



DENSIDAD DE SIEMBRA DE MAÍZ ASOCIADA A LA VARIABILIDAD ESPACIAL DEL SUELO

Martínez Bologna, G.^{1*}; Castro, S.²; Cerliani, C.¹; Balboa, G.¹; Naville, R.¹; Espósito, G.¹

¹Facultad de Agronomía y veterinaria (Universidad Nacional de Río Cuarto); ²Universidad Nacional de Colombia
* gmartinezbologna@gmail.com; Ruta Nacional 36, km 601, 5800-Río Cuarto, Córdoba, Argentina; 54-358-467650

INTRODUCCIÓN

En maíz, la densidad de siembra (D) es una de las prácticas de manejo que mayor impacto produce sobre el margen bruto, dado que condiciona tanto los costos directos como los rendimientos.

La escasa plasticidad vegetativa y reproductiva de este cultivo, el elevado umbral de crecimiento individual para fijar granos y la poca capacidad para compensar un bajo número de granos con mayor peso individual, hacen que el rendimiento del maíz sea muy inestable frente a cambios en la densidad y disponibilidad de recursos durante la floración (Andrade *et al.*, 1996). De este modo, es factible pensar que la respuesta a la densidad está condicionada por la disponibilidad de recursos.

En el sur de la provincia de Córdoba la disponibilidad de recursos se caracteriza por ser altamente variable, tanto espacial como temporalmente (Espósito *et al.*, 2012). Lógicamente este comportamiento se encuentra relacionado con la distribución estacional de las precipitaciones, su variación interanual (Seiler *et al.*, 2008) y aspectos del relieve y del suelo que condicionan el movimiento y almacenamiento del agua (Cisneros *et al.*, 2012). La variabilidad temporal estacional influye en el comportamiento de las distintas fechas de siembra (FS), mientras que la variabilidad espacial lleva a la necesidad de dividir el lote en zonas de igual comportamiento y está influenciada por atributos del relieve como el índice topográfico compuesto (CTI), el cual se relaciona con el movimiento superficial del agua y por ello con el rendimiento (Espósito, 2013). En Brasil, Horbe *et al.* (2013) encontraron que la dosificación variable de semillas por zonas de manejo (ZM) aumentó el retorno económico, debido a que se justificó reducir la D en la zona de baja producción y aumentarla en la de mayor producción, en comparación con la densidad media usada por el productor. Resultados similares fueron encontrados en la provincia de Córdoba por Bragachini *et al.* (2012). Actualmente, los estudios sobre densidad de siembra variable por ZM son escasos y no existen trabajos que incluyan atributos del relieve en la determinación de la densidad de siembra óptima en maíz.

El objetivo de este estudio fue elaborar modelos de respuesta para evaluar la conveniencia agronómica y económica de variar la densidad de siembra, tanto espacial (ya sea por ZM o CTI) como temporalmente (por FS).

MATERIALES Y MÉTODOS

El presente estudio se realizó en cercanías a la localidad de Vertientes (Córdoba) durante la campaña 2010-2011, comprendiendo dos lotes contiguos de un establecimiento. En cada uno de ellos se realizó una zonificación empleando información proveniente de mapas de rendimiento de maíz y soja de años anteriores, índice diferencial normalizado de vegetación (NDVI) y CTI. Para ello se utilizó el programa Management Zone Analyst (Fridgen *et al.*, 2004), el cual fracciona al campo en grupos naturales a partir de clasificaciones o número de zonas especificados mediante un análisis "cluster".

Posteriormente se realizó un ensayo en cada lote, donde se evaluaron cinco densidades de siembra en un rango de D comprendidas entre 24700 y 123810 pl ha⁻¹ utilizando dos fechas de siembra, una temprana (primeros días de Octubre (Te)) y otra tardía (primeros días de Diciembre (Ta)). El diseño experimental fue en franjas atravesando las ZM establecidas anteriormente.

Los datos de rendimiento fueron recolectados con monitor y georeferenciados mediante GPS. En cada lote se elaboraron mapas digitales de elevación del terreno mediante DGPS, los cuales fueron interpolados en una grilla regular de 9 m usando el comando TOPOGRID de ArcGIS (ESRI, 2007) para generar un mapa digital de elevación. A partir de este último, se calculó el CTI, empleando la ecuación $CTI = \ln(SCA/\tan(\text{slope}))$, donde SCA es el área de cuenca específica y "slope" es la pendiente, ambos obtenidos mediante la herramienta TAUDM de ArcGIS (Tarboton, 1997).

Con los mapas de rendimiento de los ensayos de densidad se procedió a estimar los parámetros de las ecuaciones 1, 2, y 3, las cuales relacionan el rendimiento con la D para todo el lote, el rendimiento con la D para cada ZM y el rendimiento con la D y el CTI respectivamente.

$$R = a + bD + cD^2 \quad [1]$$

$$R = a + bD + cD^2 + dZM + eZMD + fZMD^2 \quad [2]$$

$$R = a + bD + cD^2 + dCTI + eCTID \quad [3]$$

Dónde:

R: Rendimiento (kg ha⁻¹).

D: Densidad de siembra (pl ha⁻¹).

ZM: Zonas de manejo asignadas como variables dummy.

CTI: Índice topográfico compuesto.

a, b, c, d, e y f: Parámetros de las ecuaciones.

Los parámetros fueron estimados utilizando estadística espacial mediante el programa GeoDa^(TM) (Anselin, 2011), ya que Bongiovanni (2002) menciona que los datos provenientes de un monitor de rendimiento presentan autocorrelación espacial y heterocedasticidad (los errores no son independientes y la varianza de los mismos no es homogénea, respectivamente).

El análisis estadístico incluye el modelo de error espacial (ecuación 4):

$$Y = X\beta + \varepsilon \quad [4]$$

Donde X y β , son la matriz de incidencia y el vector de parámetros, ε es el vector de errores aleatorios que asume la forma $\lambda W\varepsilon + \mu$, donde μ es el error de muestreo aleatorio con una especificación auto regresiva espacial (SAR) y coeficiente autoregresivo λ . La matriz de ponderadores espaciales (W) tiene una estructura Queen de 8 vecinos.

Las ZM fueron incluidas a la ecuación 2 mediante variables dummy (parámetros d , e y f del modelo 2), con la restricción de que su sumatoria debe ser igual a cero; lo que permite que la estimación del efecto de las diferentes ZM y de los términos de la interacción con la D puedan ser comparados con la respuesta media (Bongiovanni, 2002).

Una vez calibrados los modelos, se optimizaron tradicionalmente las ecuaciones 1, 2 y 3 según Dillon & Anderson (1990), a los fines de establecer la densidad óptima económica (DOE) para cada caso (ecuaciones 5 y 6 respectivamente). Dado el uso de variables dummy, la optimización de 1 y 2 resulta en una única ecuación (5).

$$DOE = \frac{\frac{PS}{PM} - b}{2c} \quad [5]$$

$$DOE = \frac{\frac{PS}{PM} - b - eCTI}{2c} \quad [6]$$

Dónde:

PS: Precio de la semilla individual de maíz (U\$S semilla⁻¹).

PM: Precio del maíz (U\$S kg⁻¹).

Los precios utilizados de maíz y semillas fueron de 0,112 U\$S kg⁻¹ y 141,8 U\$S por bolsa respectivamente, con un contenido de 80000 semillas por bolsa. El precio del maíz fue tomado en dólares estadounidenses al 3 de octubre del 2010 como precio futuro de venta en el mercado físico de abril del 2011 (154,8 USD Tn⁻¹) según la bolsa de cereales de Rosario. Se consideró un gasto de comercialización y flete del 22 %. El precio de la semilla utilizado corresponde al valor del híbrido DK 190 MGRR tomado en dólares al 3 de octubre del 2011 según el mercado de Río Cuarto.

Por último, se evaluó la conveniencia económica de realizar dosificación variable (ya sea por ZM o según el CTI) con respecto a la dosificación uniforme. Para ello se analizó la diferencia de retorno a la densidad utilizando la DOE recomendada por cada modelo y evaluada en la ecuación de mejor ajuste.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Zonificación.

En cada lote se establecieron dos ZM, alta producción (AP) y baja producción (BP) (Tabla 1).

Tabla 1. Aspectos productivos de las ZM de cada lote.

| | Lote 6 | | | | Lote 5 | | | |
|---|--------|------|------|------|--------|-------|------|------|
| | AP | | BP | | AP | | BP | |
| | Te | Ta | Te | Ta | Te | Ta | Te | Ta |
| Rendimiento medio (kg ha⁻¹) | 9637 | 9057 | 7381 | 7368 | 10967 | 10923 | 9202 | 7971 |
| Proporción del lote | 0,49 | 0,49 | 0,51 | 0,51 | 0,45 | 0,45 | 0,55 | 0,55 |

AP, alta productividad. BP, baja productividad. Te, siembra temprana. Ta, siembra tardía

Cabe destacar que durante la realización de esta experiencia la oferta hídrica, considerando solamente las precipitaciones, desde septiembre a marzo fue muy similar a la media histórica (707 mm, campaña 2010/11, con un valor medio para el periodo 1993/2011 de 723 mm), con una adecuada distribución mensual. Esta condición explicaría los niveles de rendimiento obtenidos.

De acuerdo a Espósito *et al.* (2012) el suelo de la ZM AP es un Haplustol údico con textura franca limosa a franca, relieve normal, escurrimiento medio y permeabilidad moderada, mientras que el de la ZM BP es un Haplustol éntico con textura franca arenosa, relieve normal, escurrimiento rápido y permeabilidad moderadamente rápida.

A modo de ejemplo en la Figura 1 se visualiza el ensayo (superior) y el mapa de rendimiento (inferior) de la FS temprana del lote 6, atravesando las 2 ZM. En el mapa de rendimiento se puede inferir la influencia de cada ZM sobre el rendimiento de maíz y su interacción con la D.

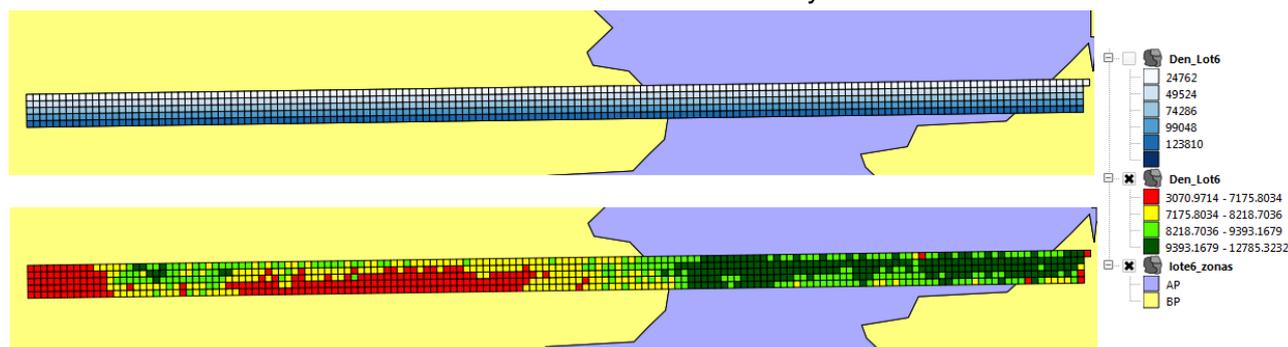


Figura 1. Mapa de franjas con diferentes densidades de siembra (superior) y mapa de rendimiento (inferior) del ensayo correspondiente al lote 6, con sus respectivas ZM, sembrado los primeros días de Octubre.

Calibración de los modelos.

En ambos lotes y FS se detectó efecto de la D sobre el rendimiento (Tabla 2). En el lote 6 éste efecto varió entre ZM sólo en Te, mientras que en el lote 5 los corrimientos fueron significativos para ambas fechas de siembra, aunque en Ta éstos fueron muy pequeños (Tabla 3). Resultados similares fueron encontrados por Espósito (2013), evaluando la respuesta al agregado de nitrógeno en la misma región y con un modelo similar.

En la ecuación 3 no se detectaron efectos aditivos del CTI ni de su interacción con la D (Tabla 4), lo que difiere con lo hallado por Espósito (2013) evaluando la respuesta al agregado de nitrógeno, por lo tanto se deduce que es factible esperar un comportamiento diferente en la evaluación de la densidad de siembra variable en años húmedos o normales

Tabla 2. Análisis estadístico de la ecuación 1.

| | Lote 5 | | | | Lote 6 | | | |
|-----------------------|-----------|----|-----------|----|-----------|----|-----------|----|
| | Te | | Ta | | Te | | Ta | |
| | Parámetro | SE | Parámetro | SE | Parámetro | SE | Parámetro | SE |
| A | 7734 | ** | 414,7 | ns | 7846,927 | ** | 258,4 | Ns |
| bD | 0,052 | ** | 0,257 | ** | 0,0170752 | ** | 0,237 | ** |
| cD² | -3,06E-7 | ** | -1,47E-6 | ** | -1,44E-7 | ** | -1,50E-6 | ** |
| Lambda | 0,749 | ** | 0,72 | ** | 0,9 | ** | 0,82 | ** |
| R² | 0,548 | | 0,832 | | 0,863 | | 0,783 | |

a, b y c, parámetros medios de la ecuación 1. d, e y f, corrimiento de los parámetros para cada zona de manejo. SE, nivel de significancia estadística. * y **, diferencias estadísticas al 5 y al 1 % de probabilidad. ns, no significativo. Lambda, coeficiente auto regresivo espacial (Anselin *et al.*, 2011).

Tabla 3. Análisis estadístico de la ecuación 2.

| | Lote 5 | | | | Lote 6 | | | |
|-------------------------|-----------|----|-------------|----|------------|----|-----------|----|
| | Te | | Ta | | Te | | Ta | |
| | Parámetro | SE | Parámetro | SE | Parámetro | SE | Parámetro | SE |
| A | 7718,29 | ** | 894 | ** | 7605,96 | ** | 499 | Ns |
| bD | 0,06 | ** | 0,2455827 | ** | 0,02690156 | ** | 0,2366553 | ** |
| cD² | -3,47E-07 | ** | -1,4E-06 | ** | -1,96E-07 | ** | -1,5E-06 | ** |
| dZM | -70,99 | ns | 1012,635 | ** | -1087,36 | ** | -131,93 | Ns |
| eZMD | 0,02 | ** | -0,02861826 | ** | 0,03857265 | ** | 0,01042 | Ns |
| fZMD² | -9,75E-08 | ** | 2,13E-07 | ** | -2,00E-07 | ** | -2,10E-08 | Ns |
| Lambda | 0,61 | ** | 0,686 | ** | 0,889 | ** | 0,76 | ** |
| R² | 0,56 | | 0,832 | | 0,877 | | 0,781 | |

a, b y c, parámetros medios de la ecuación 1. d, e y f, corrimiento de los parámetros para cada zona de manejo. SE, nivel de significancia estadística. * y **, diferencias estadísticas al 5 y al 1 % de probabilidad. ns, no significativo. Lambda, coeficiente auto regresivo espacial (Anselin *et al.*, 2011).

Tabla 4. Análisis estadístico de la ecuación 3.

| | Lote 5 | | | | Lote 6 | | | |
|-----------------------|-----------|----|-----------|----|-----------|----|-----------|----|
| | Te | | Ta | | Te | | Ta | |
| | Parámetro | SE | Parámetro | SE | Parámetro | SE | Parámetro | SE |
| a | 8381,2 | ** | -357,6 | ns | 7527,9 | ** | 322,86 | Ns |
| bD | 0,0436 | ** | 0,2653 | ** | 0,0152 | * | 0,22 | ** |
| cD² | -3,06E-07 | ** | -1,48 | ** | -1,43E-07 | ** | -1,50E-06 | ** |
| dCTI | -78,04 | ns | 93,652 | ns | 38 | ns | 2,328 | Ns |
| eCTID | 0,001 | ns | -0,00091 | ns | 0,00015 | ns | 0,0017 | Ns |
| Lambda | 0,749 | ** | 0,72 | ** | 0,897 | ** | 0,8 | ** |
| R² | 0,549 | | 0,832 | | 0,863 | | 0,783 | |

a, b, c, d y e parámetros de la ecuación 2. SE, nivel de significancia estadística. * y **, diferencias estadísticas al 5 y al 1 % de probabilidad. ns, no significativo. Lambda, coeficiente auto regresivo espacial (Anselin *et al.*, 2011).

Optimización y análisis económico.

Como promedio de ambos lotes, la DOE resultó superior en Ta, disminuyendo 24187 pl ha⁻¹ en la siembra temprana. De la misma manera la DOE se redujo en 16271 pl ha⁻¹ en las zonas de BP (Figura 2), en concordancia con Horbe *et al.* (2013) y Bragachini *et al.* (2012). Resultados similares fueron hallados por Espósito *et al.* (2012) con dosificación variable de nitrógeno, quienes mencionan que la variabilidad temporal asociada a la fecha de siembra es mayor que la variabilidad espacial. La ecuación 2 no fue optimizada ya que el CTI no se correlacionó significativamente con el rendimiento.

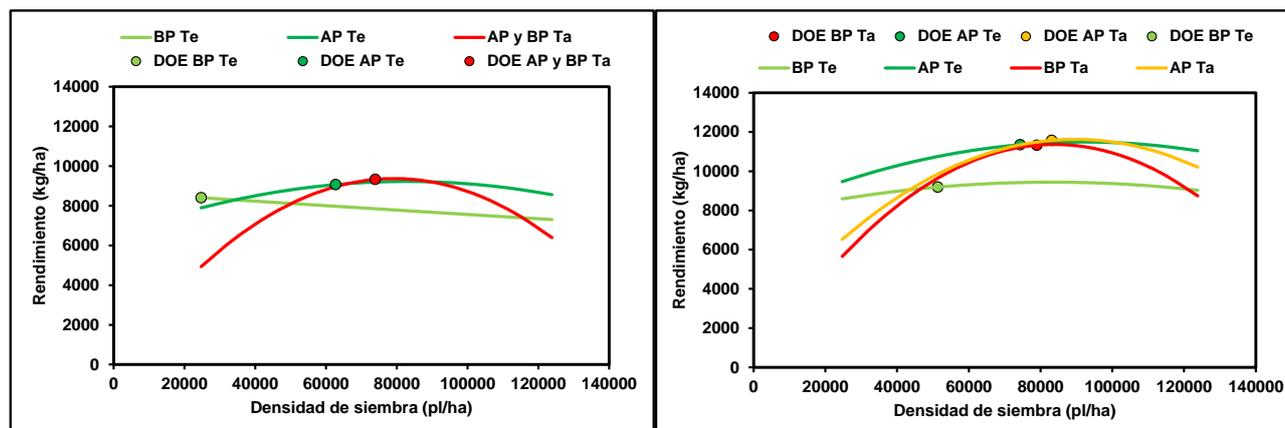


Figura 2. Relación entre R y D para las 2 ZM del lote 6 (izquierda) y lote 5 (derecha).

Los resultados del análisis económico indican que la diferencia de retornos a la densidad de siembra por realizar dosificación variable de semillas, en comparación con el manejo uniforme, es nula en Ta para ambos lotes y en Te es de 6,5 y 31,3 U\$S ha⁻¹ para el lote 5 y 6 respectivamente.

Estos valores superan el costo de indiferencia de la dosificación variable (4 U\$S ha⁻¹) mencionado por Bragachini *et al.* (2009).

CONCLUSIÓN

La respuesta del rendimiento a la densidad no evidenció una mayor sensibilidad espacial que la incluida en las zonas de manejo, motivo por el cual resulta suficiente con variar la D entre ZM.

Para la campaña en la que se realizaron los ensayos, conviene económicamente variar la D sólo en siembras tempranas, mientras que en siembras tardías las distintas ZM responden de manera similar.

Las conclusiones y los parámetros obtenidos sólo son válidos para la oferta hídrica del año en que se realizó el ensayo. No obstante, sería necesario calibrar las ecuaciones propuestas en un amplio rango de condiciones ambientales, a los fines de disponer de modelos de respuesta sitio específica sensibles a la variabilidad temporal interanual.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a los Ing. Agr. Pablo Martínez y José Galván por su apoyo incondicional para el desarrollo de este trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

- Andrade, F; A Cirilo; S Uhart, & M Otegui (eds.). 1996. *Ecofisiología del Cultivo de Maíz*. Ed: La Barrosa.
- Anselin, L. 2011. OpenGeoDa, A software program for the analysis of spatial data, Version 0.9.9.6. Spatial analysis laboratory, Department of Agricultural and Consumer Economics, University of Illinois, Urbana-Champaign, Urbana, IL (EUA). <http://geodacenter.asu.edu/>
- Bragachini, M; A Méndez; F Scaramuzza; JP Vélez & D Villarroel. (2009). *Determinación de Viabilidad Económica de la Tecnología de Dosis Variable de Insumos en Maíz*. INTA Manfredi. Proyecto Agricultura de Precisión. Manfredi, Córdoba, Argentina.
- Bragachini, M; A Méndez; F Scaramuzza; D Villarroel & JP Vélez. 2012. *Ensayo de larga duración de manejo de insumos en forma variable*. INTA. En: <http://inta.gob.ar/documentos/ensayo-de-larga-duracion-de-manejo-de-insumos-en-forma-variable/>. Consultado el 21/01/2014.
- Bongiovanni, R. 2002. *A spatial econometric approach to the economics of site-specific nitrogen management and corn production*. PhD Thesis, Department of Agricultural Economics, Purdue University, West Lafayette, IN.
- Cisneros, J; C Cholaky; A Cantero Gutiérrez; J González; M Reynero; A Diez & L Bergesio (eds.). 2012. *Erosión hídrica: principios y técnicas de manejo*. 1a ed. Río Cuarto: UniRío editora:
- Dillon, J & J Anderson (eds). 1990. *The analysis of response in crop and livestock production*. Pergamon Press, New York (EUA), 250 p.
- Espósito, G; G Balboa; C Castillo; R Balboa & A Degioanni. 2012. *Fecha de siembra y fertilización variable de maíz sobre Haplustoles de Córdoba*. XIX Congreso Latinoamericano y XXIII Congreso Argentino y Latino Americano de la Ciencia del Suelo. Mar del Plata. Buenos Aires. Argentina.
- Espósito, G. 2013. *Análisis de la variabilidad espacio-temporal de la respuesta al nitrógeno en maíz mediante un modelo econométrico mixto espacial (MEME)*. Tesis Doctoral. Escuela de posgrado, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Córdoba.
- ESRI, 2007. ArcMap ver. 9.2. ESRI, Redlands, CA, USA.
- Fridgen J; N Kitchen; K Sudduth; S Drummond; W Wiebold & C Fraisse. 2004. *Management zone analyst (MZA): software for subfield management zone delineation*. Agron. J. 96: 100-108.
- Horbe TAN; TJC Amado; AO Ferreira & PJ Alba. 2013. *Optimization of corn plant population according to management zones in Southern Brazil*. Precision Agric. 14:450–465
- Seiler R; AM Wehbe; M Vinocur; EI Tarasconi. 2008. *Efectos del cambio climático y de la variabilidad climática sobre la producción agropecuaria: impactos y adaptación*. XII Reunión Argentina de Agrometeorología, 8 al 10 de octubre de 2008. San Salvador de Jujuy – Argentina.
- Tarboton D. 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.