus resultados sugieren que el análisis “cluster” que realiza el programa permite identificar regiones de productividad común, aun cuando el análisis de correlación entre los distintos años de los datos no identificó una fuerte estabilidad temporal en los patrones de rendimiento. Aunque esperaban obtener marcadas diferencias en productividad potencial partiendo de las series de suelos dentro del sitio de estudio, la división de los lotes según el monitor de rendimiento específico de un cultivo, dió como resultado una mayor reducción de la varianza del rendimiento que a partir de grandes series de suelo o de productividades combinadas de dos cultivos en la rotación.

Para la región sur de Córdoba no se han establecido parámetros que vinculen estimaciones de fracción de cubierta vegetal verde con la respuesta a fertilización nitrogenada.

### **I.3. Importancia del trabajo**

Este trabajo tesis se encuadra dentro de un proyecto de investigación llevado adelante por la Cátedra de Producción de Cereales de la FAV-UNRC, cuyo objetivo es generar información local proveniente de ensayos a campo, con el fin de estudiar la relación entre el IR y la DOEN, para elaborar una función de respuesta óptima y así establecer la correspondencia entre estas variables.

### **I.4. Hipótesis y objetivos**

#### **I.4.a. Hipótesis**

Existe relación entre la fracción de cubierta vegetal verde (FCVV) y la respuesta económica a la fertilización nitrogenada en V8 por zonas de manejo, estimable mediante el índice de respuesta obtenido con cámara digital.

#### **I.4.b. Objetivos**

##### *General*

Evaluar la relación entre el momento de observación de la fracción cubierta vegetal verde determinada con cámara digital y la respuesta económica en rendimiento de maíz a la fertilización nitrogenada.

##### *Específicos*

- Evaluar el uso de técnicas de procesamiento de fotografías tomadas con cámara digital aplicadas a imágenes de cubiertas vegetales para estimar el porcentaje de cobertura.
- Determinar la dosis óptima económica de nitrógeno en maíz según zonas de manejo.
- Relacionar el índice de respuesta de cobertura vegetal con la dosis óptima económica de nitrógeno.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### II.1. Descripción de área de estudio

El trabajo se llevó a cabo durante la campaña agrícola 2008/2009 en un establecimiento agropecuario ubicado a 80 km al suroeste de la ciudad de Río Cuarto y 5 km al sur la localidad de Chaján (Dpto. Río Cuarto, Córdoba). Las coordenadas del sitio del ensayo son 33° 35' 14" latitud sur, 65° 3' 23" longitud oeste. La ubicación del ensayo se ilustra en la Figura 1.

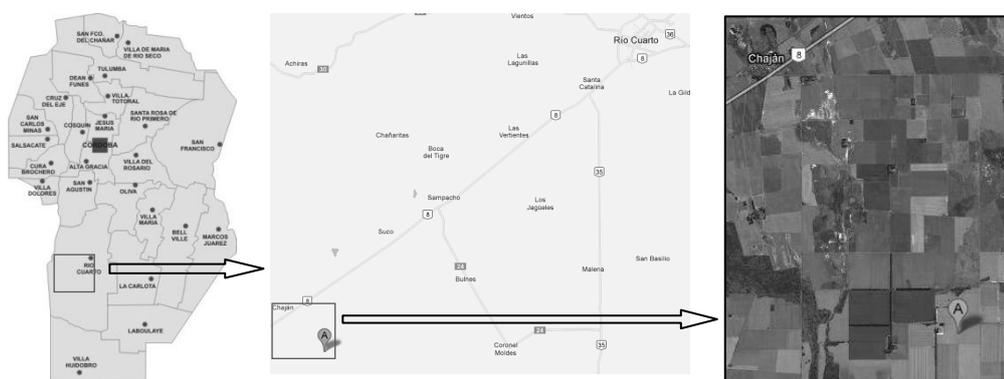


Figura 1. Mapa de la provincia de Córdoba y ubicación del ensayo (A) en la misma.

El clima predominante de la zona es templado subhúmedo con invierno seco, presentando un régimen de precipitaciones monzónico, con una media anual de 775 milímetros. El período libre de heladas se extiende por aproximadamente 256 días, generalmente desde el mes de octubre a abril. El mes más frío del año es julio, con una temperatura media de 8.5 °C, mientras que el mes más cálido es enero con una temperatura media de 22 °C. (Meteorología Agrícola, Facultad de Agronomía y Veterinaria, UNRC).

Las precipitaciones ocurridas en la campaña productiva 2008/2009 en la que se realizó el trabajo se muestran en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Registro mensual de precipitaciones de la campaña 2008/2009.

| Jul | Ago | Sep  | Oct  | Nov   | Dic   | Ene  | Feb  | Mar  | Abr | May  | Jun | Total        |
|-----|-----|------|------|-------|-------|------|------|------|-----|------|-----|--------------|
| 8,6 | 5,8 | 24,1 | 23,1 | 194,6 | 131,8 | 84,1 | 77,7 | 33,0 | 7,1 | 23,6 | 0,0 | <b>613,7</b> |

Los suelos zonales se caracterizan por ser profundos, excesivamente drenados con una capa arable u horizonte superficial (ócrico) de color pardo con moderado a pobre contenido de materia orgánica, estructura débil a masiva y poco desarrollo de horizontes genéticos. Han evolucionado a partir de materiales eólicos franco arenosos a arenosos, vinculados a la Pampa medanosa cordobesa y bajo un régimen subhúmedo o semiárido (ústico). La

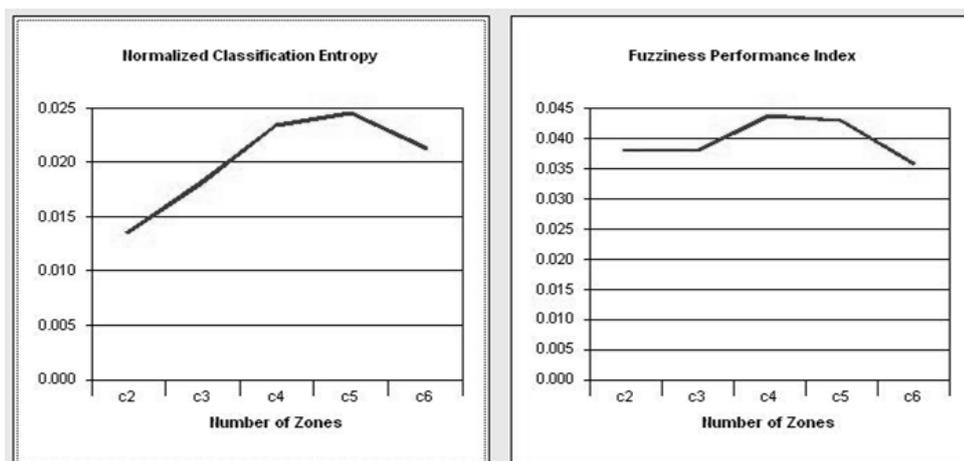
secuencia de horizontes predominante en este tipo de suelos es la siguiente: A, AC, C. Se clasifican como Haplustol éntico (SAGyP-INTA, 1990).

Se realizó un análisis de suelo en el lote que arrojó valores de 8,15 mg kg<sup>-1</sup> de fósforo disponible (Bray I), 1,6% de materia orgánica (Walkley-Black) y un pH de 6,36.

## II.2. Diseño experimental y tratamientos

El ensayo consistió en siembra de maíz a mediados de Octubre, con una densidad de 70000 plantas por hectárea, a 52 cm entre hileras y empleando el híbrido AX892IT. 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. Por ese motivo, se realizó una zonificación ambiental a nivel de lote en zonas de manejo (ZM), empleando para ello mapas de rendimiento de tres campañas anteriores. 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, Mizzou-ARS, 2000), el cual divide al campo en grupos naturales a partir de clasificaciones o número de zonas especificados mediante un análisis “cluster”. El MZA entrega sus resultados a través de la representación gráfica del desempeño de dos índices: el FPI (índice de borrosidad) y el NCE (clasificación entrópica normalizada) (Fridgen, 2000) para evaluar visualmente la cantidad óptima de ambientes, según se muestran en la Figura 2.



**Figura 2.** Representación gráfica de los índices NCE (izquierda) y FPI (derecha) para evaluar visualmente la cantidad óptima de ambientes a delimitar.

El FPI da una medida del grado de dispersión entre ambientes y sus valores pueden variar de 0 a 1. Valores cercanos a 0 indican clases distintas con escasa pertenencia un mismo grupo mientras que los valores cercanos a 1 indican clases indistintas con un alto

grado de pertenencia al mismo grupo. El NCE modela el grado de homogeneidad de las zonas. Valores bajos de este indican alto grado de organización y valores altos, bajo grado de organización. En la representación gráfica el número óptimo de ambientes se produce cuando ambos índices están en su mínimo. En caso de divergencia entre los números óptimos otorgados por cada índice, la decisión final sobre cuántas unidades ambientales delimitar, debe realizarse considerando agregar otras variables al análisis (Fridgen *et al.*, 2004).

El tipo de diseño fue en franjas atravesando zonas de manejo delimitadas previamente, consistiendo los tratamientos en las siguientes franjas a la siembra:

1. Testigo
2. 50 kg de Fosfato Diamónico
3. 50 kg de Fosfato Diamónico y 108 kg de N.

La dosis de 50 kg de Fosfato Diamónico (FDA, 18-46-0) se corresponde con la aplicación que se realiza habitualmente en este establecimiento. La fuente de N utilizada fue Nitrato de Amonio Calcáreo (CAN, 27-0-0) y se corresponde con 400 kg del mismo. La dosis de 50 kg de FDA y 400 kg de CAN del tratamiento 3, se fijó como dosis de exceso de N, para observar el contraste entre esta franja y las demás, para poder comparar las mismas en las distintas ZM y evaluar los porcentajes de cobertura del cultivo.

Para establecer el óptimo económico se realizó el siguiente tratamiento: refertilización en V8 sólo sobre otras parcelas que recibieron 50 kg de Fosfato Diamónico al momento de la siembra. Ésta se realizó en franjas de acuerdo al siguiente orden de fertilización:

1. Testigo
2. 16.2 kg N (60kg CAN)
3. 32.4 kg N (120kg CAN)
4. 44.8 kg N (160kg CAN)
5. 64.8 kg N (240kg CAN)
6. 97.2 kg N (360kg CAN)

Las dosis de N y P fueron constantes en cada franja a través de las distintas ZM en las que el terreno fue dividido. El ancho de las franjas fue el del ancho de la sembradora y el largo fue el del lote.

El diseño experimental utilizado fue en bloques completos aleatorios con tres repeticiones espaciales por tratamiento.

### **II.3. Mediciones en V4 y V8**

La técnica de utilizar fotografías cenitales como medio para obtener datos de cobertura ya ha sido analizada y el método presenta similitudes con lo propuesto por Purcell (2000),

Richardson *et al.* (2001), Falco (2010) y Sánchez *et al.* (2011). En cada bloque se tomaron 12 fotografías en dos etapas ontogénicas diferentes: con 4 y 8 hojas totalmente expandidas (V4 y V8 respectivamente) (Ritchie *et al.*, 1997).

Las fotografías digitales fueron tomadas con una cámara Panasonic DMC-FZ18 (Panasonic Corporation, Kadoma, Osaka, Japan). La misma fue sostenida a 140 cm sobre el nivel del suelo y de forma que apuntara directamente a este. El campo de visión abarcado fue de aproximadamente 1 metro cuadrado de suelo. El tamaño de la imagen fue  $2,448 \times 3,264$  píxeles (8.0 megapíxeles), fue almacenado en el formato de imagen comprimido JPEG (Joint Photographic Experts Group, .jpg) y requirió de 2,9 MB de espacio por fotografía. Todas las fotografías fueron tomadas con sombreado natural (nubes) o artificial, para evitar que el reflejo solar sobre el dosel, altere los patrones de color de la imagen y, como consecuencia, modifique los valores de cobertura obtenidos.

Para estimar la fracción de cubierta vegetal verde (FCVV) a partir de las fotografías, una vez transferidas a una computadora, fueron procesadas con dos programas diferentes: ENVI 4.5 (Environment for Visualizing Images, Exelis Visual Information Solutions, Boulder, Colorado, USA) y SisCob 1.0 (Laboratório de Imagem, Embrapa, Brasil).

ENVI es una aplicación que se utiliza para procesar y analizar imágenes geoespaciales. Es comúnmente usado en detección remota y análisis de imagen. Contiene una serie de algoritmos de procesamiento de imágenes científicas y herramientas para extraer información para su investigación y análisis. Para este trabajo se realizó un procesamiento del espectro de las fotografías digitales, para las que se evaluó la respuesta de los píxeles a diferentes longitudes de onda para obtener información sobre los materiales de interés dentro de cada píxel (cubierta vegetal verde, rastrojo y suelo).

La otra aplicación, SisCob, a través de técnicas de inteligencia artificial Waikato Environment for Knowledge Analysis (WEKA, University of Waikato, New Zealand) implementa una red neuronal artificial del tipo perceptrón multicapa (MLP) que permite crear una aplicación dinámica para el estudio de la cobertura del suelo por medio de reconocimiento de patrones. Estas redes neuronales artificiales, son un paradigma de aprendizaje y procesamiento automático inspirado en la forma en que funciona el sistema nervioso animal. Para construir el clasificador de imágenes de la red neuronal supervisada, necesita un conjunto de datos de entrada previamente clasificado o cuya respuesta objetivo se conoce. Aquí es necesario determinar las clases de los patrones y los patrones propiamente dichos. En esta etapa, a través de las ventanas de selección, se determinan los patrones de cada clase, guiados por diferentes tonos de color en la imagen. Una vez definidos los patrones se crea la red neural, se la carga y se la utiliza para clasificar las imágenes.

Al momento de la cuantificación de los valores de FCVV las dos aplicaciones trabajaban de forma diferente. El ENVI requiere procesar cada imagen individualmente y

una vez procesada se cuantifica la proporción de píxeles de la cubierta vegetal verde versus los píxeles totales de cada una. El SisCob facilita en gran medida la tarea ya que permite procesar lotes de imágenes y una vez finalizado arroja los valores de cobertura para cada imagen en una tabla, lo que agiliza y reduce mucho los tiempos de trabajo requeridos respecto del otro programa.

Las fotografías tomadas en la franja con alta fertilización nitrogenada a la siembra será denominada “franjaN” y la franja sin fertilización nitrogenada a la siembra “franjaSN”. Con los dos valores de FCVV se procederá a realizar el cálculo del índice de respuesta (IR) en forma similar a Johnson *et al.* (2000), mediante la Ecuación 1:

$$IR = \frac{FCVV_{franjaN}}{FCVV_{franjaSN}} \quad [1]$$

Una vez obtenidos los datos de IR, se los comparó con índices calculados por otros autores, para verificar la utilidad y precisión de la técnica utilizada en vistas a desarrollar un método similar a los estudiado por Johnson y Raun (2003) y Raun *et al.* (2005). Estos autores han estudiado formas de obtener estimaciones confiables del índice de respuesta a cosecha ( $IR_{cosecha}$ ) a partir de los valores de rendimiento, que permita decidir la dosis de refertilización con un indicador sólido. El mismo fue calculado según la Ecuación 2:

$$IR_{cosecha} = \frac{RTO_{franjaN}}{RTO_{franjaSN}} \quad [2]$$

donde  $RTO_{franjaN}$  y el  $RTO_{franjaSN}$  son los rendimientos de los tratamientos con y sin fertilización nitrogenada a la siembra, respectivamente.

Por otro lado se usó el  $IR_{medio}$  obtenido en V8, como entrada para la ecuación de regresión obtenida por Melchiori (2006) en estudios de utilización de sensores remotos para el manejo sitio específico del nitrógeno, para comparar la dosis de N obtenida con la DOEN ponderada por zonas de manejo del ensayo de fertilización ( $DOEN_p$ ). La función hallada por este autor se muestra en la Ecuación 3:

$$N = 167,56 \cdot IR - 166,08 \quad [3]$$

donde N es la dosis de nitrógeno ( $kg\ ha^{-1}$ ) e IR es el índice de respuesta obtenido.

## II.4. Mediciones a cosecha

Las franjas refertilizadas en V8, tratamientos (1, 2, 3, 4, 5), fueron recolectadas con una cosechadora con la que cuenta el establecimiento, que posee monitor de rendimiento de cultivos y capacidad de georeferenciación mediante GPS, con la cual se determinó el rendimiento de cada una de las franjas.

Luego se analizaron estos mapas de rendimiento mediante el programa Quantum Gis Wroclaw (Quantum GIS Development Team, 2011). Dicho procesamiento consistió, en una primera instancia, en la limpieza del mapa de rendimiento del lote completo, esto es, la eliminación de aquellos datos que por diferentes motivos generaban una distorsión de los datos recolectados, es decir, que eran inconsistentes o incoherentes con la realidad. Entre las fallas que dan origen a estos datos podemos encontrar: en la preparación y mantenimiento de alguno de los componentes del sistema que toma los datos (GPS, consola, sensores) o bien, inducidos por el operario durante el proceso de cosecha, ejemplo: indebida calibración de peso y humedad, incorrecto ajuste del ancho de corte. Otros, más que errores son desviaciones en la medición, y ocurren producto de la manera en que funciona el sistema de mapeo en sí, como por ejemplo, atascamientos de la cosechadora, entradas y salidas de la cabecera, cosecha con más de una máquina, y a veces errores de GPS (Bragachini *et al.*, 2006).

Con este fin se utilizó el análisis de Intervalo Intercuartil (IIQ) (Tukey, 1977). El enfoque del IIQ es un método de la estadística descriptiva, analítico, no paramétrico que identifica los valores extremos a través de una determinación estadística detallada de la distribución de datos. Los puntos extremos o valores atípicos (observaciones numéricamente distantes del resto de los datos) se definen entonces como los valores de los datos que se encuentran más allá de una "valla interior", también llamados "outliers", definidos por la Ecuación 4:

$$X < Q1 - 1,5 \cdot IIQ \text{ ó } X > Q3 + 1,5 \cdot IIQ \quad [4]$$

donde Q1 y Q3 son los cuartiles primero y tercero, y  $IIQ = Q3 - Q1$ .

Una vez limpios los mapas, se construyeron de grillas con polígonos cuadrados de lado igual al ancho de la maquina cosechadora. Luego fue superpuesta la grilla sobre la capa de mapa de rendimiento y se la rotó la de modo que coincidiera la dirección de la cosecha con la dirección de los ejes de la grilla, para respetar la posición de cada dato de rendimiento en relación a sus vecinos.

Ya ubicada la grilla, para cada polígono de la misma se promediaron los atributos de todos los puntos del mapa de rendimiento que quedaran bajo su superficie.

Posteriormente, se identificaron los tratamientos en el mapa y se agregaron campos de información a la base de datos de la capa correspondiente a los siguientes parámetros:

- Obs: Datos observados, es decir, cada uno de los polígonos del mapa de rendimiento.
- N: nitrógeno, cantidad de N aplicada a cada polígono.
- N<sup>2</sup>: nitrógeno cuadrado, cuadrado de la cantidad de N aplicada a cada polígono.
- Z: zona de manejo de: 1: baja productividad, 2: alta productividad.

Los campos considerados de interés para evaluar en el modelo (N y N<sup>2</sup>) toman valores sobre un rango continuo (variables cuantitativas), mientras que el último campo de interés (ZM) es una variable cualitativa con dos categorías representadas como variables “Dummy”, indicadoras o dicotómicas, las cuales sirvieron para identificar categorías o clase a la que pertenecen las observaciones y observar el efecto de las dos zonas de manejo. 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 N puedan ser comparados con la respuesta media (Bongiovanni, 2002). Finalmente, se incluyeron las interacciones entre las variables “zona de manejo”, “dosis de nitrógeno” y “dosis de nitrógeno cuadrado” de la siguiente forma:

- Z2xN
- Z2xN<sup>2</sup>

## **II.5. Análisis estadístico**

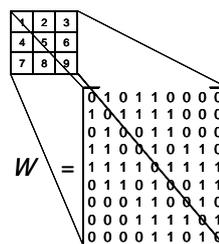
Para el análisis estadístico se aplicaron modelos de Econometría Espacial, especialidad dentro de la Econometría que se ocupa del tratamiento de la interacción espacial (autocorrelación espacial) y de la estructura espacial (heterocedasticidad) en los modelos de regresión (Anselin, 1999). Esto es así porque uno de los problemas es que la estadística tradicional que se usa en el análisis de parcelas experimentales y de ensayos a campo asume que las observaciones son independientes y homocedásticas. En el caso de los datos de agricultura de precisión, este supuesto de independencia ya no es válido. Las observaciones recogidas con monitor de rendimiento están claramente relacionadas con las observaciones vecinas. Los rendimientos del cultivo se deben a una respuesta a los insumos que se aplican, a las características predeterminadas del sitio, y a los factores climatológicos aleatorios (Bullock y Bullock, 2000).

Una de las herramientas usadas en Econometría es el análisis de regresión. Su objetivo primordial es estimar el valor de una variable aleatoria (la variable dependiente: por ej.: el rendimiento de un cultivo), dado que los valores de una o más variables asociadas (la o las variables independientes, por ej.: dosis de fertilizante N) son conocidos. La ecuación de

regresión es la fórmula algebraica por la cual se determina el valor estimado de la variable dependiente o de respuesta (Anselin, 1999).

Para realizar el análisis de regresión se recurrió a una aplicación especializada en el trabajo con datos espaciales georeferenciados llamado OpenGeoDa 0.9.8.8 (GeoDa Center for Geospatial Analysis and Computation, Arizona State University.). Fue diseñado para análisis espacial y análisis multivariado exploratorio de datos (globales y locales) de autocorrelación espacial. Realiza regresión lineal básica incluyendo modelos espaciales como el modelo de retardo espacial y el modelo de error espacial, ambos estimados por máxima verosimilitud.

En primer lugar se usó el modelo clásico de Mínimos Cuadrados Ordinarios (OLS, por sus siglas en inglés). La inclusión de dicho modelo, se efectuó con el fin de estimar y comprobar la dependencia espacial que, en el caso de los datos de rendimiento, se presenta como la similitud de valores para ubicaciones similares. En otras palabras, valores altos o bajos de rendimiento tienden a estar rodeados de observaciones vecinas con valores similares. Por lo tanto, y debido a que los valores de los factores de rendimiento en un punto del lote dependen de los valores en otros puntos del lote, los datos de este lote van a presentar autocorrelación espacial (Bongiovanni, 2006). Por lo tanto, para que la regresión sea estadísticamente significativa, se tiene que corregir esta autocorrelación espacial, de modo tal que los estimadores obtenidos permitan realizar cálculos económicos con precisión. A los fines de corregir dicha dependencia espacial, cada observación fue ponderada a través de la confección de una matriz de ponderadores espaciales con una estructura “Queen” (W) de 8 vecinos con bordes y esquinas en común (Anselin, 1988), estandarizada por fila. La misma se esquematiza en la Figura 3.



**Figura 3.** Matriz “Queen” de ponderadores espaciales.

Los parámetros estadísticos observados fueron:

- $R^2$ : proporción de la variabilidad en un conjunto de datos que se explica por el modelo estadístico. Proporciona una medida de qué tan bien los resultados futuros es probable que sean predichos por el modelo.

- Criterio de información de Akaike (AIC, Akaike, 1974) para cuantificar la validez de selección del modelo a aplicar. Dado un conjunto de modelos candidatos para los datos, el modelo preferido es el que tiene el valor mínimo de AIC.

- Índice “I” de Moran (Moran, 1950) para evaluar la autocorrelación entre los datos. El mismo asume valores entre -1 (que indica dispersión perfecta) y 1 (correlación perfecta). Un valor de cero indica una distribución espacial al azar.

- Multiplicadores de Lagrange (ML): procedimiento para encontrar los máximos y mínimos de funciones de varias variables sujetas a restricciones. Son estadísticas para las pruebas de dependencia espacial en los modelos lineales. Se evaluaron los ML simples y robustos tanto para la variable dependiente como para la dependencia del error.

El otro modelo, denominado de error espacial autorregresivo (SAR), utiliza la metodología de máxima verosimilitud para la determinación de los campos de interés y parámetros estadísticos. Dicho modelo asume que la variable dependiente no está correlacionada por sí misma, sino que es el error de muestreo aleatorio el que está correlacionado. Matemáticamente se expresa según la Ecuación 5:

$$Y = X\beta + \varepsilon \quad [5]$$

donde Y es el vector (n por 1) de observaciones de la variable dependiente, X es la matriz de observaciones de las variables independientes,  $\beta$  es el vector de parámetros estimados, y  $\varepsilon$  es el término de error espacial, obtenido mediante la Ecuación 6:

$$\varepsilon = \lambda W\varepsilon + \mu \quad [6]$$

donde  $\mu$  es el error de muestreo aleatorio que sigue una especificación autoregresiva espacial (SAR) con un coeficiente autoregresivo  $\lambda$  (lambda), corregido también por la matriz de ponderadores espaciales (W).

La respuesta del maíz al N se modeló como un polinomio de segundo grado por cada ZM según la Ecuación 7:

$$Y_{ij} = \beta_0 + \beta_1 Nf + \beta_2 Nf^2 + \beta_3 ZM + \beta_4 Nf \times ZM + \beta_5 N^2 \times ZM + \varepsilon_{ij} \quad [7]$$

donde  $Y_{ij}$  es el rendimiento del maíz ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) por cada punto ij del monitor de rendimiento,  $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$  y  $\beta_5$ , son los parámetros de la ecuación de regresión, N es la dosis de fertilizante ( $\text{kg ha}^{-1}$ ), ZM se refiere a las variables “dummy” para cada zona de manejo, y  $\varepsilon_{ij}$  es el término de error de la regresión por cada ubicación (Gregoret *et al.* 2011).

## II.6. Optimización de funciones

Para obtener en cada ZM las dosis óptimas económicas de nitrógeno (DOEN) o cantidad de N necesaria para alcanzar el máximo retorno económico al fertilizar, se realizó una optimización tradicional de las funciones (Dillon y Anderson, 1990) según la Ecuación 8 y su primera derivada en la Ecuación 9:

$$\pi = py(\beta_0 + \beta_1 N + \beta_2 N^2 + \beta_3 ZM + \beta_4 NZM + \beta_5 N^2 ZM) - pN - F \quad [8]$$

$$DOEN = \frac{\left(\frac{pN}{py}\right) - \beta_1 - \beta_4 ZM}{2\beta_2 + 2\beta_5 ZM} \quad [9]$$

donde  $\pi$  es el retorno económico al nitrógeno,  $py$  es el precio del Maíz ( $\$ \text{kg}^{-1}$ ),  $\beta_0$ ,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ ,  $\beta_3$ ,  $\beta_4$  y  $\beta_5$ , son los parámetros de la ecuación de regresión,  $N$  es la dosis de fertilizante ( $\text{kg ha}^{-1}$ ),  $ZM$  se refiere a las variables “dummy” para zona de manejo,  $pN$ : precio del N elemental (Urea) ( $\$ \text{kg}^{-1}$ ), y  $F$  son los costos fijos.

Esta función debe ser interpretada 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 y Lowenberg-DeBoer, 2006).

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).

Según la relación de precios entre el fertilizante y el grano de maíz se establecerá la dosis óptima económica del nitrógeno aplicado.

El cálculo por hectárea de rendimientos y costos de fertilizante dentro de cada tecnología de dosificación se realizó ponderándolo por el porcentaje de participación de cada sub zona dentro del lote. Esta ponderación se realiza para comparar los retornos de nitrógenos por hectárea que se obtendrían en caso de adoptar tecnología de dosificación fija o variable.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### III.1. Toma de fotografías y procesamiento

Ejemplos de las fotografías cenitales inalteradas tomadas en el ensayo por encima de la cubierta del maíz se muestran en la Figura 4 para el etapa de V4 y la Figura 5 para la de V8: en la columna izquierda (a) corresponden al ensayo sin fertilización nitrogenada a la siembra y en la derecha (b) a la fertilizada.



**Figura 4.** Fotografías inalteradas de los tratamientos sin (a) y con (b) fertilización nitrogenada a la siembra en el estado de V4.

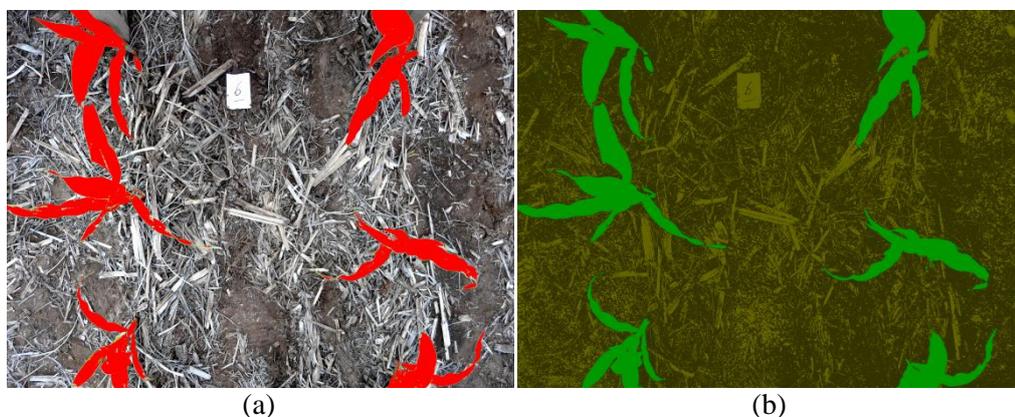


**Figura 5.** Fotografías inalteradas de los tratamientos sin (a) y con (b) fertilización nitrogenada a la siembra en el estado de V8.

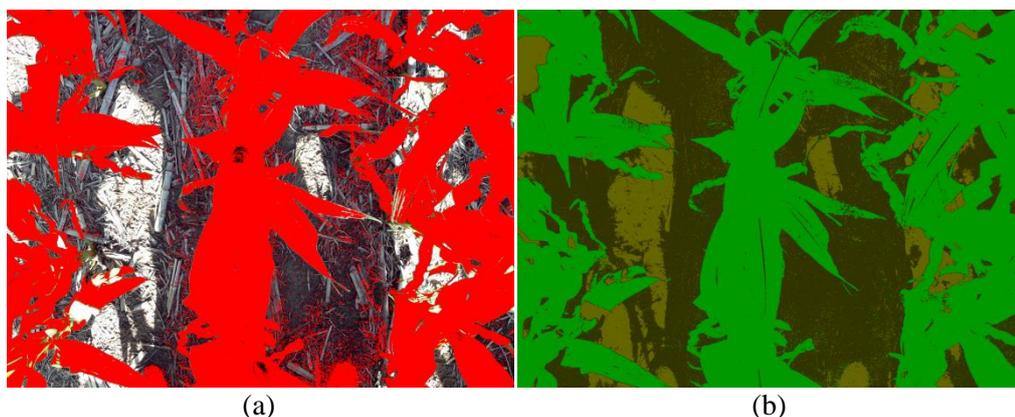
Para las imágenes mostradas arriba los valores de cobertura según ENVI fueron: 4(a) 8,34 %, 4(b) 9,49%, 5(a) 46,34% y 5(b) 55,51%. Los valores arrojados por el SisCob fueron: 4(a) 8,88 %, 4(b) 10,5%, 5(a) 45,41% y 5(b) 52,81%.

Para visualizar la capacidad de las aplicaciones de distinguir los distintos elementos que componen la imagen, en la Figura 6 en V4 y Figura 7 en V8 se muestra una comparación lado a lado del resultado del procesamiento realizado por cada una: ENVI (a) y SisCob (b). Los colores empleados en cada programa para la selección del dosel son claramente

diferentes para facilitar la distinción de los mismos. Al conocer la suma de las áreas destacadas (en rojo en una y en verde en la otra) y la superficie total por imagen (píxeles totales), se calculó la fracción de cobertura vegetal verde.



**Figura 6.** Fotografías procesadas digitalmente con ENVI (a) y con SisCob (b) en V4.



**Figura 7.** Fotografías procesadas digitalmente con ENVI (a) y con SisCob (b) en V8.

Cabe destacar cómo SisCob supera a ENVI en la facilidad con la que es posible incorporarle los patrones a seleccionar deseados, así como las particularidades mencionadas anteriormente, para lograr un calibrado cercano al óptimo. Esta diferencia se puede ver en la figura 7 al notar que la imagen (b) no presenta áreas foliares despintadas ni la “suciedad” que sí aparecen en la imagen (a).

Aunque el color del suelo cambia con las condiciones de humedad del suelo y con las condiciones de iluminación (sol directo vs. sombra), efecto que también se observa sobre las hojas del cultivo, si el software es calibrado correctamente no debiera tener problemas con su capacidad de distinguir el área foliar de la tierra u otros elementos presentes.

Los valores de cobertura correspondientes a las imágenes mostradas más arriba son: figura 6 (a) 9,49% y 10,5% para la (b); 55,51% para la figura 7 (a) y para la (b) 52,81, correspondiendo (a) y (b) a los procesamientos llevados a cabo mediante ENVI y SisCob, respectivamente.

### III.2. Análisis de cobertura e índice de respuesta

Los datos de cobertura por tratamiento y zona de manejo para las observaciones realizadas en V4 y V8 respectivamente se muestran en las Tablas 2 y 3. En estas se puede apreciar en todos los casos un efecto zona, entendiéndolo como la diferencia en cobertura del cultivo entre las zonas de alta y baja producción. Este efecto se mantiene tanto con 4 como con 8 hojas desplegadas. No obstante no se vislumbran diferencias entre tratamientos para el primer momento de observación (V4), pero sí se hacen evidentes en V8, lo que concuerda con lo propuesto por Mullen *et al.* (2003) que plantearon que recién a partir de aproximadamente 7 hojas desplegadas se revelan diferencias en cobertura para distintos tratamientos.

**Tabla 2.** Porcentajes de cobertura (%) según programa utilizado (ENVI, SisCob), tratamiento, y zona de manejo determinado en V4.

| Sitio | ENVI     |           | SisCob   |           |
|-------|----------|-----------|----------|-----------|
|       | Franja N | Franja SN | Franja N | Franja SN |
| AP    | 9,64%    | 9,61%     | 10,05%   | 9,87%     |
| BP    | 8,51%    | 8,28%     | 9,47%    | 9,39%     |

AP: alta producción, BP: baja producción, FranjaN: tratamiento fertilizado con nitrógeno a la siembra, FranjaSN: tratamiento no fertilizado.

**Tabla 3.** Porcentajes de cobertura (%) según programa utilizado (ENVI, SisCob), tratamiento y zona de manejo determinado en V8.

| Sitio | ENVI     |           | SisCob   |           |
|-------|----------|-----------|----------|-----------|
|       | Franja N | Franja SN | Franja N | Franja SN |
| AP    | 61,97    | 45,68     | 62,54    | 45,53     |
| BP    | 59,46    | 46,81     | 60,89    | 48,16     |

AP: alta producción, BP: baja producción, FranjaN: tratamiento fertilizado con nitrógeno a la siembra, FranjaSN: tratamiento no fertilizado.

A partir de los datos de porcentaje de cobertura presentados anteriormente se calculó el índice de respuesta (IR) según software utilizado (ENVI, SisCob). Los mismos se muestran en las tablas 4 y 5 (estadios de 4 y 8 hojas completamente desplegadas respectivamente). En una columna adicional se incluyen los valores del índice de respuesta a cosecha ( $IR_{cosecha}$ ), de modo que se pueda comparar la utilidad del calculado a partir de la cobertura en diferentes momentos del cultivo.

**Tabla 4.** Índice de respuesta (IR) a partir de cobertura según programa utilizado e índice de respuesta a cosecha ( $IR_{cosecha}$ ), para cada zona de manejo determinado en V4.

| Sitio | IR   |        | $IR_{medio}$ | $IR_{cosecha}$ |
|-------|------|--------|--------------|----------------|
|       | ENVI | SisCob |              |                |
| AP    | 1    | 1,02   | 1,02         | 1,37           |
| BP    | 1,03 | 1,01   |              |                |

AP: alta producción, BP: baja producción,  $IR_{medio}$ : promedio de IR por zonas (AP, BP) y software (ENVI, SisCob),  $IR_{cosecha} = R_{to_{franjaN}} / R_{to_{franjaSN}}$ , donde franjaN y franjaSN son tratamientos con y sin fertilización.

**Tabla 5.** Índice de repuesta (IR) a partir de cobertura según programa utilizado e índice de respuesta a cosecha ( $IR_{cosecha}$ ), para cada zona de manejo determinado en V8.

| Sitio | IR   |        | $IR_{medio}$ | $IR_{cosecha}$ |
|-------|------|--------|--------------|----------------|
|       | ENVI | SisCob |              |                |
| AP    | 1,36 | 1,37   | 1,31         | 1,37           |
| BP    | 1,27 | 1,26   |              |                |

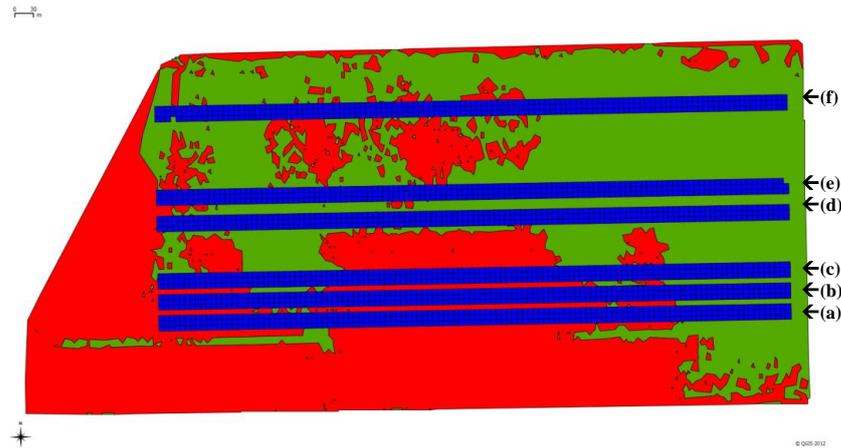
AP: alta producción, BP: baja producción,  $IR_{medio}$ : promedio de IR por zonas (AP, BP) y software (ENVI, SisCob),  $IR_{cosecha} = R_{to_{franjaN}} / R_{to_{franjaSN}}$ , donde franjaN y franjaSN son tratamientos con y sin fertilización.

Del análisis los valores de IR se observa que cuanto más adelante en la temporada de crecimiento se hace el cálculo del mismo, más evidentes son las diferencias en respuesta del cultivo entre el tratamiento testigo y el de exceso de N. El mejor ajuste derivado de observaciones en etapas fenológicas más avanzadas del cultivo coincide con lo obtenido por Mullen *et al.* (2003). Si bien estos autores utilizaron un IR calculado a partir de mediciones de NDVI y no de cobertura vegetal, la relación entre el primero y este último ya ha sido analizada en este trabajo y, aunque no son equivalentes, puede describirse mediante una relación lineal. Esta relación, es válida para coberturas vegetales inferiores al 80%. A partir de coberturas con este valor, existe un efecto de saturación del NDVI, por el cual el NDVI no se incrementa en una relación lineal con la fracción de cobertura (González Piqueras, 2006).

### III.3. Análisis de mapa de rendimiento

Concluida la cosecha, se recolectaron los datos del monitor de rendimiento de la cosechadora para poder procesarlos. Este procesamiento consistió en lo siguiente: se eliminaron los “outliers” con el método del análisis de Intervalo Intercuartil; se creó una grilla que abarcara completamente el ensayo; y para las celdas de la misma se promediaron los atributos de los puntos que abarcaba cada una y se identificaron las franjas de cada tratamiento como se ilustra en la Figura 8.

Ubicados los tratamientos del ensayo, en la base de datos de la capa se crearon los campos para cada variable que interviene en el análisis estadístico. Luego se analizaron los dos modelos estadísticos planteados, OLS y SAR, empleando el OpenGeoDa.



**Figura 8.** Franjas de refertilización correspondientes a cada tratamiento: (a) Testigo, (b) 16,2, (c) 32,4, (d) 44,8, (e) 64,8 y (f) 97,2 kg N ha<sup>-1</sup> respectivamente, y su ubicación dentro del lote del ensayo (rojo - BP, verde - AP).

La salida del análisis de regresión se muestra en la Tabla 6 para la situación de ausencia de zonas de manejo y en la Tabla 7 con presencia de zonas de manejo, cada uno con ambos modelos, el OLS y el SAR.

**Tabla 6.** Salida estadística del análisis de regresión para los modelos: Mínimos Cuadrados Ordinarios (OLS) y Error Espacial Autorregresivo (SAR), sin zonas de manejo.

| Variable             | OLS     |              | SAR        |              |
|----------------------|---------|--------------|------------|--------------|
|                      | Valor   | Probabilidad | Coficiente | Probabilidad |
| R <sup>2</sup>       | 0,243   | -            | 0,848      | -            |
| Máxima Verosimilitud | -43524  | -            | -40210     | -            |
| AIC                  | 87053,3 | -            | 80425,8    | -            |
| Constante            | 7411,36 | 0,000        | 7849,25    | 0,000        |
| N                    | 30,69   | 0,000        | 25,38      | 0,000        |
| N <sup>2</sup>       | -0,099  | 0,000        | -0,131     | 0,000        |
| Lambda               | -       | -            | 0,837      | 0,000        |
| I de Moran           | 0,828   | -            | -          | -            |
| ML (lag)             | 6297,78 | 0,000        | -          | -            |
| ML Robusto (lag)     | 14,57   | 0,000        | -          | -            |
| ML (error)           | 7076,63 | 0,000        | -          | -            |
| ML Robusto (error)   | 793,41  | 0,000        | -          | -            |

OLS: modelo de mínimos cuadrados ordinarios, SAR: modelo de autorregresión espacial, AIC: criterio de información de Akaike, ML: multiplicadores de Lagrange

En la primera situación, sin zonificar (Tabla 6), se observa en el OLS que los datos obtenidos a partir del mapa de rendimiento están correlacionados espacialmente. Esto lo vemos a través de un I de Moran 0,828 y un pobre ajuste en R<sup>2</sup> (0,243). ML (error) y ML Robusto (error) mayores que sus contrapartes (lag) altamente significativos (p<0,01), nos indican la conveniencia de emplear el modelo SAR. Este supuesto se comprobó al notar un mayor R<sup>2</sup> (0,848) y menor AIC, por lo tanto, los datos se ajustan mejor por el modelo SAR porque los valores de los estimadores mencionados anteriormente indican que los datos se

explican mejor por la dependencia espacial del error de estimación y no por la dependencia espacial de la variable observada.

**Tabla 7.** Salida estadística del análisis de regresión para los modelos: Mínimos Cuadrados Ordinarios (OLS) y Error Espacial Autorregresivo (SAR), con zonas de manejo.

| Variable             | OLS     |              | SAR     |              |
|----------------------|---------|--------------|---------|--------------|
|                      | Valor   | Probabilidad | Valor   | Probabilidad |
| R <sup>2</sup>       | 0,423   | -            | 0,847   | -            |
| Máxima Verosimilitud | -42792  | -            | -40177  | -            |
| AIC                  | 85596,3 | -            | 80366,6 | -            |
| Constante            | 7817,65 | 0,000        | 7955,1  | 0,000        |
| N                    | 26,24   | 0,000        | 23,67   | 0,000        |
| N <sup>2</sup>       | -0,092  | 0,000        | -0,125  | 0,000        |
| Z2                   | 761,51  | 0,000        | 251,33  | 0,000        |
| Z2XN                 | -6,61   | 0,000        | -5,11   | 0,000        |
| Z2XN <sup>2</sup>    | 0,007   | 0,319        | 0,019   | 0,000        |
| Lambda               | -       | -            | 0,824   | 0,000        |
| I de Moran           | 0,747   | -            | -       | -            |
| ML (lag)             | 5072    | 0,000        | -       | -            |
| ML Robusto (lag)     | 83,3    | 0,000        | -       | -            |
| ML (error)           | 5759,1  | 0,000        | -       | -            |
| ML Robusto (error)   | 770,4   | 0,000        | -       | -            |

OLS: modelo de mínimos cuadrados ordinarios, SAR: modelo de autorregresión espacial, AIC: criterio de información de Akaike, ML: multiplicadores de Lagrange

En la segunda situación, con zonas de manejo (Tabla 7), se ve que aún sin aplicar el SAR, si bien los efectos de autocorrelación espacial seguían presentes, los indicadores R<sup>2</sup> (0,423), AIC e I de Morán (0,747) habían mejorado. La explicación para que esto suceda es que la creación de zonas de manejo usando análisis “cluster”, sumado al conocimiento del lote, le permite al modelo corregir (parcialmente) la autocorrelación espacial. A pesar de esta leve mejora, los Multiplicadores de Lagrange seguían señalando la conveniencia de emplear el modelo de error espacial. Por otro lado la interacción entre N cuadrado y zona 2, fue no significativa (p=0,319).

Al analizar el modelo SAR con zonas se ve la mejora en el R<sup>2</sup>, un AIC menor a todos los anteriores y los parámetros de la regresión todos altamente significativos (p<0,01). No obstante, para comprobar la conveniencia del SAR con zonificación respecto del no zonificado se realizó una prueba de Fisher, cuyos resultados se muestran en la Tabla 8.

**Tabla 8.** Prueba de Fisher para la comparación entre el modelo de autorregresión espacial sin zonas (SAR S/Z) y con zonas (SAR C/Z).

| Modelo  | gl | AIC     | MV     | Chi <sup>2</sup> | gl | Pr(>Chi <sup>2</sup> ) |
|---------|----|---------|--------|------------------|----|------------------------|
| SAR S/Z | 2  | 80425,8 | -40210 |                  |    |                        |
| SAR C/Z | 5  | 80366,6 | -40177 | 66               | 3  | 0,000                  |

gl: grados de libertad, AIC: criterio de información de Akaike, MV: máxima verosimilitud

Los resultados altamente significativos de la prueba de Fisher sumados a los anteriores brindan, con más certeza, la comprobación de la conveniencia de emplear el modelo SAR con zonas sobre la no zonificación del lote.

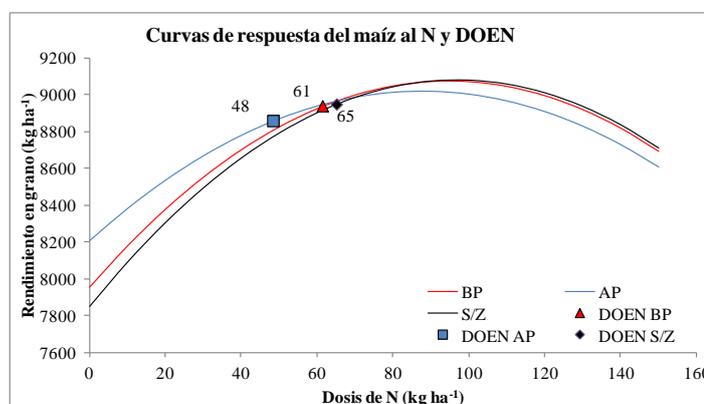
### III.4. Dosis óptima económica de N

La salida estadística del análisis de regresión realizado sobre el mapa de rendimiento brindó los coeficientes necesarios para construir las funciones de respuesta del maíz a la fertilización nitrogenada con y sin zonificación. A partir de éstas se calculó el óptimo económico de la dosis de N. En la Tabla 9 se muestran las funciones de respuesta para cada caso, la DOEN y el rendimiento en grano que se espera obtener con esa dosis.

**Tabla 9.** Función de respuesta del maíz al N, dosis óptima económica de nitrógeno (DOEN) ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) y rendimiento esperado ( $R_{to}$ ) ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) para situaciones sin zonificación (S/Z) y alta (AP) y baja (BP) producción.

| Condición | Función de respuesta           | DOEN | $R_{to}$ |
|-----------|--------------------------------|------|----------|
| S/Z       | $7849,3 + 25,38 N - 0,131 N^2$ | 65   | 8949     |
| BP        | $7955,1 + 23,67 N - 0,125 N^2$ | 61   | 8937     |
| AP        | $8206,4 + 18,57 N - 0,106 N^2$ | 48   | 8856     |

En la Figura 9 se muestran en forma gráfica las curvas de respuesta del rendimiento en grano del maíz al nitrógeno aplicado y las dosis óptimas económicas correspondientes a las funciones de producción antes mostradas. El propósito de esto es brindar un elemento visual de diferenciación de la capacidad de respuesta a la fertilización en cada situación: mayor ordenada al origen, pendiente menos pronunciada y rendimiento máximo con menores dosis en AP; y respuesta similar para BP y S/Z donde la ordenada al origen es menor, las pendientes son más pronunciadas y los rendimientos máximos requieren mayor cantidad de N.



**Figura 9.** Curvas de respuesta del maíz al nitrógeno y dosis óptima económica (DOEN) para no zonificación, zona de baja y zona de alta producción (S/Z, BP y AP respectivamente).

Una vez obtenidas las dosis óptimas para cada situación, sus superficies, rendimiento esperado y empleando los precios de maíz y nitrógeno mencionados anteriormente, fue posible realizar los cálculos de retorno de N para evaluar la conveniencia económica de la dosificación variable de N por zonas de manejo, que se aparecen en la Tabla 10.

**Tabla 10.** Análisis económico de retorno de nitrógeno (N) comparando para una única zona de manejo (ZM) versus dosis variable en dos ZM.

|   | Sin Zonificar | Zonificado  |      |
|---|---------------|-------------|------|
|   |               | BP          | AP   |
| DOEN (kg ha <sup>-1</sup> )                     | 65            | 61          | 48   |
| Superficies (ha)                                | 37            | 27          | 10   |
| Proporción (%)                                  | 1             | 0,73        | 0,27 |
| Costo fertilizante (\$ ha <sup>-1</sup> )       | 226           | 213         | 168  |
| Rendimiento (kg ha <sup>-1</sup> )              | 8947          | 8938        | 8857 |
| Ingreso (\$)                                    | 3731          | 3727        | 3693 |
| Retorno N (\$ ha <sup>-1</sup> )                | 3505          | 3514        | 3526 |
| <b>Retorno N ponderado (\$ ha<sup>-1</sup>)</b> | <b>3505</b>   | <b>3517</b> |      |
| <b>Dif. Retorno N (\$ ha<sup>-1</sup>)</b>      |               | <b>12</b>   |      |

BP: baja producción, AP: alta producción, DOEN: dosis óptima económica de nitrógeno.

Como se desprende del análisis económico, para la situación considerada, el resultado en retorno de N fue de 12 \$ ha<sup>-1</sup> más utilizando zonas de manejo. Se puede ver como la DOEN sin zonificación es mayor que las otras dos, lo que mientras se traduce en mayores costos de fertilizante no se ve reflejado en mayores rendimientos en cada punto del lote. Por otro lado, al calcular el total de N a aplicar en el lote del ensayo se obtienen 2405 kg N con dosis fija y 2127 kg N empleando dosis variable. Esta diferencia en la cantidad total de fertilizante a comprar redundante en una menor inversión y, por lo tanto, menores riesgos económicos para el productor. Desde un punto de vista ambiental, la utilización de menores cantidades reduce los riesgos de contaminación de napas, ríos y otros cuerpos de agua, emisión de gases con efecto invernadero, degradación de suelos, etc.

Este beneficio a favor del manejo con dosificación variable se condice con lo expresado por el análisis estadístico en cuanto a la conveniencia respecto de la no zonificación o manejo con dosis uniforme en todo el lote.

### III.5. Relación DOEN - IR

Como ya fue comprobada la conveniencia de la fertilización por zonas de manejo y fueron calculados tanto el IR<sub>medio</sub> en V8 y la DOEN para cada ZM, es posible comparar la dosis de N (DOEN<sub>IR</sub>) que resulta de introducir ese IR en la función obtenida por Melchiori (2006) con la DOEN ponderada por zonas de manejo (DOEN<sub>p</sub>) de acuerdo a la proporción de superficie de cada una. En la Tabla 11 se muestran estos resultados.

**Tabla 11.** Comparación de la DOEN ( $DOEN_{IR}$ ) obtenida de introducir el  $IR_{medio}$  en la función de Melchiori con la DOEN ponderada por zonas de manejo del ensayo ( $DOEN_p$ ).

| $IR_{medio}$ | V8 | $DOEN_{IR}$ | $DOEN_p$ | Dif  |
|--------------|----|-------------|----------|------|
| 1,31         |    | 53          | 58       | 8,6% |

Se puede apreciar que hay un 9% de diferencia entre la dosis ponderada, obtenida por análisis estadístico del mapa de rendimiento zonificado y aquella obtenida a partir de datos de cobertura obtenidos procesamiento digital de fotografías cenitales del cultivo. Por lo tanto se plantea como una técnica que, si bien requiere experimentación y calibración mayores, es un medio válido en la búsqueda de un indicador predictivo anticipado y confiable de las dosis de nitrógeno requeridas por el cultivo.

## CONCLUSIONES

La facilidad con que se hicieron las mediciones de la cobertura del dosel, hacen de la toma de fotografías digitales cenitales, conjuntamente con el empleo de franjas nitrogenadas contrastantes a la siembra, un medio conveniente para determinar los requerimientos de fertilización en el maíz. Una ventaja adicional es el uso múltiple que se puede dar a una cámara digital y software de escaneo en un laboratorio, en comparación con la función muy especializada y el uso limitado de otros sensores remotos. En este sentido la técnica de imágenes digitales para medir la cobertura de dosel, como se describe en este trabajo, podría ser adaptada fácilmente para aplicaciones similares, como la medición de la tasa de establecimiento de cultivos, rebrote de malezas después de los tratamientos herbicidas o laboreo, o para separar la vegetación muerta de tejido de la planta fresca. Aquí se destaca la utilidad de uno de los programas evaluados, el SisCob, ya que por su simplicidad y escalabilidad resulta muy conveniente, siempre y cuando se realicen las prácticas y calibraciones correspondientes, para la realización de todas las tareas antes mencionadas.

Para las condiciones en las que se realizó este trabajo, el índice de respuesta obtenido con la fracción de cubierta vegetal verde, presentó correspondencias con estudios similares realizados con sensores remotos. Además, se relacionó este índice con la dosis óptima económica de nitrógeno por zonas de manejo.

Por lo tanto, los resultados hallados justifican una mayor experimentación de este método de determinación de requerimientos de fertilización en maíz, de tal forma que se pueda desarrollar y calibrar a campo en diversas condiciones de suelo y clima.

Se determinó tanto en forma estadística como económica que para el lote de estudio fue conveniente la división en dos zonas de manejo.

Este procedimiento, combinado con métodos de agricultura de precisión como la división en zonas de manejo analizada aquí, permite aprovechar todas las ventajas y beneficios del manejo sitio específico tanto a nivel económico como ambiental.

## BIBLIOGRAFÍA

- AACREA. 2011. **Series de precios agropecuarios**. Área de Economía de AACREA. Capital Federal, Argentina.
- AKAIKE, H. 1974. **A new look at the statistical model identification**. IEEE Transactions on Automatic Control. 19(6): 716–723.
- ANDRIULO A. Y G. CORDONE. 1998. **Impacto de labranzas y rotaciones sobre la materia orgánica de suelos de la Región Pampeana Húmeda**. En: Siembra Directa, Cap. 5. 65-96 pp. Editores: Panigatti, J.; H. Marelli; D. Buschiazzo y R. Gil. Editorial Hemisferio Sur.
- ANSELIN, L. 1988. **Spatial Econometrics: Methods and Models**. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands.
- ANSELIN, L. 1999. **Spatial Econometrics**. Staff paper. Bruton Center, School of SocialSciences, University of Texas at Dallas, Richardson. 31 pp.
- BLACKMER, A.M. Y S.E. WHITE. 1998. **Using precision farming technologies to improve management of soil and fertilizer nitrogen**. Australian Journal of Agricultural Research. 49:555-564.
- 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. 2006. **Econometría espacial. Libro agricultura de precisión: Integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable**. Editorial PROCISUR. Cap.8.2. p:162-165.
- BONGIOVANNI, R. y J. LOWENBERG-DEBOER. 2006. **Viabilidad económica. Libro agricultura de precisión: Integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable**. Editorial PROCISUR. Cap.9. p: 171-184.
- BRAGACHINI M.; A. MÉNDEZ y F. SCARAMUZZA. 2004. **Agricultura de Precisión y Siembra Variable de insumos en tiempo real mediante el uso de GPS**. En <http://www.agriculturadeprecision.org/siembCoseAlma/Sembradora%20IOM%20Inteligente.htm>. Fecha de acceso 26/05/2010.
- BRAGACHINI, M.; A. MENDEZ; F. SCARAMUZZA; F. PROIETTI. 2006. **Monitoreo de rendimiento y elaboración de mapas**. Libro agricultura de precisión: Integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable. Editorial PROCISUR. Cap.3. p: 45-55.
- BRAGACHINI, M; A. MÉNDEZ; F. SCARAMUZZA; J.P. VÉLEZ y D. VILLARROEL. 2009. **Determinación de Viabilidad Económica de la Tecnología de Dosis Variable**

- de Insumos en Maíz.** INTA Manfredi. Proyecto Agricultura de Precisión. Manfredi, Córdoba, Argentina. 9 pp.
- BROCK, A.; S.M. BROUDER; G. BLUMHOFF y B.S. HOFMANN. 2005. **Defining Yield-Based Management Zones for Corn–Soybean Rotations.** *Agron. J.* 97(4):1115-1128.
- BULLOCK, D. S. y D. G. BULLOCK. 2000. **From Agronomic Research to Farm Management Guidelines: A Primer on the Economics of Information and Precision Technology.** *Precision Agriculture.* 2(1):71-101.
- CASSMAN, K.G.; A. DOBERMAN y D.T. WALTERS. 2002. **Agroecosystems, nitrogen-use efficiency, and nitrogen management.** *Ambio* 31:132-140.
- CHANG, J.; D.E. CLAY; C.G. CARLSON; C.L. REESE; S.A. CLAY y M.M. ELLSBURY. 2004. **Defining yield goals and management zones to minimize yield and nitrogen and phosphorus fertilizer recommendation errors.** *Agron. J.* 96:825–831.
- DILLON, J. y J. ANDERSON. 1990. **The Analysis of Response in Crop and Livestock Production.** Pergamon Press, New York.
- FALCO, A. 2010. **Desarrollo de un modelo de diagnostico de fertilización nitrogenada por zonas de manejo.** Tesis. Fac de Agronomía y Veterinaria, Univ. Nacional de Río Cuarto, Río Cuarto, Córdoba, Argentina.
- FOX, R.H. y W.P. PIEKIELEK. 1995. **The relationship between corn grain yield goals and economic optimum nitrogen fertilizer rates.** Publication #136. Crop and Soil Sciences Department, Pennsylvania State University, University Park.
- FREEMAN, K.W.; K. GIRMA; D.B. ARNALL; R.W. MULLEN; K.L. MARTIN; R.K. TEAL y W.R. RAUN. 2007. **By-plant prediction of corn forage biomass and nitrogen uptake at various growth stages using remote sensing and plant height.** *Agron. J.* 99:530–536.
- FRIDGEN, J.J. 2000. **Development and evaluation of unsupervised clustering software for sub-field delineation of agricultural fields.** M.S. thesis. Univ. of Missouri, Columbia.
- FRIDGEN, J.J.; N.R. KITCHEN; K.A. SUDDUTH; S.T. DRUMMOND; W.J. WIEBOLD y C.W. FRAISSE. 2004. **Management zone analyst (MZA): software for subfield management zone delineation.** *Agron. J.* 96: 100-108.
- GARCÍA, O. F. 2005. **Criterios para el manejo de la fertilización del cultivo de maíz.** Presentado en la jornada “Maíz” capacitación agropecuaria INPOFOS/PPI/PPIC/ cono sur pp. 1-2, Argentina.
- GONZÁLEZ PIQUERAS, J. 2006. **Evapotranspiración de la cubierta vegetal mediante la determinación del coeficiente de cultivo por teledetección.** *Extensión*

- a escala regional: Acuífero 08.29 Mancha Oriental.** En, Departament de Termodinàmica. Facultat de Física. Valencia: Universitat de València. 331 p.
- GREGORET, M.C.; M. DÍAZ ZORITA; J. DARDANELLI; y R. BONGIOVANNI. 2011. **Regional model for site-specific corn nitrogen fertilization rainfed in Haplustolls of the central pampas, Argentina.** Precision Agriculture. 12(6):831-849.
- HATFIELD, J.L.; A.A. GITELSON; J.S. SCHEPERS y C. WALTHALL. 2008. **Application of spectral remote sensing for agronomic decisions.** Agron. J. 100:117-131.
- HONG, N.; P.C. SCHARF; J.G. DAVIS; N.R. KITCHEN y K.A. SUDDUTH. 2007a. **Economically optimal nitrogen rate reduces soil residual nitrate.** Journal of Environmental Quality 36:354-362.
- HONG, S.D.; J. S. SCHEPERS; D.D. FRANCIS y M.R. SCHLEMMER. 2007b. **Comparison of ground-based remote sensors for evaluation of corn biomass affected by nitrogen stress.** Communications in Soil Science and Plant Analysis, 38:2209-2226.
- HUNT, E.R. JR.; C.S.T. DAUGHTRY; J.E. MCMURTREY; C.L. WALTHALL; J.A. BAKER; J.C. SCHROEDER y S. LIANG. 2002. **Comparison of remote sensing imagery for nitrogen management.** En: Proceedings of the Sixth International Conference on Precision Agriculture and Other Precision Resources Management, Editado por P.C. Robert, R.H. Rust and W.E. Larson (ASA-CSSA-SSSA, Madison, WI, USA), CD-ROM.
- INMAN, D.J.; R. KHOSLA y D.G. WESTFALL. 2005. **Nitrogen uptake across site-specific management zones in irrigated corn production systems.** Agron. J. 97:169–176.
- JOHNSON, G.V.; W.R. RAUN y R.W. MULLEN. 2000. **Nitrogen use efficiency as influenced by crop response index.** Agronomy abstracts. ASA, CSSA, and SSSA, Madison, WI. p. 291.
- JOHNSON, G.V. y W.R. RAUN. 2003. **Nitrogen response index as a guide to fertilizer management.** Journal of Plant Nutrition, 26: 249–262.
- KOCH, B.; R. KHOSLA; W.M. FRASIER; D.G. WESTFALL y D. INMAN. 2004. **Economic feasibility of variable-rate nitrogen application utilizing site-specific management zones.** Agron. J. 96:1572–1580.
- LUDWIG, B.; D. GEISSELER; K. MICHEL; R.G. JOERGENSEN; E. SCHULZ; I. MERBACH; J. RAUPP; R. RAUBER; K. HU; L. NIU y X. LIU. 2011. **Effects of fertilization and soil management on crop yields and carbon stabilization in soils.** A review. Agron. Sustain. Dev. 31, 361-372.

- LUKINA, E.V.; M.L. STONE y W.R. RAUN. 1999. **Estimating vegetation coverage in wheat using digital images**. J. Plant Nutr. 22:341–350.
- LUKINA, E.V.; W.R. RAUN; M.L. STONE; J.B. SOLIE; G.V. JOHNSON; H.L. LEES; J.M. LARUFFA y S.B. PHILLIPS. 2000. **Effect of row spacing, growth stage, and nitrogen rate on spectral irradiance in winter wheat**. J. Plant Nutr. 23:103–122.
- MELCHIORI, R.; P.A. BARBAGELATA; C. CHRISTIANSEN y A. VON MARTINI. 2001. **Manejo por sitios específicos del nitrógeno en maíz: evaluación del N-sensor**. Actas VII Congreso Nacional de Maíz (CD). 4p.
- MELCHIORI, R. 2006. **El desplazamiento del borde rojo en el diagnóstico del estado nutricional nitrogenada en maíz**. XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Salta-Jujuy, Argentina. 280p.
- MIZZOU-ARS. 2000. **Management Zone Analyst Version 1.0.1**. University of Missouri-Columbia & Agricultural Research Service of the United States Department of Agriculture.
- MORAN, P.A.P. 1950. **Notes on Continuous Stochastic Phenomena**. Biometrika 37(1):17–23.
- MULLEN, R.W.; K.W. FREEMAN; W.R. RAUN; G.V. JOHNSON; M.L. STONE y J.B. SOLIE. 2003. **Identifying an in-season response index and the potential to increase wheat yield with nitrogen**. Agron. J. 95:347–351.
- PEDROL, H.M.; J.M. CASTELLARÍN y F. SALVAGIOTTI. 2004. **Sustentabilidad y diversificación de riesgos productivos. Importancia del maíz en la rotación de los cultivos**. IDIA XXI. a. 4, no. 6. INTA. Buenos Aires. AR. p. 141-146.
- PURCELL, L.C. 2000. **Soybean canopy coverage and light interception measurement using digital imagery**. Crop Sci. 40:834–837.
- QUANTUM GIS DEVELOPMENT TEAM. 2011. **Quantum GIS Geographic Information System**. Open Source Geospatial Foundation Project. <http://qgis.osgeo.org>.
- RAUN R.W. y G.V. JOHNSON. 1999. **Improving Nitrogen Use Efficiency for Cereal Production**. Agron. J. 91:357-363.
- RAUN, W.R.; J.B. SOLIE; M.L. STONE; K.L. MARTIN; K.W. FREEMAN; R.W. MULLEN; H. ZHANG; J.S. SCHEPERS y G.V. JOHNSON. 2005. **Optical sensor-based algorithm for crop nitrogen fertilization**. Communications in Soil Science and Plant Analysis. 36(19-20):2759-2781.
- RICHARDSON, M.D.; D.E. KARCHER y L.C. PURCELL. 2001. **Quantifying Turfgrass Cover Using Digital Image Analysis**. Agron. J. 41: 1884-1888.
- RITCHIE, S.W.; J.J. HANWAY y G.O. BENSON. 1997. **How a corn plants develops**. Spec. Publ. 48. Iowa State Univ. Coop. Ext. Serv., Ames.

- ROBERT, P.C. 2002. **Precision agriculture: A challenge for crop nutrition management.** Plant and Soil. 247:143–149.
- ROUSE, J.W., JR.; R.H. HAAS; J.A. SCHELL Y D.W. DEERING. 1973. **Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation.** Prog. Rep. RSC1978-1. Remote Sensing Cent., Texas A&M Univ., College Station. 93 p.
- SAGyP – INTA. 1990. **Atlas de Suelos de la República Argentina.** Proyecto PNUD Arg-85/019, Buenos Aires. Dos tomos, 1600 p. 39 mapas.
- SÁNCHEZ, N.; J. MARTÍNEZ FERNÁNDEZ; M. PILES; A. AGUASCA; G. BARONCINI-TURRICCHIA; M. VALL-LLOSERA; A. CAMPS; A. MONERRIS y N. RODRÍGUEZ ÁLVAREZ. 2011. **Experimentos in situ para mejorar la estimación remota de humedad del suelo en banda L.** Jornadas de Investigación en la Zona no Saturada del Suelo. Estudios en la Zona no Saturada del Suelo. Vol X. 125-130pp.
- SAWYER, J.; E. NATZIGER; G. RANDALL; L. BUNDY; U. REHM y B. JOENI. 2006. **Concepts and rationale for regional nitrogen rate guidelines for corn.** Extension Publication PM 2015. Iowa State University. Ames, IA.
- SCHARF, P.C.; J.P. SCHMIDT; N.R. KITCHEN; K.A. SUDDUTH; S.Y. HONG; J.A. LORY y J.G. DAVIS. 2002. **Remote sensing for nitrogen management.** Journal of Soil Water Conservation. 57:518-524.
- SCHARF, P.C.; N.R. KITCHEN; K.A. SUDDUTH; J.G. DAVIS; V.C. HUBBARD y J.A. LORY. 2005. **Field-scale variability in optimal nitrogen fertilizer rate for corn.** Agron. J. 97, 452–461.
- SCHEPERS, J.S. 2001. **Practical applications of remote sensing.** Proc. InfoAg Conference, Potash and Phosphate Institute: Indianapolis, Ind.
- SERRANO, L.; I. FILELLA y J. PENUELAS. 2000. **Remote sensing of biomass and yield of winter wheat under different nitrogen supplies.** Crop Sci. 40:723–731.
- SIIA. 2011. Sistema Integrado de Información Agropecuaria. [www.siiia.gov.ar](http://www.siiia.gov.ar). Consultado el 02/02/2012.
- SOIL SURVEY STAFF. 1975. **Soil taxonomy: a basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys.** Agriculture Handbook 436. U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C., USA.
- STAFFORD, J.V. y K. EVANS. 2000. **Spatial distribution of potato cyst nematode and the potential for varying nematicide application.** Proceedings of Fifth International Conference on Precision Agriculture (CD), July 16-19, 2000. Bloomington, MN, USA.

- TEAL, R.K.; B. TUBANA; K. GIRMA; K.W. FREEMAN; D.B. ARNALL; O. WALSH y W.R. RAUN. 2006. **In-season prediction of corn grain yield potential using normalized difference vegetation index**. *Agron. J.* 98:1488–1494.
- TUKEY, J.W. 1977. **Exploratory data analysis**. Addison-Wesley Reading, MA. 688pp.
- WHELAN, B.M.; A.B. MCBRATNEY y B.C. BOYDELL. 1997. **The Impact of Precision Agriculture**. Proceedings of the ABARE Outlook Conference, 'The Future of Cropping in NW NSW', Moree, UK, July 1997. 5p.
- WHITE, M.A.; G.P. ASNER; R.R. NEMANI; J.L. PRIVETTE y S. RUNNING. 2000. **Measuring fractional cover and leaf area index in arid ecosystems. Digital camera, radiation transmittance and laser altimetry methods**. *Remote Sensing of Environment.* 74:45-57.