

Aproximaciones para el manejo sitio-específico de la fertilización nitrogenada en maíz a través de índices espectrales

H.M. Redel¹ y M.M. Zubillaga¹

Introducción

El rendimiento de los cultivos es el resultado de la interacción entre el genotipo, las propiedades del suelo, las condiciones climáticas de la campaña y el manejo agronómico (Diacono et al., 2012). La cuantificación de la variabilidad espacial de los atributos asociados a la producción agrícola es una herramienta de manejo para evaluar la conveniencia de la implementación de la agricultura de precisión (Diacono et al., 2011; Oliver et al., 2010). Los principios de esta tecnología se basan en la capacidad de reconocer niveles de variación o heterogeneidad de ambientes dentro del lote de producción y adecuar las recomendaciones agronómicas a cada unidad reconocida (Roberts, 2001). Esta variabilidad a escala de lote modifica la tecnología convencional de aplicación uniforme de insumos en el lote de producción (Zubillaga y Urricariet, 2007), pudiendo mejorar la rentabilidad y reducir el impacto ambiental (Ruffo et al., 2006).

La disponibilidad de nitrógeno (N) en la región pampeana es uno de los factores que con mayor frecuencia limita el rendimiento de maíz (Echeverría y Sainz Rozas, 2006; Álvarez, 2007). Cuando no hay funciones de producción que evalúen la respuesta a la fertilización nitrogenada, el método más frecuentemente utilizado para la determinación de la dosis de N es el método del balance de masas. Por un lado, la captura de la variabilidad espacial de los factores que intervienen en el balance permitiría la aplicación específica por sitio del nutriente y por el otro, es importante poder relacionar los distintos pools de N para observar posibles pérdidas de N del sistema o una falta del mismo (sobre y sub fertilización). Se debe tener en cuenta que, en la región pampeana, entre un 10 a 30% del N total aplicado está sujeto a pérdidas de lixiviación (Rimski-Korsakov et al., 2007).

Las herramientas que se utilizan para diagnosticar la deficiencia de N durante el ciclo de los cultivos son diversas. Cuando se utiliza a la planta como indicador, puede determinarse la deficiencia a través del índice de nutrición del N (INN). El INN se puede considerar un parámetro confiable para diagnosticar el estado nutricional del cultivo (Ziadi et al., 2008). Este parámetro tiene en cuenta la concentración de N en vegetal y la concentración crítica de N para un determinado nivel de biomasa. La concentración crítica de N es la concentración mínima de N a la cual el crecimiento es máximo (Plenet y Lemaire, 2000). Para la determinación del INN es necesario el muestreo del vegetal durante el ciclo del cultivo y el procesamiento adecuado de las muestras y su determinación de N en el laboratorio.

Dicha metodología presenta la desventaja del tiempo requerido para llevar a cabo el diagnóstico del estado nutricional del cultivo.

Existen otras herramientas que brindan la posibilidad de predecir el estado nutricional del cultivo utilizando la reflectancia del cultivo. Los índices espectrales (IE) se generan a partir de la información de sensores remotos, los cuales codifican la respuesta de los cultivos a la radiación electromagnética, generando gran cantidad de información con distribución espacial continua (Scottford y Miller, 2005). Las mediciones de las propiedades ópticas del canopeo (o follaje superior) de maíz como la reflectancia y la transmitancia pueden considerarse técnicas tan eficientes como el análisis vegetal (Schepers et al., 1996). La utilización de sensores remotos permite realizar determinaciones en cultivo de manera no destructiva y rápida, facilitando la repetitividad de las determinaciones. El IE más utilizado para caracterizar la vegetación es el NDVI (índice de vegetación de diferencia normalizada, por sus siglas en inglés), índice asociado a la biomasa aérea, con ciertas limitantes relacionadas con la saturación a altos niveles de biomasa (Rouse et al., 1973). Cuando el índice de área foliar (IAF) es elevado, se recomienda utilizar el GNDVI (índice verde de vegetación normalizada, por sus siglas en inglés), el cual utiliza la reflectancia del cultivo en la longitud de onda del verde e infrarrojo cercano (Cristiano et al., 2010). El índice denominado REIP (punto de inflexión del borde rojo) fue sensible a las variaciones en los pigmentos fotosintéticos, materiales no fotosintéticos y también a la reflexión del suelo (Dawson y Curran, 1998). Otros índices de interés son: Viopt, índice de vegetación óptimo, desarrollado para predecir el estatus de N en trigo (Reyniers et al., 2006); y el OSAVI, índice de vegetación optimizado por el ajuste del suelo (Rondeaux et al., 1996), el cual tiene en cuenta no solo la reflectancia del cultivo sino también la del suelo, índice de importancia cuando la cobertura no es completa.

Los objetivos de este estudio fueron caracterizar el patrón de distribución espacial de variables del cultivo de maíz, y analizar cómo se comportan distintos IE en la diferenciación de ambientes y dosis y su relación con el INN.

Materiales y métodos

La experimentación fue conducida en la localidad de Vedia (Provincia de Buenos Aires, Argentina) ubicada en la sub-región Pampa Arenosa de la Región Pampeana, donde se identifican ambientes de marcada heterogeneidad a escala intra-lote. La variabilidad encontrada en los suelos se corresponde con el paisaje,

¹ Cátedra de Fertilidad y Fertilizantes, Facultad de Agronomía, UBA. Correo electrónico: hredel@agro.uba.ar

donde se encuentran Hapludoles énticos, franco gruesos, en las partes más elevadas y convexas de las planicies, y Hapludoles típicos, desarrollados entre las lomas (INTA, 1989).

En la campaña 2012/13 se seleccionó un lote con distintos ambientes productivos, encontrándose zonas de alta, media y baja productividad correspondientes a los bajos, medias lomas y lomas, respectivamente. Se planteó un muestreo sistemático en grilla (o retícula) geo-referenciado en un cultivo de maíz. El ensayo contó con franjas testigo (0N, lugar donde se montó la grilla) y franjas fertilizadas con dosis creciente de N (75 y 150 kg N ha⁻¹). La distancia entre los puntos de muestreo en la grilla fue de 30 m distribuidos en 15 filas x 5 columnas. Además en tres de las columnas se planearon 3 sub-muestreos intensivos cada 10 m, totalizando 111 puntos de muestreo en una superficie total de experimentación de 10 ha (**Figura 1**).

En madurez fisiológica se muestreó en cada punto una superficie de 0.63 m² de biomasa total de maíz, determinándose la biomasa aérea total acumulada y la partición a grano (rendimiento en grano) y rastrojo, previo acondicionamiento de la muestra. Asimismo, se determinó el contenido de N acumulado en rastrojo y en grano (Nelson y Sommers, 1973).

El análisis de estadística clásica se analizó con el paquete estadístico Infostat (Di Rienzo et al., 2013). Para estudiar la heterogeneidad espacial de las variables se emplearon técnicas geo-estadísticas (GS+Demo-versión 9.0 de Gamma Design Software, 2013). El análisis consistió en calcular la semi-varianza isotrópica (independiente de

la dirección) según la **Ecuación 1**:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i) - z(x_i + h)]^2 \quad \text{Ec. 1.}$$

donde $\gamma(h)$ es la semi-varianza para "N" pares de datos separados por una distancia de h , y Z es el valor en las posiciones x_i y $(x_i + h)$ para las variables propuestas a las distintas escalas espaciales posibles de observación ($h < 450$ m), siendo $z(x_i)$ el valor de una variable en una localización (x_i) y $z(x_i + h)$ el valor de la misma variable en un punto distante (h) del anterior. El ajuste de los modelos se evaluó mediante el coeficiente de regresión (R^2) y la relación entre la variancia nugget (Co) y la variancia total ($Co+C$). A partir de los modelos ajustados, se estimaron los valores de las variables para la totalidad de la parcela a través de interpolación por técnicas de kriging.

Para estudiar el comportamiento del INN y los índices espectrales en la diferenciación de ambientes y dosis de N, se realizó un ensayo de fertilización en cada ambiente productivo. La delimitación de los ambientes se realizó mediante el cálculo de cota relativa (CR) de cada sitio, separando las cotas en tres tercios ($CR = ((\text{Cota actual} - \text{cota mínima}) / (\text{cota máxima} - \text{cota mínima}) * 100)$). Se utilizó un diseño experimental en parcelas divididas, donde el factor principal fue el ambiente productivo (determinado por la cota) y las sub-parcelas las dosis de N (0, 75 y 150 kg de N ha⁻¹). Se realizaron tres repeticiones para cada tratamiento, con un total de 27 unidades experimentales. La fuente nitrogenada fue UAN aplicado entre líneas al estadio V4. El muestreo de material vegetal y radiométrico se llevó a cabo para dos estadios del cultivo: V8 y R1. Para el muestreo vegetal se tomaron las plantas comprendidas en una superficie de 0.63 m² centrada en cada punto geo-referenciado. Estas fueron secadas a 60 °C hasta peso constante para determinar biomasa aérea. Las muestras fueron molidas y se determinó la concentración de N en el vegetal (Nelson y Sommers, 1973). Los INN se obtuvieron a través del cociente entre la concentración de N del tejido de la planta entera y la concentración crítica de N (%) calculada a través del algoritmo (**Ecuación 2**):

$$\% N \text{ crítico} = 3.4 (MS)^{-0.37} \quad \text{Ec. 2.}$$

donde % N crítico es la concentración mínima de N a la cual el crecimiento es máximo y MS es la biomasa aérea total acumulada expresada en masa seca. Los valores de INN varían de valores menores a 1 (indicando que el N es limitante para el crecimiento), valores cercanos a 1 (el N no es limitante para el crecimiento) y mayores a 1 (el N se encuentra en exceso) (Plenet y Lemaire, 2000).

El muestreo radiométrico se llevó a cabo con un radiómetro multispectral portátil (Crop-Scan MSR16, Rochester, EE.UU.) en longitudes de onda de 450, 500, 550, 610, 660, 680, 710, 730, 760, 780, 810, 870, 950, 1080, 1220 y 1600 nm. El radiómetro se dispuso sobre el tope del canopeo a 1.1 m de altura, integrando una superficie de 0.52 m². Con la reflectancia en las distintas

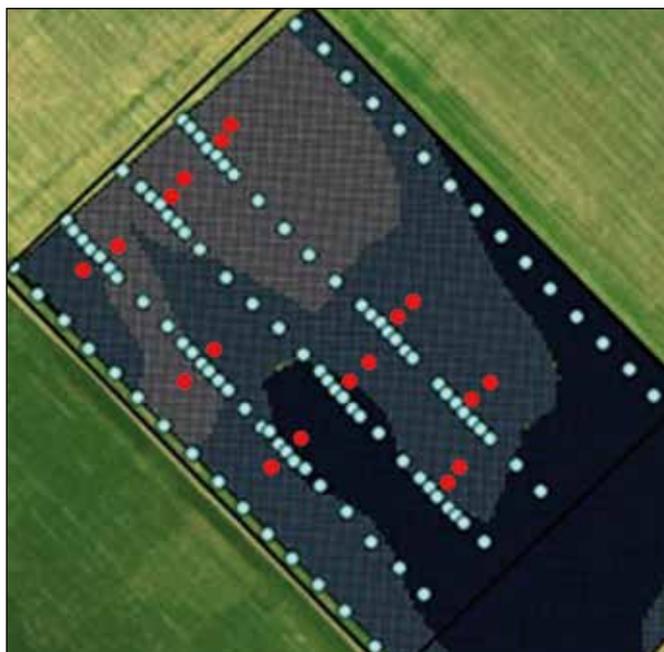


Figura 1. Ambientes del lote seleccionado para el ensayo (zonas oscuras, medias y claras representan la loma, media loma y el bajo, respectivamente). Los puntos de muestreo geo-referenciados se marcan con los círculos celestes. Los puntos rojos representan las unidades experimentales del ensayo de nutrición, mas el punto celeste contiguo (27 unidades en total).

longitudes de onda se calcularon índices espectrales NDVI, GNDVI, OSAVI, Vlopt, REIP, según las ecuaciones 3, 4, 5, 6 y 7, respectivamente.

$$NDVI = [(R810_{nm} - R670_{nm}) / (R810_{nm} + R670_{nm})] \quad Ec. 3.$$

$$GNDVI = [(R810_{nm} - R550_{nm}) / (R810_{nm} + R550_{nm})] \quad Ec. 4.$$

$$OSAVI = [(R800_{nm} - R670_{nm}) / (R800_{nm} + R670_{nm} + 0.16)] \quad Ec. 5.$$

$$Vlopt = 1 + 0.45 * [(R800_{nm}^2 + 1) / (R670_{nm} + 0.45)] \quad Ec. 6.$$

$$REIP = 700 + \{40 * [(R670_{nm} + R780_{nm}) / 2] - R700_{nm}\} / (R740_{nm} - R700_{nm}) \quad Ec. 7.$$

donde R# es la reflectancia observada a distintas longitudes de onda (nm).

Adicionalmente, se calcularon los balances hídricos para ambos tipos de suelos por el método de Penman-Monteith (Allen et al., 1998). El balance hídrico calculado consiste en la diferencia entre la evapotranspiración del cultivo (Hargreaves y Samani, 1985) y el agua disponible en el perfil (agua almacenada y precipitación).

Los resultados se analizaron utilizando el software INFOSTAT (Di Rienzo et al., 2013) a través del ANOVA para el diseño en parcelas divididas con arreglo en bloques completamente aleatorizado, y la prueba de la diferencia mínima significativa (DMS) para comparación de medias.

Resultados y discusión

Biomasa aérea del cultivo de maíz

La cantidad de biomasa total acumulada en promedio a madurez fisiológica del maíz fue de 21 281 kg MS ha⁻¹ con una partición a grano del 52%. La variabilidad de la biomasa de rastrojo y grano dada por el coeficiente de variación resultó media, siendo la misma baja, media o alta según los rangos 0-15%, 15-75% y >75%, respectivamente según Dahiya et al. (1984) (Tabla 1).

Los parámetros del semi-variograma que caracterizan a la variabilidad no explicada (varianza nugget), la variabilidad total (Co + C) y el rango de dependencia espacial se

Tabla 1. Estadística descriptiva de la biomasa aérea acumulada en rastrojo y grano a madurez fisiológica a escala intralote (n=111).

Biomasa aérea kg MS ha ⁻¹	Media	C.V.	Mínimo	Máximo
Rastrojo	10 136	16	6048	13 714
Grano	11 144	23	4627	18 333

Tabla 2. Parámetros de los semivariogramas de biomasa aérea total y su partición.

Biomasa aérea kg MS ha ⁻¹	Variancia Nugget Co	Variancia total Co+C	Rango m	R ²	Proporción Co/(Co+C)
Rastrojo	9.7 x 10 ⁵	4.134 x 10 ⁶	546	0.881	0.23
Grano	2.54 x 10 ⁶	7.532 x 10 ⁶	403	0.885	0.33
Total	6.1 x 10 ⁶	25.87 x 10 ⁶	885	0.888	0.24

muestran en la **Tabla 2**. Al evaluar el grado de dependencia espacial se utilizó el criterio propuesto por Cambardella et al. (1994), el cual supone que esta es fuerte cuando la relación Co:(Co+C) es ≤0.25, moderada para valores entre 0.25 y 0.75 y débil para valores >0.75. La estructura espacial de la biomasa total y el rastrojo presentó una fuerte dependencia espacial. Sin embargo, para el rendimiento en grano la estructura espacial fue moderada. Es frecuente en el país el uso de los monitores de rendimiento, los cuales permiten observar la variabilidad espacial del rendimiento. Sin embargo, no es frecuente cuantificar la variabilidad de la biomasa de rastrojo, el cual es importante para estimar los aportes de C en el balance de materia orgánica de los agro-ecosistemas.

Los mapas continuos de la productividad del cultivo de maíz se observan en la **Figura 2**. Ensayos en la región han encontrado que el rendimiento del cultivo de maíz presentó variabilidad espacial relacionada con la capacidad de agua disponible (Urricariet et al., 2011) y el drenaje (Timlin et al., 1998).

Nitrógeno total acumulado

El N acumulado por el vegetal en el lote fue en promedio de 160 kg N ha⁻¹, siendo el mínimo y máximo de 107 y 265 kg N ha⁻¹, respectivamente. La partición de N hacia los granos fue, en promedio, 75% (**Tabla 3**). Las zonas de menor acumulación de N pudieron deberse a un menor potencial de rendimiento relacionado a menor agua disponible en el suelo por sus características texturales más arenosas y menor contenido de materia orgánica. Muchas veces estos sectores son fertilizados suponiendo que su potencial de rendimiento es mayor, por lo que las aplicaciones de N serían superiores a lo requerido por el cultivo pudiendo causar ineficiencias en el uso del N aplicado, con posibles pérdidas de N del sistema (Muschiatti Piana et al, 2012).

El N acumulado total y su partición a grano y rastrojo presentaron moderada estructura espacial (**Tabla 4**). En esta evaluación, la acumulación del N por el vegetal es íntegramente provista por el suelo, como N al momento inicial del cultivo y N aportado por la mineralización. La fracción provista por el suelo es de importancia ya que se ha observado a cosecha que el N proveniente del suelo presentó entre un 56 y 74% del total absorbido por la planta en experimentos con fertilización (Rimski-Korsakov et al., 2008). Adicionalmente se ha encontrado estructura espacial del N mineralizado, el cual se relacionó espacialmente con variables de suelo (Zubillaga et al., 2006).

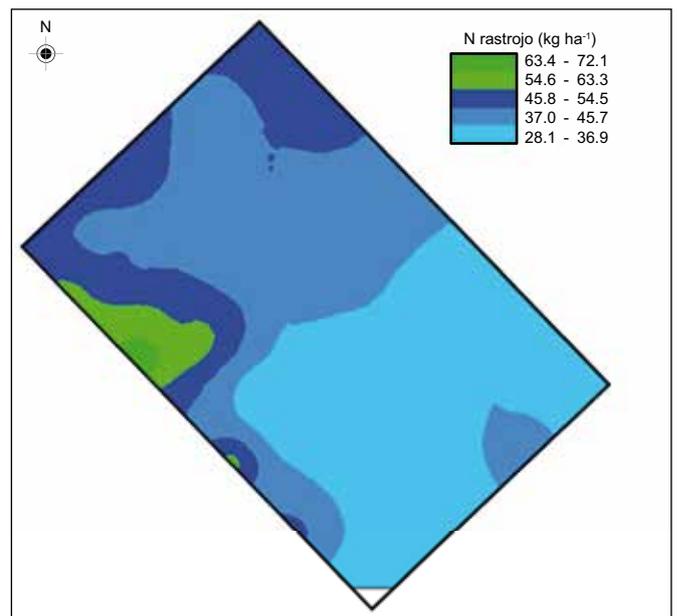
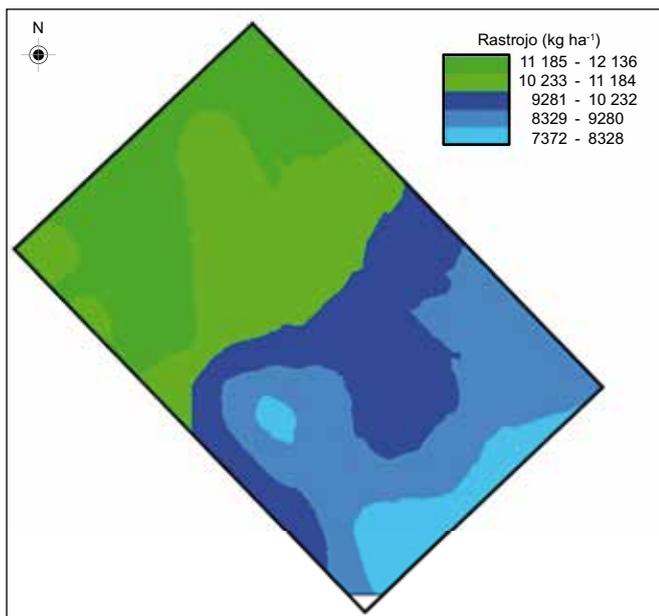
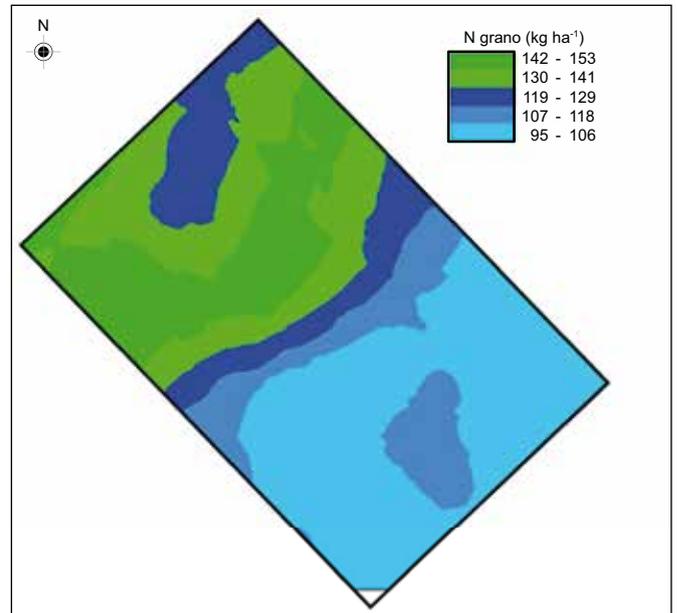
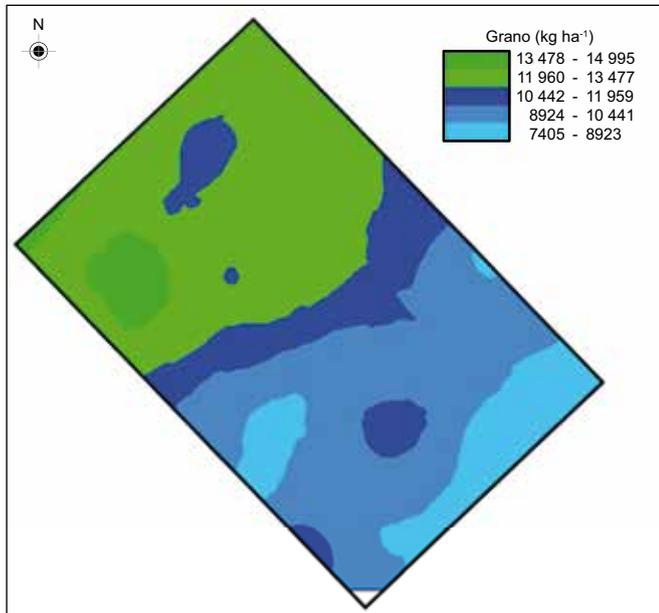
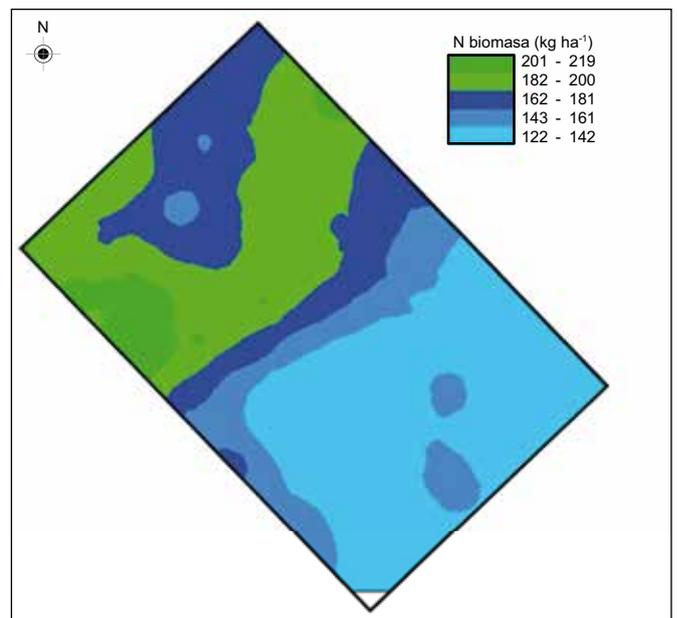
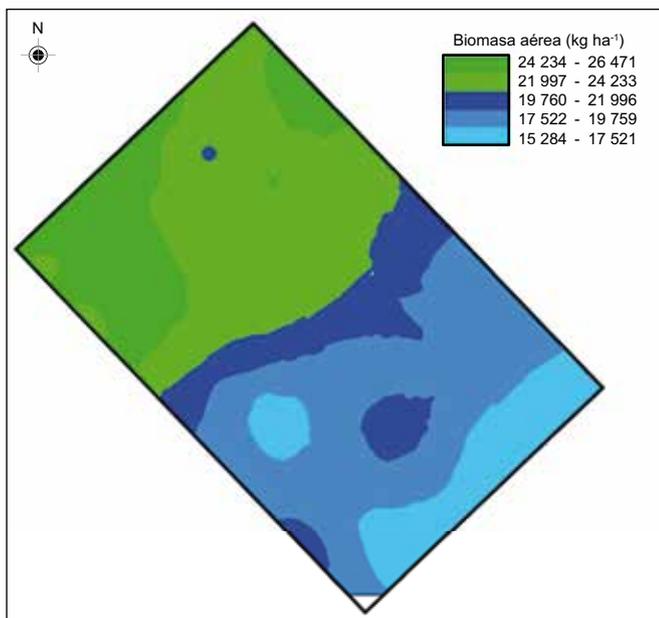


Figura 2. Distribución espacial de la biomasa aérea total acumulada de maíz a madurez, y su partición a grano y rastrojo (kg MS ha⁻¹).

Figura 3. Distribución espacial del N acumulado en biomasa por el cultivo de maíz a madurez, y su partición a grano y rastrojo (kg ha⁻¹).

Los mapas continuos de las variables N acumulado en biomasa y su partición a grano y rastrojo se presentan en la **Figura 3**.

Efecto del ambiente productivo y la dosis de N sobre INN

No se encontró interacción significativa ambiente*dosis por lo que se pudo analizar por separado el efecto de cada uno de ellos sobre el INN. El INN en el estadio V8 presentó diferencias significativas según dosis de N ($p=0.004$), siendo el INN más cercano a la unidad cuanto mayor ha sido la dosis de N. En el estadio R1, el INN no presentó diferencias según la dosis de N, pero discriminó los ambientes productivos ($p=0.0292$). El INN fue mayor solo en el ambiente más productivo (**Tabla 5**).

Tabla 3. Estadística descriptiva del N acumulado por el cultivo de maíz (kg ha⁻¹).

N acumulado kg N ha ⁻¹	Media	CV	Mínimo	Máximo
Rastrojo	40	33	24	102
Grano	120	23	76	198

La falta de diferencia en INN entre los ambientes productivos para el estadio V8 se pudo deber a que no ocurrieron deficiencias hídricas hasta dicho momento. Durante el periodo de barbecho, el perfil se recargó adecuadamente en ambos suelos. La diferencia entre ambientes se comienza a observar a partir de 67 días desde la siembra, donde el balance hídrico estimado muestra que el cultivo presentó restricciones hídricas. El cultivo que se desarrolló sobre los suelos con mayor capacidad de agua disponible (Hapludol típico, media loma y bajo) presentó menos días de estrés hídrico que el cultivo desarrollado en la zonas de menor productividad (Hapludol éntico, loma) (**Figura 4**).

A diferencia de lo observado en el presente trabajo, para la campaña agrícola 2010/11 se encontraron diferencias entre ambientes en INN en V8 (Mosso y Zubillaga, 2012). En dicha campaña, los registros pluviométricos fueron menores (diferencia de 240 mm) y con distinta distribución (en los meses de noviembre y diciembre, la diferencia en la precipitación fue de 260 mm entre campañas) lo que favoreció la expresión de diferencias en INN.

Tabla 4. Parámetros del semivariograma para el N acumulado por el vegetal y su partición.

Variable kg N ha ⁻¹	Variación Nugget Co	Variación total Co+C	Rango m	R ²	Proporción Co/(Co+C)
Rastrojo	58	192	184	0.841	0.31
Grano	375	1213	919	0.874	0.31
N acumulado	486	1871	505	0.905	0.26

Tabla 5. Comparaciones múltiples del factor Dosis y Ambiente (cota) para el parámetro INN. Letras diferentes indican diferencias significativas entre las medias de cada factor según la prueba DMS ($p\leq 0.05$).

Estadios del cultivo	Dosis de N kg N ha ⁻¹	Media	Ambiente productivo	Media
V8	0	0.48 c	Cota baja	0.70 a
	75	0.61 b	Cota media	0.58 a
	150	0.81 a	Cota alta	0.63 a
R1	0	0.54 a	Cota baja	0.67 a
	75	0.56 a	Cota media	0.53 b
	150	0.63 a	Cota alta	0.53 b

Tabla 6. Comparaciones múltiples del factor dosis para los distintos IE. Letras diferentes indican diferencias significativas ($p\leq 0.05$).

Estadios del cultivo	Dosis kg N ha ⁻¹	NDVI	GNDVI	OSAVI	REIP	Vlopt
V8	0	0.44 a	0.59 c	0.79 b	731.5 b	8.3 c
	75	0.52 b	0.67 b	0.89 a	738.0 a	11.9 b
	150	0.59 c	0.70 a	0.92 a	741.7 a	13.5 a
R1	0	0.58 b	0.71 b	0.94 b	741.5 b	16.3 b
	75	0.64 a	0.76 a	1.01 a	744.4 ab	15.4 b
	150	0.66 a	0.77 a	1.01 a	749.8 a	21.0 a

Tabla 7. Comparaciones múltiples del factor Ambiente para los distintos IE en R1 de maíz. Letras diferentes indican diferencias significativas ($p \leq 0.05$).

Ambiente	INN	INVI	GNDVI	OSAVI	REIP
Cota Baja	0.67 a	0.59 b	0.72 b	0.96 b	740.57 b
Cota media	0.53 b	0.62 b	0.74 b	0.98 b	744.56 ab
Cota alta	0.53 b	0.68 a	0.78 a	1.01 a	750.66 a

Tabla 8. Coeficientes de correlación de Pearson entre INN e índices espectrales (correlación significativa $p \leq 0.10^*$ y $p \leq 0.05^{}$).**

Índice	Momento	
	V8	R1
NDVI	0.70 **	0.50 **
GNDVI	0.70 **	0.48 **
OSAVI	0.69 **	0.40 *
REIP	0.67 **	0.62 **
Vlopt	0.68 **	0.22

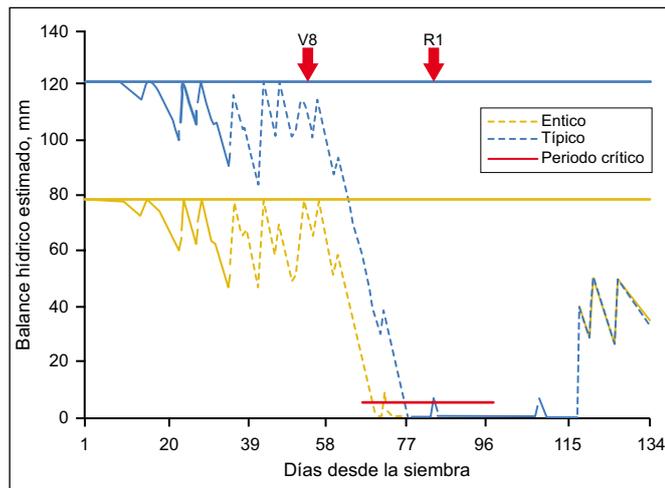


Figura 4. Periodo crítico para la determinación del rendimiento, balance hídrico estimado (línea punteada) y capacidad de agua disponible (línea llena) en función de días desde la siembra para los distintos tipos de suelo en estudio.

Efecto del ambiente productivo y la dosis de N sobre índices espectrales

No se encontró interacción ambiente*dosis por lo que se pudo analizar por separado el efecto de cada uno de ellos sobre los distintos IE. Los IE discriminaron las distintas dosis de N para los dos estadios analizados (Tabla 6). Para el estadio V8, los índices NDVI, GNDVI y Vlopt presentaron la mayor sensibilidad al diferenciar las tres dosis de N ($p < 0.001$, para todos los casos). Esto puede deberse a que estos índices, que relacionan la reflectancia del cultivo en las bandas del rojo (R670nm) e infrarrojo cercano (R810nm), se saturan en canopeos densos (Haboudane et al., 2004). Los índices OSAVI y

REIP discriminaron solo el tratamiento sin N del resto ($p < 0.0003$). En el estadio R1, todos los índices han discriminado al tratamiento sin fertilizar del resto ($p < 0.004$, para todos los casos).

El efecto del ambiente productivo solo fue significativo en el estadio R1 (Tabla 7). Los índices NDVI, GNDVI, OSAVI y REIP discriminaron el ambiente de alta productividad respecto al de media y baja ($p < 0.0093$, para todos los casos). Este comportamiento fue similar al del INN, donde a partir de esta etapa fenológica el cultivo experimentó déficit hídrico.

Relación entre INN e índices espectrales

La correlación entre INN e índices espectrales fue estadísticamente significativa en ambos momentos de toma de datos (Tabla 8). En el estadio V8, todos los índices registraron elevados coeficientes de correlación. En R1, los coeficientes resultaron menores en todos los casos y no se encontró correlación significativa entre INN y Vlopt. En este estadio, el índice que mejor se relacionó al estatus nitrogenado del cultivo resultó REIP.

Conclusión

Las variables estudiadas presentaron un patrón de distribución espacial definido. Por lo tanto, la tecnología de aplicación variable de insumos a nivel intra-lote podría generar un avance hacia un uso más eficiente del nitrógeno. Las mediciones espectrales y el INN permitieron diferenciar ambientes productivos y dosis de N. Por un lado, las dosis de N se diferenciaron en V8 para el INN y en ambos estadios para los índices espectrales. Por otro lado, los ambientes se diferenciaron en R1, momento en el cual el cultivo presentó estrés hídrico diferencial según ambiente.

La relación encontrada entre INN e índices espectrales permitiría utilizar a estos últimos como indicadores confiables del estatus nitrogenado de los cultivos. Este indicador presenta mayor sensibilidad en el estadio vegetativo, lo cual podría ser beneficioso para la detección y corrección de deficiencias nitrogenadas en etapas tempranas del ciclo del cultivo.

Agradecimientos

Este trabajo fue financiado por UBACyT20020100100757. Y al convenio de vinculación tecnología Expte CD 239966/12 FAUBA.

Bibliografía

- Allen, R.G., L.S. Pereira, D. Raes, y M. Smith. 1998. Crop Evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements, FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. Food and Agriculture Organisation, Land and Water. Rome, Italy.
- Álvarez, R. 2007. Fertilización en maíz. En Álvarez, R (ed). Fertilización de cultivos de grano y pasturas. Editorial Facultad de Agronomía. 131-156.
- Cambardella, C.A., T.B. Moorman, y B.H. Broker. 1994. Spatial analysis of soil fertility for site-specific crop management. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58:1240-1248.
- Cristiano, P.M., G. Posse, C.M. Di Bella, y F.R. Jaimes. 2010. Uncertainties in fPAR estimation of grass canopies under different stress situations and differences in architecture¹, *International Journal of Remote Sensing.* 31(15):4095-4109.
- Dahiya, I.S., J. Richter, y R.S. Malik. 1984. Soil spatial variability: A review. *Intern. J. Trop. Agric.* 2(1):1-102.
- Dawson, T.P., y P.J. Curran. 1998. A new technique for interpolating the reflectance red edge position.
- Di Rienzo, J.A., F. Casanoves, M.G. Balzarini, L. Gonzalez, M. Tablada, y C.W. Robledo. 2013. InfoStat versión 2013. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- Diacono, M., A. Castrignanó, A. Troccoli, D. De Benedetto, B. Basso, y P. Rubino. 2012. Spatial and temporal variability of wheat grain yield and quality in a Mediterranean environment: A multivariate geostatistical approach. *Field Crops Research* 131(2012):49-62.
- Diácono, M., A. Troccoli, G. Girone, y A. Castrignanó. 2011. Field-Scale Variability and Homogeneous Zone Delineation for Some Qualitative Parameters of Durum Wheat Semolina in Mediterranean Environment. *World Journal of Agricultural Sciences* 7(3):286-290.
- Echeverría, H.E., y H.R. Sainz Rozas. 2006. En: H.E. Echeverría y F.O. García (eds). Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos. Editorial INTA, Buenos Aires, Argentina. 255-282.
- GS+9.0. Gamma Design Software. 2013. GS+. Geostatistics for the environmental sciences. Plainwell, Michigan USA.
- Haboudane, D., J.R. Miller, E. Pattey, P.J. Zarco-Tejada, e I.B. Strachan. 2004. Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: Modeling and validation in the context of precision agriculture. *Remote Sensing of Environment* 90:337-352.
- Hargreaves, G.H., y Z.A. Samani. 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Eng. in Agric.*, 1(2):96-99.
- INTA. 1989. Mapa de Suelos de la Provincia de Buenos Aires, escala 1:500.000. 527 p. Bs. As. Argentina.
- Mosso, J.E., y M.M. Zubillaga. 2012. Comparación entre índices espectrales para predecir INN en condiciones contrastantes de ambientes de manejo y dosis de N en maíz. CD R XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo.
- Muschietti Piana, M.P., P.A. Cipriotti, y S. Urricariet. 2012. Simulación de las pérdidas de nitratos por lixiviación en fertilizaciones nitrogenadas del cultivo de maíz. V Congreso Iberoamericano de Ambiente y Calidad de Vida y VI Congreso de Ambiente y Calidad de Vida, Catamarca, Argentina. Presentación oral.
- Nelson, D.W., y L.E. Sommers. 1973. Determination of total nitrogen in plant material. *Agronomy Journal* 65:109-112.
- Oliver, Y.M, M.J. Robertson, y M.T.F. Wong. 2010. Integrating farmer knowledge, precision agriculture tools, and crop simulation modelling to evaluate management options for poor-performing patches in cropping fields. *Europ. J. Agronomy.* 32:40-50.
- Plenet, D., y G. Lemaire. 2000. Relationships between dynamics of nitrogen uptake and dry matter accumulation in maize crops: determination of critical N concentration. *Plant and Soil* 216:65-82.
- Reyniers, M., D.J.J. Walvoort, y J. De Baardemaaker. 2006. A linear model to predict with a multi-spectral radiometer the amount of nitrogen in winter wheat. *International Journal of Remote Sensing.* 27:4159-4179.
- Rimski-Korsakov, H., G. Rubio y R.S. Lavado. 2007. Potential losses of nitrate by leaching in soils of the pampas Argentina. *Agricultural Water Management* 65:83-94.
- Rimski-Korsakov, H., G. Rubio, I. Pino, y R.S. Lavado. 2008. Destino del nitrógeno del fertilizante en un cultivo de maíz. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur. IPNI Cono Sur.* 39:1-5.
- Roberts, R., B. English, y S. Mahajanashetti. 2001. Environmental and economic effects of spatial variability and weather. En: Blackmore, E y G Grenier (eds.). European conference on precision agriculture. pp. 545-550. Montpellier, Francia.
- Rondeaux, G., M. Steven, y F. Baret. 1996. Optimization of soil-adjusted vegetation indices. *Remote Sensing of Environment.* 55:95-107.
- Rouse, J.W., R.H. Haas, J.A. Schell, y D.W. Deerin. 1973. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. N. SP-351. Ed Third ERTS Symposium. 1:309-317. Whashington. NASA.
- Ruffo, M.L., G.A. Bollero, D.S. Bullock, y D.G. Bullock. 2006. Site-specific production functions for variable rate corn nitrogen fertilization. *Precision Agriculture* 7:327-342.
- Schepers, J.S., T.M. Blackmer, W. Wilhelm, y M. Resende. 1996. Transmittance and reflectance measurements of corn leaves from plants with different nitrogen and water supply. *J. Plant Physiol.* 148:523-529.
- Scotford, I.M., y P.C.H. Miller. 2005. Applications of spectral reflectance techniques in Northern European cereal production: A Review. *Biosystems Engineering* 90:235-250.
- Timlin, D.J., Y. Pachepsky, V. Snyder, y R. Bryant. 1998. Spatial and temporal variability of corn grain yield on a hillslope. *Soil Sci.Soc.Am.J.* 62:764-773.
- Urricariet, S., M. Niborski y C.M. Kvolek. 2011. Atributos del suelo y paisaje asociados a la variabilidad de rendimientos de maíz en la pampa arenosa. *Ciencia del Suelo.* 29(1):49-59.
- Ziadi, N., M. Brassard, G. Bélanger, A. Claessens, A.N. Cambouris, y M.C. Nolin. 2008. Chlorophyll Measurements and Nitrogen Nutrition Index for the Evaluation of Corn Nitrogen Status. *Agron. J.* 100:1264-1273.
- Zubillaga, M.M., M. Carmona, A. Latorre, M. Falcon, y M.J. Barros. 2006. Estructura espacial de variables edáficas a nivel lote en Vedia Pcia de Buenos Aires. XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Salta, CD R: ISBN-10:987-21419-5-9.
- Zubillaga, M.M., y S. Urricariet. 2007. Caracterización de la variabilidad en la fertilidad de los suelos según la tecnología de fertilización. pp. 119-133. En Prystupa P. (ed) Tecnología de la fertilización de cultivos extensivos en la Región Pampeana. EFA. FAUBA. Buenos Aires, Argentina. ❖