

73932

BALBOA, GUILLERMO RA
Comperacion agronom!

2014 **73932**



Universidad Nacional de Río Cuarto
Facultad de Agronomía y Veterinaria

Maestría en Ciencias Agropecuarias

**“Comparación agronómica de dos criterios de dosificación de
nitrógeno en maíz en la llanura bien drenada del Centro y Sur de la
Provincia de Córdoba”**

Ing. Agr. BALBOA, Guillermo Raúl

Director

Ing. Agr. Dr. Espósito, Gabriel Pablo

Codirector

Ing. Agr. Ph.D. Bongiovanni, Rodolfo Gustavo

Río Cuarto – Córdoba

Julio de 2014

73032

MFN:
Clasif:
T.899

UNIVERSIDAD NACIONAL DE RÍO CUARTO
Facultad de Agronomía y Veterinaria

CERTIFICADO DE APROBACIÓN

Título: “Comparación agronómica de dos criterios de dosificación de nitrógeno en maíz en la llanura bien drenada del Centro y Sur de la Provincia de Córdoba”

Autor: Guillermo Raúl Balboa

DNI: 31.123.666

Director: Ing. Agr. Dr. Gabriel Pablo Espósito

Codirector: Ing. Agr. Ph.D. Rodolfo Bongiovanni

Tribunal Examinador de Tesis

Dr. José Manuel Cisneros

MSc. Ricardo José Melchiori

MSc. Guillermo Angel Cerioni



Fecha de presentación: 23/07/2014

Facultad de Agronomía y Veterinaria
Universidad Nacional de Río Cuarto

AGRADECIMIENTOS

Mi Director y codirector de tesis por su permanente apoyo y guía en este camino.

Mis compañeros de trabajo, Gabriel, Ricardo, Cecilia y Guillermo por permitirme desarrollarme tanto profesional como personalmente en este maravilloso grupo de trabajo.

La Facultad de Agronomía y Veterinaria de la Universidad Nacional de Río Cuarto por brindarme la posibilidad de continuar perfeccionándome con una oferta de posgrado de excelencia.

Técnicos, productores y ayudantes que colaboraron con los ensayos experimentales.

*A mis padres, Marta y Ricardo;
A mis hermanos, Cecilia, Leandro, Laura y Marta;
por su apoyo incondicional*



ÍNDICE DE TEXTO

ÍNDICE DE TEXTO	5
ÍNDICE DE TABLAS	7
ÍNDICE DE FIGURAS	9
RESUMEN	10
SUMMARY	11
CAPÍTULO 1	12
INTRODUCCIÓN	12
1.1. Antecedentes	17
1.2. HIPÓTESIS	23
1.3. OBJETIVO GENERAL	23
1.3.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	23
CAPÍTULO 2	24
MATERIALES Y MÉTODOS	24
2.1. Introducción metodológica	24
2.2. Metodología utilizada para el logro del objetivo específico I.	25
2.3. Metodología utilizada para el logro del objetivo específico II.	26
2.3.1 Calculo de dosis criterio I: DOENZM	26
2.3.2. Calculo de dosis criterio II: MEME	29
2.4. Metodología utilizada para el logro del objetivo específico III	30
CAPÍTULO 3	32
RESULTADOS	32
3.1. Para el objetivo específico I	32
3.1.1. Zonificación y caracterización del sitio I: El Piquete	32
3.1.2. Zonificación y caracterización del sitio II; Santa Clara	34
3.1.3. Zonificación y caracterización del sitio III y IV: Don Nicolás I y Don Nicolás II.	38
3.1.4. Zonificación y caracterización del sitio V: Las Vertientes	41
3.1.5. Síntesis de los sitios de estudio	44
3.2. Resultados del objetivo específico II.	45
3.2.1 El Piquete: DOENZM, DOMEME	45
3.2.2. Santa Clara: DOENZM, DOMEME	48

3.2.3. Don Nicolás II: DOENZM, DOMEME	51
3.2.4. Don Nicolás I: DOENZM, DOMEME	53
3.2.5. Las Vertientes: DOENZM, DOMEME	55
3.2.6. Síntesis de los cinco sitios experimentales	57
3.3. Resultados Para el objetivo III	58
CAPÍTULO 4	61
DISCUSIÓN	61
4.1. Zonificación y caracterización de los sitios	61
4.2. Resultados agronómicos de los diferentes criterios evaluados	64
CAPÍTULO 5	67
CONCLUSIONES	67
CAPÍTULO 6	68
BIBLIOGRAFÍA	68
Protocolo I. Limpieza de mapas de rendimiento mediante Quantum GIS.	81
Protocolo II Zonificación de lotes de producción.	85
Protocolo III. Diseño y Ejecución de Ensayos de Manejo Sitio Específico	89
Protocolo IV. Análisis de datos de ensayos generados mediante manejo sitio específico	91
Análisis estadísticos	93

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Perfil del suelo Ensayo I El Piquete, Río Cuarto (Córdoba). Zona de manejo: Alta Productividad.	33
Tabla 2. Perfil del suelo Ensayo I El Piquete, Río Cuarto (Córdoba). Zona de manejo Baja Productividad	33
Tabla 3. Rendimiento y coeficiente de variación de los mismos para tres campañas por zona de manejo. El Piquete (Córdoba).	34
Tabla 4. Perfil del suelo Ensayo II Santa Clara, Río Cuarto (Córdoba). Zona de manejo: Alta Productividad.	35
Tabla 5. Perfil del suelo Ensayo II Santa Clara, Río Cuarto (Córdoba). Zona de manejo: Productividad Media	35
Tabla 6. Perfil del suelo Ensayo II Santa Clara, Río Cuarto (Córdoba). Zona de manejo: Baja Productividad	36
Tabla 7. Rendimiento y coeficiente de variación de los mismos para tres campañas por zona de manejo. Santa Clara (Córdoba).	37
Tabla 8. Perfil del suelo Ensayo III Don Nicolás I, Río Cuarto (Córdoba). Zona de manejo: Alta Productividad	38
Tabla 9. Perfil del suelo Ensayo III Don Nicolás I, Río Cuarto (Córdoba). Zona de manejo: Baja Productividad	38
Tabla 10. Rendimiento y coeficiente de variación de los mismos para tres campañas por zona de manejo. Don Nicolás I y II (Córdoba).	39
Tabla 11. Perfil del suelo Ensayo IV Don Nicolás II, Río Cuarto (Córdoba). Zona de manejo: Alta Productividad	40
Tabla 12. Perfil del suelo Ensayo IV Don Nicolás II, Río Cuarto (Córdoba). Zona de manejo: Baja Productividad	40
Tabla 13. Perfil del suelo Ensayo V Las Vertientes, Río Cuarto (Córdoba). Zona de manejo: Alta Productividad	42
Tabla 14. Perfil del suelo Ensayo V Las Vertientes, Río Cuarto (Córdoba). Zona de manejo: Baja Productividad.	43
Tabla 15. Rendimiento y coeficiente de variación para tres campañas, Las Vertientes, Córdoba.	44
Tabla 16. Coeficientes de parámetros para estimación de DOENZM y su significancia estadística, El Piquete, Córdoba.	48
Tabla 17. Coeficientes de parámetros para estimación de DOENZM y su significancia estadística, Santa Clara, Córdoba.	50
Tabla 18. Coeficientes de parámetros para estimación de DOENZM y su significancia estadística, Don Nicolás II, Córdoba.	53
Tabla 19. Coeficientes de parámetros para estimación de DOENZM y su significancia estadística, Don Nicolás I, Córdoba.	54
Tabla 20. Coeficientes de parámetros para estimación de DOENZM y su significancia estadística, Las Vertientes, Córdoba.	57
Tabla 21. Dosis y rendimientos para DOENZM, DOMEME y dosis modal para cada sitio y campaña.	59

Tabla 22. Rendimiento, respuesta a la fertilización, EAN y dosis para los tres criterios evaluados _____ 60

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Zonificación lote El Piquete (Córdoba).	32
Figura 2. Zonas de manejo Santa Clara (Córdoba).	37
Figura 3. Zonas de manejo Don Nicolás I (Córdoba).	39
Figura 4. Zonas de manejo Don Nicolás II (Córdoba).	41
Figura 5. Zonas de manejo Las Vertientes (Córdoba).	42
Figura 6. Mapa de CTI, (a), mapa de prescripción de N en base a MEME año normal (b), sitio El Piquete.	46
Figura 7. Mapa de rendimiento del ensayo, El Piquete Córdoba.	47
Figura 8. Precipitación normal (barras rojas) y precipitación campaña 2010/11, El Piquete, Río Cuarto (Córdoba).	47
Figura 9. Mapa de CTI, (izquierda), mapa de prescripción de N en base a MEME año seco (derecha), sitio Santa Clara, Córdoba.	49
Figura 10. Mapa de rendimiento del ensayo Santa Clara, Córdoba.	49
Figura 11. Precipitación Normal (barras rojas) y precipitación campaña 2011/12, Santa Clara, Río Cuarto (Córdoba).	50
Figura 12. Mapa de CTI (a) y mapa de DOMEME (b) para Don Nicolás II, Córdoba.	51
Figura 13. Mapa de rendimiento ensayo Don Nicolás II, Córdoba.	52
Figura 14. Precipitación normal (barras rojas), precipitación campaña 2010/11 (barras azules) y campaña 2011/12 (barras verdes) para Don Nicolás II y I respectivamente. (Córdoba).	52
Figura 15. Mapa de CTI (a) y mapa de DOMEME (b) para Don Nicolás I, Córdoba.	54
Figura 16. Mapa de rendimiento ensayo Don Nicolás I	54
Figura 17. Mapa de CTI (arriba) y mapa de DOMEME (abajo) para Don Nicolás I, Córdoba.	55
Figura 18. Mapa de rendimiento para Las Vertientes, Córdoba.	56
Figura 19. Precipitación Normal (barras rojas), Campaña 2012/13 (barras azules) para Las Vertientes, Córdoba.	56
Figura 20. Rendimiento en función de la dosis de N sitio El Piquete, Campaña 2010-11.	57
Figura 21. Rendimiento en función de la dosis de N sitio Don Nicolás II, Campaña 2010-11.	58
Figura 22. Rendimiento en función de la dosis de N sitio Las Vertientes, Campaña 2012-13.	58
Figura 23. Eficiencia agronómica del nitrógeno aplicado y relación con margen bruto y costo relativo de la unidad de nitrógeno	60

RESUMEN

Solo un 33% del nitrógeno aplicado en los cereales como fertilizante a nivel mundial es recuperado en grano. Ensayos con diferentes dosis de N abarcando distintas posiciones topográficas mostraron que la productividad del cultivo y la curva de respuesta a este nutriente difieren por efecto de la posición del paisaje y del año. El objetivo del presente trabajo fue comparar los resultados agronómicos de dos criterios de dosificación de nitrógeno en maíz en la llanura bien drenada del Centro y Sur de la Provincia de Córdoba. Para ello se implantaron 5 ensayos El Piquete, Don Nicolás II (2010/11), Santa Clara, Don Nicolás I (2011/12), Las Vertientes (2011/12). Los criterios de dosificación de nitrógeno empleados fueron: dosis óptima económica por zona de manejo (DOENZM), dosis óptima económica ajustada por CTI mediante un Modelo Econométrico Mixto Espacial (DOMEME). Se zonificaron los lotes de los ensayos mediante análisis cluster. Para el cálculo de la DOENZM se dispusieron de cinco dosis crecientes de N en franjas (40-80-160-240) y una franja sin fertilización nitrogenada. Luego de la cosecha se calculó la DOENZM empleando una relación de precios de 7,76. Para el cálculo de la DOMEME se empleó el modelo MEME teniendo en cuenta la predicción climática de la campaña y se generó una prescripción para cada lote que fue incluida como una franja en el ensayo. Las franjas se cosecharon con máquina equipada con monitor de rendimiento conectado a GPS. Se calculó la respuesta en rendimiento a la aplicación de N y la eficiencia agronómica del N. Los datos fueron sometidos a análisis de la varianza y test de separación de medias LSD Fisher. El empleo de mapas de rendimiento de años anteriores permitió delimitar zonas de manejo con diferencias de productividad para los sitios evaluados. La descripción de los perfiles típicos por zona de manejo aportó características importantes para comprender su funcionamiento. El criterio DOMEME permitió aumentar un 4% el rendimiento respecto del empleo de optimizaciones por zona de manejo. La EAN fue de 15,37 y 10,18 kg de grano kg N⁻¹ para DOMEME y DOENZM respectivamente. La dosis no fue estadísticamente distinta para los criterios evaluados, pero la redistribución de la misma en el terreno permitió aumentar los rendimientos.

Palabras clave:

Fertilización variable sitio específica, Modelo de fertilización, dosis óptima económica de N, condición hídrica.

SUMMARY

Only 33% of worldwide applied nitrogen as fertilizer in cereals is recovered in grain. Trials with different rates of N covering different topographic positions showed that crop yield and response curve differed by landscape position and year. The aim of this study was to compare the agronomic performance of two corn criteria nitrogen dosing in well-drained plain of Central and South Province of Córdoba. Five trials were implanted: El Piquete, Don Nicolas II (2010/11), Santa Clara, Don Nicolas I (2011/12) Las Vertientes (2011/12). The nitrogen rates criteria used were: economic optimum dose management zone (DOENZM) economic optimum dose adjusted by CTI Joint Econometric Model Space (DOMEME). Trials were zoned by cluster analysis. Five stripes of increasing nitrogen (40-80-160-240), and a strip without nitrogen fertilization were arranged. After harvesting the DOENZM was calculated using price ratio of 7.76. To calculate the DOMEME the MEME model was used taking into account the climate prediction of the campaign and a prescription for each site was included as a strip in the test. The strips were harvested with machines equipped with yield monitor connected to GPS. Yield response to N application and N agronomic efficiency was calculated. Data were subjected to analysis of variance and mean separation test LSD Fisher. The use of yield maps from previous years allowed to delineate management zones with differences in productivity for evaluated sites. DOMEME criteria allowed to increase yield by 4% compared to the use of performance optimizations management zone. Agronomic Nitrogen efficiency was 15,37 and 10,18 grain kg N⁻¹ applied for DOMEME and DOENZMT respectively. The dose was not statistically different for the two criteria evaluated, but the redistribution of the same in the field greatly enhanced yields.

Keywords: Site-specific variable-rate fertilization, fertilization model, economically optimal N rates, water condition

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

La población mundial alcanzará los 9100 millones de habitantes alrededor del 2050. Estimaciones de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación indican que será necesario incrementar en un 60% la producción agrícola global (cerca de un 77% en los países en desarrollo) hacia el 2050 para alcanzar la oferta de 3070 kcal por habitante por día, lo cual se traduce en un requerimiento de 940 millones de toneladas de cereales y 200 millones de toneladas de carne para ese año (OECD-FAO, 2012).

Según el Banco Mundial, la producción global de los cereales (trigo, maíz y arroz) se incrementó a una tasa cercana al 2% anual en los últimos 50 años, no obstante en la última década (2002-2011) este incremento en la producción se asentó en un aumento de la productividad por hectárea más que en un aumento de la superficie sembrada. Expertos de FAO señalan que el incremento de productividad se reducirá en la década 2012-2021 a 1,7% (OECD-FAO, 2012).

Esta situación implica un elevada presión sobre los recursos naturales, lo cual exige desarrollar estrategias productivas que permitan incrementar la productividad, minimizando el impacto ambiental (Cisneros *et al.*, 2008). Los aumentos de producción se deben en más del 55% al uso de fertilizantes, por lo que el consumo de los mismos, mundial y nacional, ha aumentado sustancialmente en las últimas décadas en Argentina, a partir de 1990 (FAO, 2004).

La agricultura argentina ha incrementado notablemente su productividad en los últimos 20 años, gracias a la incorporación tecnológica y a innovación científica en lo referido a técnicas modernas de manejo de cultivos. En este sentido, fueron fundamentales los aportes de la siembra directa, la fertilización estratégica, el manejo ecofisiológico de los cultivos, los avances en genética y maquinarias, como así también la incorporación de la agricultura de precisión, entre otros (Andrade, 2011).

Una buena disponibilidad nutricional, especialmente en los momentos en que los nutrientes son requeridos en elevadas cantidades, asegura: i) un buen crecimiento foliar, lo que permite al cultivo alcanzar rápidamente y mantener la cobertura total del suelo; y, ii) una alta eficiencia de conversión de la radiación interceptada en biomasa. Esto garantiza un óptimo estado fisiológico en la etapa decisiva para la determinación del rendimiento. El maíz necesita absorber 20 kg de nitrógeno y alrededor de 4 kg de fósforo por tonelada de rendimiento de grano. En consecuencia,

los requerimientos de estos nutrientes quedan definidos según el potencial productivo de cada ambiente, debiéndose aplicar fertilizantes cuando la cantidad aportada por el suelo no satisfaga las necesidades de los cultivos. Si los requerimientos nutricionales no son cubiertos, la tasa de crecimiento del cultivo se reduce y como consecuencia su productividad (Andrade *et al.*, 1996).

La eficiencia en el uso del nitrógeno (EUN), entendida como la cantidad de grano producida por unidad de nitrógeno aportado, fue estimada por Dale (1997), Tkachuk (1977) y Keeney (1982) en aproximadamente un 33%, a nivel mundial para la producción de cereales (trigo, *Triticum aestivum* L., maíz, *Zea mays* L., arroz, *Oryza sativa* L., cebada, *Hordeum vulgare* L. sorgo, *Sorghum bicolor* L., mijo, *Pennisetum glaucum* L., avena, *Avena sativa* L. centeno, *Secale cereale* L.). El 67% del N restante aplicado representa una elevada pérdida económica valuada en miles de millones de dólares por año. La baja eficiencia es consecuencia de la desnitrificación del suelo, la volatilización, los escurrimientos superficiales y la lixiviación, entre otras posibles causas.

Incrementar la EUN en cereales es posible en sistemas que utilicen variedades con alto índice de cosecha, incorporando fertilizantes con mayor aporte de N como amonio, o bien por aplicación de dosis variables basadas en la detección de zonas de manejo (Raun & Johnson, 1999). Una de las estrategias propuesta para incrementar la eficiencia global en el uso de los fertilizantes nitrogenados es el manejo sitio específico de insumos.

Diversos autores han manifestado que, aplicaciones nitrogenadas en dosis completa al momento de la siembra, incrementan los riesgos de pérdidas por lixiviación ante lluvias intensas; además de dificultar el cálculo de la dosis necesaria por desconocer el estado de crecimiento del cultivo (Schmidt *et al.*, 2002; Tawainga *et al.*, 2003; Sainz Rozas *et al.*, 2001). Por este motivo, la aplicación de nitrógeno en estadios vegetativos intermedios entre la siembra y la floración, es una técnica de manejo agronómico que mejora la eficiencia de uso del nutriente (Scharf *et al.*, 2002).

La práctica dominante de los productores agropecuarios en la Argentina y en el mundo, es aplicar la misma cantidad de fertilizante nitrogenado en toda la superficie del campo, sin considerar la posible variabilidad espacial de las necesidades de este nutriente. Por este motivo Scharf *et al.* (2005) han señalado que

es frecuente la fertilización en exceso en algunos sectores del lote y la subfertilización en otros.

Para el manejo de la variabilidad espacial mencionada en el párrafo anterior, se ha desarrollado la agricultura de precisión. Esta práctica ha sido definida por Pierce y Nowak (1999) como la aplicación de tecnologías y principios para manejar la variabilidad espacial y temporal dentro del lote, mediante la modificación de las decisiones agronómicas que consideran la optimización de los recursos en cada punto del campo, cuya finalidad es mejorar la productividad minimizando el impacto ambiental.

Melchiori *et al.* (2013) realizaron un relevamiento mediante encuesta del estado de la agricultura de precisión en Argentina. El mismo indica que los monitores de siembra, de rendimiento, el GPS y el corte por sección en las maquinas pulverizadoras se encuentran entre las tecnologías más adoptadas por quienes realizan AP. Dentro del grupo de las tecnologías de menor adopción (menos del 20%) se encuentran la siembra variable y la fertilización variable.

El Manejo de Nutrientes Sitio-Específico (MNSE), también llamado Tecnología de Dosis Variable (TDV) corresponde a la aplicación variable de dosis de fertilizantes de acuerdo al nivel de fertilidad de cada sector de manejo homogéneo dentro del lote, esto significa que no se trabaja necesariamente con una sola dosis de fertilizante, sino que con tantas dosis como áreas significativamente homogéneas existan en la explotación (Ortega y Flores, 1999).

La adopción de herramientas de agricultura de precisión como ser: monitores de rendimiento, sensores remotos, sistemas de guiado y aplicación variable de insumos, ha sido intensa en varios países agrícolas durante las últimas dos décadas, aún falta conocimiento agronómico que relacione la variabilidad productiva de los suelos con el manejo variable de la nutrición mediante métodos que aseguren la conveniencia económica de la fertilización variable (Kyveryga *et al.* 2011).

Los principios generales del manejo sitio-específico son transferibles entre regiones, pero debido a la variabilidad local de las condiciones edáficas y climáticas las estrategias deben ser modeladas localmente (Bongiovanni, 2002; Bravo *et al.*, 2004; Vieira *et al.*, 2006 y Siqueira *et al.*, 2006). Trabajos realizados con anterioridad en regiones semiáridas en secano o bajo riego mostraron resultados poco consistentes, sugiriendo la necesidad de mejorar los métodos de diagnóstico de

fertilización. Por ejemplo, Bragachini *et al.* (2004) estimaron la dosis de N en maíz utilizando un balance entre la oferta de N desde el suelo y el requerimiento del cultivo para alcanzar un cierto rendimiento esperado, considerando tanto cada zona de manejo por separado como el promedio del lote. Los resultados mostraron la conveniencia económica de la dosis por ambientes frente a la promedio en la zona de bajo rendimiento potencial, evitando la aplicación de una sobredosis de fertilizante. Sin embargo la zona de alto potencial no mostró ventajas derivadas de la aplicación diferencial, sugiriendo la necesidad de un modelo matemático de respuesta sitio-específica. Además, pocos estudios han considerado que los datos obtenidos con monitores de rendimiento no son independientes, sino que se correlacionan con las observaciones vecinas originando auto-correlación espacial y heterocedasticidad (Anselin *et al.*, 2004), limitación que se corrige con métodos de estadística espacial o geoestadística (Griffin *et al.*, 2005).

Ensayos con diferentes dosis de N abarcando distintas posiciones topográficas mostraron que tanto la productividad del cultivo como la curva de respuesta a este nutriente difieren por efecto de la posición del paisaje y del año (Bongiovanni, 2002).

Espósito *et al.* (2006) en el Departamento de Río Cuarto (Córdoba) elaboraron, calibraron y validaron un modelo de diagnóstico de la fertilización nitrogenada en maíz (NP-Zea), el cual realiza un balance de nitrógeno entre la demanda potencial y la oferta de un ambiente en particular. Bocco (2006) encontró un alto índice de coincidencia entre valores observados y simulados de rendimiento en ensayos realizados, en ambientes contrastantes de la zona de Coronel Moldes (Córdoba), estableciendo que este modelo puede utilizarse para diagnóstico de nitrógeno por zonas de manejo.

En relación a la dinámica hídrica de un cultivo, cabe señalar la importancia del paisaje en su determinación, puesto que frente a eventos de precipitación, el agua puede escurrir de posiciones altas hacia sectores más bajos del relieve, dentro de un lote de producción o dentro de una microcuenca. En este sentido, Kravchenko y Bullock (2000) asociaron la productividad de maíz con el régimen hídrico y el paisaje, de modo tal que en los años secos los mayores rendimientos se encuentran en las posiciones bajas del paisaje y los menores en las posiciones más altas. Es intuitivo comprender que el movimiento superficial del agua genera una mayor

disponibilidad en el bajo. Por el contrario en las campañas húmedas, el exceso de humedad perjudica el normal crecimiento de los cultivos, disminuyendo su producción.

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

La topografía de los lotes de producción puede ser modelada a través de mapas digitales de elevación (DEM), los cuales son herramientas de disponibilidad creciente en la agricultura Argentina, como consecuencia del aumento de maquinaria de agricultura de precisión provistas con GPS (MINAGRI, 2011). A partir de estos DEM se pueden determinar atributos espaciales de terreno (AE) mediante el empleo de sistemas de información geográfica (Tarboton, 1997), los cuales pueden relacionarse con los mapas de rendimiento de los cultivos (Ruffo *et al.*, 2006).

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

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

Como en la actualidad no existen metodologías para la determinación de las propiedades físicas y químicas de suelo requeridas por el NP-Zea, a la misma escala de detalle que la de los monitores de rendimiento, es factible cometer errores a la hora de discernir el grado de precisión de este modelo en el manejo de nutrientes sitio-específico.

Espósito (2013) elaboró y calibró un Modelo Econométrico Mixto Espacial (MEME) para la recomendación de fertilización nitrogenada a nivel sitio específico.

En base a todo lo expuesto anteriormente, el propósito de este estudio es comparar los resultados agronómicos de dos criterios de dosificación de nitrógeno en maíz en la llanura bien drenada del Centro y Sur de la Provincia de Córdoba

1.1. ANTECEDENTES

Estados Unidos es el principal productor mundial de maíz con 274 millones de toneladas. En la campaña 2012-13 se cosecharon en Argentina 4,86 millones de hectáreas de maíz con una producción de 32,1 millones de toneladas. Esto ubica a la Argentina en el cuarto puesto en producción a nivel mundial. El maíz es el segundo cultivo extensivo en superficie y producción luego de soja con 18,8 millones de toneladas y una producción de 46 millones de toneladas de grano promedio anual para la mencionada oleaginosa (SIIA, 2014).

Para la campaña 2012-13 la provincia de Córdoba se ubicó en el primer puesto en superficie cosechada de maíz a nivel país con un 33% lo cual representó 1.583.500 ha. La producción para ese período fue de 10.789.190 t aportando el 34% del total nacional de maíz seguida por la provincia de Buenos Aires con el 30% (SIIA, 2014).

Para el año 2011 el consumo de fertilizantes en Argentina alcanzó 3.721.000 toneladas, el 47% corresponde a productos nitrogenados, el 45% a fosfatados y el 8% restante a otros fertilizantes. Para el período 1993-2011 el uso de fertilizantes nitrogenados creció 6,5 veces (CIAFA, 2014). El 47% mencionado representa 875.000 toneladas de nitrógeno. El 88% de la superficie sembrada con maíz en la Argentina se fertiliza. Del total de nutrientes aplicados en este cultivo los nitrogenados representan el 67% con 524.998 toneladas (Fertilizar, 2014). Para la provincia de Córdoba la superficie fertilizada de maíz alcanzó el 95% para la campaña 2012-13.

Espósito *et al* (2014) estimaron una eficiencia agronómica para nitrógeno en el cultivo de maíz en Argentina de 27,5 kg de grano por kg de N en base al análisis de 507 ensayos de fertilización para el período 2006-2013. Para la región de Córdoba ese valor desciende a 20%. De Prada y Penna (2008) establecieron que la dosis modal de nitrógeno en el Sur de Córdoba es de 43 kg ha⁻¹, con extremos de 5 y 100 kg ha⁻¹. La dosis promedio se ubicó en 23 kg ha⁻¹.

Los suelos predominantes de Córdoba se desarrollaron bajo condiciones climáticas de semiaridez sobre materiales loésicos franco-limosos y aluviales franco-arenosos, con aportes moderados en superficie (Doratto, 1986). El contenido de materia orgánica predominante es bajo a moderado (1 a 2,5%) y el efecto del manejo ha condicionado la evolución del suelo en superficie a lo largo de los últimos 50 años, con la expansión de la mecanización y el monocultivo, reflejándose en una disminución sistemática del contenido de materia orgánica y el avance de procesos erosivos (Cita).

Los suelos de la región pampeana argentina presentan una deficiencia crónica de nitrógeno (N) para sostener altas producciones de maíz, debido a la disminución de los tenores de materia orgánica como consecuencia de su mal uso y por los procesos de erosión que caracterizaron a la producción de cultivos hasta la última década del siglo pasado (Díaz Zorita y Buschiazzo, 2006). Por otra parte, la intensificación de la agricultura en esta región ha posibilitado la obtención de altos rendimientos, es decir mayor demanda de nutrientes, por lo que la fertilización del cultivo cumple un rol esencial para maximizar su rentabilidad.

Un correcto y eficiente manejo de la fertilización de un cultivo debe contemplar aplicar el nutriente correcto en la cantidad necesaria y en el momento y localización apropiados para satisfacer la demanda del mismo (Roberts, 2012).

Para el caso de nitrógeno en maíz, numerosas investigaciones proponen diferentes metodologías para ajustar la dosis de fertilización nitrogenada. Un grupo importante de métodos se basan en balances de este nutriente teniendo como base análisis de suelo en presiembra y al estado de 5 ó 6 hojas, o análisis de tejido en estadios tempranos y avanzados del cultivo (Cita).

Salvagiotti *et al.* (2011) plantean la importancia de la interacción con el ambiente en la respuesta a la fertilización. Sin embargo muy pocos modelos de diagnóstico consideran variables climáticas para su funcionamiento.

En general el análisis de suelos es la herramienta básica y fundamental para determinar los niveles de fertilidad de cada lote y diagnosticar la necesidad de fertilización. Los análisis vegetales permiten integrar los efectos del suelo y del ambiente sobre la nutrición de las plantas ampliando así la base de diagnóstico. Características climáticas de la zona, del suelo y su manejo y del manejo de cultivo complementa la toma de decisiones.

La ecuación I presenta el método del balance de nitrógeno (Meisinger, 1984):

$$Nfert = \frac{Ncult - (Nmin * E1) - (Ninic * E2)}{E3} \quad I$$

Donde:

Nfert = Requerimiento de fertilizante nitrogenado

Ncult = Requerimiento de N del cultivo (kg N absorbido por qq grano)

Nmin = N neto mineralizado durante el ciclo del cultivo

Ninic = Nitrato (NO₃) disponible a la siembra (0-60 cm)

E1 = Eficiencia de uso del N mineralizado

E2 = Eficiencia de uso del N inorgánico inicial

E3 = Eficiencia de uso del N del fertilizante

La disponibilidad de N de Nitratos en presiembra es otra de las metodologías empleadas para el diagnóstico de N en maíz. Para la región Pampeana se comenzó a desarrollar a partir de 1980 en el Norte de Buenos Aires y Centro de Santa Fe (Senigaglia *et al.* 1984; Barberis *et al.* 1985; Gambaudo y Fontanetto 1996). Ruiz *et al.* (2001) desarrollaron un esquema simplificado de decisión para la fertilización nitrogenada basado en la disponibilidad inicial de N-Nitratos (N del suelo + N del fertilizante), pH del suelo y los años de agricultura continua. Para ensayos realizados en Córdoba, Santa Fe y Buenos Aires el coeficiente de determinación entre el nitrógeno en el suelo más fertilizante y el rendimiento fue del 56%.

El análisis de nitratos en suelo en V₅ - V₆ es una metodología muy promisoría a la hora de diagnosticar nitrógeno. Esta se basa en el contenido de N disponible en el suelo (0-30cm) que representa el N disponible a la siembra, sumado al N aportado por la mineralización de la materia orgánica. Melchiori *et al.* (1996) en Entre Ríos encontraron niveles críticos de 17,4 mg kg⁻¹. Ferrari *et al.* (2001 b) reportaron niveles críticos de 18-20 mg kg⁻¹ para el norte de Buenos Aires. En el sudeste bonaerense se esperan respuestas a la aplicación de N si el nivel de N-nitratos es menor de 15-27 mg kg⁻¹ dependiendo del rendimiento alcanzado (Sainz Rosas *et al.*, 2000). Para maíces en secano con rindes medios de 9 t los niveles críticos se ubicaron entre 15 y 17 mg kg⁻¹ N-Nitratos según estudios de García *et al.*, 1997, Sainz Rosas *et al.*, 2000). Por otro lado Bianchini (2004) encontró, para ensayos en Córdoba, Entre Ríos y Santa Fe, un valor crítico de 19 mg kg⁻¹.

Dentro de los métodos basados en el análisis de tejido De cultivo podemos citar la determinación de nitratos en base de tallos que permite evaluar la nutrición nitrogenada del cultivo en diferentes etapas fenológicas. Si la determinación se

realiza en estadios tempranos permitiría corregir rápidamente una posible deficiencia nitrogenada. Para el sur de Santa Fe, González Montaner y Di Napoli (1997) reportaron un nivel crítico de 4.500 mg l^{-1} de nitratos en savia. Ferrari *et al.* (2001a) reportaron valores de 1.439 mg l^{-1} para obtener el 90% del rendimiento máximo en el sur de Santa Fe y noreste de Buenos Aires. Para el sudeste de Buenos Aires los valores críticos descienden a $1.200\text{-}2.400 \text{ mg l}^{-1}$ (Sainz Rosas *et al.* 2001). Al estadio de R₆ estos mismos autores reportaron valores de nitratos en base de tallo de 800 mg kg^{-1} como umbral de suficiencia.

En este grupo de metodologías que emplean a la planta como variable síntesis del estado nutricional se puede emplear el índice de verdor medido con el sensor Minolta SPAD 502, el mismo se relaciona con el contenido de clorofila y de N en las hojas. Para establecer los índices de respuesta se deben emplear franjas testigo fertilizada a la siembra. En los estadios V₅-V₆ Echeverría y García (1998) establecieron que las diferencias halladas no permitieron separar niveles contrastantes de N. Para determinaciones alrededor de floración el índice de suficiencia (lectura testigo/lectura fertilizado) para un rendimiento relativo al 95% del máximo arrojó valores de 0,97-0,98.

En análisis de planta entera o de una parte de ella a lo largo del ciclo del cultivo permitió establecer algunos umbrales críticos al tratar de establecer el estado nutricional de un cultivo de maíz. Voss (1993) reportó valores críticos de N en planta entera de 3,5-5% en V₃-V₄ y de N en hoja de la espiga de 2,75-3,5% alrededor de floración. Sin embargo estos análisis sólo sirven como diagnóstico, ya que en estadios avanzados del cultivo no se puede corregir la deficiencia nitrogenada. En Argentina Ambrogio *et al.* (2001) reportaron una concentración crítica de 2,7% de N en hoja de la espiga en floración por encima de la cual los rendimientos serían superiores a 9 t ha^{-1} .

La necesidad de integrar los métodos de balance con variables de gran impacto como la disponibilidad hídrica para el cultivo llevó al desarrollo de modelos de diagnóstico de nitrógeno a escala regional. Este tipo de modelos permiten conjugar variables edáficas, meteorológicas y genéticas para representar el funcionalismo del cultivo y asistir entre otras cosas a la toma de decisiones de fertilización nitrogenada.

Mercau *et al.* (2001) calibraron y validaron un modelo de crecimiento desarrollo del cultivo (GECER) para la zona norte de Buenos Aires y sur de Santa Fe. El modelo incorpora localidades, series climáticas, series de suelo, niveles de materia orgánica, perfiles de humedad a la siembra, e híbridos de maíz. Empleando la disponibilidad inicial de nitratos de 0-60cm. A partir de ello se puede predecir el rendimiento para distintos escenarios climáticos, determinar la cantidad de fertilizante necesario para un determinado rendimiento objetivo en esos escenarios e incorpora la evaluación del riesgo económico asociado a la opción de manejo seleccionada.

Espósito *et al.* (1997) indicaron que la principal dificultad a la hora de emplear la siembra directa en el sur de Córdoba era la falta de diagnósticos eficientes de las necesidades de fertilización nitrogenada. Es por ello que Gesumaría, *et al.* (2000) desarrollaron un modelo de diagnóstico de fertilización nitrogenada en maíz llamado NP-Zea. El mismo toma como variables de entrada parámetros de fertilidad del lote, determinaciones de nitratos y contenido volumétrico de agua en V_6 , precipitaciones diarias y valor de insumos y producto. Al estado fenológico de V_6 encontraron ajustes aceptables entre la respuesta a la fertilización y la disponibilidad hídrica del perfil presentes en 100 cm y entre la respuesta y la disponibilidad de $N-NO_3$ presentes en 40 cm del suelo. Elaboraron el modelo de diagnóstico que al final de la etapa de validación arrojó un índice de coincidencia entre los valores observados y simulados de 91,56 en el factor de mineralización del N del suelo y de 91,75 para el rendimiento del cultivo. Este índice es una medida relativa de diferencia entre valores observados y simulados por un modelo (Willmott, 1982).

En virtud de la complejidad de las interacciones intervinientes en la dinámica de N del continuo suelo - planta - atmósfera, la correcta predicción de la dosis óptima económica variable espacial y temporalmente se transforma en una tarea dificultosa (Bongiovanni y Lowenberg-DeBoer, 2006; Kyveryga *et al.*, 2011) y como los experimentos tradicionales realizados a campo presentan dependencia espacial en estas interacciones, surge como una adecuada estrategia la realización de estudios de respuesta al N en diferentes tipos de suelos y condiciones climáticas para estimar funciones de respuesta al agregado de N, sensibles a estas interacciones en pequeñas escalas de detalle dentro de los lotes de producción (Bullock and Lowenberg-DeBoer, 2007; Hurley *et al.*, 2004; Schmidt *et al.*, 2007).

Con el desarrollo de nuevas tecnologías de la información y adquisición de datos a través de sensores remotos principalmente y a la generalización del empleo de sistemas de posicionamiento global preciso ha surgido en la última década lo que se puede denominar un nuevo paradigma en el diagnóstico de la fertilidad nitrogenada que incluye el análisis de gran cantidad de datos adquiridos mediante sensores remotos o la modelización de atributos del terreno que influyen en la respuesta a la fertilización nitrogenada.

En Argentina, Melchiori *et al.*, (2001) compararon aplicaciones uniformes de N y variables a partir de un algoritmo de cálculo y el empleo del sensor Green Seeker ®. Este sensor toma mediciones de reflectancia del dosel del cultivo y prescribe la dosis de aplicación variable de N en tiempo real. No solo se aumentó el rendimiento en el tratamiento con dosis variable sino que se incrementó en forma importante la EUN. En 2005, Melchiori *et al.* compararon el rendimiento de maíz con fertilización a la siembra, fraccionada con refertilización fija y con refertilización calculada mediante las lecturas del sensor. La EUN para dosis fija al momento de la siembra fue de 18 kg kg⁻¹ mientras que para la dosis variable ese valor ascendió a 44 kg kg⁻¹.

Finalmente, el modelo desarrollado por Espósito (2013) propone una función de producción dependiente del nitrógeno, el CTI y la condición meteorológica de la campaña, basado en un pronóstico climático.

El desarrollo del modelo MEME representó un aporte metodológico novedoso al conocimiento científico, para estimar funciones de producción de maíz dependientes de insumos agrícolas. Con este modelo se pueden realizar recomendaciones de aplicación variable de nitrógeno a escala regional, dependiendo de las características hídricas de cada campaña y de la variabilidad espacial del CTI en cada lote de producción (Espósito, 2013). Al considerar al efecto año y a la localidad como factores de efectos aleatorios, el MEME permite obtener parámetros que pueden ser empleados en otros años y localidades y así, generar recomendaciones de fertilización para otras campañas agrícolas y/o en otros sitios de la región donde se generó y calibró el modelo.

1.2. HIPÓTESIS

Para la llanura bien drenada del Centro y Sur de la Provincia de Córdoba, el empleo de un modelo econométrico mixto espacial para la determinación de dosis de nitrógeno a escala sitio específico arroja mejores resultados agronómicos respecto de la determinación de la misma por zonas de manejo dentro del lote.

1.3. OBJETIVO GENERAL

Comparar los resultados agronómicos de dos criterios de dosificación de nitrógeno en maíz en la llanura bien drenada del Centro y Sur de la Provincia de Córdoba.

1.3.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Objetivo I: Cuantificar, caracterizar y delimitar territorialmente la variabilidad espacial del rendimiento de maíz y soja, para determinar diferentes zonas de manejo dentro de lotes de producción.
- Objetivo II: Determinar la dosis óptima económica de nitrógeno por criterio zona de manejo (DOENZM) y establecer la dosis óptima según criterio modelo econométrico mixto espacial (DOMEME) para cada sitio.
- Objetivo III: Evaluar la respuesta agronómica del empleo de DOMEME en comparación con la DOENZM.

CAPÍTULO 2

MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. INTRODUCCIÓN METODOLÓGICA

En el presente trabajo se evaluaron los resultados agronómicos de dos criterios para la dosificación de nitrógeno en el cultivo de maíz:

Criterio I: dosis óptima económica por zona de manejo (DOENZM)

Criterio II: dosis óptima económica ajustada por CTI mediante un Modelo Econométrico Mixto Espacial, MEME (Espósito, 2013).

Los ensayos se realizaron en campos de la llanura bien drenada de la región centro sur de la Provincia de Córdoba. En los sitios seleccionados la producción se realiza bajo siembra directa. Los lotes seleccionados contaron con al menos tres mapas de rendimiento de años anteriores que incluyeran al menos dos cultivos diferentes. Fue necesario además que contaran con un mapa de altimetría precisa. Finalmente debían contar con maquina fertilizadora variable y cosechadora equipada con monitor de rendimiento y sistema de posicionamiento global.

Se realizaron un total de cinco ensayos que se identificarán como: El Piquete (2010/11), Don Nicolás I (2011/12), Don Nicolás II (2010/11), Santa Clara (2011/12) y Las Vertientes (2012/13).

En cada uno de los cinco sitios experimentales se implantó un ensayo de maíz. La fecha de siembra de cada ensayo fue considerada de primera para las condiciones de Río Cuarto: entre el 25 de septiembre y el 5 de octubre de cada año según disponibilidad de agua para la siembra. Se evaluaron cinco dosis de N en (40, 80, 160 y 220 kg N ha⁻¹) ubicadas en franjas atravesando zonas de manejo definidas previamente para cada sitio, además se estableció un testigo sin fertilizar. Se incorporó también una dosis de N espacialmente variable según el criterio DOMEME. La fuente y forma de aplicación de N fue UAN (32-0-0) chorreado en el entresurco para todos los ensayos. Todas las franjas fueron fertilizadas con N al estadio V₆ del cultivo. Para evitar otras interferencias nutricionales todos los ensayos fueron fertilizado a la siembra con 150 kg ha⁻¹ de fosfato monoamónico azufrado (14-34-0-8, NPKS). Los ensayos se mantuvieron libres de malezas, plagas y enfermedades mediante los controles culturales o químicos necesarios. El diseño experimental fue en bloques completos aleatorios con 3 repeticiones espaciales por tratamiento.

Las franjas fueron cosechadas con máquina equipada con monitor de rendimiento y sistema de posicionamiento global.

Con los rendimientos de las franjas de N creciente se estimó una función de producción por zona de manejo dentro de cada lote dependiente del nitrógeno (Bongiovanni, 2002), la cual permitió obtener la dosis económicamente óptima de nitrógeno (DOENZM) por zona (Criterio I). Esta dosis se calculó a cosecha, mientras que la dosis variable, dependiente del CTI (Criterio II), fue calculada previo a la siembra del maíz.

2.2. METODOLOGÍA UTILIZADA PARA EL LOGRO DEL OBJETIVO ESPECÍFICO I.

Los mapas de rendimiento de cada sitio se procesaron mediante el programa Quantum Gis (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 sean inconsistentes o incoherentes con la realidad.

Esta limpieza se realizó mediante 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 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 I:

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

Donde X son los valores outliers a eliminar y Q1 y Q3 son los cuartiles primero y tercero, e $IIQ = Q3 - Q1$.

Para esta actividad se desarrolló el protocolo I

"Limpieza de mapa de rendimiento mediante programa Quantum GIS" el cuál está disponible en el anexo I. El mismo cuenta además con un link de descarga de un set de datos modelo para poder ejercitar la técnica.

Luego se realizó la zonificación de cada lote en alta productividad (AP) baja productividad (BP) y/o productividad promedio (PM) para el caso que sea necesario.

El número de zonas (dos o tres) y sus límites fueron definidos mediante el programa de computación Management Zone Analyst (MZA) (Mizzou-ARS, 2000), el cual divide al lote en grupos naturales a partir de clasificaciones o número de zonas especificados mediante un análisis “clúster”. 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) para evaluar visualmente la cantidad óptima de ambientes.

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 o seleccionar el mínimo número de clases (Fridgen et al., 2004).

El Protocolo II “Delimitación de zonas de manejo mediante Management Zone Analyst” está disponible en el anexo II. El mismo cuenta con un link de descarga de un set de datos modelo para poder ejercitar la técnica.

A partir del mapa de zonas de manejo se procedió a la descripción de los rendimientos en cada una de ellas mediante el procesamiento de los mapas de rendimiento y de zonas mediante Quantum GIS.

Finalmente, se caracterizó a cada zona de manejo mediante la descripción del perfil de suelo por zona de manejo para cada sitio. La ubicación de la calicata fue seleccionado en gabinete e identificada a campo mediante el empleo de un dispositivo de posicionamiento global.

2.3. METODOLOGÍA UTILIZADA PARA EL LOGRO DEL OBJETIVO ESPECÍFICO II.

2.3.1 CÁLCULO DE DOSIS CRITERIO I: DOENZM

Con los mapas de rendimiento de las franjas de N se procedió a la optimización económica de la dosis. Para ello 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).

El modelo que se utilizó en este estudio, es el denominado de error espacial autorregresivo (SAR), que 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 II:

$$Y = X\beta + \varepsilon \quad \text{[II]}$$

donde Y es el vector (n por 1) de observaciones de la variable dependiente, X es la matriz de incidencia con las observaciones de las variables independientes, β es el vector de parámetros estimados, y ε es el término de error espacial, obtenido mediante la Ecuación III:

$$\varepsilon = \lambda W\varepsilon + \mu \quad \text{[III]}$$

donde μ es el error de muestreo aleatorio que sigue una especificación autoregresiva espacial (SAR) con un coeficiente autoregresivo λ (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 IV:

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

donde Y_{ij} es el rendimiento del maíz (kg ha^{-1}) por cada punto ij del monitor de rendimiento, $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ y β_5 , son los parámetros de la ecuación de regresión, N es la dosis de fertilizante (kg ha^{-1}), ZM se refiere a las variables “dummy” para cada zona de manejo, y ϵ_{ij} es el término de error de la regresión por cada ubicación (Gregoret *et al.* 2011).

Según la relación de precios entre el fertilizante y el grano de maíz se estableció la dosis óptima económica del nitrógeno aplicado por zona de manejo. Los precios utilizados de maíz y nitrógeno fueron de 1,22 y 9,47 \$ kg^{-1} , respectivamente. El precio del maíz fue tomado como valor promedio en peso según cotización Bolsa de Cereales de Rosario para el mes de mayo de 2014, descontados los gastos de flete y comercialización para el Departamento de Río Cuarto. El precio del nitrógeno fue tomado como valor promedio del mes de mayo de 2014 según cotización del mercado local en Río Cuarto. Finalmente, la relación de precios (insumo/producto) se calculó en 7,76 kg maíz kg N^{-1} .

El cálculo de la dosis óptima económica de N por zona de manejo, se realizó mediante una optimización tradicional de las funciones de respuesta de tipo cuadrática (Dillon y Anderson, 1990):

$$DOENZM = \frac{\left(\frac{pN}{py}\right) - \beta_1}{2\beta_2} \quad [V]$$

Donde, py : precio del maíz (\$ kg^{-1}), pN : precio del nitrógeno elemental (\$ kg^{-1}), β_1 y β_2 los parámetros de la ecuación.

Los mapas de cosecha del ensayo fueron sometidos a un proceso de limpieza ya descrito y luego se construyeron grillas con polígonos cuadrados de lado igual al ancho de la plataforma de la maquina cosechadora. Este procedimiento permitió lograr un diseño experimental equilibrado ya que la distancia entre observaciones entre líneas será la misma que la distancia entre observaciones dentro de una misma línea. Para ello se superpuso la grilla sobre la capa de mapa de rendimiento y se la rotó de modo que coincidiera la dirección de la cosecha con la dirección de los ejes de la grilla. 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 aplicado a cada polígono

N2: nitrógeno elevado al cuadrado,

Zi: zona de manejo de: 1: baja productividad, 2: alta productividad 3: productividad promedio (en los casos de 3 ZM).

Los campos considerados de interés para evaluar en el modelo (N y N2) toman valores sobre un rango continuo mientras que “Z” es una variable cualitativa con dos categorías representadas como variables “dummy”, indicadoras o dicotómicas, las cuales sirvieron para identificar categorías o clases a la que pertenecen las observaciones y observar el efecto de las dos o tres 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:

- $Z_i \times N$

- $Z_i \times N^2$

En el anexo IV se presenta el “Protocolo de análisis de datos generados en ensayo de manejo sitio específico”.

2.3.2. CÁLCULO DE DOSIS CRITERIO II: MEME

Para la generación de la dosis del MEME se confeccionaron en cada ensayo mapas digitales de elevación de terreno mediante un dispositivo de posicionamiento global con corrección diferencial (DGPS), los cuales fueron interpolados en una grilla regular de 9 m usando el comando TOPO TO RASTER de ArcMap (ESRI, 2007) para generar un mapa digital de elevación (DEM). A partir de este último, se calculó el índice topográfico compuesto (CTI), empleando la ecuación $CTI = \ln(SCA/\tan(\text{slope}))$, donde SCA es el área de cuenca específica y slope es la

pendiente, ambos mapas fueron obtenidos mediante la herramienta TAUDEM de ArcGIS (Tarboton, 1997).

El modelo MEME define una función de producción dependiente de la dosis de N, del CTI y de la condición meteorológica de la campaña (Año) (Espósito, 2013);, la misma se plantea en la ecuación VI:

$$Rto=7127+14,11N-0,039N^2+29,57CTI-1721Año-10,98AñoN+0,021AñoN^2-8,12AñoCTI+0,38AñoCTIN \text{ [VI]}$$

Donde Rto es el rendimiento de maíz, N son las dosis de nitrógeno. CTI es el índice topográfico compuesto y CTIN es el efecto interacción de la dosis de N con CTI. Año: es igual a 1 para año seco, -1 para año húmedo y 0 para año normal.

Como se observa el cálculo de la dosis por el criterio II se debe contar con un pronóstico climático de la campaña. Si la misma se pronostica como húmeda normal o seca se debe aplicar una u otra ecuación.

Para la región Sur de Córdoba la campaña 2010/11 meteorológicamente se comportó como normal a levemente seco, la campaña 2011/12 fue seca y la campaña 2012/13 como normal a húmeda. En sus informes agroclimáticos Sierra (2010, 2011, 2012) predijo dicho comportamiento con suficiente exactitud. Para sus pronósticos emplea el índice ENSO y la temperatura del atlántico a la altura de Brasil entre otros indicadores.

2.4. METODOLOGÍA UTILIZADA PARA EL LOGRO DEL OBJETIVO ESPECÍFICO III

A los fines de comparar agronómica y económicamente los resultados del empleo de uno u otro criterio se calcularon las dosis y rendimientos para cada criterio. En el caso del criterio I la DOENZM de cada zona y su rendimiento fue ponderada por la superficie que representa la zona en el lote. De esta manera se obtuvo una única dosis y rendimiento para todo el lote.

La dosis de N y el rendimiento del criterio II fueron calculados promediando los valores de las franjas de dosis MEME que atravesaron el lote.

El resultado agronómico de estos criterios se comparó además con lo que se hubiese obtenido si se aplicaba la dosis modal de N de la región establecida por De Prada y Penna (2008) en 43 kg N ha⁻¹. Para obtener el rendimiento de la dosis modal se ingresó el valor modal de N a la ecuación ajustada para cada zona de manejo en

cada sitio y luego se ponderó el rendimiento obtenido de la misma manera que para el criterio I.

Con los datos de rendimiento y dosis ponderada para cada criterio se determinó la Eficiencia Agronómica del Nitrógeno (Doberman, 2005):

$$EAN = \frac{(R_{toF} - R_{to0})}{DN} \quad (VII)$$

Donde EAN: eficiencia agronómica del Nitrógeno, R_{toF}: rendimiento del tratamiento fertilizado; R_{to0}: rendimiento del tratamiento testigo y DN: dosis de nitrógeno.

Se determinó la respuesta a la fertilización como la diferencia entre el rendimiento de cada criterio (calculado como se explicó anteriormente) y el tratamiento testigo.

Tanto para rendimiento bajo fertilización, como para EAN y respuesta a la fertilización se realizó un análisis de la varianza tomando al sitio como repetición y test de separación de medias LSD Fisher. Se empleó el software estadístico Infostat (Di Rienzo *et al.*, 2013).

Cada unidad de N produjo diferentes cantidades de maíz (EAN). Se graficó la EAN para cada criterio empleando la relación de precios establecida.

A los fines de estimar el impacto del cambio de la EAN a nivel regional los resultados obtenidos se extrapolaron a la totalidad de la superficie de los departamentos de Río Cuarto y Juárez Celman estableciendo posibles impactos productivos y económicos de la aplicación de un criterio de fertilización basado en el modelo MEME. Para las estimaciones se tomó el precio de maíz pizarra Rosario promedio del mes de mayo 2014 que fue \$1.220 por t, descontados los gastos de flete y comercialización para el Dpto. Río Cuarto.

CAPÍTULO 3

RESULTADOS

3.1. PARA EL OBJETIVO ESPECÍFICO I

3.1.1. ZONIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL SITIO I: EL PIQUETE

El sitio el Piquete se ubica 62 km al Sur Este de la localidad de Río Cuarto en el Dpto. Juárez Celman, Córdoba. El lote tiene una superficie total de 59,6 ha. El relieve es normal muy suavemente ondulado con pendiente del 1%. La Figura 1 muestra la zonificación realizada a partir de la interpretación de la salida del programa de análisis clúster MZA. El mismo indicó dividir al lote en dos zonas de manejo. La zona de Alta Producción (AP) ocupa un 46% de la superficie y la zona de Baja Producción (BP) el restante 54%.

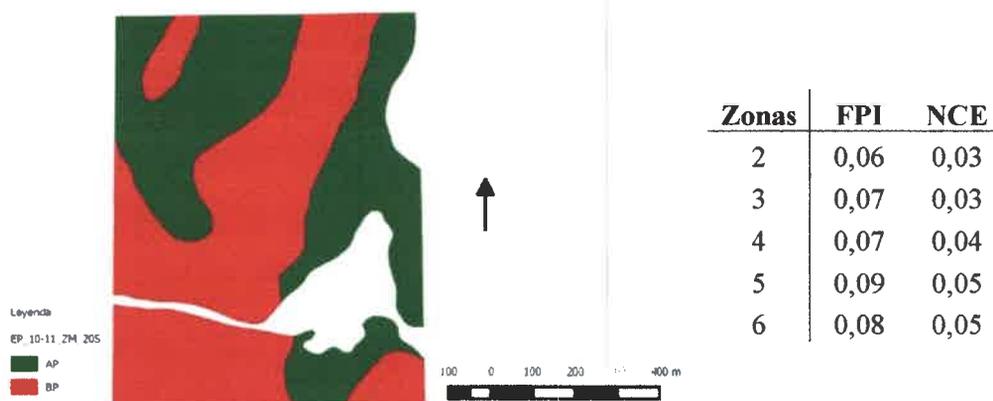


Figura 1: Zonificación lote El Piquete (Córdoba). AP: **Alta Producción** (verde), BP (**Baja Producción**). Valores de FPI (índice de borrosidad) y NCE (índice de entropía) según cantidad de zonas.

Las Tablas 1 y 2 muestran la descripción del perfil de cada zona de manejo. El suelo se clasificó como Haplustol típico. Son suelos profundos moderadamente provistos de materia orgánica. Las zonas de alta producción se asocian a sectores más bajos en el terreno. La ubicación más elevada de las zonas identificadas como de baja producción tiene un impacto en la dinámica hídrica de este tipo de ambientes.

Tabla 1. Perfil del suelo Ensayo I El Piquete, Río Cuarto (Córdoba).
Zona de manejo: Alta Producción.

<i>Horizonte</i>	<i>Profundidad (cm)</i>	<i>Arcilla (%)</i>	<i>Limo (%)</i>	<i>Arena (%)</i>	<i>Análisis de suelo</i>		
					<i>MO (%)</i>	<i>P (ppm)</i>	<i>pH</i>
Ap	0 – 10	20	30	50	1,69	10,1	6,1
A2	10 – 25	20	30	50			
AB	25 – 35	18	30	52			
Bw1	35 – 46	16	30	52			
Bw2	46 – 59	14	28	58			
BC	59 – 72	11	28	61			
C	72 +	11	28	61			

MO: materia orgánica. P: fósforo disponible.

Tabla 2. Perfil del suelo Ensayo I El Piquete, Río Cuarto (Córdoba).
Zona de manejo Baja Producción

<i>Horizonte</i>	<i>Profundidad (cm)</i>	<i>Arcilla (%)</i>	<i>Limo (%)</i>	<i>Arena (%)</i>	<i>Siembra</i>		
					<i>MO (%)</i>	<i>P (ppm)</i>	<i>pH</i>
Ap	0 – 10	15	27	58	1,36	11,1	6,4
A2	10 – 22	15	27	58			
Bw	22 – 43	13	25	62			
BC	43 – 58	8	25	65			
C	58 +	10	25	67			

MO: materia orgánica. P: fósforo disponible.

De la comparación de perfiles entre AP y BP se puede interpretar que la zona de mayor producción se asocia a suelos más profundos y con una fertilidad superior desde el punto de vista de la materia orgánica, además por su composición textural los suelos de la zona de BP poseen una menor capacidad de retención de agua. Es frecuente para el caso del fósforo que los ambientes de menor producción muestren valores mayores producto de la aplicación de dosis uniformes a todo el lote y a una mayor extracción proporcional en los ambientes más productivos. El análisis de los rendimientos de los mapas de campañas anteriores permitió determinar que la zona

clasificada como de alta producción tiene en promedio un 20,1% más de rendimiento que la zona de baja producción (Tabla 3). El coeficiente de variación para rendimiento de la zona BP es menor que para AP para las tres campañas evaluadas.

Tabla 3. Rendimiento de trigo y soja (kg ha^{-1}) y coeficiente de variación para tres campañas por zona de manejo. El Piquete (Córdoba).

Cultivo/Campaña		AP	BP
Trigo 2007	Rto kg ha^{-1}	4.756	4.067
	CV	0.16	0.08
Soja 2008	Rto kg ha^{-1}	2.177	1.823
	CV	0.42	0.37
Soja 2010	Rto kg ha^{-1}	2.372	1.914
	CV	0.26	0.10

AP: Alta Producción. BP: Baja Producción. CV: coeficiente de variación

3.1.2. ZONIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL SITIO II: SANTA CLARA

El establecimiento Santa Clara se ubica 72km al sur este de la localidad de Río Cuarto en el Dpto Juárez Celman, Córdoba. El lote se ubica 10 km al Este del sitio El Piquete, por lo que comparten similares características desde el punto de vista del paisaje y los perfiles de suelo. La superficie del sitio del ensayo es de 72,8 ha. El relieve es normal muy suavemente ondulado con pendiente de 0,9%. El proceso de zonificación en base al empleo de mapas de rendimiento indicó como más adecuado la división del terreno en tres zonas de manejo (Figura 2). Los perfiles característicos de cada zona se presentan en las Tablas 4, 5 y 6. El suelo se clasificó como Haplustol típico en AP y PM y Haplustol éntico en BP. Los perfiles descriptos para AP y PM no muestran diferencias importantes desde el punto de vista de la profundidad y secuencia de horizontes. En cuanto a la materia orgánica AP presenta un valor superior que PM. El perfil de la zona BP se lo clasificó como Haplustol éntico por ser menos desarrollado y menos profundo. En cuanto a la fertilidad química BP posee casi la mitad de la materia orgánica que AP pero cabe destacar que los valores de P son levemente superiores ($2,6 \text{ mg kg}^{-1}$) comparado con AP. Esto podría explicarse por los efectos de recupero que tiene la aplicación de dosis uniforme de P en el lote en zonas donde la disponibilidad de agua para el cultivo estaría limitando la

producción y con ello la absorción de este elemento generando, indirectamente, el recupero de este nutriente en el suelo.

Tabla 4. Perfil del suelo Ensayo II Santa Clara, Río Cuarto (Córdoba). Zona de manejo: Alta Producción.

<i>Horizonte</i>	<i>Profundidad (cm)</i>	<i>Arcilla (%)</i>	<i>Limo (%)</i>	<i>Arena (%)</i>	<i>Siembra</i>		<i>pH</i>
					<i>MO (%)</i>	<i>P (ppm)</i>	
Ap	0 – 12	16	32	52	2,5	14,2	5,8
A2	12 – 27	16	32	52			
Bw1	27 – 43	14	29	57			
Bw2	43 – 56	12	29	59			
BC	56– 70	11	28	61			
C	70 +	11	28	61			

MO: materia orgánica. P: fósforo disponible. .

Tabla 5. Perfil del suelo Ensayo II Santa Clara, Río Cuarto (Córdoba). Zona de manejo: Producción Media

<i>Horizonte</i>	<i>Profundidad (cm)</i>	<i>Arcilla (%)</i>	<i>Limo (%)</i>	<i>Arena (%)</i>	<i>Siembra</i>		<i>pH</i>
					<i>MO (%)</i>	<i>P (ppm)</i>	
Ap	0 – 14	16	32	52	1,9	14,5	5,8
A2	14 – 25	16	32	52			
Bw1	27 – 40	15	27	58			
Bw2	40 – 56	14	27	59			
BC	56– 65	11	28	61			
C	65 +	11	28	61			

MO: materia orgánica. P: fósforo disponible.

Tabla 6. Perfil del suelo Ensayo II Santa Clara, Río Cuarto (Córdoba). Zona de manejo: Baja Producción

<i>Horizonte</i>	<i>Profundidad (cm)</i>	<i>Arcilla (%)</i>	<i>Limo (%)</i>	<i>Arena (%)</i>	<i>Siembra</i>		
					<i>MO (%)</i>	<i>P (ppm)</i>	<i>pH</i>
Ap	0 – 11	17	33	54	1,3	16,8	6
A	11 – 27	17	33	54			
AC	27 – 48	15	28	57			
C	48 +	13	28	59			

MO: materia orgánica. P: fósforo disponible. .

La zona AP ocupa un 29% de la superficie, la zona PM el 37% y la BP el 45%. Del análisis de los mapas de rendimiento de años anteriores se pudo establecer que la zona identificada como AP rinde un 4,3% más en promedio que la zona PM (Tabla 7). En cambio en la zona BP el rendimiento de los cultivos en promedio fue un 9,25% menor que PM. La menor diferencia detectada en los perfiles de suelo descriptos para cada zona de manejo se relaciona con la menor diferencia encontrada al momento de analizar la productividad de cada sector del lote. Evidentemente AP y PM son zonas de comportamiento similar. La diferencia entre zonas AP y BP fue del 14%. Es importante destacar que las mayores diferencias entre zonas no se encontraron para maíz sino para soja. La diferencia de rendimiento para entre AP y BP en las dos campañas con soja es 21,8% este porcentaje baja a 6,18% para campañas de maíz. Generalmente el cultivo de maíz es mucho más sensible ante variaciones ambientales pero este efecto pudo deberse a campañas contrastante desde el punto de vista hídrico. La técnica de zonificación previa y luego la selección de sitios para la caracterización del perfil aparenta ser una herramienta interesante a la hora caracterizar un lote de producción. Además se constituye como una importante fuente de información para hacer más eficiente el trabajo de campo en la caracterización de ambientes.

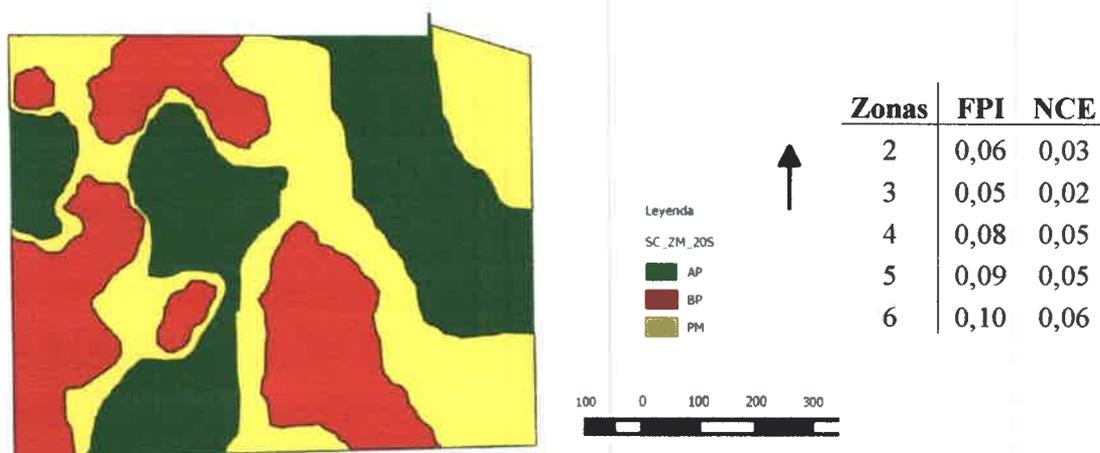


Figura 2. Zonas de manejo Santa Clara (Córdoba). AP: alta producción (verde), BP (baja producción) PM (Producción Media). Valores de FPI (índice de borrosidad) y NCE (índice de entropía) por cantidad de zonas.

Tabla 7. Rendimiento de soja y maíz (kg ha^{-1}) y coeficiente de para tres campañas por zona de manejo. Santa Clara (Córdoba).

Cultivo/Campaña		AP	PM	BP
Soja 2009	Rto kg ha^{-1}	3912	3741	3161
	CV	0.15	0.13	0.14
Maíz 2010	Rto kg ha^{-1}	9654	9508	9335
	CV	0.13	0.15	0.12
Soja 2011	Rto kg ha^{-1}	4825	4410	4021
	CV	0.10	0.11	0.12

AP: Alta Producción. PM: Producción Media BP: Baja Producción.

CV: coeficiente de variación

La disposición de las zonas de manejo sigue una secuencia lógica BP-PM-AP, lo cual se condice con los valores de rendimiento presentados en la Tabla 7. Para transitar de un sector de alta productividad a uno de baja productividad se debe atravesar una zona transicional de productividad media. Las características de esta zona transicional fueron importantes para definirla como zona por el sistema de zonificación realizado.

3.1.3. ZONIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL SITIO III Y IV: DON NICOLÁS I Y DON NICOLÁS II.

Estos sitios se encuentran en el Establecimiento Don Nicolás 85 km al sur este de la localidad de Río Cuarto, en el departamento homónimo, Córdoba. El relieve es normal. El lote Don Nicolás I posee una superficie de 100ha, las mismas fueron clasificadas en dos zonas de manejo AP (59%) y BP (41%). Las Tablas 8 y 9 describen el perfil de cada zona. El suelo se clasificó como Haplustol údico, posee textura franco arenosa. Son suelos poco desarrollados pero profundos. Por la textura este tipo de suelos se caracteriza por tener baja capacidad de retención hídrica y susceptibilidad a la erosión eólica. En cuanto a su fertilidad química presenta bajos valores de MO y P. El contenido de MO de la zona AP es un 22% superior al de la zona BP. Al igual que se observó en los sitios El Piquete y Santa Clara la zona BP posee valores de P mayores comparado con AP.

Tabla 8. Perfil del suelo Ensayo III Don Nicolás I, Río Cuarto (Córdoba). Zona de manejo: Alta Producción

<i>Horizonte</i>	<i>Profundidad (cm)</i>	<i>Arcilla (%)</i>	<i>Limo (%)</i>	<i>Arena (%)</i>	<i>Siembra</i>		<i>pH</i>
					<i>MO (%)</i>	<i>P (ppm)</i>	
Ap	0 – 18	14,4	27	58,6	1,63	13	6
A	18 – 30	13,8	27	59,2			
AC	30 – 64	13,2	25	61,8			
C	64 +	10,9	24	65,1			

MO: materia orgánica. P: fósforo disponible.

Tabla 9. Perfil del suelo Ensayo III Don Nicolás I, Río Cuarto (Córdoba). Zona de manejo: Baja Producción

<i>Horizonte</i>	<i>Profundidad (cm)</i>	<i>Arcilla (%)</i>	<i>Limo (%)</i>	<i>Arena (%)</i>	<i>Siembra</i>		<i>pH</i>
					<i>MO (%)</i>	<i>P (ppm)</i>	
Ap	0 – 14	14	26	60	1,33	14	5,8
A	14 – 30	13,2	24,8	62			
AC	30 – 55	13,2	22,8	64			
C	55+	10	24	66			

MO: materia orgánica. P: fósforo disponible.

La Figura 5 muestra la disposición de las zonas de manejo en el lote. En la parte central del la Figura puede observarse que la división de zonas es muy clara y parece estar sugiriendo algún tipo de variabilidad por manejo. Indagando en la historia del lote se verificó que antes estaba dividido en dos lotes y fueron unidos. La división puede observarse en la zona central de la Figura 3.

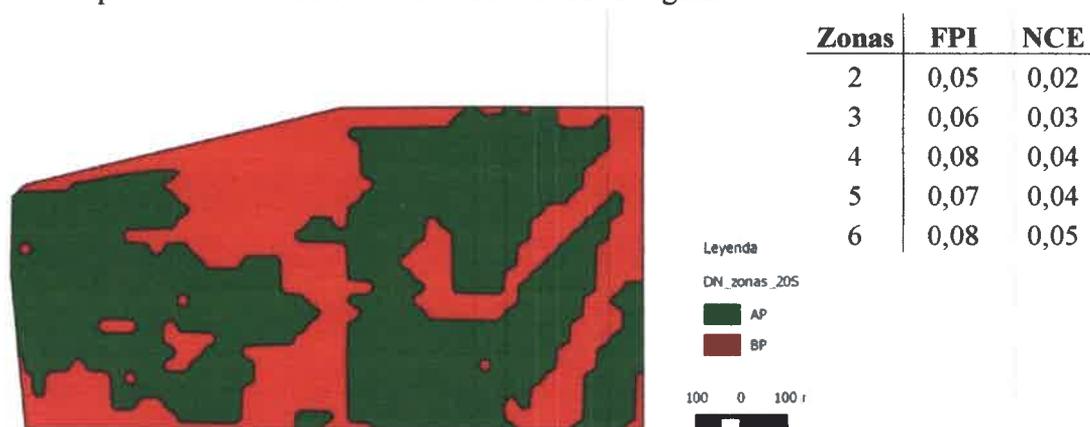


Figura 3. Zonas de manejo Don Nicolás I (Córdoba). AP: alta producción (verde), BP (baja producción). Valores de FPI (índice de borrosidad) y NCE (índice de entropía) por cantidad de zonas.

Los mapas de rendimientos de maíz y soja empleados para la zonificación fueron clasificados por zonas para caracterizar la productividad de cada una de ellas. La zona AP rinde en promedio un 31,6% más que la zona BP. Si la caracterización se realiza por cultivo la diferencia de rendimiento para el cultivo de maíz asciende a 34,5% y la de soja se ubica en el 25,9%. (Tabla 10).

Tabla 10. Rendimiento de maíz y soja (kg ha^{-1}) y coeficiente de variación para tres campañas por zona de manejo. Don Nicolás I y II (Córdoba).

Don Nicolás I				Don Nicolás II			
Cultivo/ Campaña		AP	BP	Cultivo/ Campaña		AP	BP
Maíz 2002	Rto kg ha^{-1}	10076	7903	Soja 2002	Rto kg ha^{-1}	4125	3205
	CV	0.27	0.27		CV	0,24	0,27
Maíz 2004	Rto kg ha^{-1}	8955	6324	Soja 2004	Rto kg ha^{-1}	3586	2987
	CV	0.18	0.24		CV	0,19	0,25
Soja 2008	Rto kg ha^{-1}	4443	3527	Maíz 2008	Rto kg ha^{-1}	9528	7458
	CV	0.20	0.25		CV	0.17	0.24

AP: Alta Producción. BP: Baja Producción. CV: coeficiente de variación

El sitio Don Nicolás II es un lote contiguo a Don Nicolás I. La superficie total del mismo es de 145 ha. El análisis clúster de los datos de rendimiento indicó que la división en dos zonas de manejo sería más adecuada para generar la mayor diferencia entre clases y la mayor homogeneidad de rendimientos dentro de cada zona. El 51% de la superficie se clasificó como AP (Figura 4). Al igual que el lote contiguo los suelos se clasificaron como Haplustoles énticos y poseen la mismas limitantes descritas para Don Nicolás I. Las Tablas 11 y 12 describen el perfil tipo de cada zona.

Tabla 11. Perfil del suelo Ensayo IV Don Nicolás II, Río Cuarto (Córdoba). Zona de manejo: Alta Producción

<i>Horizonte</i>	<i>Profundidad (cm)</i>	<i>Arcilla (%)</i>	<i>Limo (%)</i>	<i>Arena (%)</i>	<i>Siembra</i>		
					<i>MO (%)</i>	<i>P (ppm)</i>	<i>pH</i>
Ap	0 – 20	13	27	60	1,73	13	6,1
A	20 – 30	12	27	61			
AC	30 – 69	12	25	63			
C	69 +	11	24	65			

MO: materia orgánica. P: fósforo disponible.

Tabla 12. Perfil del suelo Ensayo IV Don Nicolás II, Río Cuarto (Córdoba). Zona de manejo: Baja Producción.

<i>Horizonte</i>	<i>Profundidad (cm)</i>	<i>Arcilla (%)</i>	<i>Limo (%)</i>	<i>Arena (%)</i>	<i>Siembra</i>		
					<i>MO (%)</i>	<i>P (ppm)</i>	<i>pH</i>
Ap	0 – 13	11	24	65	1,4	15	5,9
A	13 – 28	12,5	22	65,5			
AC	28 – 54	13	22	65			
C	54+	10	21	69			

MO: materia orgánica. P: fósforo disponible.

Del análisis de los datos de rendimiento de campañas anteriores (Tabla 10) se concluye que la zona AP posee una media de rendimiento 25,5% superior a la zona BP. La clasificación realizada por clúster permitió separar dos grandes zonas de manejo con importante variabilidad productiva entre ellas.

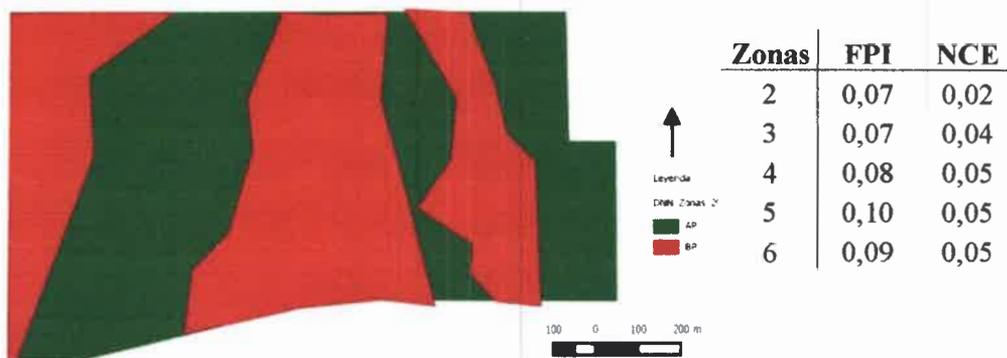


Figura 4. Zonas de manejo Don Nicolás II (Córdoba). AP: alta Producción (verde), BP (baja Producción). Valores de FPI (índice de borrosidad) y NCE (índice de entropía) por cantidad de zonas.

3.1.4. ZONIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL SITIO V: LAS VERTIENTES

El ensayo número cinco se ubicó 20 km al sur oeste de la ciudad de Río Cuarto, en el Departamento Dpto. Río Cuarto, Córdoba, en cercanías de la localidad de Las Vertientes. El relieve es normal. La Figura 5 presenta la disposición de las zonas de manejo. La zona AP ocupa el 41,25% de la superficie del lote. Las Tablas 13 y 14 muestran los perfiles tipo descriptos en cada zona. El suelo de la zona AP se clasificó como haplustol údico y el de la zona BP como haplustol éntico. La textura es franco arenosa, la baja retención de agua, ligera susceptibilidad a la erosión hídrica y eólica son limitantes que comparten con todos los sitios en los cuáles se realizaron ensayos.

Desde el punto de vista de la fertilidad química el sitio Las Vertientes tiene un adecuado nivel de materia en comparación con los suelos de la región. En la zona AP el contenido de P se ubica por encima del nivel crítico establecido para maíz. En la zona BP el nivel de P cae abruptamente a 7 ppm. La zona AP En la Tabla 14 se resume los datos de rendimiento de los mapas procesados.

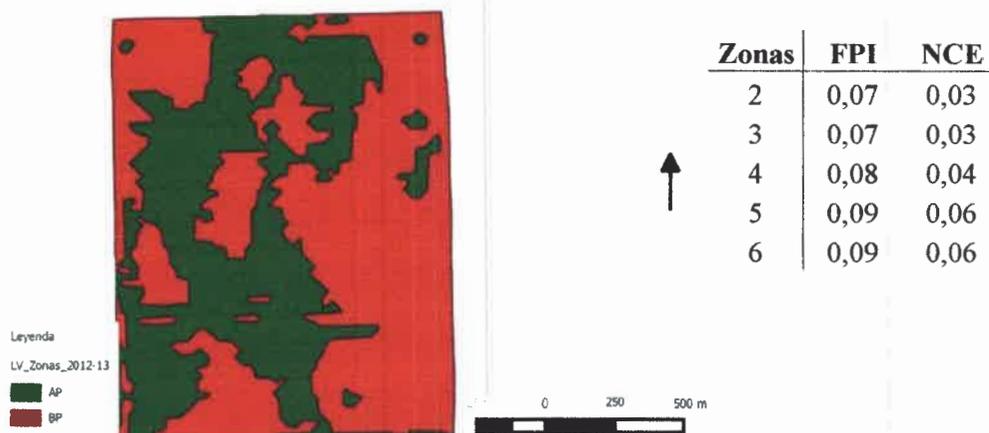


Figura 5. Zonas de manejo Las Vertientes (Córdoba). AP: alta productividad (verde), BP (baja productividad). Valores de FPI (índice de borrosidad) y NCE (índice de entropía) por cantidad de zonas.

Tabla 13. Perfil del suelo Ensayo V Las Vertientes, Río Cuarto (Córdoba). Zona de manejo: Alta Producción

<i>Horizonte</i>	<i>Profundidad (cm)</i>	<i>Arcilla (%)</i>	<i>Limo (%)</i>	<i>Arena (%)</i>	<i>Siembra</i>		
					<i>MO (%)</i>	<i>P (ppm)</i>	<i>pH</i>
Ap	0-8	12	58,1	29,9	3,07	20,9	6,2
A2	8-20	16	50,6	33,4			
AB	20-29	16	50,1	33,6			
Bw1	29-44	14	48,5	37,5			
Bw2	44-56	13	49,5	37,5			
BC	56-80	12	49,9	38,1			
C	60-65	8	55,1	36,9			

MO: materia orgánica. P: fósforo disponible.

Tabla 14. Perfil del suelo Ensayo V Las Vertientes, Río Cuarto (Córdoba). Zona de manejo: Baja Producción.

<i>Horizonte</i>	<i>Profundidad (cm)</i>	<i>Arcilla (%)</i>	<i>Limo (%)</i>	<i>Arena (%)</i>	<i>Siembra</i>		
					<i>MO (%)</i>	<i>P (ppm)</i>	<i>pH</i>
Ap	0-8	8	29,4	62,6	2,07	7,9	6,1
A2	8-20	8	29,8	62,2			
AC	20-34	8	29	63			
C1	34-60	8	24,2	67,8			
C2	60-102	4	24,7	71,3			

MO: materia orgánica. P: fósforo disponible.

La Tabla 13 resume los resultados de rendimiento por zona de manejo para los mapas de años anteriores. El promedio de diferencia entre la zona AP y BP es de un 35,5% a favor del segundo. Cabe destacar que para campañas secas como la 2011-12 la diferencia entre rendimientos por zona se amplía al 69,79%. En los años donde la limitante es el agua todas las restricciones que se pueden observar por zona de manejo cobran importancia y cumplen un rol preponderante en la definición del rendimiento. Los perfiles descritos por textura y profundidad poseen una capacidad diferencial en el almacenaje de agua a favor de AP. Esta diferencia en ciclos secos son las que marcan importantes descensos o aumentos en el rendimiento. La comprensión del funcionalismo de los suelos es fundamental para poder interpretar los resultados productivos de cada sitio y entenderlo no solo como un simple generador de granos sino como un complejo sistema con elementos que interaccionan permanentemente y que debemos comprender para poder manejar en forma adecuada y equilibrada.

Tabla 15. Rendimiento de soja y maíz (kg ha^{-1}) y coeficiente de variación para tres campañas, Las Vertientes, Córdoba.

Cultivo/ Campaña		AP	BP
Soja 2009	Rto kg ha^{-1}	5905	4607
	CV	0,21	0,27
Maíz 2010	Rto kg ha^{-1}	8768	8083
	CV	0,14	0,15
Soja 2011	Rto kg ha^{-1}	1574	927
	CV	0,41	0,70

AP: Alta Producción. BP: Baja Producción. CV: coeficiente de variación

3.1.5. SÍNTESIS DE LOS SITIOS DE ESTUDIO

Los cinco sitios bajo estudio comparten características entre ellos y representan los perfiles que se pueden encontrar en la llanura bien drenada del centro y sur de la provincia de Córdoba. Son suelos haplustoles con diferencias en el grado de desarrollo, profundidad, capacidad de retención hídrica y fertilidad. En general, el análisis de los mapas de rendimiento de campañas anteriores indicó separar a los sitios en dos zonas de manejo excepto el caso de Santa Clara donde mediante el estudio de los perfiles y las medias de rinde por zona de manejo pudo establecerse que las zonas AP y PM son similares y por tanto podrían fusionarse y manejarse como una única unidad de producción.

Los mapas de rendimiento mostraron ser una herramienta útil para la definición de las zonas de manejo dentro del lote. En general mostraron consistencia entre campañas para la caracterización de los rindes. Es imprescindible contar con memorias de manejo y de variables ambientales (i.e precipitaciones mensuales por campaña) de los sitios para poder realizar una interpretación correcta de los resultados observados. Un claro ejemplo de esto se da en las campañas donde se producen importantes déficits de agua que se manifiesta en diferencias en rendimiento por zonas de manejo de más del 60%, como se citó en alguno de los sitios.

La baja capacidad de retención de agua es una característica general en los perfiles de la región. Cuando dentro de un lote se observan diferencias de desarrollo en el perfil de los suelos, por ejemplo por distintas posiciones en el paisaje (loma y bajo), estas diferencias se traducen en capacidades de almacenamiento de agua diferencial dentro del lote y con ello potenciales productivos diferentes.

En años normales o húmedos las diferencias entre zonas de manejo se reducen considerablemente ya que una de las limitantes más importantes de la región como es la capacidad de retención de agua se ve reducida por la mayor disponibilidad de este recurso.

Los sitios de estudios se asocian a toposecuencias de loma, media loma y bajo generalmente. En algunos casos estas secuencias son más marcadas y en otros apenas perceptibles en el lote. Para los perfiles estudiados las zonas más elevadas se asociaron a sitios de baja producción y las zonas bajas a sitios de mayor producción. El rol del movimiento de agua en la toposecuencia adquiere un rol fundamental en este sentido. Sitios bajos reciben más agua y con ellos los procesos de desarrollo son mayores.

El manejo de los lotes dosis uniforme de insumos (i.e., semillas, fertilizantes, etc.) genera variabilidad inducida en algunas propiedades. En cuatro de los cinco sitios experimentales las zonas de menor producción tenían un mayor contenido de P. Una de las teorías que explica esto es que se aplica una dosis superior a la capacidad productiva de la zona de manejo y esa dosis comienza a funcionar como dosis de recupero del nivel de P en el suelo.

3.2. RESULTADOS DEL OBJETIVO ESPECÍFICO II.

3.2.1 EL PIQUETE: DOENZM, DOMEME

La Figura 6.a. muestra el mapa de CTI construido a partir del relevamiento altimétrico del lote El Piquete y el mapa de prescripción de dosis MEME (criterio II) para el mismo lote considerando que la campaña fue pronosticada como normal (Figura 6.b). Los valores de CTI para el lote de estudio presentan un rango de 2,6 a 29,9 con una media de 8,62.

Las dosis recomendadas por el modelo tuvieron un rango de 32 a 178 kg ha⁻¹ de N con una media de 56,8 kg ha⁻¹ de N. Al comparar las Figuras 6.a. y 6.b. se puede observar claramente que para un año húmedo las zonas con bajos valores de CTI reciben como recomendación del MEME más nitrógeno y las zonas con mayor CTI reciben una recomendación de N menor.

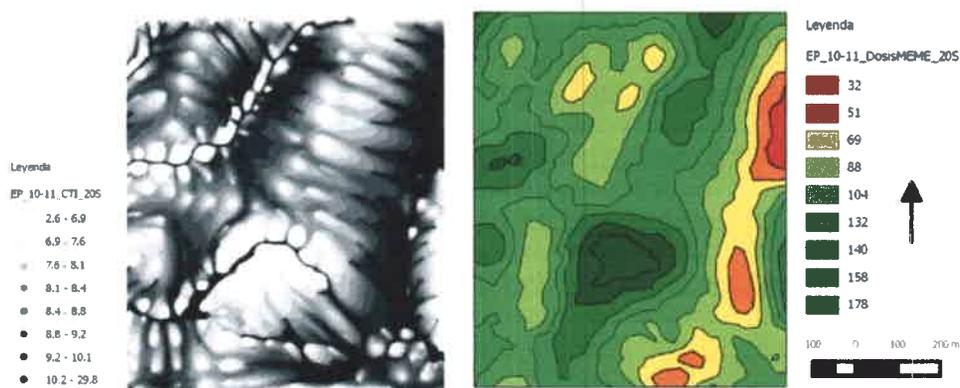


Figura 6. Mapa de CTI, (a), mapa de prescripción de N en base a MEME año normal (b), sitio El Piquete.

Las zonas de CTI más bajo generalmente se asocian a sitios con mayor pendiente y una menor área de cuenca específica. En estos sitios, la limitante de producción del factor agua cobra mayor importancia que en las zonas con mayores valores de CTI. Si la campaña es normal o húmeda esa restricción de producción por agua se ve reducida y entonces cada unidad de N aplicada tendrá un mayor impacto en la producción. Es de esperar entonces que para años húmedos el modelo MEME recomiende reducir las dosis de N a valores cercanos a cero en zonas con valores de CTI bajos, asignando dosis de fertilización a aquellas zonas de elevado CTI. En estos sitios donde el valor de CTI es elevado el nitrógeno seguramente será aprovechado, porque pese a ser una campaña seca la disponibilidad hídrica de estos sectores sería superior.

La Figura 7 presenta el mapa de rendimiento del ensayo. Cada una de las franjas de arriba hacia abajo representa los tratamientos y repeticiones. Los rendimientos se ubicaron entre 5.999 y 12.970 kg ha⁻¹ para todo el ensayo. Valores muy aceptables para la media regional. Se destaca la gran variabilidad espacial que puede observarse en el mapa de rendimiento.

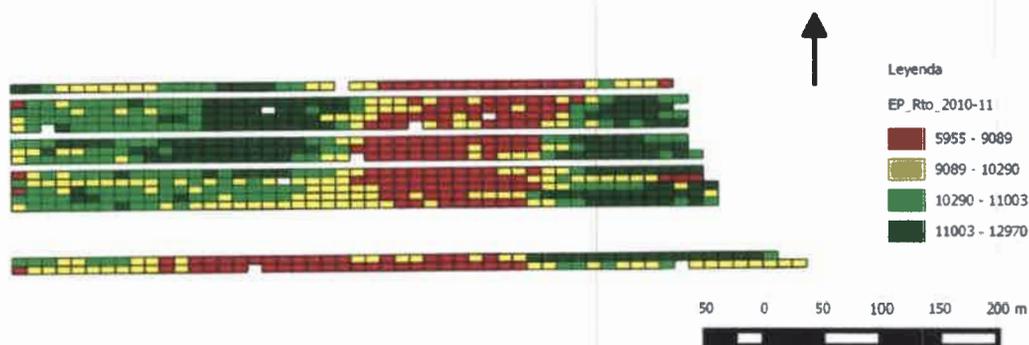


Figura 7. Mapa de rendimiento del ensayo, El Piquete Córdoba.

En la Figura 8 se presentan las precipitaciones para la campaña 2010-11 registrada en el establecimiento El Piquete, Río Cuarto (Córdoba). El total de precipitaciones para el ciclo del cultivo fue de 763 mm, apenas 3 mm por debajo de la precipitación normal para ese período. La distribución de las mismas fue regular no registrándose déficit durante el periodo crítico del cultivo (última década de diciembre y primera década de enero).

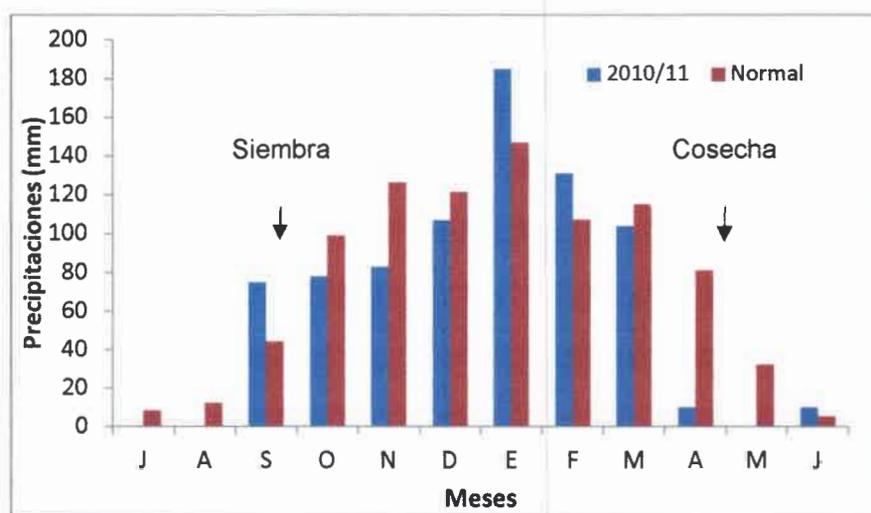


Figura 8. Precipitación normal (barras rojas) y precipitación campaña 2010/11, El Piquete, Río Cuarto (Córdoba).

El promedio de rendimiento para las franjas fertilizadas con el criterio II fue de 10.206 kg ha⁻¹.

En la Tabla 16 se presenta el valor de los coeficientes para la constante y los parámetros empleados para estimar la DOENZM a partir del rendimiento de las franjas de N creciente del ensayo. Todos ellos menos el parámetro cuadrático en la

zona dos (BP) tuvieron significancia estadística. La DOENZM para la zona AP y BP fue de 86 y 49 kg ha⁻¹ respectivamente. El rendimiento para esas dosis fue de 10.930 y 9692 kg ha⁻¹ para AP y BP, respectivamente.

Tabla 16. Coeficientes de parámetros para estimación de DOENZM y su significancia estadística, El Piquete, Córdoba.

Parámetro	Coefficiente	Valor p
CONSTANT	9394,52	<0,01
N	14,47	<0,01
N2	-0,048	<0,01
Z2	-184,65	0,02
NXZ2	-2,52	0,03
N2XZ2	0,0052	0,40

3.2.2. SANTA CLARA: DOENZM, DOMEME

En base al pronóstico agroclimático de campaña seca se elaboró el mapa de aplicación de N para el lote Santa Clara, teniendo como base el mapa de CTI (Figura 9). Los valores de CTI se ubicaron en un rango de 4,1 a 30,2 con un valor medio de 9,7.

El 93% de la superficie recibió una recomendación de 0 kg ha⁻¹ de N. La dosis para el 7% de la superficie fertilizada varió de 22 a 89 kg de N ha⁻¹. La DOMEME promedio para el ensayo fue de 4,46 kg N ha⁻¹. En forma contraria a lo que ocurrió para el sitio El Piquete, en este sitio, y para una campaña pronosticada como seca, el modelo MEME solo asignó dosis de fertilizante a aquellas zonas donde el CTI poseía valores muy elevados. Es allí donde en años secos, la disponibilidad de mejores condiciones hídricas permitirá aprovechar el nitrógeno aplicado.

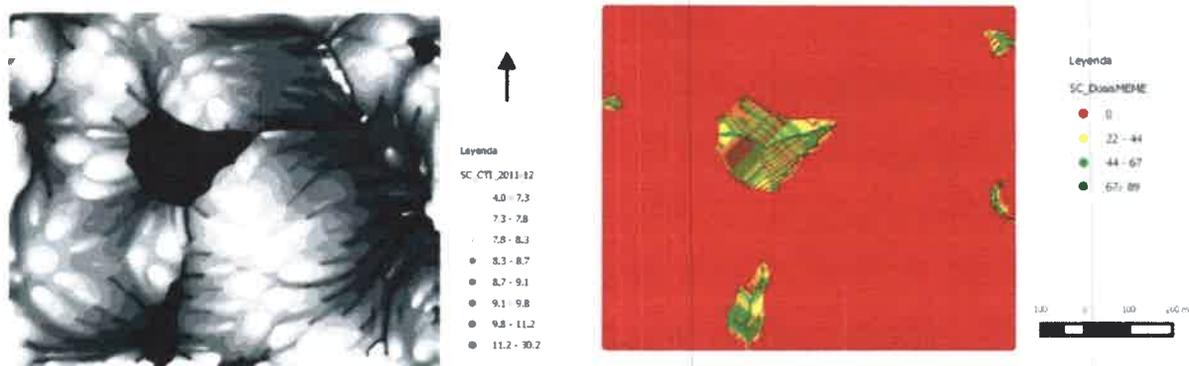


Figura 9. Mapa de CTI, (izquierda), mapa de prescripción de N en base a MEME año seco (derecha), sitio Santa Clara, Córdoba.

La Figura 10 muestra el mapa de rendimiento del ensayo Santa Clara, Córdoba. Los rendimientos se ubicaron en un rango de 0 a 9.515 kg ha⁻¹ con una media de 4.045 kg ha⁻¹. Los datos de rendimiento de la zona central se descartaron ya que se registraron fallas técnicas al momento de la refertilización. El rendimiento evidenció una importante merma por efecto del déficit hídrico de la campaña. La Figura 14 muestra las precipitaciones 2011/12 y la normal para la zona del ensayo. Se observa claramente que en el mes de diciembre, momento en el cual el cultivo se encontraba en el período crítico (V₁₃-R₃), las precipitaciones sólo aportaron el 10% de la normal para ese mes. Durante los meses de noviembre, diciembre y enero el maíz recibió el 50% de las precipitaciones normales. En resumen, los registros pluviométricos previos al período crítico y durante el mismo fueron muy inferiores a la normal lo que explica el bajo rendimiento general del ensayo.

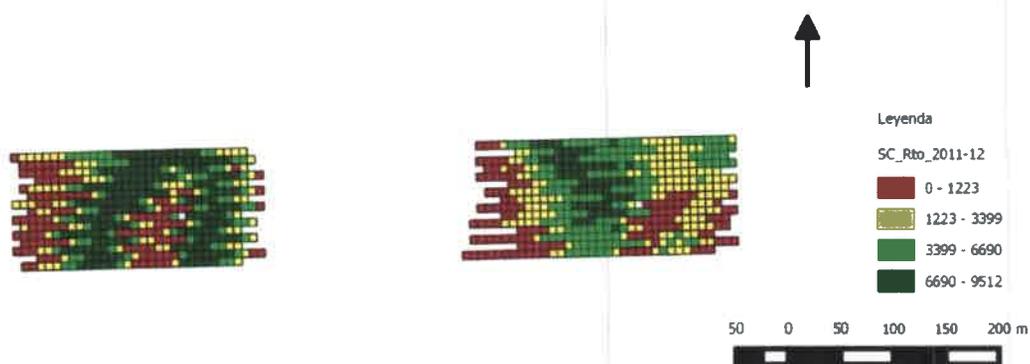


Figura 10. Mapa de rendimiento del ensayo Santa Clara, Córdoba.

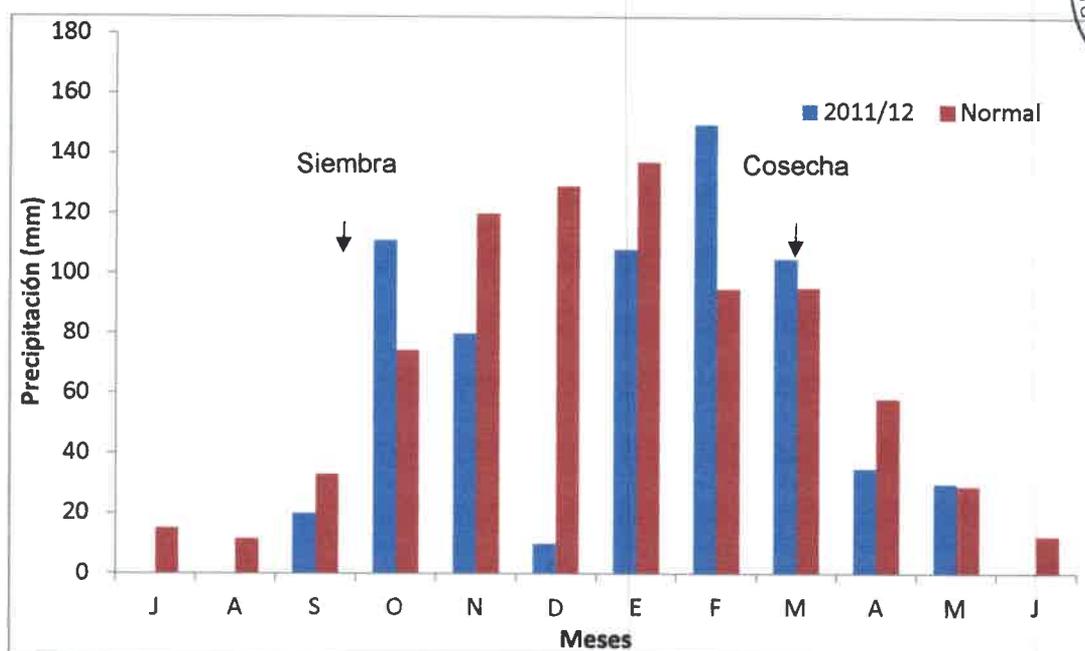


Figura 11. Precipitación Normal (barras rojas) y precipitación campaña 2011/12, Santa Clara, Río Cuarto (Córdoba).

Para la determinación de la DOENZM se realizó la regresión estadística cuyos resultados se muestran en la Tabla 17. El único parámetro que resultó estadísticamente significativo fue la constante. De la interpretación de los mismos se deduce que no existió diferencia de rendimiento entre zonas de manejo ni respuesta a la fertilización nitrogenada. Esta falta de respuesta se asocia principalmente al déficit hídrico que atravesó el cultivo durante el período crítico para definición de rendimiento. La falta de agua durante el ciclo posiblemente redujo la absorción de N del suelo. Para este sitio no se pudo determinar la DOENZM ni el rendimiento de la dosis modal ya que no se encontró respuesta a la fertilización ni a las zonas de manejo.

Tabla 17. Coeficientes de parámetros para estimación de DOENZM y su significancia estadística, Santa Clara, Córdoba.

Santa Clara	Coefficiente	Valor p
CONSTANT	3465,30	<0,01
N	4,49	0,51
N2	-0,02	0,56
Z2	-634,29	0,32
Z2N	-3,54	0,78
Z2N2	0,01	0,92

3.2.3. DON NICOLÁS II: DOENZM, DOMEME

El ensayo en Don Nicolás II se realizó durante el ciclo 2010/11 pronosticado como normal. El mapa de CTI (Figura 12.a.) del lote mostró valores medios de 10,2 con extremos de 5,5 y 29,8. La dosis DOMEME media fue de 42,1 kg N ha⁻¹ con un rango de 0 a 93 kg N ha⁻¹. El mapa de prescripción de dosis nitrogenada por criterio DOMEME (Figura 12.b.) tuvo un comportamiento distinto respecto del CTI con el sitio El Piquete. En aquellos sitios donde el CTI es menor el modelo recomendó, para año normal, una mayor dosis de N en comparación a sitios con mayor CTI. Los sitios con elevado CTI recibieron menos de 12 kg ha⁻¹ de N.

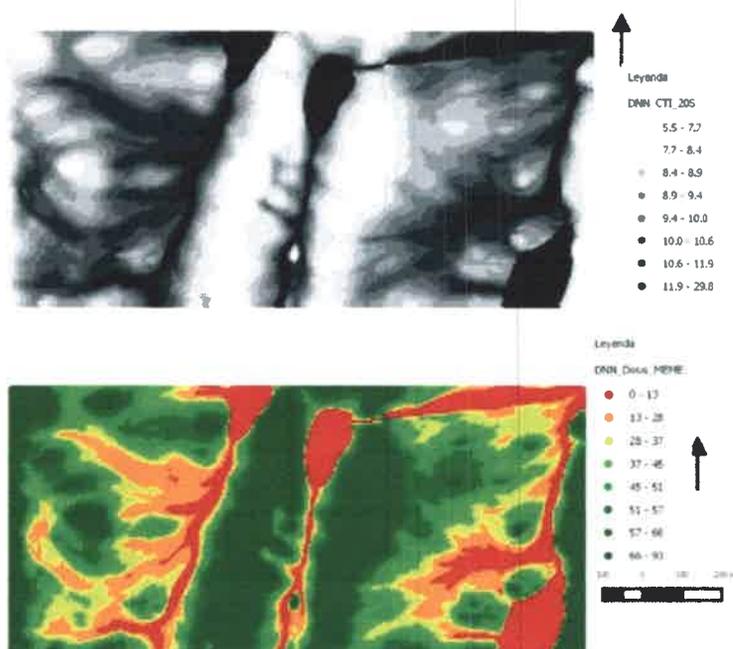


Figura 12. Mapa de CTI (a) y mapa de DOMEME (b) para Don Nicolás II, Córdoba.

El mapa de rendimiento del bloque I del ensayo se muestra en la Figura 13. La media de rendimiento alcanzado fue de 7.860 kg ha⁻¹ con extremos de 3.780 y 11.260 kg ha⁻¹. La Figura 14 muestra las precipitaciones para la campaña 2010/11, 2011/12 y las normales para el establecimiento Don Nicolás donde se implantaron los ensayos Don Nicolás II y Don Nicolás I.

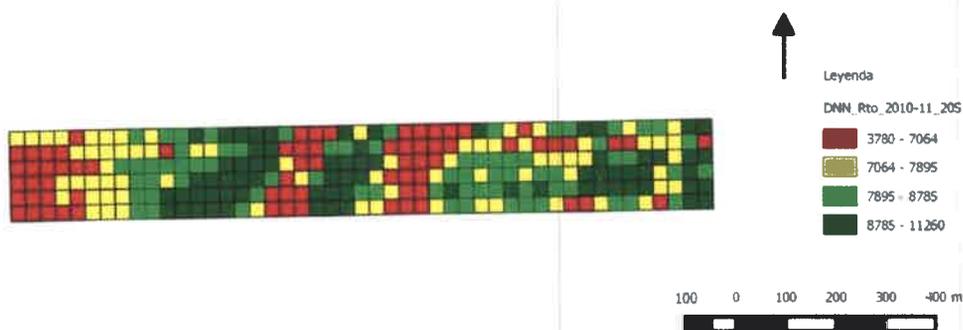


Figura 13. Mapa de rendimiento bloque I ensayo Don Nicolás II, Córdoba.

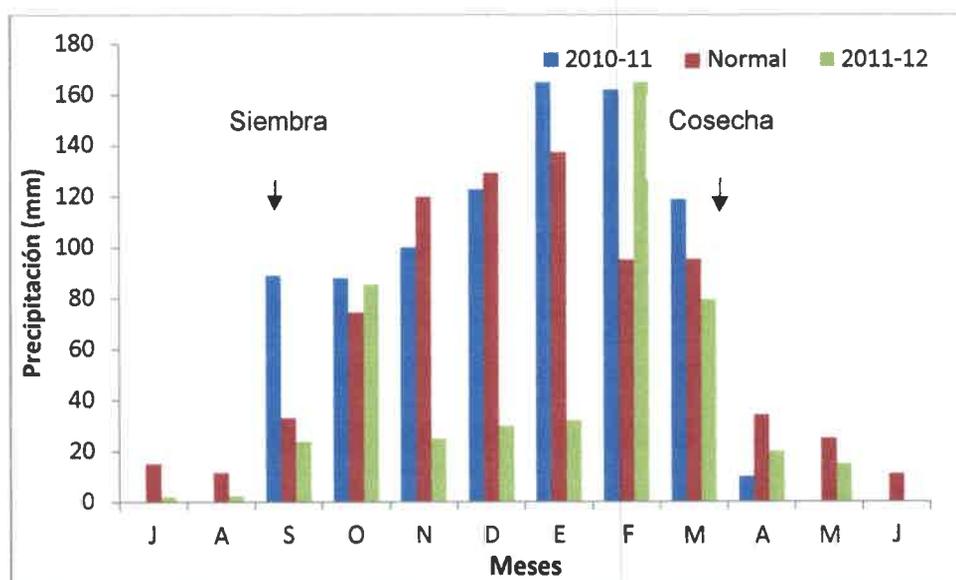


Figura 14. Precipitación normal (barras rojas), precipitación campaña 2010/11 (barras azules) y campaña 2011/12 (barras verdes) para Don Nicolás II y I respectivamente.

En ambas campañas se registraron importantes diferencias de precipitaciones que condicionaron el rendimiento de los cultivos. La lluvia para el ciclo del cultivo 2010/11 estuvo dentro de los parámetros normales al ascender a 727 mm, 280 de los cuales ocurrieron durante el período crítico del cultivo.

Los parámetros de la regresión para el ensayo Don Nicolás II para rendimiento en función de nitrógeno y zonas de manejo (Tabla 18) indicaron que solo existió respuesta al agregado de N pero no a la división por zonas de manejo. LA DOENZM quedó definida entonces en 40,8 kg N ha⁻¹ con un rendimiento de 7.702 kg de maíz por hectárea.

El rendimiento de la dosis modal de 43 kg N ha⁻¹ en el lote, empleando la ecuación ajustada fue de 7.719 kg ha⁻¹.

Tabla 18. Coeficientes de parámetros para estimación de DOENZM y su significancia estadística, Don Nicolás II, Córdoba.

Parámetro	Coeficiente	Valor p
CONSTANT	7319,76	<0,01
N	10,99	<0,01
Z2	-180,86	0,16
N2	-0,04	0,03
NZ2	-1,38	0,65
N2Z2	0,01	0,94

3.2.4. DON NICOLÁS I: DOENZM, DOMEME

El sitio del ensayo Don Nicolás I se sembró en la campaña 2011/12. Los valores de CTI medio (Figura 15.a.) fueron de 10,26 con extremos de 5,7 y 30,1. En base a este mapa y aplicando la ecuación para pronóstico de año seco la DOMEME indicó que el 97% de la superficie debía recibir una dosis de N igual a 0 (Figura 15.b.). El restante 3% recibió dosis con un rango de 22 a 88 kg ha⁻¹. De la comparación de estos mapas, al igual que ocurrió en la campaña seca del sitio Santa Clara, surge que las zonas con CTI muy elevado recibieron dosis de N.

La Figura 16 muestra el mapa de rendimiento del bloque I del ensayo Don Nicolás I. El rendimiento medio se ubicó en 1.386 kg ha⁻¹. Los extremos fueron de 12 kg a 3134 kg por hectárea. El rendimiento fue muy afectado por la disponibilidad hídrica de la campaña (Figura 14). Para el ciclo 2011/12 la precipitación durante el ciclo del cultivo fue de 411 mm con un importante déficit durante los meses de diciembre y enero donde solo precipitaron 62 mm condicionando en forma importante el rendimiento final de este sitio y campaña. La Tabla 19 muestra los coeficientes de los parámetros para la obtención de la DOENZM. El único parámetro además de la constante que fue estadísticamente significativo fue el efecto de la zona de manejo sobre la constante. En este sitio no se encontró respuesta a la aplicación de nitrógeno por lo que no se pudo optimizar la dosis de N. La media de rendimiento por zona de manejo fue de 1.721 y de 1.399 kg ha⁻¹ para AP y BP respectivamente.

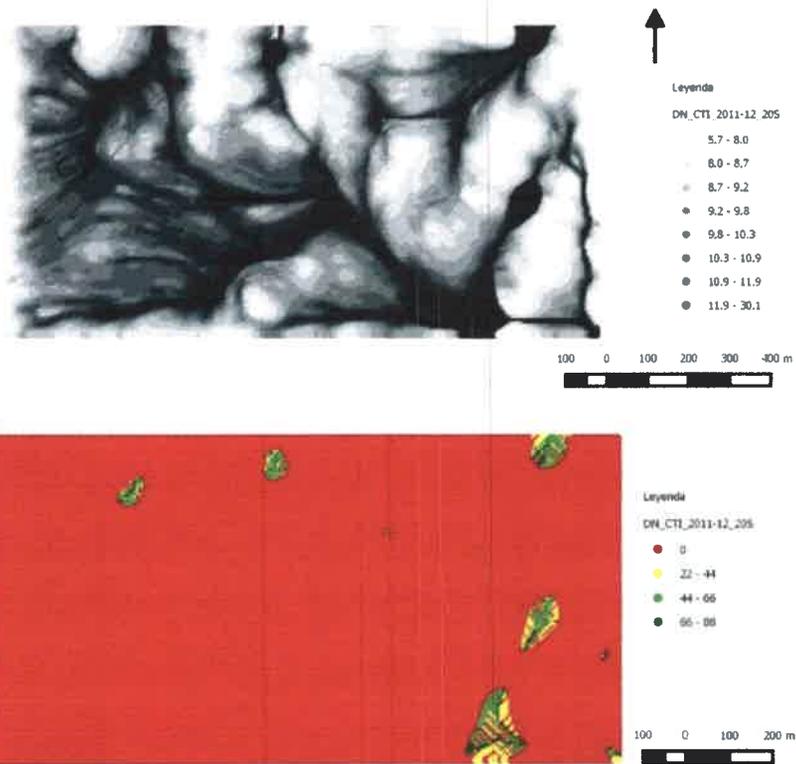


Figura 15. Mapa de CTI (a) y mapa de DOMEME (b) para Don Nicolás I, Córdoba.

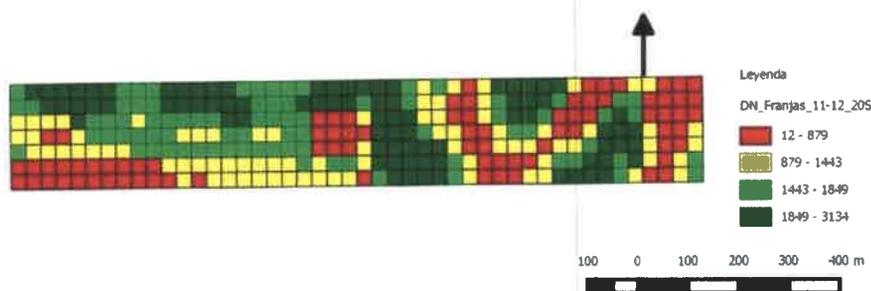


Figura 16. Mapa de rendimiento del bloque I del ensayo Don Nicolás I.

Tabla 19. Coeficientes de parámetros para estimación de DOENZM y su significancia estadística, Don Nicolás I, Córdoba.

Parámetro	Coficiente	Valor p
CONSTANT	1560,33	<0,01
N	-4,33	0,15
N2	0,03	0,22
Z2	-161,07	<0,01
Z2N	2,21	0,28
Z2N2	-0,01	0,52

3.2.5. LAS VERTIENTES: DOENZM, DOMEME

La campaña 2012/13 en la cual se implantó el ensayo de Las Vertientes fue húmeda para la región del ensayo en coincidencia con lo pronosticado. En la Figura 17 se observan las dosis indicadas por el MEME para el lote calculadas a partir del mapa de CTI y la ecuación para año húmedo.

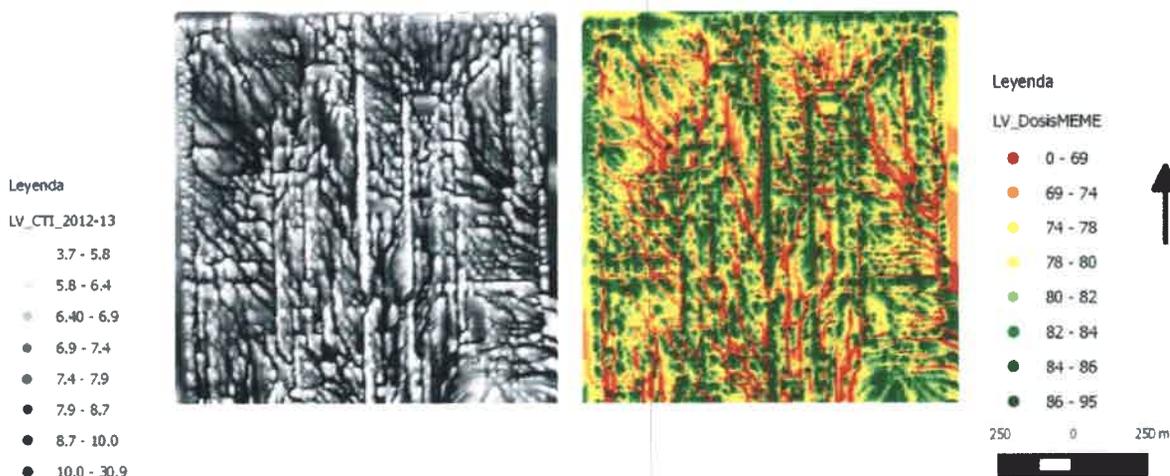


Figura 17. Mapa de CTI (izquierda) y mapa de DOMEME (derecha) para Don Nicolás I, Córdoba.

Los valores de CTI del lote tuvieron extremos de 3,7 y 30,9 con una media de 7,86. Las dosis del MEME variaron de 0 a 95 kg ha⁻¹ de N con un valor medio de 70 kg ha⁻¹.

La Figura 18 muestra el mapa de rendimiento del ensayo. Los valores tienen un rango de 7.601 a 13.058 kg de maíz por hectárea. El valor medio de rendimiento del ensayo fue de 10.164. Las lluvias durante el ciclo del cultivo ascendieron a 759 mm un 10% por encima de la media para la zona. Además del valor de precipitaciones del registro, se debe destacar que la distribución de las mismas permitió al cultivo alcanzar los rendimientos que muestra el mapa. Durante septiembre, octubre, noviembre y diciembre el cultivo recibió 519 mm de precipitación que le permitieron atravesar su período crítico con excelentes condiciones hídricas.

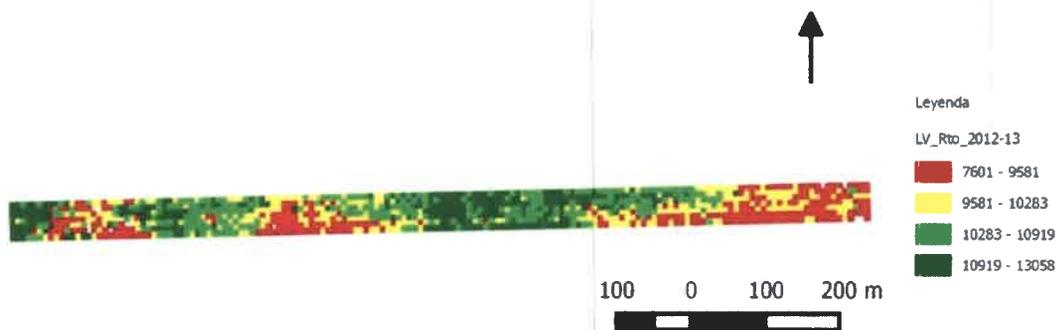


Figura 18. Mapa de rendimiento del bloque I del ensayo Las Vertientes, Córdoba.

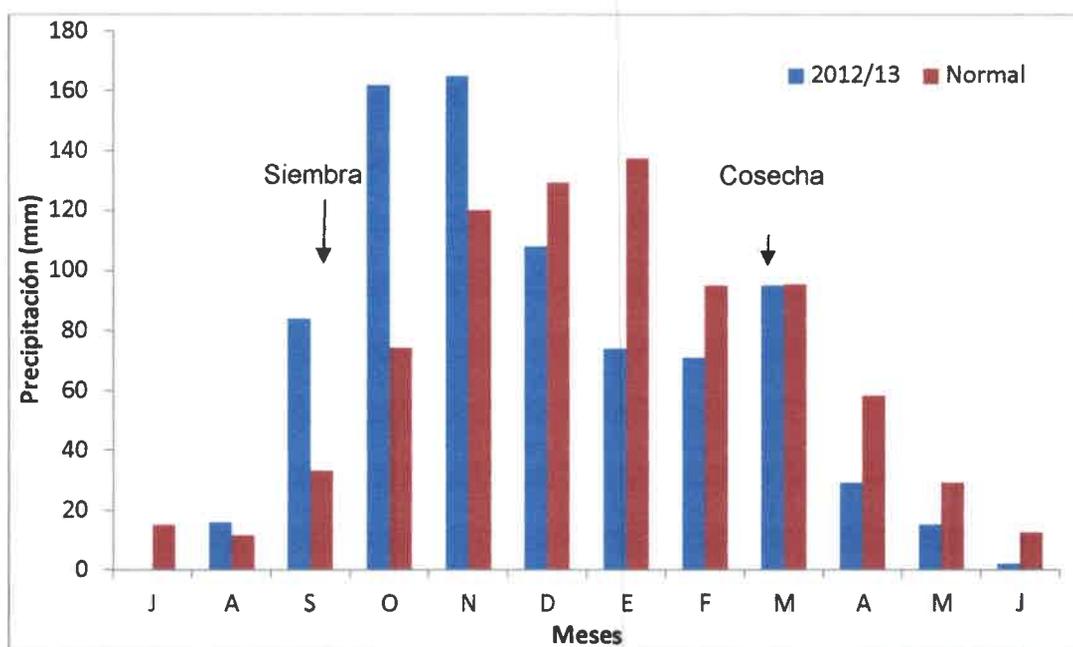


Figura 19. Precipitación Normal (barras rojas), Campaña 2012/13 (barras azules) para Las Vertientes, Córdoba.

La Tabla 20 presenta el valor de los parámetros de la regresión cuadrática para rendimiento en función del nitrógeno y la zona de manejo. Todos los parámetros fueron estadísticamente significativos por lo que se pudo estimar la DOENZM para cada zona de manejo. La optimización de la dosis indicó un valor de 35 y 56,2 kg de N por hectárea para AP y BP respectivamente. Los rendimientos alcanzados con dichas dosis fueron de 10.876 kg ha⁻¹ para la zona de Alta Producción y de 9.658 kg ha⁻¹ para la zona caracterizada como baja producción. En tanto que la dosis modal de 43 kg de N ha⁻¹ alcanzó un rendimiento de 10.937 para la zona de alta producción y de 9.543 kg ha⁻¹ para la zona de baja producción.

Tabla 20. Coeficientes de parámetros para estimación de DOENZM y su significancia estadística, Las Vertientes, Córdoba.

Parámetro	Coefficiente	Valor p
CONSTANT	10595,95	<0,01
N	8,25	<0,01
N2	-0,01	0,04
Z2	-1534,16	0,03
Z2N	5,24	0.04
Z2N2	-0,04	0.01

3.2.6. SÍNTESIS DE LOS CINCO SITIOS EXPERIMENTALES

En el Piquete (Figura 20) y Las Vertientes (Figura 21) se encontró respuesta por agregado de N y la misma fue afectada por zona de manejo. Para el caso del sitio Don Nicolás II, la respuesta fue sólo al agregado de N (Figura 22) y no por zonas de manejo, es por ello que se observa una sola curva en la Figura.

Los sitios Santa Clara y Don Nicolás I no mostraron respuesta al agregado de N pero sí a las zonas de manejo. El bajo rendimiento de estos casos se explica por las escasas lluvias acontecidas durante el ciclo del cultivo en estos sitios.

Para las campañas secas no se evidenció respuesta a la fertilización nitrogenada. En estas campañas la recomendación del modelo MEME fue la no fertilización de más del 90% de la superficie de cada sitio.

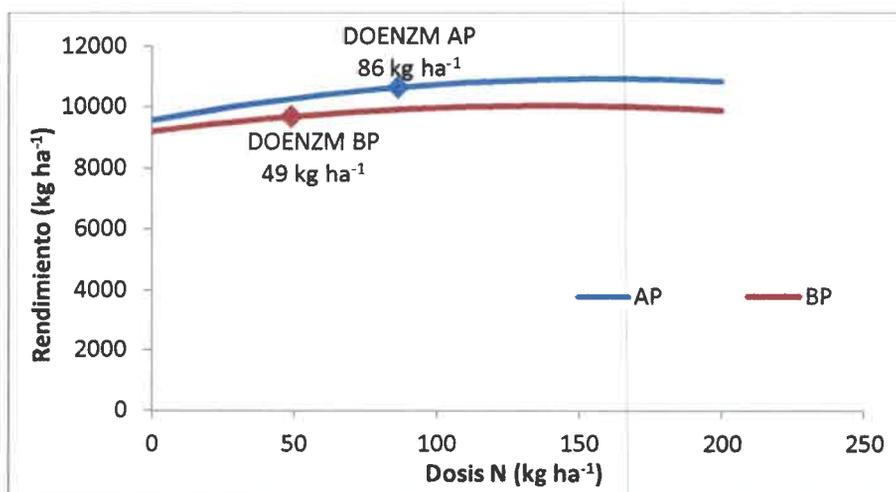


Figura 20. Rendimiento de maíz (kg ha⁻¹) en función de la dosis de N (kg ha⁻¹) sitio El Piquete, Campaña 2010-11. Línea azul AP (alta producción), línea roja BP (baja producción).

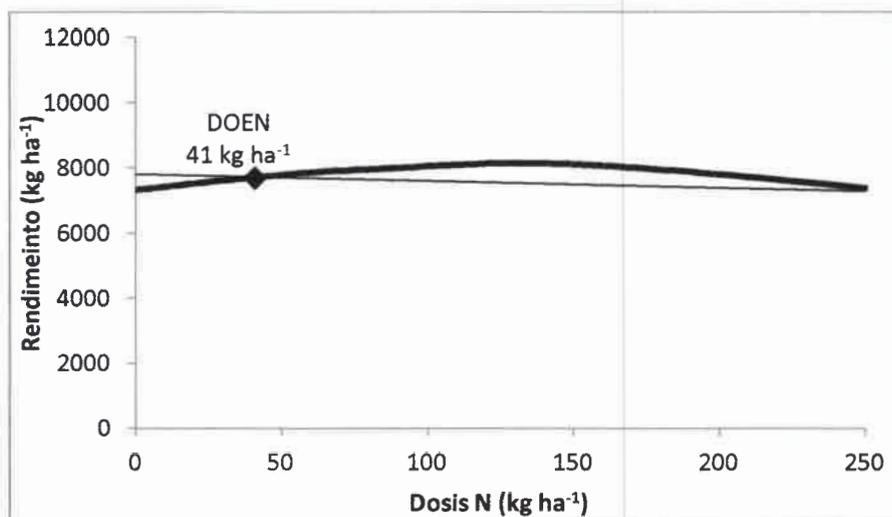


Figura 21. Rendimiento de maíz (kg ha^{-1}) en función de la dosis de N (kg ha^{-1}) sitio Don Nicolás II, Campaña 2010-11. Línea negra gruesa AP (alta producción), línea negra fina BP (baja producción).

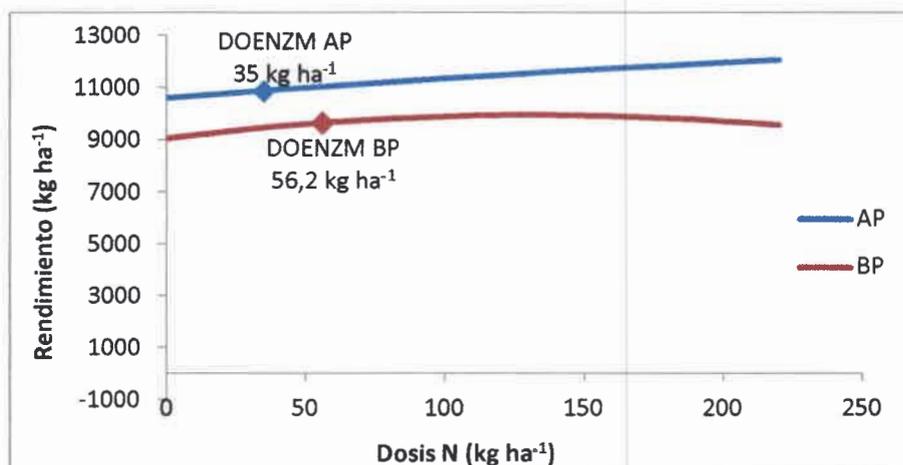


Figura 22. Rendimiento de maíz (kg ha^{-1}) en función de la dosis de N (kg ha^{-1}) sitio Las Vertientes, Campaña 2012-13. Línea azul AP (alta producción), línea roja BP (baja producción).

3.3. RESULTADOS PARA EL OBJETIVO III

El resumen de dosis y rendimiento para cada uno de los criterios evaluados en cada sitio se presenta en la Tabla 21. En las campañas donde se evidenció respuesta al agregado de N la producción de la dosis DOENMEME fue superior a la de los otros criterios evaluados. En los años pronosticados como seco el criterio II indicó que no había que aplicar N o las dosis eran cercanas a cero.

Tabla 21. Dosis de N (kg ha^{-1}) y rendimientos de maíz (kg ha^{-1}) para DOENZM, DOMEME y dosis modal para cada sitio y campaña.

<i>Ensayo</i>	<i>Campaña</i>	<i>Año</i>	<i>DOENZM</i>		<i>DOMEME</i>		<i>Dosis Modal</i>
			<i>(Criterio I)</i>		<i>(Criterio II)</i>		
			<i>Dosis</i>	<i>Rto.</i>	<i>Dosis</i>	<i>Rto.</i>	<i>Rto.</i>
			<i>kg N</i>	<i>kg ha⁻¹</i>	<i>kg N</i>	<i>kg ha⁻¹</i>	<i>kg ha⁻¹</i>
			<i>ha⁻¹</i>		<i>ha⁻¹</i>		
El Piquete	2010/11	Normal	66	10.130	57	10.206	9.904
Don Nicolás II	2010/11	Normal	41	7.702	45	8.090	7.719
Don Nicolás I	2011/12	Seco	0	1.588	0	1.367	1.588
Santa Clara	2011/12	Seco	0	3.448	4	3.904	4.109
Las Vertientes	2012/13	Húmedo	48	10.154	79	10.828	10.114

La Tabla 22 muestra el resultado del análisis de la varianza realizado para rendimiento, respuesta a la fertilización y EAN para los tres criterios evaluados, tomando al sitio como repetición. Para el análisis solo se emplearon aquellos ensayos donde se encontró respuesta estadísticamente significativa a la fertilización. Para las variables rendimiento, respuesta a la fertilización y EAN el criterio II DOMEME se diferenció estadísticamente del resto de los criterios de fertilización evaluados. El rendimiento obtenido mediante la aplicación de la DOMEME fue un 4% y un 5% superior que el alcanzado al emplear la DOENZM y la dosis modal respectivamente.

La dosis media de N no difirió estadísticamente entre los criterios evaluados. (Tabla 22). A pesar de que las dosis deben interpretarse entonces como iguales para los tres criterios, la eficiencia agronómica del N del criterio II (DOMEME) fue en promedio un 48,82% superior al promedio de eficiencia de los otros dos criterios evaluados. Por lo tanto cada kilogramo de nitrógeno aplicado en los ensayos en las franjas DOMEME produjo más kilos de maíz.

El porcentaje de aumento en la respuesta a la fertilización para DOMEME respecto de DOENZM y de la dosis modal fue de 71% y 103% respectivamente.

Tabla 22. Rendimiento de maíz (kg ha^{-1}), respuesta a la fertilización, EAN y dosis para los tres criterios evaluados

Criterio	Rendimiento (kg ha^{-1})	Respuesta (kg ha^{-1})	EAN (kg grano kg N ha^{-1})	Dosis (kg ha^{-1})
DOMEME	9708 a	916 a	15,37 a	60,28
DOENZM	9328 b	533 b	10,18 b	51,54
Moda	9245 b	450 b	10,48 b	43,00
CV (%)	1,7	25,25	12,59	23,46
Valor p	0,0481	0,0469	0,0232	0,3213

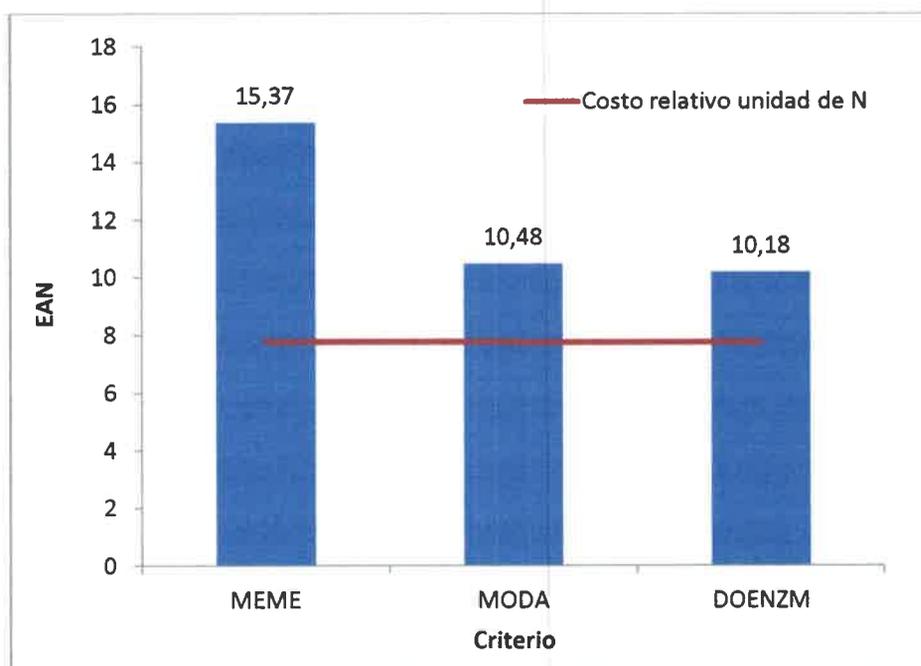


Figura 23. Eficiencia agronómica del nitrógeno aplicado y relación con margen bruto y costo relativo de la unidad de nitrógeno.

Al asumir una relación de precio establecida en 7,76 cada unidad de nitrógeno tiene un costo directo 7,76 veces el valor de un kg de maíz. Si la eficiencia agronómica del nitrógeno aplicado se define como la cantidad de kg de maíz que se producen con una unidad de N aplicado entonces todo valor de EAN por encima de

7,76 puede ser considerado como el ingreso extra por fertilizar descontado el costo del fertilizante (Figura 23).

Para la campaña 2012/13 la producción total de maíz de los Departamentos Juárez Celman y Río Cuarto fue de 2.828.150 toneladas producto de la cosecha de 435.100 ha. De Prada y Penna (2008) estiman en 85% la superficie fertilizada del cultivo de maíz en la región. Si se asume que la fertilización más frecuente es 43 kg N ha⁻¹ y en base a los resultados del presente trabajo, se podría aumentar la producción de la región en 111.875 toneladas. Este aumento en la producción implicaría un ingreso a la región de \$136,48 millones de pesos (precio maíz pizarra Rosario promedio mayo de 2014) además de una reducción del impacto ambiental negativo del N producto de un aumento en la eficiencia de uso del mismo.

CAPÍTULO 4

DISCUSIÓN

4.1. ZONIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LOS SITIOS

En los ambientes agrícolas, donde frecuentemente la disponibilidad de agua y de nutrientes son limitantes del cultivo, la producción de granos depende en gran medida del tipo de suelo y de su posición en relación con el paisaje. La capacidad de retención de agua para luego ponerla a disposición de los cultivos reviste singular importancia. Partiendo de la idea de la existencia de esa variabilidad, no sólo a nivel regional sino principalmente a escala de lote, es necesario cuantificarla territorialmente y describirla. El conocimiento de esa variabilidad y la interpretación agronómica de los factores que generan la misma es fundamental para poder realizar el manejo diferencial de insumos a los fines de optimizar la producción no sólo desde el punto de vista productivo sino también ambiental y social. Doerge (1999) define a las zonas de manejo como subregiones dentro de los lotes que expresan una combinación homogénea de factores determinantes del rendimiento, para los cuales resulta apropiada una proporción única de insumos. La definición de zonas de manejo, basadas en la capacidad del suelo, adquiere mayor importancia en sistemas productivos de secano (Taylor *et al.*, 2007).

Los sitios experimentales donde se realizaron los ensayos del presente trabajo fueron sometidos a un proceso de zonificación descrito en el capítulo 2. Para ello se emplearon mapas de rendimiento de campañas anteriores y se los sometió a análisis

de clúster. En cuatro de los cinco sitios la recomendación fue separar al lote en dos zonas de manejo. El promedio de diferencias de rendimientos ente AP y BP para los sitios evaluados fue del 24,65% (Tablas 3, 7, 10 y 15). La técnica empleada permitió separar zonas de manejo con importantes diferencias de rendimiento entre ellas empleando como dato insumo a los mapas de rendimiento. Estos resultados coinciden con los propuestos por Fraisse *et al.* (2001) y Plant *et al.* (2001), dado que los principales requerimientos que las ZM deben cumplir para ser consideradas como tales son: a) las diferencias de rendimientos entre ZM debe ser mayor que las diferencias dentro de las ZM; y b) los factores limitantes de rendimiento dentro de la ZM deben ser los mismos.

Además, debe considerarse que los mapas de rendimiento representan una síntesis de la interacción de procesos químicos, físicos y biológicos, que bajo ciertas condiciones climáticas permiten monitorear los patrones espaciales de la productividad de los cultivos indicando dónde es necesario variar los *inputs* del sistema para mejorar la productividad (Long, 1998; Hörbe *et al.*, 2013; Rodrigues *et al.*, 2013). Bongiovanni y Lowenberg-DeBoer (2006), concluyeron que pueden ser necesarios varios años de datos para entender mejor las interacciones entre la variabilidad espacial en las propiedades de los suelos y la productividad de los cultivos.

Por la disponibilidad generalizada en Argentina de los mapas de rendimiento se destaca la importancia que esta fuente de información adquiere al momento de zonificar lotes por productividad. Melchiori *et al.*, (2013) estimaron que existe en Argentina la capacidad operativa para monitorear el 60% de la superficie cultivada.

La zonificación realizada a través de mapas de rendimiento se caracterizó luego con puntos de observación del perfil por zona de manejo y por sitio. De esta forma se trataron de observar posibles características de esos perfiles que otorguen los diferenciales de productividad observados. Coincidiendo con esto, Justo *et al.* (2012) también delimitaron zonas de manejo mediante análisis clúster de tres mapas de rendimiento identificando diferentes zonas contrastantes; destacando además la potencialidad de su uso para el muestreo dirigido de ambientes.

Por otro lado, Córdoba *et al.* (2012) emplearon además de los mapas de rendimiento, mapas de conductividad eléctrica aparente (0-0,3 m), profundidad de tosca y de elevación sobre el terreno, para identificar las ZM. La incorporación al

análisis de otras capas de información les permitió explicar el origen de la variabilidad productiva de cada ZM mediante el análisis de componentes principales, empleados en la clasificación. Estos autores concluyeron además que la identificación de zonas de manejo debe ser complementada con restricciones logísticas y con muestreos de suelo dirigidos.

Otros autores también emplearon los mapas de rendimiento como principal insumo para la zonificación (Diker *et al.*, 2004; Flowers *et al.*, 2005; Hörbe *et al.*, 2013). Sin embargo, existen múltiples fuentes de datos para afrontar un proceso de zonificación desde los más simples como utilizar el conocimiento que tiene el productor de su lote (Fleming *et al.*, 2000; Hörbe *et al.*, 2013), otros más tradicionales como basarse en cartas de suelo (Franzen *et al.*, 2002; Dillon *et al.*, 2005), o métodos más modernos como el uso de imágenes satelitales (Zarco-Tejada *et al.*, 2005; Pedroso *et al.*, 2010), la implementación de sensores proximales de suelo (Halcro *et al.*, 2003; Corwin y Lesch 2005; Hemmat y Adamchuk, 2008; Bendor *et al.*, 2009; Piikki *et al.*, 2013) o combinación de todas estas fuentes (Fleming *et al.*, 2004; Koch *et al.*, 2004; Schepers *et al.*, 2004; Taylor *et al.*, 2007; Gregoret *et al.*, 2011; Espósito *et al.*, 2012, Albarenque *et al.* 2012). Si el objetivo es observar la evolución temporal del estado de un cultivo las imágenes satelitales son de gran importancia. La fuente de datos a emplear dependerá principalmente de la limitante existente para la elección del método más conveniente. La disponibilidad previa o el costo de acceso a los relevamientos necesarios también se constituye como un factor importante a la hora de seleccionar la o las variables síntesis a relevar.

Las fuentes de información pueden ser complementarias entre sí permitiendo, mediante el empleo de más de un método, caracterizar de una manera más adecuada la variabilidad presente. En este sentido, para el sudeste de la provincia de Buenos Aires, Paggi *et al.* (2013) establecieron que la conductividad eléctrica (0-0,3 m) puede emplearse como indicador de la serie de suelo en lotes que presenten variabilidad en su profundidad efectiva. Para ello realizaron relevamientos con dos sensores de conductividad y un calador hidráulico. Las mediciones de conductividad eléctrica (CE) se asocian fuertemente al contenido de arcilla y humedad del suelo en suelos no salinos (Taylor *et al.*, 2007). Por ello, el uso de la CE ha demostrado ser eficaz en la delimitación de zonas de manejo en diferentes países donde se desarrolla la agricultura extensiva de precisión (Li *et al.*, 2007; Taylor *et al.*, 2007; Arno *et al.*,

2011), incluyendo la región Pampeana Argentina (Peralta y Costa, 2013; Peralta *et al.*, 2013; Simón *et al.*, 2013).

4.2. RESULTADOS AGRONÓMICOS DE LOS DIFERENTES CRITERIOS EVALUADOS

Considerando que la producción de granos del cultivo de maíz está principalmente limitada por la disponibilidad de agua en el suelo y el uso de fertilizantes nitrogenados (Maddonni *et al.*, 2003) cabe destacar entonces que cobra importancia el flujo superficial del agua a la hora de comprender la respuesta al N en este cultivo. Por este motivo, la posición relativa en el paisaje de los perfiles de suelo característicos de las zonas de manejo identificadas en el presente trabajo seguramente determinó la variabilidad en sus características físicas y químicas (Tablas 1, 2, 4, 5, 6, 8, 9, 11 y 12). A su vez, esta variabilidad otorgó funcionamientos distintos que pueden sintetizarse en las diferencias de rendimiento identificadas. Coincidiendo con estos resultados, Gregoret *et al.* (2006), Siquiera *et al.*, (2006) y Vieira *et al.*, (2006), reportaron diferencias espaciales en el almacenamiento de agua de suelo, y conductividad hidráulica saturada, asociadas a la cota relativa del lote. Las texturas y profundidad del perfil de cada zona de manejo identificada y su posición en el paisaje, seguramente definió diferentes niveles de agua disponible para el cultivo a lo largo de su ciclo, explicándose así las diferencias productivas encontradas.

Como en otras regiones de Argentina, en ambientes ondulados, la variabilidad espacial del rendimiento de maíz se relaciona con la variabilidad de la capacidad de retención hídrica de los suelos. La misma se asocia con su posición relativa en el paisaje y con su textura. Resultados similares fueron encontrados por Urricariet *et al.* (2011) en el Oeste de Buenos Aires.

En el sitio Don Nicolás II la respuesta a la fertilización no fue afectada por zona de manejo. Similares resultados fueron reportados por Gregoret *et al.* (2008) quienes elaboraron un modelo de respuesta sitio específica del N, dependiente del contenido de agua y N disponible al momento de la siembra, en la región centro semiárida en la provincia de Córdoba. En este caso también, la variabilidad entre ZM no fue suficiente para detectar diferencias significativas entre aplicaciones de dosis de fertilización nitrogenadas uniformes o variables según ZM.

El flujo y acumulación del agua en diferentes posiciones del terreno, así como por la redistribución de partículas minerales del suelo y materia orgánica a través de la erosión y deposición del suelo, son factores a los que se atribuye parte de la variabilidad espacial en el rendimiento y esta variabilidad no siempre está debidamente contemplada en las ZM, dado que son patrones graduales de variación (Pachepsky *et al.*, 2001).

Por este motivo, es necesario utilizar información con una escala espacial continua a los efectos de incorporar un mayor detalle de esta variabilidad. En este sentido ha sido destacado por varios autores que el CTI es un atributo espacial del relieve muy conveniente. Originalmente desarrollado por Beven y Kirkby (1979), es un índice topográfico asociado al flujo superficial del agua ante eventos de precipitación y está altamente correlacionado con la humedad del suelo en paisajes ondulados (Schmidt y Persson, 2003) y por ende con el rendimiento de maíz y soja (Huang *et al.*, 2008). Al incorporar en el modelo DOMEME de recomendación un atributo espacial como el CTI, es de esperar que la eficiencia agronómica del fertilizante aplicado sea mayor, como ocurrió en los ensayos evaluados.

Kumhálová *et al.* (2011), encontraron una relación significativa entre el rendimiento y la concentración de nutrientes de los cultivos con la topografía, identificando además que la correlación entre el CTI y el rendimiento fue afectada por las características hídricas de cada campaña, donde en años húmedos esta correlación es débil, mientras que en años secos la misma es fuerte. Las funciones de producción estimadas por Espósito (2013), en su relación a la fertilización nitrogenada, han mejorado como consecuencia de la inclusión del CTI y de las características hídricas de cada campaña. De este modo, la misma puede utilizarse a nivel regional manteniendo la escala sitio específico para su uso en agricultura de precisión.

La EAN para el criterio DOMEME (Tabla 20) fue estadísticamente superior respecto de la DOENZM o de la eficiencia de la dosis modal. En promedio la EAN DOMEME fue un 48,82% mayor con un valor de 15,37 kg de grano por kg de N aplicado. Doberman (2005) cita valores comunes a nivel mundial de EAN en el rango de 10 – 30 kg grano kg N⁻¹.

En Argentina, se han citado diferentes valores de referencia de la EAN. García *et al.* (2013) recopilaron valores de esta eficiencia de 23,4 kg de grano por kg

N en Córdoba, 22,6 en Buenos Aires y de 21,5 en Santa Fe. Espósito *et al.* (2014) realizaron una revisión de estudios de fertilización de cereales en Argentina realizados desde 2006 y hasta 2013, reportando valores medios de EAN para más de 20 ensayos por región de 27,8 kg grano kg N⁻¹ para el sudeste de Buenos Aires, 25,2 para Entre Ríos, 25 para la Región Centro y de 20,8 para la provincia de Córdoba.

Melchiori (2011) en ensayos realizados en Entre Ríos con diversas fuentes de N, reportó valores de EAN de 37 y 29 kg grano kg N⁻¹ para franjas fertilizadas con 70 y 140 unidades de N respectivamente.

Por estos antecedentes, es necesario resaltar que existen grandes diferencias en la EAN entre regiones, destacándose que las regiones con bajas precipitaciones o climas más áridos, evidencian menores valores de EAN y por lo tanto es en éstas donde cobraría mayor impacto las mejoras en la eficiencia del uso del N.

Existen una extensa cantidad de trabajos publicados en referencia a diferentes técnicas para ajustar el manejo de nitrógeno en la producción de maíz en Argentina. Sin embargo una revisión bibliográfica exhaustiva a nivel nacional permitió encontrar pocas publicaciones cuyo objetivo sea optimizar la dosis de nitrógeno a escala de manejo sitio específico. La revisión bibliográfica sobre fertilización con nitrógeno en cereales realizada por Espósito *et al.* (2014) identificaron sólo 11 trabajos de un total de 92. Este es un indicador de que al momento hay pocas experiencias a nivel nacional sobre manejo de nitrógeno a escala de sitio específico.

En el plano internacional, numerosos estudios recientes han demostrado que el empleo de información más detallada a escala sitio específica obtenida con agricultura de precisión pueden mejorar las estrategias de manejo de dosis variable para nitrógeno en maíz; particularmente cuando se establecen funciones de producción sitio específicas empíricas que relacionan el rendimiento con el estado de humedad, atributos de terreno u otras características del suelo (Bullock *et al.*, 2009; Ruffo *et al.*, 2006). Raun *et al.* (2005) desarrollaron un algoritmo de fertilización nitrogenada para trigo y maíz basado en el empleo de un sensor óptico de índice verde. Mediante el empleo de franjas de suficiencia de N a la siembra el sensor asociado al algoritmo prescribe la dosis de N en el momento de refertilización.

Para los sitios y campañas evaluadas el criterio de fertilización a través del empleo del modelo econométrico mixto espacial permitió aumentar el rendimiento y hacer más eficiente el uso del nitrógeno aplicado como fertilizante. La aplicación de

este modelo a escala regional permitiría no sólo aumentar los ingresos económicos, sino también reducir el impacto negativo del nitrógeno que no es aprovechado por los cultivos.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES

El empleo de mapas de rendimiento de años anteriores permitió delimitar zonas de manejo con diferencias de productividad para los sitios evaluados. La descripción de los perfiles típicos por zona de manejo aportó características importantes para comprender el funcionamiento de cada zona de manejo.

El empleo del modelo de econométrico mixto espacial para la prescripción de dosis variable (DOENMEME) permitió aumentar un 4 y 5% el rendimiento respecto del empleo de optimizaciones por zona de manejo o la aplicación de la dosis modal zonal respectivamente.

Se registró un aumento promedio de la EAN del 48,86% para DOENMEME respecto de los otros dos criterios evaluados. La dosis no fue estadísticamente distinta para los tres criterios evaluados, pero la redistribución de la misma en el terreno permitió aumentar los rendimientos.

En campañas agrícolas con importantes déficit hídrico respecto de la lluvia normal no se observó respuesta al agregado de nitrógeno. El criterio DOENMEME diagnosticó en estos casos realizar aplicaciones en menos del 10% de la superficie.

El modelo de diagnóstico de fertilización nitrogenada en base a atributos espaciales del terreno se perfila como una potente herramienta para ser aplicada en la región de la llanura bien drenada del Sur de Córdoba. No sólo desde el punto de vista productivo y económico sino también por su potencial método para reducir el impacto ambiental del nitrógeno aplicado.



CAPÍTULO 6

BIBLIOGRAFÍA

- ALBARENQUE S.M.; CAVIGLIA O.P.; MELCHIORI R.J.M. 2012. Evaluación de la eficiencia en el uso de nitrógeno y respuesta a la fertilización nitrogenada por ambiente en el cultivo de maíz. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. [http://www.inta.gov.ar/documentos/evaluacion-de-la-eficiencia-en-el-uso-de-nitrogeno-y-respuesta-a-la-fertilizacion-nitrogenada -por-ambiente-en-el-cultivo-de-maiz/at_multi_download /file /INTA-%20Evaluación%20en%20 el%20uso%20de%20nitrógeno%20en %20maíz.pdf](http://www.inta.gov.ar/documentos/evaluacion-de-la-eficiencia-en-el-uso-de-nitrogeno-y-respuesta-a-la-fertilizacion-nitrogenada-por-ambiente-en-el-cultivo-de-maiz/at_multi_download/file/INTA-%20Evaluación%20en%20el%20uso%20de%20nitrógeno%20en%20maíz.pdf) Accedido 3/6/2014
- AMBROGIO, M., H. BIZET y F. GARCIA. 2001. Explorando deficiencias nutricionales en la región pampeana. Resultados de los ensayos de fertilización AAPRESID-INPOFOS. En: Maíz en siembra directa. Publicación técnica de AAPRESID. pp 39-49.
- ANDRADE, F. 2011. La tecnología y la producción agrícola. El pasado y los actuales desafíos. EEA Balcarce, Centro Regional Buenos Aires Sur. Ediciones INTA, 42 pp.
- ANDRADE, F.; CIRILO, A.; 1996 Maíz en alta producción CAPÍTULO 9.: en Ecofisiología del cultivo de maíz. Ed. La Barrosa. Pág. 255 – 267.
- ANSELIN, L. 1999. Spatial Econometrics. Staff paper. Bruton Center, School of SocialSciences, University of Texas at Dallas, Richardson. 31 pp.
- ANSELIN, L; R BONGIOVANNI & J LOWENBERG-DEBOER. 2004. A spatial econometric approach to the economics of site-specific nitrogen management in corn production. American Journal of Agricultural Economics 86(3): 675-687.
- ARNO J., MARTINEZ-CASASNOVAS J.A., RIBES-DASI M. AND ROSELL J.R. 2011. Clustering of grape yield maps to delineate site-specific management zones. Span. J. Agric. Res. 9: 721–729.
- BARBERIS L., E. CHAMORRO, C. BAUMMAN PONAY, D. ZOURAKIS, D. CANOVA y S URRICARIET. 1985. Respuesta del cultivo de maíz a la fertilización nitrogenada en la Pampa Ondulada. Campaña 1980/81 – 1983/84. II. Modelos Predictivos y Explicativos. Rev. Fac. Agronomía 6:65-84.

- BEN-DOR E., CHABRILLAT S., DEMATTE J.A.M., TAYLOR G.R., HILL J., WHITING M.L. AND SOMMER S. 2009. Using imaging spectroscopy to study soil properties. *Remote Sens. Environ.* 113: 38–55.
- BEVEN K. AND KIRKBY M. 1979. A physically-based variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrol. Sci. Bull.* 24:43-69.
- BIANCHINI A. 2004. Nutrición en la rotación: Cinco años de la red de ensayos de ensayos de AAPRESID-INPOFOS. Resultados de maíz de la campaña 2003/04. Maíz en siembra directa. AAPRESID. Rosario. Santa Fe. Pp. 71-75.
- BOCCO, F. A. 2006. Validación del Modelo NP-Zea, en la fertilización nitrogenada del Cultivo de Maíz, en dos Suelos de la Zona de Coronel Moldes (Cba.). Trabajo Final. Facultad de Agronomía y Veterinaria, Universidad Nacional de Río Cuarto.
- BONGIOVANNI, R. 2002. A spatial econometrics approach to the economics of site-specific nitrogen management in corn production. Ph.D. Thesis, Department of Agricultural Economics, Purdue University, West Lafayette, IN (EUA), 280 p.
- 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.; MELCHIORI, R.; MENDEZ, A. 2013. Agricultura de precisión y máquinas precisas. Actualización Técnica N°79. 2013. Proyecto Agricultura de Precisión INTA, Ministerio de Agricultura Ganadería y Pesca de Argentina. Consultado mayo de 2014.
- BRAGACHINI, M; A. MENDEZ & F SCARAMUZZA. 2004. Siembra de ensayos de maíz, año 2003/2004. Establecimiento "El Paraíso", Pilar Córdoba. Informe Técnico de divulgación. Disponible en <http://www.agriculturadeprecision.org/articulos/articulos.htm> Accedido el 20/06/14
- BRAVO, O; N AMIOTTI; JP RHOLLAUSER y P ZALVA. 2004. Variabilidad de suelos y su incidencia en el rendimiento de trigo a nivel de predio. *Actas*

del XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo Paraná Argentina (Actas CD).

- BULLOCK D. S., M. RUFFO, BULLOCK D. G. and BOLLERO G. 2009. The value of variable rate technology: An information. Theoretic approach. *Amer. J. Agr. Econ.* 91: 209–223.
- BULLOCK, D. S. and LOWENBERG-DEBOER J. 2007. Using Spatial Analysis to Study the Values of Variable Rate Technology and Information. *J. Agr. Econ.* 58(3):517-535, 09.
- 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.
- Cámara de la Industria Argentina de Fertilizantes y Agroquímicos (CIAFA). Informe Evolución de la Agricultura y uso de fertilizantes. <http://www.ciafa.org.ar/ferti.html> Accedido Febrero de 2014.
- CISNEROS J. M., CANTERO A., DEGIOANNI A., BECERRA V. H. Y ZUBRZYCKI M. A. 2008. Producción, uso y manejo de las tierras. En: *Percepción económica y visión de los productores agropecuarios de los problemas ambientales en el Sur de Córdoba, Argentina.* De Prada J. D., Penna J. P. (ed.), INTA, pp. 31-46.
- CÓRDOBA, M.; BALZARINI, M.; BRUNO, C.; COSTA, L.L. Identificación de zonas de manejo sitio-específico a partir de la combinación de variables de suelo. 2012. *Revista Corpoica - Ciencia y Tecnología Agropecuaria* 13(1), 47-54.
- CORWIN D.L. AND LESCH S.M. 2005. Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture, *Comp. Electron. Agric.* 46: 11–43.
- DALE, N. 1997. Ingredient analysis table. 1997 ed. *Feedstuffs.* 69(30): 24–31.
- DE PRADA, J.; & J PENNA, 2008. *Percepción económica y visión de los productores agropecuarios de los problemas ambientales en el Sur de Córdoba, Argentina.* Ediciones INTA. Buenos Aires, Argentina.
- Di RIENZO J.A., CASANOVES F., BALZARINI M.G., GONZALEZ L., TABLADA M., ROBLEDO C.W. *INFOSTAT versión 2013.* Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>

- DÍAZ-ZORITA M. Y BUSCHIAZZO D. E. 2006. The potential for soil carbon sequestration in the Pampas. En: Carbon Sequestration in Soils of Latin America. Lal, R., Cerri C. C., Bernoux M., Etchevers J., Cerri E. (ed.), The Haworth Press. Inc., New York, USA, pp. 369-382.
- DIKER K., HEERMANN D.F. AND BRODAHL M.K. 2004. Frequency analysis of yield for delineating yield response zones. *Precis. Agric.* 5: 435-444.
- DILLON C.R., SAGHAIAN S., SALIM J. and KANAKASABAI M. 2005. Optimal water storage location and management zone delineation under variable subsurface drip irrigation. p. 959-965. In J.V. Stafford (ed.) Precision agriculture '05: Proc. 5th Conf. on Precision Agriculture, Uppsala, Sweden, 8-11 June 2005. Wageningen Academic Publishers, Wageningen, The Netherlands.
- DILLON, J. y J. ANDERSON. 1990. The Analysis of Response in Crop and Livestock Production. Pergamon Press, New York. 251 pp
- DOBERMAN, A.R. (2005). Nitrogen use efficiency – state of the art. IFA International Workshop on Enhanced-Efficiency Fertilizers, Frankfurt, Germany.
- DOERGE T. 1999. Defining management zones for precision farming. *Crop Insight*. Pioneer Hi-Bred International Inc. (8):21.
- DORATTO A. K. 1986. Estudios edafogénicos y mineralógicos comparados de suelos desarrollados sobre diferentes rocas madres. Tesis Doctoral, Fac. Cs. Exactas Fís. y Nat. Universidad Nacional de Córdoba, Argentina, 360 pp.
- ECHEVERRÍA H. y F. GARCÍA. 1998. Guía para la fertilización fosfatada de trigo, maíz, girasol y soja. Boletín Técnico No. 149. EEA INTA Balcarce.
- ESPÓSITO, G., GESUMARÍA, JJ, CASTILLO, CA., ZORZA EJ., SAYAGO, F. y F. DAITA. 1997. Estudio de situación del sistema de siembra directa, en diferentes cultivos en el área de influencia de la UNRC. Actas Resúmenes IV Jornadas Científico Técnicas de la Facultad de Agronomía y Veterinaria. UNRC. Río Cuarto. Pág. 204-206.
- ESPÓSITO, G.; C. CASTILLO; R. BALBOA. 2006. Calibración y validación de un método de diagnóstico de fertilización nitrogenada en maíz para el sur de Córdoba (Argentina). Departamento de Producción Vegetal. Facultad de

- Agronomía y Veterinaria. Universidad Nacional de Río Cuarto. Córdoba. Argentina. RIA 35 (3):45-63. Diciembre 2006. INTA, Argentina.
- ESPOSITO, G.; DÍAZ-ZORITA, M.; BALBOA, G.; CERLIANI, C. ; MARTÍNEZ BOLOGNA G. 2014. Revisión de estudios de fertilización de cereales en Argentina. XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Bahía Blanca. Argentina.
- ESPÓSITO, GP. 2013. Análisis de la variabilidad espacio-temporal de la respuesta al nitrógeno en maíz mediante un modelo econométrico mixto espacial (MEME). Tesis Doctoral. Universidad Nacional de Córdoba. 88pp
- ESPÓSITO, GP; W ROBLEDO; R BONGIOVANNI; M RUFFO y G BALBOA. 2010. Manejo sitio específico del nitrógeno ajustado por atributos espaciales del terreno. XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Rosario. Santa Fe. Argentina.:140.
- ESPÓSITO. G.; W. ROBLEDO; R. BONGIOVANNI; M. RUFFO y G. BALBOA 2012. DOSIFICACIÓN VARIABLE DE NITRÓGENO EN MAÍZ SEGÚN EL ÍNDICE TOPOGRÁFICO COMPUESTO. XIX Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo y XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Mar del Plata, Argentina.
- ESRI, 2007. ArcMap ver. 9.2. ESRI, Redlands, CA, USA
- FERRARI M., F. RIMATORI, G. FERRARIS, J. OSTOJIC, M. GALETTO y R. GÓMEZ. 2001a. Diagnóstico de deficiencias de N en maíz basado en la concentración de nitratos en savia. VII Congreso Nacional de Maíz. AIANBA. Pergamino, Buenos Aires, Argentina
- FERRARI M., J. OSTOJIC, G. FERRARIS, L VENTIMIGLIA, H. CARTA y S. RILLO 2001b. Momento de aplicación del fertilizante nitrogenado en maíz de siembra directa. VII Congreso Nacional de Maíz. AIANBA. Pergamino, Buenos Aires, Argentina.
- FERTILIZAR, Asociación Civil. Detalle de consumo de fertilizantes extensivos. [http:// www.fertilizar.org](http://www.fertilizar.org) . Accedido Febrero de 2014.
- FLEMING K.L., HEERMANN D.F., WESTFALL D.G. 2004. Evaluating Soil Color with Farmer Input and Apparent Soil Electrical Conductivity for Management Zone Delineation. Agron. J. 96: 1581–1587

- FLEMING K.L., WESTFALL D.G., WIENS D.W. AND BRODAHL M.C. 2000. Evaluating farmer defined management zones for variable rate fertilizer application. *Precis. Agric.* 2:201–215.
- FLOWERS M., WEISZ R. AND WHITE J.G. 2005. Yield-Based Management Zones and Grid Sampling Strategies. *Agron. J.* 97:968–982.
- FRAISSE C., SUDDUTH K. Y KITCHEN N. 2001. Delineation of site-specific management zones by unsupervised classification of topographic attributes and soil electrical conductivity. *Transactions of the ASAE.* 44: 155–166.
- FRANZEN D.W., HOPKINS D.H., SWEENEY M.D., ULMER M.K. AND HALVORSON A.D. 2002. Evaluation of soil survey scale for zone development of site-specific nitrogen management. *Agron. J.* 94: 381–389.
- 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.
- GAMBAUDO, S. y H. FONTANETTO. 1996. Fertilización. En Maíz. Información para Extensión. EEA INTA Rafaela, Santa Fe.
- GARCÍA F., K. FABRIZZI, M. RUFFO y P. SCARABICCHI. 1997. Fertilización nitrogenada y fosfatada de maíz en el sudeste de Buenos Aires. Actas VI Congreso Nacional de Maíz. AIANBA. Pergamino, Buenos Aires, Argentina.
- GARCÍA, F.; TABOADA, M.; GONZÁLEZ SAN JUÁN, M.F.; PICONE, L. 2013. El nitrógeno en la agricultura argentina. Alternativas para incrementar la eficiencia de uso en los cultivos de grano y mitigar las emisiones de óxido nítrico. <http://lacs.ipni.net/article/LACS-1210>. Consultado Mayo de 2014.
- GESUMARIA. J; C. CASTILLO; G. ESPOSITO y R. BALBOA. 2000. “NP-ZEA Programa para el cálculo de dosis de Nitrógeno y Fósforo”. Registro del derecho de autor DNDA Exp. 97476 13/11/2000.
- GONZÁLEZ MONTANER J., y M. DI NAPOLI. 1997. Respuestas a nitrógeno del cultivo de maíz en el sur de la provincia de Santa Fe. Actas VI Congreso Nacional de Maíz. AIANBA. Pergamino, Buenos Aires, Argentina
- GREGORET M. C., DÍAZ ZORITA M., DARDANELLI J. and BONGIOVANNI R. G. 2011. Regional model for nitrogen fertilization of site-specific rainfed

- corn in haplustolls of the central Pampas, Argentina. *Precis. Agric.* 12(6):831-849.
- GREGORET M. C., DÍAZ ZORITA M., DARDANELLI J. and BONGIOVANNI R. G. 2008. Modelo regional de respuesta de maíz al nitrógeno con variables sitio-específicas en ambientes semiáridos. XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Potrero de los Funes, San Luis. Argentina.
- GREGORET M.C.; DARDANELLI J.; BONGIOVANNI R. y M. DÍAZ-ZORITA. 2006. Modelo de respuesta sitio-específica del maíz al nitrógeno y agua edáfica en un haplustol. *Cienc. Suelo* 24 (2) 147-159.
- GRIFFIN, TW; J BROWN & J LOWENBERG-DEBOER. 2005. Yield monitor data analysis: data acquisition, management, and Analysis protocol. Department of Agricultural Economics Purdue University, West Lafayette, IN (EUA).
- HALCRO G., CORSTANJE R. AND MOUAZEN A.M. 2013. Site-specific land management of cereal crops based on management zone delineation by proximal soil sensing. In *Precision agriculture'13* (pp. 475-482). Wageningen Academic Publishers.
- HEMMAT R. AND ADAMCHUK V.I. 2008. Sensor systems for measuring soil compaction: Review and analysis. *Comp. Electron. Agric.* 63: 89–103.
- HÖRBE T.A.N., AMADO T.J.C., FERREIRA A.O. AND ALBA P.J. 2013. Optimization of corn plant population according to management zones in Southern Brazil. *Precis. Agric.* 14: 450–465.
- HUANG X., WANG L., YANG L. & A. N. KRAVCHENKO. 2008. Management Effects on Relationships of Crop Yields with Topography Represented by Wetness Index and Precipitation. *Agronomy Journal*, 100(5):1463–1471.
- HURLEY T. M., MALZER G. L. AND KILIAN B. 2004. Estimating site-specific nitrogen crop response functions: A conceptual framework and geostatistical model. *Agron. J.* 96:1331–1343.
- JUSTO, C.; LARDONE, A.; BARRACO, M.; SCIANCIA, C.; MIRANDA, W.; NOELLEMEYER, E. ABADIE, G. 2012. Delimitación de zonas de manejo a partir de monitores de rendimiento. Memoria Técnica INTA General VILLEGAS 2011-2012.

- KEENEY, D.R. 1982. Nitrogen management for maximum efficiency and minimum pollution. In F.J. Stevenson (ed.) Nitrogen in agricultural soils. Agron. Monogr. 22. ASA, CSSA, and SSSA, Madison, WI. p. 605–649.
- KOCH B., KHOSLA R., FRASIER W.M., WESTFALL D.G. AND INMAN D. 2004. Economic feasibility of variable-rate nitrogen application utilizing site-specific management zones. *Agron. J.* 96:1572–1580.
- KRAVCHENKO A. N. AND BULLOCK D. G. 2000. Correlation of corn and soybean grain yield with topography and soil properties. *Agron. J.* 92:75–83.
- KUMHÁLOVÁ J., KUMHALA F., KROULIK M. & S. MATEJCOVA. 2011. The impact of topography on soil properties and yield and the effects of weather conditions. *Precision Agriculture*, 12(6):813–830.
- KYVERYGA P. M., BLACKMER T. M. AND CARAGEA P. C. 2011. Categorical Analysis of Spatial Variability in Economic Yield Response of Corn to Nitrogen Fertilization. *Agron. J.* 103(3):796–804.
- LI Y., SHI Z., LI F. AND LI H.Y. 2007. Delineation of site-specific management zones using fuzzy clustering analysis in a coastal saline land. *Comp. Electron. Agric.* 56: 174–186.
- LONG D.S. 1998. Spatial autoregression modeling of site-specific wheat yield. *Geoderma*, 85: 181–197.
- MADDONNI, G., RUÍZ, R., VILARIÑO, P.; GARCIA DE SALAMONE, I. e I. 2003. Fertilización en los cultivos de grano. En: *Producción de granos. Bases funcionales para su manejo.* Ed. Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires. Cap. 19. 783 pp
- MEISINGER, J.J. 1984. Evaluating plant-available nitrogen in soil crops system. In R. D. Hauck (ed) *Nitrogen in Crop Production.* ASA-CSSA-SSSA. Madison, Wisconsin USA
- MELCHIORI, R.J.M.; ALBARENQUE, S. M.; KEMERER A.C. 2013. Uso, adopción y limitaciones de la agricultura de precisión en Argentina.

Presentado en: 12 Curso Internacional de Agricultura de Precisión, INTA Manfredi.

- MELCHIORI R.J.M. 2011. Avances en el manejo de nutrientes: Tecnologías de fertilización. Actas Simposio Fertilidad 2011. F. García y A. Correndo (ed.). Pp. 111-115. IPNI Cono Sur-Fertilizar AC.
- MELCHIORI R.J.M., CAVIGLIA O.P., BIANCHINI A, FACCENDINI N. y W. RAUN 2005. Evaluación de la refertilización nitrogenada basada en la utilización de un sensor óptico. VII Congreso Nacional de Maíz. 16-1.
- MELCHIORI, R., O, PAPAROTTI y W. PAUL. 1996. Diagnóstico de la fertilización nitrogenada de maíz: nitratos en preescardilla. Serie de Extensión N°11. EEA INTA Paraná. Entre Ríos.
- MERCAU J., E. SATORRE, M. OTEGUI, G. MADDONI, J. CARCOVA, R. RUIZ, M. URIBELARREA y F. MENENDEZ. 2001. Evaluación a campo del comportamiento del modelo CERES en cultivos de maíz del norte de la provincia de Buenos Aires. VII Congreso Nacional de Maíz. AIANBA. Pergamino, Buenos Aires, Argentina.
- MINAGRI. 2011. Red Agricultura de precisión. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca. Actualización técnica N° 9. 15 pp.
- MIZZOU-ARS. 2000. Management Zone Analyst Version 1.0.1. University of Missouri-Columbia & Agricultural Research Service of the United States Department of Agriculture.
- OECD-FAO. 2012. Agricultural Outlook 2012, OECD Publishing. doi: 10.1787/agr_outlook-2012-en.
- ORTEGA, R.; L. FLORES. 1999. Agricultura de precisión, p13-46. En R. ORTEGA y L. FLORES (ed.) Agricultura de Precisión: Introducción al manejo sitio - específico. Ministerio de Agricultura, Instituto de Investigaciones Agropecuarias, CRI Quilamapu-Chile.
- PACHEPSKY Y.A., TIMLIN D.J. AND RAWLS W.J. 2001. Soil Water Retention as Related to Topographic Variables. Soil Sci. Soc. Am. J. 65: 1787.
- PAGGI, M.; PERALTA, N.; CALANDRONI, M.; CABRIA, F.; COSTA, J. L. y V. APARICIO. Identificación de series de suelos mediante el uso de sensores de conductividad eléctrica aparente en el sudeste bonaerense. 2013. Cienc. suelo vol.31 N°2. Ciudad Autónoma de Buenos Aires

- PEDROSO M., TAYLOR JAMES, TISSEYRE B., CHARNOMORDIC B. AND GUILLAUME S. 2010. A segmentation algorithm for the delineation of agricultural management zones. *Comp. Electron. Agric.* 70: 199–208.
- PERALTA N.R. AND COSTA J.L. 2013. Delineation of management zones with soil apparent electrical conductivity to improve nutrient management. *Comp. Electron. Agric.* 99: 218–226.
- PERALTA N.R., COSTA J.L., BALZARINI M. AND ANGELINI H. 2013. Delineation of management zones with measurements of soil apparent electrical conductivity in the southeastern pampas. *Can. J. Soil Sci.* 93: 205–218.
- PIERCE, J.S.; P. NOWAK. 1999. Aspects of precision agriculture. D Spark (ed) *Advanced in Agronomy* 67:1-85
- PIIKKI, K., SÖDERSTRÖM, M., & STENBERG, B. 2013. Sensor data fusion for topsoil clay mapping. *Geoderma* 199: 106–116.
- PLANT R.E. 2001. Site Specific Management: the application of information technology to crop production. *Comp. Electron. Agric.* 30: 9–29.
- QUANTUM GIS DEVELOPMENT TEAM. 2011. Quantum GIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. <http://qgis.osgeo.org>.
- RAUN W.R., J. B. SOLIE, M. L. STONE, K. L. MARTIN, K. W. FREEMAN, R. W. MULLEN, H. ZHANJ., J. S. SCHEPERS, and G. V. JHONSON. 2005. Optical Sensor-Based Algorithm for Crop Nitrogen Fertilization. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 36: 2759–2781.
- RAUN, W.R. y V. JOHNSON. 1999. Improving Nitrogen Use Efficiency for Cereal Production. *Agronomy Journal* 91:357-363
- ROBERTS D. F., FERGUSON R. B., KITCHEN N. R., ADAMCHUK, V. I. AND SHANAHAN J. F. 2012. Relationships between Soil-Based Management Zones and Canopy Sensing for Corn Nitrogen Management. *Agron. J.* 104(1):119-129.
- RODRIGUES M.S., CORÁ J.E., CASTRIGNANO A., MUELLER T.G. and RIENZI E. 2013. A Spatial and Temporal Prediction Model of Corn Grain Yield as a Function of Soil Attributes. *Agron. J.* 105(6): 1878–1887

- RUFFO M; G BOLLERO, DS BULLOCK & DG BULLOCK. 2006. Site-specific production functions for variable rate corn nitrogen fertilization. *Precision Agric.* 7:327-342.
- RUIZ, R.A, SATORRE, E.H. MADDONNI, G.A., CARCOVA, J. y OTEGUI, M.E. 2001. Umbrales de decisión para la fertilización nitrogenada en maíz. En *Actas VII Congreso Nacional de Maíz Pergamino*, Buenos Aires, Argentina.
- SAINZ ROZAS H., H. ECHEVERÍA, E. HERFURT y G. STUDDERT. 2001. Nitrato en la base del tallo de maíz. II. Diagnóstico de la nutrición nitrogenada. *Ciencia del Suelo* 19(2):125-135.
- SAINZ ROZAS H., H. ECHEVERRÍA, G STUDDERT y G. DOMINGUEZ. 2000. Evaluation of the presidedress soil nitrogen test por no-tillage maize fertilized at planting. *Agron. J.* 92:1176-1183.
- SALVAGIOTTI, F.; CASTELLARIN, J.M.; FERRAGUTI, F. J. y PEDROL, H. M. 2011. Dosis óptima económica de nitrógeno en maíz según potencial de producción y disponibilidad de nitrógeno en la región pampeana norte. *Cienc. suelo [online]*. vol.29, n.2, pp. 199-212.
- SCHARF, P.C.; N. KITCHEN; K. SUDDUTH; J. DAVIS; V. HUBBARD y J. LORY. 2005. Field Scale Variability in optimal Nitrogen Fertilizer Rate for Corn. *Agron. J.* 97:452-461.
- SCHARF, P.C.; W.J. WIEBOLD; J.A. LORY. 2002. Corn Yield Response to Nitrogen Fertilizer Timing and Deficiency Level. *Agronomy Journal*. 94:435-441.
- SCHEPERS A.R., SHANAHAN J.F., LIEBIG M.A., SCHEPERS J.S., JOHNSON S.H. AND LUCHIARI JR A. 2004. Appropriateness of management zones for characterizing spatial variability of soil properties and irrigated corn yields across years. *Agron. J.* 96:195-203.
- SCHMIDT F. and PERSSON A. 2003. Comparison of DEM Data Capture and Topographic Wetness Indices. *Precis. Agric.* (4):179-192.
- SCHMIDT J. P., HONG N., DELLINGER A., BEEGLE D.B, and LIN H. 2007. Hill slope variability in corn response to nitrogen linked to in-season soil moisture redistribution. *Agron. J.* 99:229-237.

- SCHMIDT, J.P.; DEJOIA, A.J.; FERGUSON, R.B.; TAYLOR, R.K.; YOUNG, R.K.; HAVLIN, J.L. 2002. Corn Yield Response to Nitrogen at Multiple In-Field Locations. *Agron. J.* 94:798–806.
- SENIGAGLIESI C., R. GARCÍA y M.L de GALETTO. 1984. Evaluación de la respuesta del maíz a la fertilización nitrogenada y fosfatada en el área centro-norte de Buenos Aires y Sur de Santa Fe. III Congreso Nacional de Maíz. AIANBA. Pergamino
- SIERRA, E. 2010. Perspectiva agroclimática Campaña 2010/11. Informe. Facultad de Agronomía. Universidad Nacional de Buenos Aires.
- SIERRA, E. 2011. Perspectiva agroclimática Campaña 2011/12. Informe. Facultad de de Agronomía. Universidad Nacional de Buenos Aires.
- SIERRA, E. 2012. Perspectiva agroclimática Campaña 2012/13. Informe. Facultad DE Agronomía. Universidad Nacional de Buenos Aires.
- SIIA. 2014. Sistema Integrado de Informaciones Agropecuarias. Ministerios de Agricultura, Ganadería y Pesca de la república Argentina. Series Agrícolas. www.siiia.gob.ar Consultado Febrero de 2014.
- SIMÓN M., PERALTA N. Y COSTA J.L. 2013. Relación entre la conductividad eléctrica aparente con propiedades del suelo y nutrientes. *Ciencia del suelo*, 31(1): 45–55.
- SIQUEIRA, G; RG GREGO; S VIEIRA; & M CEDDIA. 2006. Variabilidad espacial y temporal de la permeabilidad del suelo en el cultivo de Triticale en sistemas de siembra directa. *Actas del XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Salta (Argentina).* p.179.
- TARBOTON DG. 1997. A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. *Water Resources Research.* 33(2):. 309–319.
- TAWAINGA; KATSVAIRO, W.; COX, W.J.; VAN ES, H.M. 2003. Spatial Growth and Nitrogen Uptake Variability of Corn at Two Nitrogen Levels. *Agron. J.* 95:1000–1011.
- TAYLOR J.A., MCBRATNEY A.B. AND WHELAN B.M. 2007. Establishing Management Classes for Broadacre Agricultural Production. *Agron. J.* 99: 1366–1376.

- TKACHUK, R. 1977. Calculation of the nitrogen-to-protein conversion factor. In J.H. Hulse et al. (ed.) Nutritional standards and methods of evaluation for food legume breeders. Int. Dev. Res. Ctr., Ottawa, ON. p. 78–82.
- TUKEY, J.W. 1977. Exploratory data analysis. Addison-Wesley Reading, MA. 688pp.
- URRICARIET S., NIBORSKI M. Y KVOLEK, C. M. (2011). Atributos del suelo y paisaje asociados a la variabilidad de rendimientos de maíz en la pampa arenosa. *Ci. Suelo (Argentina)*, 29(1):49–59.
- VIEIRA, SR; CR GREGO; GM SIQUEIRA; FM MIGUEL & FA PAVLU. 2006. Variabilidad espacial del almacenamiento de agua del suelo bajo siembra directa. *Actas del XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Salta (Argentina)*. p. 178.
- VOSS R. 1993. Corn. In *Nutrient Deficiencies and Toxicities in Crop Plants*. W. Bennet (ed.). APS Press. St. Paul, Minnesota, EE.UU.
- WILLMOTT, C.J AND WICKS, D.E (1980) An empirical method for the spatial interpolation of monthly precipitation within California. *Phys. Geogr., Vol. 1*, 59-73.
- WILLMOTT, C.J., 1982. Some comments on the evaluation of model performance. *Bulletin of the American Meteorological Society* 63:1309-1313
- ZARCO-TEJADA P.J., USTIN S. L. AND WHITING M.L. 2005. Temporal and spatial relationships between within-field yield variability in cotton and high-spatial hyperspectral remote sensing imagery. *Agron. J.* 97(3): 641–653.

PROTOCOLO I. LIMPIEZA DE MAPAS DE RENDIMIENTO MEDIANTE QUANTUM GIS.

Introducción

Un mapa de rendimiento es una fuente de datos georreferenciados generados en el momento de la cosecha de un cultivo a partir de un sensor de rendimiento conectado a un grabador de datos que a su vez es asistido por un posicionado geográfico. También incluye el dato de humedad adquirido mediante un sensor en la misma cosechadora.

Además de los campos de rendimiento la base de datos del mapa contiene información adicional como el cultivo, la variedad, el lote, el nombre del establecimiento y del operario que realiza la cosecha, el ancho del implemento empleado, la fecha y hora, la velocidad de avance y la distancia recorrida. Si la maquina posee estación meteorológica abordo también indicará la temperatura ambiente y velocidad del viento, entre otros datos.

Los monitores de rendimiento cometen errores durante su funcionamiento debido a diferentes causas. Estos errores generan datos en los mapas que no corresponde a la realidad (outliers). Para ello se debe proceder a un proceso denominado de limpieza de los mapas de rendimiento. Mediante esta metodología se emplean soluciones estadísticas para eliminar esos datos outliers.

A continuación se presenta la metodología sistematizada de procesamiento para la limpieza de un mapa de rendimiento mediante el empleo de un potente software de información geográfica de acceso libre y código abierto llamado Quantum GIS.

Software necesario

Quantum GIS. Software Libre. Descarga de www.qgis.org

Set de datos modelo

Set de Datos protocolo I descarga desde el link:

<https://www.dropbox.com/sh/488ryulcwl46dh6/AADTgedZrPsx3-ZXnzbBMPXMa>

Procedimientos

- 1) En Panel de control poner la máquina en idioma Ingles USA o separación decimal como “puntos”

- 2) Instalar Quantum GIS y poner el programa en Español
(Settings/options/Locale/es)
- 3) Instalar complemento "Table manager", requiere conexión a internet
(complementos/obtener complementos de python.../opciones/mostrar todos los complementos.../complementos/filtrar "table manager"/ instalar)
- 4) Cargar archivo Soja2011orig.csv usando la herramienta "Añadir capa de texto delimitado", elegir SRC "geográficas/WGS84".
 - a. Evaluar las propiedades de la capa (botón derecho sobre el nombre)
 - b. Ver Tabla de atributos y evaluar campos (Abrir Tabla de atributos)
- 5) Crear Carpeta "Resultados" dentro de Protocolo I
- 6) Guardar en la carpeta "Resultados", la capa vectorial (botón derecho sobre el nombre) Guardar como "Archivo shape de ESRI" con el nombre "Soja2011.shp", no modificar el SRC (debe ser WGS84).
- 7) Eliminar la capa "Soja2011orig" y cargar de la carpeta resultados la capa "Soja2011.shp" (Añadir capa vectorial)
- 8) Eliminar y renombrar campos del archivo
 - a. Usar Complementos/Tabla/Tabla Manager
 - b. Eliminar campos innecesarios y renombrar restantes, deben quedar:
 - c. Lat – Lon – Elev11 – Var11 – HG11 – Rto11 – Lote – Ano11
 - d. Guardar los cambios
 - e. Evaluar la Tabla resultante
 - f. Abrir la Tabla de atributos, editarla (conmutar edición, "lápiz"), abrir calculadora de campos, tildar actualizar campo existente y luego elegir "Var11" y en expresión de la calculadora de campos escribir '5009'. Ok.

- 9) Convertir medidas inglesas a métricas
 - a. Abrir Tabla de Atributos y editarla
 - b. Cambiar Elev11 por Elev11*0.3048
 - c. Cambian Rto11 por Rto*67.25
 - d. Guardar la edición y cerrar Tabla

- 10) Proyectar en UTM_20S
 - a. Guardar la capa como "Soja2011_20S.shp" pero cambiando el SRC, elegir "Sistema de coordenadas proyectadas/UTM/WGS 84 / UTM zone 20S
 - b. Hacer zoom general (Zum general)
 - c. Eliminar Soja2011.shp
 - d. Hacer zoom general

- 11) Añadir coordenadas de proyección a la Tabla de datos
 - a. Vectorial/Herr. Geometría/Exp/Añadir columnas geométricas
 - b. Nombre: Soja2011_20Sp.shp
 - c. Indicar SI en añadir la nueva capa y luego "close", eliminar la capa "Soja2011.shp" y observar en la nueva capa los campos XCOORD e YCOORD.

- 12) Limpiar mapa de datos extremos
 - a. Hacer doble clic sobre el nombre de la capa
 - b. Solapa Estilo
 - i. Símbolo graduado
 - ii. Columna: Rto11
 - iii. Clases: 4
 - iv. Modo: Cuantiles
 - v. Clasificar
 - vi. Cambiar paleta de colores "doble click sobre el círculo/cambiar (con llave)/elegir color de borde y relleno/guardar como estilo/1"

- c. Tomar nota de los cuantiles 1 y 3. $Q1: 2875$ $Q3: 3720$
- d. Calcular el intervalo intercuartil ($Q3-Q1$) y multiplicarlo por 1,5. ($1,5 \cdot IQR=1268$)
- e. Eliminar todos aquellos datos de $Q1 < 1,5IQR$ ($Rto < 1607$) y $Q3 > 1,5IQR$ ($Rto > 4988$)
- f. Abrir Tabla/Búsqueda avanzada
 - i. $Rto > 4988$ (683 objetos)
- g. Editar Tabla/Borrar objetos seleccionados/OK (espere, tarda!)
- h. Volver a Tabla/Búsqueda avanzada
 - i. $Rto < 1607$ (5604 objetos)
- i. Borrar/OK (espere, tarda más! Si sale 'No responde' ESPERE)
- j. Guardar edición
- k. Clasificar nuevamente con escala de colores
- l. Ver mapa final con colores en: Rojo – Amarillo – Verde claro – Verde oscuro

13) Imprimir mapa con título, escala, norte y leyenda.

14) Revisar carpeta de Resultados para verificar los archivos generados.

Protocolo II Zonificación de lotes de producción.

Para el manejo diferencial de un lote de producción se debe proceder primero a la zonificación del mismo. Luego de la zonificación un técnico agrónomo capacitado deberá corroborar si dicha zonificación se corresponde con la variabilidad del lote a través de un relevamiento que debería incluir muestreos de suelo dirigidos y análisis del perfil cultura del mismo.

Las fuentes de datos para realizar una zonificación pueden ser muy variadas: mapas de rendimiento de cultivos anteriores, imágenes de índice verde de cultivos de años anteriores, relevamientos de altimetría precisa, mapas de electroconductividad, mapas de tosca, mapas de profundidad de napa. Nótese que dependiendo de la región en la que se encuentre el sitio experimental las variables a tener en cuenta pueden ser distintas. En la región sur de Córdoba un mapa de profundidad de napa seguramente podrá brindar información importante a la vez que para el sudeste de la Provincia de Buenos Aires un mapa de profundidad de tosca podría explicar en forma importante la variabilidad en la producción de un cultivo.

Este protocolo permite la zonificación de lotes de producción mediante el empleo de un sistema de información geográfica de acceso libre y código abierto y el análisis de clúster a través del software gratuito Management Zone Analyst. Se provee además de un set de datos cargados en servidor online para que el lector pueda adquirir destrezas prácticas con los mismos.

Software necesario

Quantum GIS. Software Libre y Gratuito. Descarga de www.qgis.org

Management Zone Analyst. Software Gratuito. Descarga de:

<http://www.ars.usda.gov/services/software/download.htm?softwareid=24>

Set de datos modelo

Set de datos Protocolo II descarga desde el link:

https://www.dropbox.com/sh/qkjtmmhnaycvhelp/AAC90a9dVp94d_9g46NxGzVaa

Procedimientos

- 1) Instalar Quantum GIS

- 2) Instalar Management Zone Analyst
- 3) Abrir el software Quantum GIS: Configurar que el proyecto sea en UTM 20S
 - a. Configuración/Propiedades del proyecto/SRC/UTM 20S
 - b. Configuración/Opciones/SRC/Sistema de referencia de coordenadas para nuevas capas/tildar "Usar SRC del proyecto"
- 4) Hacer cuadrícula para promediar los datos de las diferentes capas
 - a. Abrir Soja2011_20Sp.shp
 - b. Indicar las coordenadas manualmente o "Actualizar extensión a partir de la vista del mapa"

Xmin~316441 Ymin~6275893

Xmax~318029 Ymax~6276730

 - i. Usar 9m x 9m (polígonos)
 - ii. Nombre: cuadrícula.shp
 - iii. Definir proyección como UTM 20S
 - iv. Generar cuadrícula como polígonos
- 5) Subir de nivel la capa "Soja2011_20Sp.shp" para observarla superpuesta a la cuadrícula (arrastrar con ratón)
- 6) Unir capas
 - a. Vectorial/Herr. Gestión de datos/Unir atributos por localización
 - i. Capa vectorial objetivo: cuadrícula
 - ii. Unir capa vectorial: Soja2011_20Sp
 - iii. Tomar resumen.....: Tildar en Media
 - iv. Nombre: Lote14.shp
 - v. Tildar en "Mantener todos los registros"
 - vi. OK/Si/close
 - b. Abrir Tabla de Lote14.shp
 - i. Acomodar campos y nombres con Table Manager, dejando todos los que se llaman MEAN.... Y luego renombrarlos, borrando el prefijo MEAN.
 - ii. Eliminar capas Soja2011_20Sp.shp y cuadrícula.shp

- 7) Cargar la capa Soja2009_20Sp.shp y unirla a Lote14.shp creando Lote14_2.shp.
- 8) Unir Elevacion.shp (mapa digital de elevación con precisión) a Lote14_2.shp creando Lote14_3.shp
- 9) Unir NDVI_2011.shp a Lote14_3.shp creando Lote14_4.shp
- 10) Elimine valores igual a "0" en campos de elevación
- 11) Con Table manager inserte un nuevo campo "OBS", que sea del tipo "integer", edite la Tabla de atributos y modifique el campo OBS con la calculadora empleando "numfila", así se genera un número correlativo, es decir cada registro tendrá un número de identificación único.
- 12) Determinar Zonas de Manejo
 - a. Cargar con el programa Quantum GIS la capa "Lote14_4.shp"
 - b. Guardar en la carpeta Resultados el archivo Lote14_4.csv, seleccionar formato "valores separados por coma".
 - c. Abrir MZA .
 - d. View: Lote14_4.csv (los campos deben quedar uno debajo del otro)
 - e. Seleccionar Rto09 – Rto11 – Alt – IV11 (Next)
 - f. Indicarle al software que evalúe entre dos y tres zonas (Next)
 - g. Guardar la salida como Lote14_sal.dat
- 13) Hacer mapas de zonas
 - a. Abrir Quantum GIS y hacer un shape con el archivo Lote14_sal.dat
 - b. Para ello cargar el archivo CSV y guardarlo como Shape. (Ver protocolo 1).
 - c. Visualizar los campos 2 y 3 como categorizado (usar colores contrastantes)
 - d. Decisión: Elegir Z3 como mejor opción

- e. Evaluar en que SRC está el mapa con Metadato, Debe estar en WGS84
- f. Guardarla como Lote14_zonas_20S.shp proyectándola
- g. Abrir Table manager, renombrar campos 2 y 3 por Z2 y Z3. Además crear campo 'Rtopro' como número real.
- h. Calcular el Rto promedio entre los dos año en el campo 'Rtopro'
- i. Seleccionar Z3 igual a 1. Para ello usar "Búsqueda avanzada" en la Tabla de atributos.
- j. Vectorial/Herr. Análisis/Estadísticas básicas/campo Rtopro y recopilar información estadística en cada zona.
Zona 1) Promedio: 3241 kg/ha N: 6471 datos CV: 4,81%
Zona 2) Promedio: 3799 kg/ha N: 2666 datos CV: 6,18%
Zona 3) Promedio: 2667 kg/ha N: 2524 datos CV: 9,43%

15) Imprimir mapa con titulo, escala, norte y leyenda.

16) Revisar carpeta de Resultados para verificar los archivos generados.

PROTOCOLO III. DISEÑO Y EJECUCIÓN DE ENSAYOS DE MANEJO SITIO ESPECÍFICO

Introducción

El propósito de este apartado es compilar una metodología para la planificación, ejecución y posterior procesamiento de ensayos de manejo sitio específico destinados a optimizar la dosificación de nitrógeno, fósforo o semillas.

Diseño del experimento

Como cualquier ensayo a campo se deben definir los objetivos claramente y a partir de ello una metodología para poder cumplirlos. Si lo que se desea es optimizar el manejo de nitrógeno por ejemplo y teniendo en cuenta la respuesta de tipo óptimo a su aplicación entonces el factor a evaluar será dosis de N. Para poder explorar la curva de respuesta deberá evaluarse un amplio rango de niveles: 0-50-100-150-200-250-300-350 kg ha⁻¹ de N. Estos niveles para ambos ensayos permitirían explorar un amplio rango de resultados teniendo en cuenta el efecto de años con excelentes condiciones de crecimiento para el cultivo y años donde se presentan importantes restricciones ambientales. Teniendo en cuenta la respuesta general de tipo cuadrática al N los valores explorados permitirán construir la curva de respuesta en forma más precisa aunque los niveles evaluados no sean los normalmente empleados por productores.

Selección del sitio experimental

La selección del sitio experimental, como en toda investigación es de singular importancia. En este caso cobra relevancia la posibilidad de contar con información preexistente del lote como puede ser mapas de rendimiento de años anteriores, imágenes satelitales de cultivos previos, relevamientos con sondas de electroconductividad, relevamientos altimétricos de precisión, entre otros. Estas capas de información georreferenciadas deberán ser recabadas y sistematizadas para su análisis. El procesamiento de la información mencionada deberá permitir obtener la zonificación del área de estudio. En el protocolo II se presenta una propuesta metodológica para la zonificación de un lote de producción a partir de diferentes fuentes de datos. La zonificación del área de estudio permitirá luego analizar la respuesta por zona de manejo de la variable evaluada. Cabe destacar la importancia de realizar visitas a campo con puntos de muestreo y observación para corroborar si la zonificación realizada se corresponde con la variabilidad observada a campo.

Disposición de los tratamientos

Una vez zonificado el sitio experimental se deberán disponer los tratamientos en franjas cruzando las zonas delimitadas. Cada franja tendrá un ancho fijo y deberá ser georreferenciada en su punto central al inicio de la parcela. El largo de la franja dependerá del tamaño del lote. Deberá ser lo suficientemente larga como para abarcar la zonificación realizada.

Se debe tener en cuenta que el ancho de la franja deberá permitir luego que una maquina cosechadora con monitor de rendimiento pueda cosecharla por separado. También se debe tener en cuenta que si se harán tratamientos de fertilización o aplicación de productos foliares la franja debe ser lo suficientemente ancha para coincidir en las labores.

A nivel de campo este tipo de ensayos es más sencillo que los tradicionales ensayos de parcelas pequeñas pero se deben tener en cuenta los aspectos operativos mencionados.

Cosecha

La cosecha del ensayo deberá realizarse mediante maquina equipada con monitor de rendimiento y sistema de posicionamiento global. Los sensores de humedad y rendimiento deberán ser calibrados antes de comenzar con la cosecha. El mapa debe ser guardada como un archivo distinto al resto del lote donde la pasada 1 será el primer tratamiento del ensayo que generalmente corresponde con el Testigo. Una vez terminado el proceso de cosecha se deben descargar los datos en una computadora portátil equipada con lector de tarjetas de memoria. Los datos deberán ser leídos con el software provisto con el monitor de rendimiento y exportados en formato csv para su posterior procesamiento con software de Información Geográfica.

PROTOCOLO IV. ANÁLISIS DE DATOS DE ENSAYOS GENERADOS MEDIANTE MANEJO SITIO ESPECÍFICO

Introducción

El propósito de este apartado es unificar y sistematizar una metodología para el procesamiento de datos de ensayos generados a partir de protocolos de manejo sitio específico. Adquirir conceptos del análisis de datos mediante estadística espacial.

Software necesario

Quantum GIS. Software Libre y Gratuito. Descarga de www.qgis.org

Management Zone Analyst. Software Gratuito. Descarga de:

<http://www.ars.usda.gov/services/software/download.htm?softwareid=24>

GeoDa <https://geodacenter.asu.edu/software/downloads>

Set de datos modelo

Set de datos Protocolo IV descarga desde el link:

https://www.dropbox.com/sh/b9raasoqmmiyeky/AABpv6_QCA_vxok6OMcpeVrea

Procedimientos

1) Abrir Quantum GIS para analizar la dosis óptima de nitrógeno para maíz por zona de manejo en el Lote 6.

a. Cargar dos veces el archivo “Nitro_lot6.shp” y una vez el archivo “Lote6_zonas.shp”. Visualizar Tabla de atributos y Propiedades.

b. Visualizar como símbolo graduado el rendimiento en una capa y como categórico la densidad en otra. Interpretar visualmente los resultados activando y desactivando sucesivamente ambas capas.

c. Evaluar la capa de zonas del lote y el rendimiento del ensayo.

d. Crear la carpeta Resultados en el disco C Protocolo IV

e. Insertar el campo Nitrógeno al cuadrado “N²”. Luego calcular correctamente el campo.

f. Para calcular el campo N², abrir la Tabla de Atributos y mediante la calculadora (Field Calculator) hacer el cálculo de N² (nitrógeno x nitrógeno).

g. Mediante “Join and relates/Unir por atributos por localización” seleccionando la segunda opción de unión, obtener en la capa del ensayo las dos

zonas del lote y guardar el shape de salida como Nitro_lot6_z.shp en la carpeta Resultados. Eliminar todas las capas, excepto esta última, mostrando en la misma las dos zonas en diferentes colores como categórica.

h. Insertar campos Z2, Z2N y Z2N2 (para crear las variables dummies).

i. Para crear las variables dummy, realice una búsqueda avanzada para seleccionar las celdas que pertenecen a la zona 2 y sobre ellas modifique el campo "Z2" con valores iguales a 1.

j. Calcule para todos los registros de los campos Z2N y Z2N2 las multiplicaciones respectivas.

k. Abrir OpenGeoDa y luego cargar Nitro_lot6_z.shp, crear la matriz de ponderadores espaciales W cuya extensión es *.gal como una queen 8 vecinos. Utilice el campo "ID" como identificador de registro.

l. Hacer la regresión cuadrática con Nitrógeno, N2, Z2, Z2N y Z2N2 cargando la matriz W y con el método clásico.

m. Analizar la salida y copiarla a Word.

n. Hacer luego la regresión con el método Spatial error y copiar la salida en Word.

o. Comparar ambas opciones.

p. Hacer la regresión de Nitrógeno y N2 (sin zonas) con el método Spatial error.

q. En excel determinar la dosis óptima económica de N en base a los parámetros de la educación obtenidos de la salida de GeoDa.

ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Análisis de la varianza

EAN

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
EAN	9	0,85	0,71	12,59

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	53,34	4	13,34	5,83	0,0580
Sitio	2,44	2	1,22	0,53	0,6236
Criterio	50,91	2	25,45	11,13	0,0232
Error	9,15	4	2,29		
Total	62,49	8			

Test:LSD Fisher Alfa=0,05 DMS=3,42775

Error: 2,2863 gl: 4

Sitio	Medias	n	E.E.	
1,00	12,68	3	0,87	A
2,00	11,92	3	0,87	A
3,00	11,42	3	0,87	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Test:LSD Fisher Alfa=0,05 DMS=3,42775

Error: 2,2863 gl: 4

Criterio	Medias	n	E.E.	
meme	15,37	3	0,87	A
moda	10,48	3	0,87	B
zm	10,18	3	0,87	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Respuesta

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Respuesta	9	0,81	0,61	25,25

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	427611,11	4	106902,78	4,18	0,0975
Sitio	57442,89	2	28721,44	1,12	0,4103
Criterio	370168,22	2	185084,11	7,23	0,0469
Error	102359,11	4	25589,78		
Total	529970,22	8			

Test:LSD Fisher Alfa=0,05 DMS=362,64077

Error: 25589,7778 gl: 4

Sitio	Medias	n	E.E.	
1,00	701,00	3	92,36	A
3,00	678,33	3	92,36	A
2,00	521,33	3	92,36	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Test:LSD Fisher Alfa=0,05 DMS=362,64077

Error: 25589,7778 gl: 4

Criterio	Medias	n	E.E.	
meme	916,33	3	92,36	A
zm	533,67	3	92,36	B
moda	450,67	3	92,36	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Rto

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Rto	9	0,99	0,98	1,70

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	11864230,67	4	2966057,67	115,46	0,0002
Sitio	11498572,67	2	5749286,33	223,80	0,0001
Criterio	365658,00	2	182829,00	7,12	0,0481
Error	102757,33	4	25689,33		
Total	11966988,00	8			

Test:LSD Fisher Alfa=0,05 DMS=363,34551

Error: 25689,3333 gl: 4

Sitio	Medias	n	E.E.	
3,00	10365,33	3	92,54	A
1,00	10080,00	3	92,54	A
2,00	7837,67	3	92,54	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Test:LSD Fisher Alfa=0,05 DMS=363,34551

Error: 25689,3333 gl: 4

Criterio	Medias	n	E.E.	
meme	9708,67	3	92,54	A
zm	9328,67	3	92,54	B
moda	9245,67	3	92,54	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Dosis

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Dosis	9	0,57	0,14	23,46

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	782,70	4	195,67	1,34	0,3930
Sitio	334,78	2	167,39	1,14	0,4051
Criterio	447,92	2	223,96	1,53	0,3213
Error	586,07	4	146,52		
Total	1368,77	8			

Test:LSD Fisher Alfa=0,05 DMS=27,44017

Error: 146,5166 gl: 4

Sitio	Medias	n	E.E.	
3,00	56,41	3	6,99	A
1,00	55,40	3	6,99	A
2,00	43,00	3	6,99	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Test: LSD Fisher Alfa=0,05 DMS=27,44017

Error: 146,5166 gl: 4

Criterio	Medias	n	E.E.	
meme	60,28	3	6,99	A
zm	51,54	3	6,99	A
moda	43,00	3	6,99	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)