

UNIVERSIDAD NACIONAL DE RÍO CUARTO
FACULTAD DE AGRONOMÍA Y VETERINARIA

Trabajo Final presentado para optar al Grado de Ingeniero Agrónomo

Modalidad: Proyecto

**Estudio de la densidad de siembra óptima económica de maíz (*Zea mays*)
ajustada por zonas de manejo**

María Fernanda Gómez

DNI 34043565

Director: Ing. Agr. Dr. Gabriel Espósito

Co-Directora: Ing. Agr. Cecilia Cerliani

Río Cuarto-Córdoba

Julio/2016

UNIVERSIDAD NACIONAL DE RÍO CUARTO
FACULTAD DE AGRONOMÍA Y VETERINARIA

CERTIFICADO DE APROBACIÓN

**Estudio de la densidad de siembra óptima económica de maíz (*Zea mays*)
ajustada por zonas de manejo**

María Fernanda Gómez

DNI 34043565

Director: Ing. Agr. Dr. Gabriel Espósito

Co-Directora: Ing. Agr. Cecilia Cerliani

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

Ing. Agr. Guillermo Peiretti _____

Ing. Agr. Daniel Agüero _____

Ing. Agr. Dr. Gabriel Espósito _____

Fecha de Presentación: ____/____/____.

Aprobado por Secretaría Académica: ____/____/____.

Secretario Académico

Agradecimientos

A mi familia por el apoyo y paciencia inagotables e incondicionales.

A mis amigos, por estar siempre.

A mis profesores, por proveerme herramientas teóricas para la vida profesional y enseñanzas de vida invaluable.

A todos quienes colaboraron con su tiempo y esfuerzo, desinteresadamente en la siembra, raleo, cosecha y procesamiento de datos.

A la cátedra de cereales, por incluirme siempre tan gentilmente y responder mis innumerables dudas.

A mi co-directora, por el apoyo y predisposición constantes en este y otros proyectos realizados.

Finalmente, a mi director y correctores, por la celeridad y amabilidad.

INDICE GENERAL

Agradecimientos.....	III
ÍNDICE DE TABLAS.....	V
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VI
ÍNDICE DE ECUACIONES.....	VII
RESUMEN.....	VIII
SUMMARY.....	IX
INTRODUCCIÓN.....	1
Caracterización del problema.....	1
Antecedentes.....	4
Importancia del trabajo.....	5
HIPÓTESIS.....	6
OBJETIVO GENERAL.....	6
OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	6
MATERIALES Y METODOS.....	7
Descripción del área en estudio.....	7
Zonificación.....	8
Diseño experimental y tratamientos.....	9
Procesamiento del mapa de rendimiento.....	10
Análisis Estadístico.....	13
Función de producción y análisis económico.....	15
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	17
Zonificación.....	17
Determinación la densidad óptima económica de siembra.....	21
Evaluación de las diferencias de retorno económico a la densidad.....	26
CONCLUSIÓN.....	29
BIBLIOGRAFIA.....	30

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Análisis estadístico para los modelos OLS y SAR sin ZM para el híbrido DK 692 VT 3P.....	21
Tabla 2. Análisis estadístico para los modelos OLS y SAR con ZM para el híbrido DK 692 VT 3P.....	22
Tabla 3. Análisis estadístico para los modelos OLS y SAR sin ZM para el híbrido DK 7210 VT 3P.....	23
Tabla 4. Análisis estadístico para los modelos OLS y SAR con ZM para el híbrido DK 7210 VT 3P.....	24
Tabla 5. Función de respuesta del maíz a la densidad de siembra para el híbrido DK 692 VT 3P.	25
Tabla 6. Función de respuesta del maíz a la densidad de siembra para el híbrido DK 7210 VT 3P.....	25
Tabla 7. Diferencias de retorno económico a la densidad para el híbrido DK 692 VT 3P.	26
Tabla 8. Diferencias de retorno económico a la densidad para el híbrido DK 7210 VT 3P.	26
Tabla 9. Comparación entre la optimización económica de la densidad de siembra sin ZM y la densidad productor para el híbrido DK 692 VT 3P.....	27
Tabla 10. Comparación entre la optimización económica de la densidad de siembra sin ZM y la densidad productor para el híbrido DK 7210 VT 3P.....	27

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Temperaturas máximas, mínimas y precipitaciones, para la campaña 2013/14 en Pueblo Italiano.....	8
Figura 2. Mapa del lote donde se realizó el ensayo, con las zonas delimitadas y franjas del ensayo atravesando ambas zonas.....	9
Figura 3. Mapa de las densidades de siembra evaluadas para ambos híbridos.	10
Figura 4. Franjas de densidad correspondientes a cada tratamiento y su ubicación dentro del lote del ensayo, cruzando zonas de manejo.....	12
Figura 5. Matriz “Rook” de ponderadores espaciales	14
Figura 6. Representación gráfica de los índices NCE y FPI.	17
Figura 7. Foto satelital del lote en estudio con tipos de suelo.....	19

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Intervalo Intercuartil.....	11
Ecuación 2. Modelo SAR.....	14
Ecuación 3. Error espacial.....	14
Ecuación 4. Respuesta del maíz a la Densidad de siembra.....	15
Ecuación 5. Optimización tradicional de las funciones, para obtener DOES.....	15
Ecuación 6. Primera derivada de la ecuación 5, para obtener DOES.....	15

RESUMEN

Determinar la densidad óptima económica de siembra (DOES) constituye una práctica central para el cultivo de maíz. Ésta depende de la oferta de recursos, que varían espacialmente en cada región, e incluso a escala de lote. El objetivo de este trabajo fue evaluar la incidencia de la DOES de dos híbridos de maíz y su interacción con las zonas de manejo (ZM) sobre la productividad y el retorno económico de la densidad variable en el Sur de Córdoba. Para determinar las ZM, se dispuso de tres mapas de rendimiento de años anteriores, procesados mediante Quantum Gis 2.8.1-Wien y con posterior análisis espacial de conglomerados con el software Management Zone Analyst (MZA). Se realizó un análisis de regresión mediante OpenGeoDa 1.6.7.9, utilizando Econometría Espacial. Se corroboró la existencia de dos zonas, mediante la presencia de distintos tipos de suelo distintos en cada zona. Se realizó una optimización tradicional de funciones, se calculó la DOES para las dos zonas y los dos híbridos evaluados. En estas condiciones, no se encontró variación de respuesta en los rendimientos para distintas ZM, no hubo interacción entre densidad de siembra y ZM en los análisis de regresión. Se estableció una variación de DOES entre híbridos, siendo mayor la DOES para DK 7210 VT 3P que para DK 692 VT 3P. No se halló una diferencia de retorno económico a la densidad variable por ZM, si hubo una diferencia de retorno económico a favor de la optimización económica para el cálculo de DOES. Se concluyó que es probable que la respuesta de la densidad de siembra a las ZM sea dependiente de la pluviometría del año en estudio, siendo necesario repetir la misma experiencia en diferentes años para corroborarlo. Independientemente, la optimización económica es una herramienta valiosa, aún cuando las ZM no interaccionan con la densidad de siembra, existiendo variación en los resultados económicos realizando ésta práctica.

Palabras clave: densidad óptima de siembra, zonas de manejo, optimización económica, agricultura de precisión.

SUMMARY

Title: Study of the economic optimum sowing density of maize (*Zea mays*) adjusted by management zones.

Finding the economic optimum sowing density (EOSD) is a central practice for cultivation of maize. This depends on the supply of resources, which vary spatially in each region, and even field scale. The aim of this study was to evaluate the EOSD for two maize hybrids and their interaction with the management zones (MZ) on productivity and economic returns of the variable rate density in southern Cordoba, Argentina. To make the MZ, were used three yield maps of previous years, processed by Quantum Gis-Wien 2.8.1 and later spatial cluster analysis with Zone Management Analyst (MZA) software. A regression analysis was performed by OpenGeoDa 1.6.7.9, using Spatial Econometrics. The existence of two MZ was confirmed by the presence of different types of soil in each zone. A traditional function optimization was performed, the EOSD was calculated for the two MZ and the two hybrids evaluated. Under these conditions, it wasn't found a change of yields in response to different MZ, there was no interaction between sowing density and MZ in the regression analyzes. There was a variation between hybrids EOSD, being higher EOSD for DK 7210 VT 3P than for DK 692 VT 3P. It wasn't found difference of economic return to the variable rate density MZ, but there was a difference of economic return for economic optimization on calculating EOSD. It was concluded that it is likely that the response of stand density to MZ is dependent on the rainfall of the year in study, being necessary to repeat the same experience in different years to confirm this. Regardless, economic optimization is a valuable tool, even when the MZ not interact with sowing density, with variations in economic performance performing this practice.

Keywords: optimum sowing density, management zones, economic optimization, precision agriculture.

INTRODUCCIÓN

Caracterización del problema

La expansión agrícola ha influido sobre el clima, los ciclos del agua, del carbono y del nitrógeno en la biósfera, incrementando las emisiones de gases causantes del efecto invernadero y afectando la biodiversidad. Esta expansión ha sido impulsada por una demanda creciente de alimentos y fibras, por lo tanto el aumento de la superficie agrícola aparece como un proceso ineludible (Paruelo *et al.* 2005).

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

El principio fundamental para el desarrollo de una agricultura sostenible requiere evitar al máximo los cambios negativos en los recursos naturales de un país. Esto implica no solo el mantenimiento y manejo apropiado de los cultivos sino un apropiado uso de la tierra que garantice la permanencia del recurso para las futuras generaciones. La Agricultura de Precisión, entendida como el manejo variable de insumos según la variabilidad espacial de la productividad, se basa en el concepto de manejo sostenible de la tierra y persigue incrementar la eficiencia en los procesos agrícolas. Además, es una herramienta de manejo de sistemas de producción que comprende una serie de tácticas y estrategias que se podrían utilizar para optimizar los sistemas de cultivos y maximizar los volúmenes de cosecha (Emmen, 2004).

El maíz es de gran importancia económica a nivel mundial ya sea como alimento humano, para el ganado o como materia prima de productos industriales. La diversidad de los ambientes bajo los cuales es cultivado es mucho mayor que la de cualquier otro cultivo. Habiéndose originado y evolucionado en la zona tropical, hoy se cultiva en latitudes tan alejadas de los trópicos como Canadá, Rusia, Argentina y Chile (Paliwal, 2001).

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

Las previsiones de la FAO (2016) sitúan la producción mundial de cereales en 2016 en unos 2 543 millones de toneladas, siendo el maíz es el segundo cereal, después del trigo, en producción total estimada con 1011,77 millones de toneladas (USDA, 2016). En Argentina, la producción total de maíz del año 2016 se calcula en 25 millones de toneladas, con un rinde promedio de 76,7 qq ha⁻¹, y un área sembrada de alrededor 4,26 millones de hectáreas, distribuida en las provincias de Buenos Aires, Córdoba, Santa Fe, La Pampa, Entre Ríos, Santiago del Estero y Chaco, (BCR, 2016) exponiéndose el cultivo a muy diferentes ambientes, generando la necesidad en consecuencia de realizar diferentes prácticas de manejo para cada situación particular.

El maíz es, sin duda, una de las especies cultivadas que ofrece mayor respuesta a la aplicación de tecnología. Entre los factores que inciden sobre su rendimiento algunos tienen carácter definitorio y, por lo general están asociados a decisiones vinculadas a la estructura del cultivo. Entre estos factores la elección de un determinado híbrido (su fenología y su comportamiento agronómico) es uno de los más importantes, tanto por su influencia sobre el rendimiento potencial, el resultado y el manejo del cultivo, como su participación en los costos directos de producción (Satorre, 2008).

La densidad de plantas es producto del número de semillas sembradas y la proporción de ellas que logra establecerse. El manejo de la densidad de plantas es una de las herramientas más eficientes para lograr doseles que intercepten el máximo de radiación incidente y produzcan altas tasas de crecimiento, especialmente durante el período crítico (Andrade y Sadras, 2000).

La densidad de siembra es una de las prácticas de manejo que determina la capacidad del cultivo de capturar recursos, pudiendo llegar a afectar de manera importante la utilización de la radiación solar, del agua y los nutrientes (Satorre, 1999).

El cultivo de maíz presenta poca plasticidad foliar y reproductiva (Gardner *et al.*, 1985), y no posee gran capacidad de compensar un bajo número de plantas, por ello la densidad de plantas es más crítica en el cultivo de maíz que trigo, soja y girasol (Andrade y Sadras, 2000). Cuando los recursos por planta disminuyen, en densidades supra óptimas se dan drásticas caídas en el número de granos superficie, debido a que la espiga es un destino axilar y, por lo tanto, de prioridad secundaria en la planta (Tollenaar, 1977).

El rendimiento por unidad de área del maíz presenta una marcada respuesta parabólica al aumento de la densidad con una disminución de la producción individual, que puede llegar a ser nula en condiciones de elevada densidad de siembra. Las variables de manejo, como por ejemplo fecha de siembra y fertilización, y la disponibilidad de recursos (agua y nitrógeno fundamentalmente) modifican fuertemente la respuesta a la densidad en este cultivo. Este efecto depende también de los híbridos o variedades considerados (Kruk *et al.*, 2003).

Las condiciones climáticas durante el período de crecimiento, en especial alrededor de floración, junto con variables de sitio como la productividad del suelo y la disponibilidad de nutrientes, afectan el rendimiento alcanzable (Dardanelli *et al.*, 2003).

El ajuste de la densidad de plantas a la disponibilidad de recursos para el crecimiento del cultivo permitiría reducir el estrés durante el período más sensible permitiendo optimizar el rendimiento en grano. La variabilidad temporal estacional influye en el comportamiento de las distintas fechas de siembra, 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, el cual se relaciona con el movimiento superficial del agua y por ello con el rendimiento (Espósito, 2013).

En la región pampeana, la densidad de siembra aumentó entre un 30 y un 67% y llevó las densidades buscadas a valores de entre 70.000 y 80.000 plantas por hectárea en las principales zonas productivas. Cambios en el componente ecológico (por ejemplo, incremento de las precipitaciones estacionales) y tecnológicos (por ejemplo, difusión de la siembra directa y mayor uso de fertilizantes), junto con el aumento de la tolerancia de los híbridos modernos ante cambios en la densidad habrían contribuido al ajuste en la estructura de los cultivos. (Andrade y Abbate, 2005).

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). 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). En este sentido, la heterogeneidad de ambientes encontrados en el sur de Córdoba obligaría a la necesidad de adecuar las tecnologías de insumos y procesos para optimizar el manejo del cultivo de maíz. (Videla Mensegue *et al.*, 2014)

Como la densidad óptima de siembra en maíz depende de la oferta de recursos ambientales, los cuales varían espacialmente en función de las características naturales de cada región agrícola, resulta difícil realizar recomendaciones de densidad óptima a escala de lote. Por este motivo surge la agricultura de precisión (AP) como una herramienta capaz de adaptar las decisiones de manejo como la densidad de siembra a la variabilidad espacial en aquellas regiones que manifiesten variabilidad productiva intra lote. (Mantovani *et al.*, 2006).

La AP es una tecnología basada en el posicionamiento satelital; la cual consiste en obtener datos georeferenciados de los lotes para un mejor conocimiento de la variabilidad dentro de los mismos. A su vez, se apunta a determinar las causas de dicha variabilidad (por topografía, génesis de suelo, historia de manejo, etc.), a través de la recolección y evaluación de mapas de rendimiento, mapas topográficos, imágenes satelitales, experiencias anteriores, o mapas de suelo de áreas homogéneas, entre otros datos. A partir de estas capas de información espacial, es posible identificar dentro de un lote sitios con

potencialidad de rendimiento muy diferentes y bien definidos lo que podría determinar diferentes requerimientos de manejo de los cultivos (Méndez *et al.*, 2013).

La estrategia general consiste en la identificación de zonas que puedan ser delineadas, agrupadas y manejadas similarmente a los efectos de optimizar la aplicación de insumos y las medidas de manejo para maximizar los ingresos (Roel y Terra, 2006).

Estas zonas de gestión, o zonas de manejo, son subregiones dentro de los lotes, que poseen atributos homogéneos en condiciones de terreno, topografía y/o suelo, y por ende, pueden conducir a similares resultados, productivos o eficiencia en el uso de los insumos. Por este motivo, se recomienda considerar esta variación entre zonas de manejo al momento de ajustar técnicas productivas o empleo de insumos (Shanahan *et al.*, 2004).

Una vez identificadas, se define entonces, un ciclo de prácticas agrícolas orientado a sustituir la recomendación habitual de insumos en base a valores promedio, como ocurre en la agricultura tradicional, por un manejo localizado que contemple las variaciones del rendimiento. Se realiza entonces una optimización en el uso de los insumos porque deposita en el suelo la cantidad de semilla y/o fertilizante que cada zona requiere. También se puede precisar espacialmente el control de malezas, plagas y enfermedades a los efectos de minimizar el impacto ambiental del uso de fitosanitarios (Bragachini, 2000; Mantovani *et al.*, 2006).

Las zonas de manejo no son necesariamente estáticas y posiblemente varíen ante cambios que surgen en el manejo del lote a través de las campañas. Por ello, los mapas de variabilidad y la clasificación de los sitios en zonas constituyen una práctica iterativa constantemente evaluada y ajustada, por lo que es importante utilizar los métodos estadísticos más apropiados para la delimitación de zonas. (Córdoba *et al.* 2016)

Antecedentes

Horbe *et al.*, (2013) en Brasil, determinaron que el rendimiento de maíz fue afectado por la interacción entre la densidad y la zona de manejo, y que el ajuste de la densidad de plantas en la distintas zonas resultó en incrementos de rendimiento y del retorno económico parcial en relación con la densidad uniforme. Bullock *et al.* (1998) también observaron diferencias en la densidad óptima económica por zonas de manejo, indicando que la conveniencia económica de la siembra a densidad variable depende del costo asociado con la caracterización de la variabilidad.

En Argentina, Ross (2012) concluyó que las exigencias a la calidad de ambiente del cultivo de maíz son determinantes, provocando fuertes cambios de productividad. En ambientes más limitantes, el rendimiento se relacionó altamente con la profundidad de tosca y en ambientes sin limitaciones con el índice de ambiente. No obstante, la densidad de plantas resultó una herramienta de manejo muy

interesante, que determinó la posibilidad de realizar el cultivo en zonas marginales cuando se ajusta adecuadamente a cada ambiente.

Similares resultados fueron obtenidos por Bragachini *et al.* (2012) quien durante 6 campañas agrícolas (2003/2004 hasta 2010/2011) evaluó el efecto de la dosis fija versus dosis variable para nutrientes y semillas, en los cultivos de soja y maíz, encontrando además que el Margen Neto fue mayor para ambos cultivos cuando se utilizó dosis variable, siendo más importantes los resultados encontrados en maíz.

Por su parte, Martínez Bologna *et al.* (2014) encontraron que para la campaña 2010/2011, fue conveniente económicamente variar la densidad sólo en siembras tempranas, mientras que en siembras tardías las distintas ZM respondieron de manera similar, atribuyendo estos resultados a las características hídricas de la campaña, las cuales fueron más beneficiosas para la fecha de siembra tardía.

Si bien, varios autores indican que es conveniente modificar la densidad de siembra en maíz por zonas de manejo, no ha sido reportado claramente cuál es la interacción entre híbrido empleado y su densidad óptima por ZM.

Importancia del trabajo

Este trabajo tesis se encuadra dentro de un proyecto de investigación llevado adelante por la Cátedra de Producción de Cereales de la FAV-UNRC, cuyo objetivo es generar información local proveniente de ensayos a campo, con el fin de estudiar la relación entre ZM y DOES y 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.

HIPÓTESIS

La densidad óptima de siembra de maíz depende del híbrido empleado e interacciona con las zonas de manejo y su correcto ajuste genera un mayor retorno económico.

OBJETIVO GENERAL

Evaluar la respuesta a la densidad óptima de siembra de dos híbridos de maíz y su interacción con las zonas de manejo sobre la productividad y el retorno económico de la densidad variable en un predio al SO de la localidad de Pueblo Italiano, en el Sur de Córdoba, Argentina.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Zonificar un lote en un establecimiento agropecuario al SO de Pueblo Italiano, en el Sur de Córdoba, a partir de mapas de rendimiento de años anteriores, mapas de conductividad eléctrica aparente, mapa digital de elevación y muestreo dirigido del suelo.
- Determinar la densidad óptima económica de siembra de dos híbridos de maíz según zonas de manejo en el predio citado.
- Evaluar las diferencias de retorno económico entre la práctica de densidad variable por zona de manejo y la densidad fija para cada híbrido.

MATERIALES Y METODOS

Descripción del área en estudio

El ensayo se realizó durante la campaña agrícola 2013/2014 en el establecimiento agropecuario “Don Miguel” ubicado a 13 km al suroeste de la localidad de Pueblo Italiano (33° 52' 44" LS, 62° 57' 43" LO), Córdoba.

El área de estudio estuvo comprendida dentro de la denominada llanura eólica de relictos medanosos estabilizados. Esta llanura eólica está constituida por materiales franco arenosos, originándose en consecuencia suelos con escasa diferenciación de horizontes y moderada retención de humedad. En los sectores de bajos se vinculan suelos afectados por la salinidad y/o alcalinidad. El relieve general dominante es casi plano, con pendientes inferiores al 1% (INTA, 1986).

Durante el periodo de crecimiento del cultivo del ensayo se registró una temperatura media de 23 °C, registrándose una temperatura mínima absoluta de 5,9 °C y máxima absoluta de 40,9 °C (Figura 1). El periodo libre de heladas es de 223 días (desde 13 de septiembre a 16 de mayo). El régimen pluviométrico es monzónico (80% de las lluvias se concentran en el semestre más cálido, Octubre a Marzo), registrándose una precipitación media anual de 790 mm, durante el crecimiento del cultivo evaluado se registraron 525 mm, cuya distribución puede observarse en la Figura 1 (Bolsa de Comercio de Córdoba, 2015).

Entre los últimos quince días del mes de diciembre y los primeros quince días de enero, se registró un leve estrés hídrico, sin mayores consecuencias. En general las lluvias ocurrieron regularmente. Las precipitaciones durante la campaña fueron mayores de lo normal para la zona. En cuanto a la temperatura, la misma se mantuvo en valores normales para la zona, registrándose días de estrés térmico (con temperaturas superiores a 35°C) en últimos días de diciembre y primeros de enero.

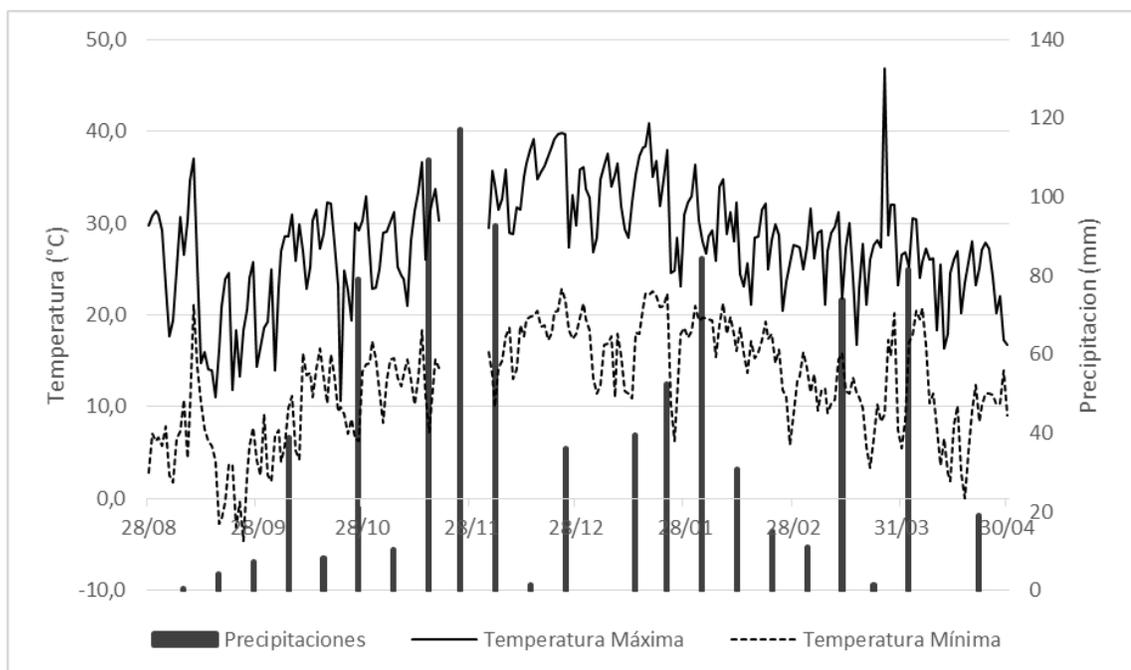


Figura 1. Temperaturas máximas (línea llena), mínimas (línea punteada) y precipitaciones (barras), para la campaña 2013/14 en Pueblo Italiano.

Zonificación

Para realizar las zonas de manejo, se dispuso de tres mapas de rendimiento de años anteriores, los cuales fueron vectorizados a puntos mediante el programa Quantum Gis 2.8.1-Wien (Quantum GIS Development Team, 2016). Luego mediante unión por localización, se combinaron las tres capas vectoriales con el fin de generar una capa única que contuviera los tres años apilados. Dicha capa se sometió a un análisis espacial de conglomerados con la aplicación Management Zone Analyst (MZA) v1.01 (University of Columbia, 2000) para definir zonas de diferente productividad potencial mediante un criterio estadístico de clasificación. En términos generales MZA agrupa datos espaciales en clases verosímiles, dando como resultado final la formación de varios grupos de datos clasificados bajo el criterio de máxima homogeneidad entre datos dentro de un grupo y máxima heterogeneidad entre grupos de datos (Fridgen *et al.*, 2004) (Boretto, 2013)

El software 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 (Fridgen *et al.*, 2000).

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, mientras que los valores cercanos a 1 indican clases indistintas. 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 (Fridgen *et al.*, 2004).

Diseño experimental y tratamientos

La siembra se realizó el 18 de Octubre de 2013, utilizando una sembradora Pierobon mix10880. La fertilización, nitrogenada y fosforada, se aplicó a dosis constantes, colocándose 87 kg ha⁻¹ de Urea y 140 kg ha⁻¹ de súper fosfato simple en la siembra. Luego el día 30 de Noviembre se refertilizó en estado V5 con 90 kg ha⁻¹ de urea en todas las franjas. En ambos casos la fertilización fue constante, independientemente de la densidad, de este modo se logró que la fertilización no fuera una variable que provocara posibles diferencias de rendimiento.

El diseño experimental fue en franjas atravesando las distintas zonas de manejo delimitadas previamente, consistiendo los tratamientos en dos híbridos comerciales de maíz en combinación con 5 densidades de siembra (30000; 60000; 90000; 120000 y 145000 plantas ha⁻¹) (Figuras 2 y 3).

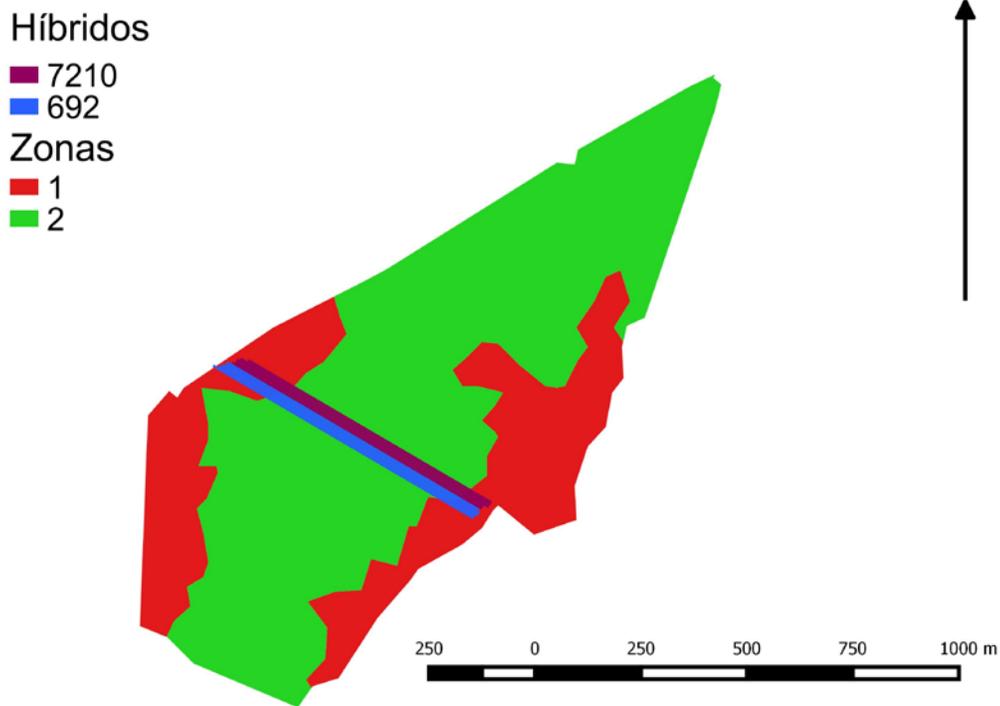


Figura 2. Mapa del lote donde se realizó el ensayo, con las zonas delimitadas. Zona 1(rojo) baja producción y Zona 2 (verde) alta producción, y franjas del ensayo atravesando ambas zonas (en violeta DK 7210 VT 3P y en azul DK 692 VT 3P).

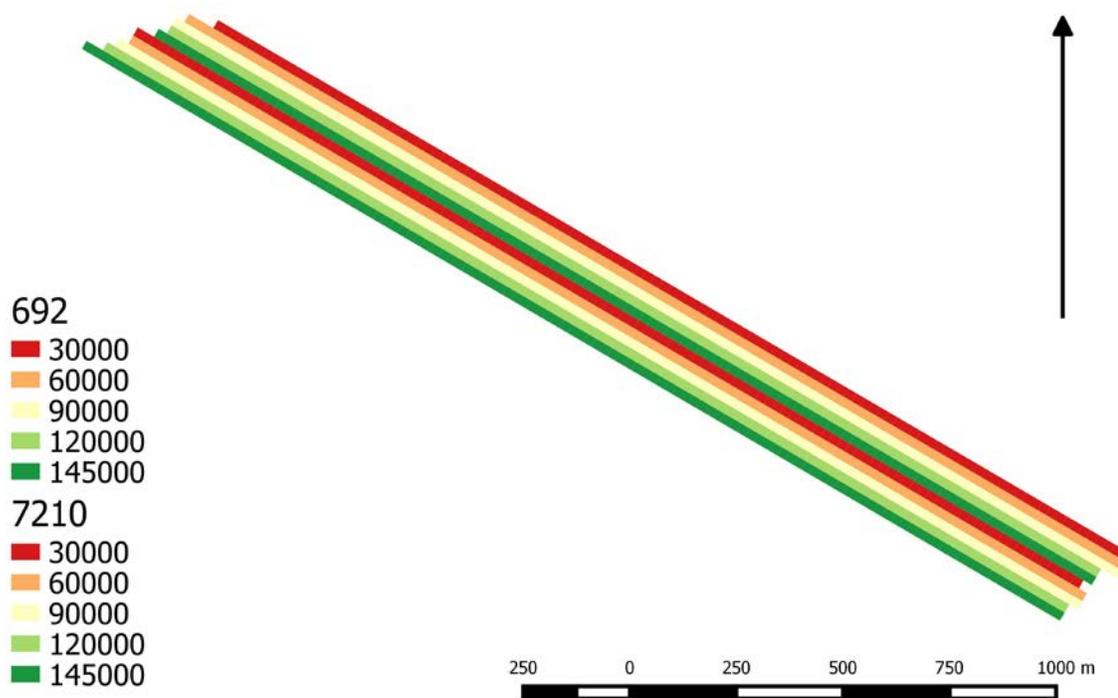


Figura 3. Mapa de las densidades de siembra evaluadas para ambos híbridos;(franjas atravesando zonas de manejo citadas en la Figura 2).

Los híbridos evaluados fueron DK 692 VT 3P y DK 7210 VT 3P. La selección de los mismos se debió a que estos híbridos difieren en su plasticidad productiva ante cambios en la densidad de siembra (Cerliani *et al.*, 2014). Para obtener la densidad de 30000 plantas ha^{-1} , debido a dificultades técnicas, se sembraron ambos híbridos a una densidad de 60000 plantas ha^{-1} y se procedió posteriormente a realizar un raleo el 14 de noviembre en aproximadamente estado V4. El 13 de diciembre el cultivo se encontraba en estado V10.

La cosecha, se realizó el día 14 de mayo de 2014, con una máquina cosechadora Case 2388, y plataforma Allochis de 11 surcos, con monitor de rendimiento Case original (CNH), previamente calibrado mediante pesada a campo con tolva balanza Montecor de 22 Tn. La misma cosechadora también poseía capacidad de georeferenciación mediante GPS, permitiendo estos dos elementos determinar el rendimiento de cada una de las franjas, con lecturas a intervalos de 1 segundo.

Procesamiento del mapa de rendimiento

El mapa de rendimiento obtenido se procesó mediante el software Quantum Gis 2.8.1-Wien (Quantum GIS Development Team, 2016).

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

Para este fin, se utilizó el análisis de Intervalo Intercuartil (IIQ) (Tukey, 1977). El enfoque del IIQ es un método de la estadística descriptiva, analítico, no paramétrico, que identifica los valores extremos a través de una determinación estadística detallada de la distribución de datos. Los puntos extremos o valores atípicos (observaciones numéricamente distantes del resto de los datos) se definen entonces como los valores de los datos que se encuentran más allá de una "valla interior", también llamados "outliers", definidos por la Ecuación 1:

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

Ecuación 1. Intervalo Intercuartil.

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

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

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

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

- Obs: Datos observados, es decir, cada uno de los polígonos del mapa de rendimiento.
- D: densidad, cantidad de semilla aplicada a cada polígono.
- D²: densidad cuadrado, cuadrado de la cantidad de semilla aplicada a cada polígono.
- Z: zona de manejo de: -1: baja productividad, 1: alta productividad.

Lo antes descripto se puede observar en la Figura 4.

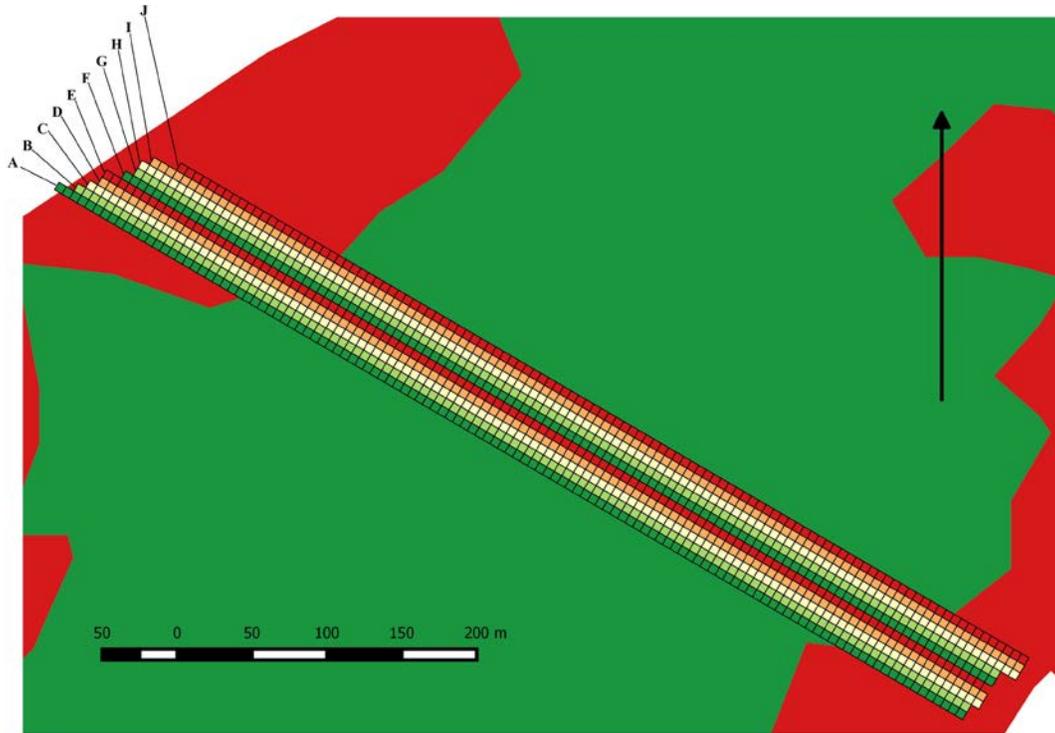


Figura 4. Franjas de D (densidad) correspondientes a cada tratamiento: A 30000 pl ha⁻¹, híbrido 692; B 60000 pl ha⁻¹, híbrido 692; C 90000 pl ha⁻¹, híbrido 692; D 120000 pl ha⁻¹, híbrido 692; E 1450000 pl ha⁻¹, híbrido 692; F 30000 pl ha⁻¹, híbrido 7210; G 60000 pl ha⁻¹, híbrido 7210; H 900000 pl ha⁻¹, híbrido 7210; I 120000 pl ha⁻¹, híbrido 7210; J 145000 pl ha⁻¹, híbrido 7210;, y su ubicación dentro del lote del ensayo, cruzando Z (zonas de manejo) (-1:rojo,BP, 1: verde AP).

Los campos considerados de interés para evaluar en el modelo (D y D^2) toman valores sobre un rango continuo (variables cuantitativas), mientras que el último campo de interés (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 constatar el efecto de las dos zonas de manejo. Una restricción impuesta a las variables dummy es que su sumatoria debe ser igual a cero; lo que permite que la estimación del efecto de las diferentes ZM dentro del lote y de los términos de la interacción con la densidad de siembra, puedan ser comparados con la respuesta media (Bongiovanni, 2002). Finalmente, se incluyeron las interacciones entre las variables zona de manejo (Z), densidad (D) y densidad cuadrado (D^2) de la siguiente forma:

- $Z \times D$
- $Z \times D^2$

Análisis Estadístico

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

Una de las herramientas usadas en Econometría es el análisis de regresión. Su objetivo primordial es estimar el valor de una variable aleatoria (la variable dependiente: por ej. el rendimiento de un cultivo), dado que los valores de una o más variables asociadas (la o las variables independientes, por ej. densidad de siembra) son conocidos. La ecuación de regresión es la fórmula algebraica por la cual se determina el valor estimado de la variable dependiente o de respuesta (Anselin, 1999).

Para realizar el análisis de regresión se recurrió a una aplicación especializada en el trabajo con datos espaciales georeferenciados llamado OpenGeoDa 1.6.7.9 (GeoDa Center for Geospatial Analysis and Computation, Arizona State University, marzo 2015.). Este fue diseñado para análisis espacial y análisis multivariado exploratorio de datos (globales y locales) de autocorrelación espacial. Realiza regresión lineal básica incluyendo modelos espaciales como el modelo de retardo espacial y el modelo de error espacial, ambos estimados por máxima verosimilitud.

En primer lugar se usó el modelo clásico de Mínimos Cuadrados Ordinarios (OLS, por sus siglas en inglés). La inclusión de dicho modelo, se efectuó con el fin de estimar y comprobar la dependencia espacial que, en el caso de los datos de rendimiento, se presenta como la similitud de valores para ubicaciones similares. En otras palabras, valores altos o bajos de rendimiento tienden a estar rodeados de observaciones vecinas con valores similares. Por lo tanto, y debido a que los valores de los factores de rendimiento en un punto del lote dependen de los valores en otros puntos del lote, los datos de este lote van a presentar autocorrelación espacial (Bongiovanni, 2006). Consiguientemente, para que la regresión sea estadísticamente significativa, se tiene que corregir esta autocorrelación espacial, de modo tal que los estimadores obtenidos permitan realizar cálculos económicos con precisión. A los fines de corregir dicha dependencia espacial, cada observación fue ponderada a través de la confección de una matriz de ponderadores espaciales con una estructura “Rook” que define como vecinas a aquellas áreas con bordes compartidos, en contraste con la matriz Queen, no incluyendo los vértices (Anselin, 1988). La misma se esquematiza en la Figura 5.

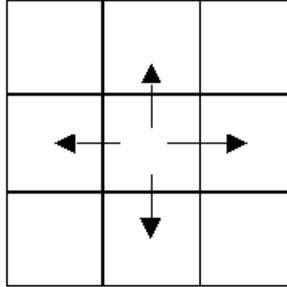


Figura 5. Matriz “Rook” de ponderadores espaciales

Los parámetros estadísticos observados fueron:

-R²: proporción de la variabilidad en un conjunto de datos que se explica por el modelo estadístico. Proporciona una medida de qué tan bien los resultados futuros es probable que sean predichos por el modelo.

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

-Criterio de Schwarz (SBIC, Schwarz, 1978) es un criterio para la selección de modelos entre un conjunto finito de modelos. Se basa en la función de probabilidad y que está estrechamente relacionado con el Criterio de Información de Akaike (AIC). Dados dos modelos estimados, el modelo con el menor valor de SBIC es el que se prefiere.

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

El otro modelo, denominado de error espacial autorregresivo (SAR), utiliza la metodología de máxima verosimilitud para la determinación de los campos de interés y parámetros estadísticos. Dicho modelo asume que la variable dependiente no está correlacionada por sí misma, sino que es el error de muestreo aleatorio es el que está correlacionado. Matemáticamente se expresa según la Ecuación 2:

$$Y = X\beta + \varepsilon$$

Ecuación 2. Modelo SAR.

donde Y es el vector (n por 1) de observaciones de la variable dependiente, X es la matriz de observaciones de las variables independientes, β es el vector de parámetros estimados, y ε es el término de error espacial, obtenido mediante la Ecuación 3:

$$\varepsilon = \lambda W\varepsilon + \mu$$

Ecuación 3.Error espacial.

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).

Función de producción y análisis económico

La respuesta del maíz a la Densidad de siembra, se modeló como un polinomio de segundo grado por cada ZM según la Ecuación 4:

$$Y_{ij} = \beta_0 + \beta_1 Df + \beta_2 Df^2 + \beta_3 ZM + \beta_4 Df \times ZM + \beta_5 D^2 \times ZM + \varepsilon_{ij}$$

Ecuación 4. Respuesta del maíz a la Densidad de siembra.

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, D es la densidad de siembra (semillas 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).

Para obtener en cada ZM la densidad optima económica de siembra (DOES) o densidad de siembra necesaria para alcanzar el máximo retorno económico al sembrar, se realizó una optimización tradicional de las funciones (Dillon y Anderson, 1990) según la Ecuación 5 y su primera derivada en la Ecuación 6:

$$\pi = py (\beta_0 + \beta_1 D + \beta_2 D^2 + \beta_3 ZM + \beta_4 DZM + \beta_5 D^2 ZM) - pD - F$$

Ecuación 5. Optimización tradicional de las funciones, para obtener DOES.

$$DOES = \frac{\left(\frac{pD}{py}\right) - \beta_1 - \beta_4 ZM}{2\beta_2 + 2\beta_5 ZM}$$

Ecuación 6. Primera derivada de la ecuación 5, para obtener DOES.

donde π es el retorno económico a la semilla, py es el precio del Maíz a la venta ($\$ \text{kg}^{-1}$), $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ y β_5 , son los parámetros de la ecuación de regresión, D es la dosis de semilla (kg ha^{-1}), ZM se refiere a las variables “dummy” para zona de manejo, pD : precio de la semilla ($\$ \text{kg}^{-1}$), y F son los costos fijos, los cuales no son considerados en el cálculo de presupuestos parciales, porque al tomar la primer derivada se eliminan por ser una constante.

Esta función debe ser interpretada de modo que el uso de una menor cantidad de insumo estaría sobre pagando ese insumo, y que una mayor cantidad de insumos no alcanzaría a cubrir su costo (Bongiovanni y Lowenberg-DeBoer, 2006).

Los precios utilizados fueron: para Maíz a la venta $0,197 \text{ USD kg}^{-1}$ y para Semilla de Maíz $0,002525 \text{ USD semilla}^{-1}$ para el híbrido DK 7210 VT 3P y $0,00225 \text{ USD semilla}^{-1}$ para el híbrido DK 692 VT 3P. En el caso del maíz, el precio fue tomado en dólares estadounidenses, el 12 de abril de 2016 como precio futuro de venta en el comercio físico a junio de 2017. El precio de las semillas de ambos híbridos,

fue tomado el 12 de abril de 2016, según cotización de la empresa Tecnosur S.A. como precio final de compra puesto en chacra. Se consideró un gasto de comercialización del 2%, así como un flete de \$ Kg⁻¹ 0,39 al 25 de Julio de 2016, según centro de camioneros de Pueblo Italiano, con transformación posterior según cotización Banco Nación tipo de cambio vendedor (USD 15,10) a mismo día que dando el precio de venta del maíz en 0,167 USD kg⁻¹.

Según la relación de precios entre la semilla y el grano de maíz se estableció la densidad optima económica de siembra (DOES).

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

Los resultados económicos obtenidos respecto a la utilización de la densidad variable por ZM, se compararon posteriormente con el costo de indiferencia de la dosificación variable (4 USD ha⁻¹) mencionado por Bragachini *et al.* (2009).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Zonificación

El análisis espacial de conglomerados, arrojó una máxima heterogeneidad para dos grupos verosímiles según el NCE, pero el FPI no fue tan contundente, como se puede observar en la Figura 6. Como mencionan Arno *et al.* (2011), mientras que la minimización de la FPI es útil porque el solapamiento entre cluster disminuye, la minimización de NCE es importante porque el grado de organización aumenta como consecuencia de la partición de la matriz de datos.

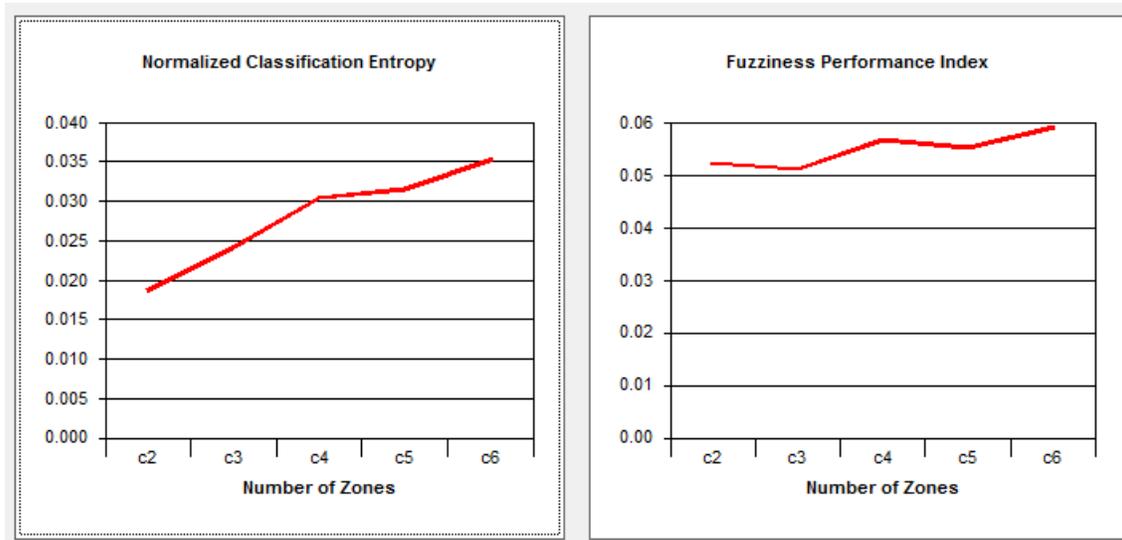


Figura 6. Representación gráfica de los índices NCE (izquierda) y FPI(derecha) para evaluar visualmente la cantidad óptima de ambientes a delimitar.

Fridgen *et al.*, 2004 afirman que 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. Por esta razón, el número de zonas fue determinado utilizando en forma conjunta la información obtenida de MZA, el historial del lote (conocimiento empírico proporcionado por el productor) y la información proporcionada por la carta de suelo correspondiente.

Considerando lo expuesto, se recurrió entonces a la carta de suelo correspondiente, observándose que en la fotocarta perteneciente a la hoja 3363-34, La Cesira (1986), de las Cartas de suelos de la República Argentina, en el espacio comprendido por el lote en estudio, existen cuatro tipos de suelo diferentes. A continuación se describe cada uno de ellos:

BGd3: capacidad de uso VIws. Complejo Benjamín Gould 20%, Los Medanitos 60%, San Julián 20%.

Comprende sectores bajos deprimidos y aureolas próximas a cubetas o charcas que reconocen especialmente origen eólico del último ciclo geomorfológico.

Son aéreas moderadamente bien drenadas, con capas freáticas fluctuantes que pueden ascender y afectar todo el perfil de suelo; además, sufren anegamientos y/o inundaciones provenientes de sectores próximos más altos, siendo esto poco frecuente y de corta duración.

Domina la Serie Los Medanitos, de buenas condiciones superficiales pero decididamente malas subsuperficiales (alcalinidad sódica). Están subordinadas la Serie Benjamín Gould y San Julián de uso muy restringido por alcalinidad fuerte superficial y subsuperficial, drenaje imperfecto y horizontes degradados.

Por las limitaciones expuestas, estas áreas no son aptas para la agricultura, solo para pasturas implantadas.

Cs5: capacidad de uso IIIsc. Asociación Canals 80%, Leguizamón 20%. Unidad muy amplia en los suelos zonales ubicados a los alrededores de Pueblo Italiano.

Se trata de una planicie alta con pequeños relieves cóncavos alternando con lomas medianas estabilizadas con orientación predominante NNE-SSW.

La unidad muestra una secuencia de lomas marcadas, pendientes cortas (1 a 2 % de gradiente) y sectores cóncavos u hoyas originadas por procesos de deflación-acumulación (acción del viento).

Los perfiles de la Serie Canals ocupan las porciones altas, con baja retención de humedad y susceptibilidad a la erosión eólica; la Serie Leguizamón se distribuye en los sitios más planos o realmente cóncavos.

Se advierte como inclusiones en porciones de loma y media loma alta la presencia de perfiles de la Serie Canals en fase ligera a moderadamente erosionada por el viento.

Estos suelos son productivos con limitaciones moderadas derivadas de los aspectos climáticos (sequías), baja retención de humedad, especialmente en las lomas de la Serie Canals, como así también la erosión y susceptibilidad.

Cs6: capacidad de uso IIIsc. Complejo Canals 60%. Ea. Don Francisco 20%. Leguizamón 20%.

Son aéreas intermedias suavemente deprimidas. Tienen relieves suavemente ondulados con ligeras concavidades y suelos desarrollados sobre material arenoso franco y franco arenoso.

En las partes altas del relieve domina la Serie Canals, con limitación por textura demasiado gruesa y por consiguiente baja retención de humedad. En las concavidades domina la Serie Leguizamón de mejor aptitud, y en áreas con escurrimiento muy lento, más deprimidas, la Serie Ea. Don Francisco con horizonte subsuperficial lixiviado, moderadamente bien drenado y alcalinidad en profundidad.

Por las consideraciones expuestas estas unidades son aptas para la agricultura, con ciertas limitaciones por razones climáticas y de moderada alcalinidad y retención de humedad.

LMd5: capacidad de uso VIws. El Aromo 35%, La Cesira 15%, San Julián 15%.

Son áreas deprimidas amplias, próximas a las localidades de La Cesira y Pueblo Italiano.

Se ubican en un paisaje de origen eólico, en áreas suavemente deprimidas, con algunas depresiones más manifiestas en su interior, y están sometidas al encharcamiento periódico circunscritos a los sectores más bajos del relieve.

Los suelos dominantes corresponden a la Serie El Aromo, con drenaje imperfecto y alcalinidad sódica en profundidad, con la capa freática próxima a la superficie y a la Serie Los Medanos, poco inundable, moderadamente bien drenada y alcalinidad sódica subsuperficial.

Los suelos subordinados corresponden a la Serie La Cesira y San Julián, con horizontes superficiales degradados, drenaje imperfecto y alcalinidad sódica.

Son suelos aptos para la implantación de pasturas y eventualmente en algunos sectores más elevados para agricultura con restricciones.

Lo observado en la fotocarta se repite en el visor de GEOINTA, que arroja la imagen satelital de la Figura 7, permitiendo observar con mayor claridad lo expuesto.

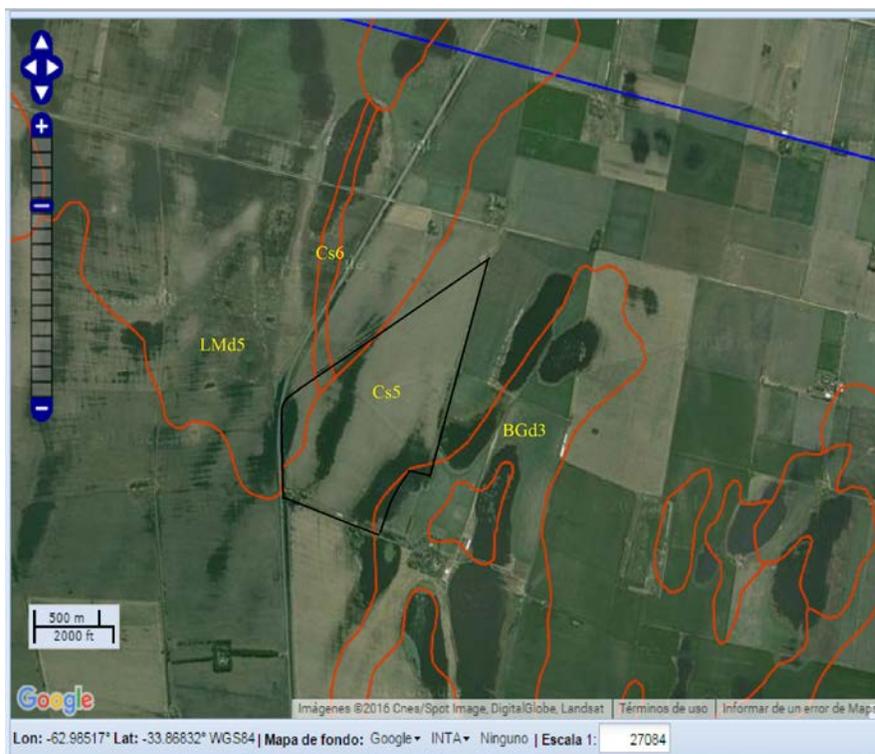


Figura 7. Foto satelital. En líneas negras se delimita el lote en estudio, las líneas rojas delimitan distintos tipos de suelo, cuyos nombres se encuentran en letras amarillas.

Estos cuatro suelos, tienen características particulares, sin embargo es posible dividirlos en dos grupos, tomando como criterio su capacidad de uso.

Los suelos BGd3 y LMd5 poseen una capacidad de uso VIws, son suelos con exceso de humedad por la acumulación de las áreas circunvecinas más elevadas o con drenaje interno muy pobre o impedido, con frecuencia sufren anegamientos y están asociados a suelos alcalinos sódicos o salinos. Tienen por lo tanto graves limitaciones para el uso, resultando ineptos para los cultivos. Son apropiados como campos naturales de pastoreo, y pasturas cultivadas.

Los suelos Cs5 y Cs6, poseen una capacidad de uso IIIsc, son suelos con ligera limitación climática, baja retención de humedad y/o ligera salinidad y/o alcalinidad. La capacidad de retención de humedad útil es tal, que los rendimientos de los cultivos merman frecuentemente por la falta de humedad durante los periodos anuales de sequía. Estos suelos requieren prácticas de manejo y conservación más complejas que los clase I o II, no obstante son adecuados para cultivos.

Por lo anteriormente expuesto, se definió como dos el número óptimo de zonas (homogéneas y de diferente rendimiento potencial), que podrían presentar respuestas diferenciales a la densidad de siembra. Dichos ambientes o zonas de manejo se pueden observar en la Figura 2. Nótese que las zonas de baja producción son coincidentes con los suelos cuya clase de uso es VIws, mientras que la zona de alta producción coincide con los suelos con clase de uso IIIsc.

Los resultados obtenidos, coinciden con Lark y Stafford, (1997), quienes recomiendan seleccionar el menor número de clases, dos ZM para este caso, si se obtienen índices divergentes.

En concordancia con la decisión tomada, Córdoba *et al.* (2016) afirman que las propiedades físicas y químicas del suelo y la topografía son frecuentemente utilizadas para delimitar zonas de manejo. Así mismo, la elevación del terreno también provee información para la delimitación de zonas homogéneas, debido a que afecta el crecimiento y desarrollo de los cultivos y por tanto es buena indicadora de la variabilidad espacial del rendimiento.

Determinación la densidad óptima económica de siembra

Los estadísticos correspondientes al análisis de regresión se presentan en la Tabla 1 para la situación sin considerar las zonas de manejo para el híbrido DK 692 VT 3P, y en la Tabla 2 considerando las zonas de manejo, cada uno con ambos modelos, el OLS y el SAR.

Tabla 1. Análisis estadístico para los modelos: Mínimos Cuadrados Ordinarios (OLS) y Error Espacial Autorregresivo (SAR), sin zonas de manejo para el híbrido DK 692 VT 3P.

Variable	OLS		SAR	
	Coficiente	Probabilidad	Coficiente	Probabilidad
R ²	0,24	-	0,65	-
Máxima Verosimilitud	-2552,48	-	-2463,00	-
AIC	5110,96	-	4932	-
SBIC	5122,08	-	4943,12	-
Constante	5385,064	0,00000	5588,449	0,00000
D	0,0781027	0,00000	0,07296275	0,00000
D ²	-4,65E-07	0,00000	-4,40E-07	0,00000
Lambda	-	-	0,74	0,00000
I de Moran	0,58	0,00000	-	-

OLS: modelo de mínimos cuadrados ordinarios, SAR: modelo de autorregresión espacial, AIC: criterio de información de Akaike, SBIC: Criterio de información de Schwartz.

En la primera situación, híbrido DK 692 VT 3P sin zonificar (Tabla 1), se observa en el OLS que los datos obtenidos a partir del mapa de rendimiento están correlacionados espacialmente. Esto se puede apreciar a través de un Índice de Moran 0,58 y un pobre ajuste en R² (0,24). Este supuesto se comprobó al notar un mayor R² (0,65) menor AIC y menor SBIC, por lo tanto, los datos se ajustan mejor por el modelo SAR porque los valores de los estimadores mencionados anteriormente indican que los datos se explican mejor por la dependencia espacial del error de estimación y no por la dependencia espacial de la variable observada. Por otra parte, Lambda (0,74) es distinto de cero y cercano a uno, lo cual estaría indicando que los errores no son independientes, y se debe usar el modelo SAR.

En cuanto a los parámetros de la función de producción, se observa que tanto la constante como D y D² poseen un valor $p < 0,05$. Esto indica que los valores obtenidos son significativos estadísticamente y por lo tanto se rechaza la Ho (que indica que los valores de los parámetros es igual a 0), y debe emplearse el valor de los parámetros estimados para construir la función de producción.

Tabla 2. Análisis estadístico para los modelos: Mínimos Cuadrados Ordinarios (OLS) y Error Espacial Autorregresivo (SAR), con zonas de manejo para el híbrido DK 692 VT 3P.

Variable	OLS		SAR	
	Coficiente	Probabilidad	Coficiente	Probabilidad
R ²	0,37	-	0,65	-
Máxima Verosimilitud	-2523,48	-	-2459,30	-
AIC	5058,97	-	4930,61	-
SBIC	5081,21	-	4952,85	-
Constante	4835,183	0,00000	5035,28	0,00000
D	0,08358175	0,00000	0,0849448	0,00000
D ²	-5,16E-07	0,00000	-5,28E-07	0,00000
Z2	-689,5438	0,14765	-690,9429	0,23522
Z2D	0,006154848	0,61797	0,01486891	0,281
Z2D ²	-6,09E-08	0,37895	-1,11E-07	0,14622
Lambda	-	-	0,69	0,00000
I de Moran	0,49	0,00000	-	-

OLS: modelo de mínimos cuadrados ordinarios, SAR: modelo de autorregresión espacial, AIC: criterio de información de Akaike, SBIC: Criterio de información de Schwartz.

En la situación con zonas de manejo para el híbrido DK 692 VT 3P (Tabla 2), para el caso de OLS se observa que, si bien el indicador R² (0,37) mejora, AIC, SBIC e I de Morán (0,49) han empeorado. La explicación para que esto suceda es que la creación de zonas de manejo usando análisis “cluster”, para este híbrido en este lote no es significativo estadísticamente. Por otro lado, tanto Z2, como las interacciones Z2D y Z2D² no fueron significativas ($p > 0,05$) en ninguno de los dos modelos, por lo tanto no se rechaza Ho, lo cual indica que las zonas de manejo para este híbrido en este lote no tienen validez estadística. Por otra parte, Lambda (0,69) es distinto de cero y cercano a uno, lo cual estaría mostrando que los errores no son independientes, y se debe usar el modelo SAR, nuevamente al igual que con el modelo OLS, no se rechaza Ho y por lo tanto no se consideran las zonas de manejo.

En la Tabla 3 se pueden observar los datos correspondientes al análisis de regresión para la situación de ausencia de zonas de manejo para el híbrido DK 7210 VT 3P, y en la Tabla 4 con presencia de zonas de manejo con ambos modelos, el OLS y el SAR.

Tabla 3. Análisis estadístico para los modelos: Mínimos Cuadrados Ordinarios (OLS) y Error Espacial Autorregresivo (SAR), sin zonas de manejo para el híbrido DK 7210 VT 3P.

Variable	OLS		SAR	
	Coefficiente	Probabilidad	Coefficiente	Probabilidad
R ²	0,09	-	0,74	-
Máxima Verosimilitud	-2695,68	-	-2550,65	-
AIC	5397,36	-	5107,3	-
SBIC	5408,51	-	5118,46	-
Constante	5977,569	0,00000	6010,248	0,00000
D	0,0670806	0,00000	0,04822581	0,00025
D ²	-3,45E-07	0,00000	-1,83E-07	0,01232
Lambda	-	-	0,86	0,00000
I de Moran	0,69	0,00000	-	-

OLS: modelo de mínimos cuadrados ordinarios, SAR: modelo de autorregresión espacial, AIC: criterio de información de Akaike, SBIC: Criterio de información de Schwartz.

Para el híbrido DK 7210 VT 3P sin zonificar (Tabla 3), se observa en el OLS que los datos obtenidos a partir del mapa de rendimiento están correlacionados espacialmente. Esto se puede ver a través de un I de Moran 0,69 y un muy bajo ajuste en R² (0,09). Este supuesto se comprobó al notar un mayor R² (0,74), menor AIC y SBIC, por lo tanto, los datos se ajustan mejor por el modelo SAR porque los valores de los estimadores mencionados anteriormente indican que los datos se explican mejor por la dependencia espacial del error de estimación y no por la dependencia espacial de la variable observada. Por otra parte, Lambda (0,86) es distinto de cero y cercano a uno, lo cual estaría indicando que los errores no son independientes, y se debe usar el modelo SAR. Los parámetros de la función de producción son significativos estadísticamente en todos los casos.

Tabla 4. Análisis estadístico para los modelos: Mínimos Cuadrados Ordinarios (OLS) y Error Espacial Autorregresivo (SAR), con zonas de manejo para el híbrido DK 7210 VT 3P.

Variable	OLS		SAR	
	Coefficiente	Probabilidad	Coefficiente	Probabilidad
R ²	0,37	-	0,74	-
Máxima Verosimilitud	-2640,7	-	-2547,75	-
AIC	5293,41	-	5107,49	-
SBIC	5315,71	-	5129,79	-
Constante	5328,087	0,00000	6284,261	0,00000
D	0,05169163	0,00129	0,0398613	0,01935
D ²	-2,32E-07	0,01113	-1,77E-07	0,07461
Z2	-1141,556	0,05277	446,1028	0,51644
Z2D	-0,01732212	0,27698	-0,01419244	0,38510
Z2D ²	1,45E-07	0,11104	2,94E-08	0,75722
Lambda	-	-	0,84	0,00000
I de Moran	0,53	0,00000	-	-

OLS: modelo de mínimos cuadrados ordinarios, SAR: modelo de autorregresión espacial, AIC: criterio de información de Akaike, SBIC: Criterio de información de Schwartz.

Por último, con zonas de manejo para el híbrido DK 7210 VT 3P (Tabla 4), para el caso de OLS se observa que, si bien el indicador R² (0,37) mejora, AIC, SBIC e I de Morán (0,53) han empeorado. Por otro lado, los parámetros D², Z2, Z2D y Z2D² no fueron significativos ($p > 0,05$) en ninguno de los dos modelos, siendo no significativas estadísticamente las zonas de manejo para este híbrido en este lote. Por otra parte, Lambda (0,84) es distinto de cero y cercano a uno, lo cual estaría indicando que los errores no son independientes, y se debe emplear el modelo SAR, pero al igual que para el otro híbrido, nuevamente no se rechaza Ho y los parámetros correspondientes a los corrimientos por zonas, son igual a 0; por lo que no deben considerarse, o sea, no hay efecto de las ZM.

Se refuerza lo expuesto anteriormente con base en los índices estadísticos, la densidad variable según zonas de manejo, para este lote, en este año, no tiene efecto estadísticamente significativo en el rendimiento. Esto coincide con lo encontrado por Martínez Bologna *et al* (2014), quienes hallaron que en siembras tardías, las distintas ZM responden de manera similar, presumiblemente por la mayor disponibilidad de agua en esa fecha de siembra. Esto podría permitir inferir que la mayor disponibilidad de agua en la estación de crecimiento durante la que se realizó el ensayo, independientemente de su fecha de siembra, sería la razón por la cual las diferencias entre las ZM están enmascaradas. Lo mostrado por Ghironi, *et al.* (2012) también concuerda con lo anterior, afirmando que el rendimiento de grano del cultivo de maíz temprano estuvo condicionado por el sitio en la campaña con precipitaciones normales a bajas para la zona en estudio, mientras que en la campaña con precipitaciones por encima de la media no se observaron diferencias en rendimiento entre los sitios.

Las regresiones realizadas a partir de los datos del mapa de rendimiento, brindaron los coeficientes necesarios para construir las funciones de respuesta del maíz a la densidad de siembra con y sin zonificación. A partir de éstas se calculó el óptimo económico para la densidad. En la Tabla 5 y 6 se muestran las funciones de respuesta para cada caso, la DOE y el rendimiento en grano que se espera obtener con esa dosis, para cada ZM y para cada híbrido utilizado.

Tabla 5. Función de respuesta del maíz a la densidad de siembra, densidad óptima económica de siembra (DOES) (semillas ha⁻¹) y rendimiento esperado (Rto) (kg ha⁻¹) para situaciones sin zonificación (S/Z) y alta (AP) y baja (BP) producción para el híbrido DK 692 VT 3P.

Condición	Función de respuesta	DOES	Rto por ZM	
			BP	AP
S/Z	$5977,569 + 0,0670806D - 3,4527E-07D^2$	73335,08	8507,88	8507,88
BP	$6284,261 + 0,0398613D - 1,77E-07D^2$	67682,93	8365,88	-
AP	$6284,261 + 0,0398613D - 1,77E-07D^2$	67682,93	-	8365,88

Tabla 6. Función de respuesta del maíz a la densidad de siembra, densidad óptima económica de siembra (DOES) (semillas ha⁻¹) y rendimiento esperado (Rto) (kg ha⁻¹) para situaciones sin zonificación (S/Z) y alta (AP) y baja (BP) producción para el híbrido DK 7210 VT 3P.

Condición	Función de respuesta	DOES	Rto por ZM	
			BP	AP
S/Z	$5588,45 + 0,07296275D - 4,4033E-07D^2$	75659,16	9024,88	9024,88
BP	$5035,28 + 0,0849448D - 5,28E-07D^2$	70044,42	8276,46	-
AP	$5035,28 + 0,0849448D - 5,28E-07D^2$	70044,42	-	8276,46

Tal como se observa en las tablas, no se encontró variación de respuesta en los rendimientos para las distintas ZM en ninguno de los dos híbridos.

La DOES, es igual para cada ZM ya que se considera que para este año con sus respectivas condiciones climáticas, en este lote y con estos genotipos, no se detectó interacción entre densidad de siembra y ZM. Así mismo, no hay una variación apreciable de DOES entre híbridos.

Evaluación de las diferencias de retorno económico a la densidad

Las diferencias de retorno económico entre la práctica de densidad variable por zona de manejo y la práctica densidad fija para cada híbrido, no son significativas cuando se las compara con el costo diferencial citado, dado que en este año y para este lote, la ZM no interaccionó con densidad de siembra en la respuesta de rendimiento de ninguno de los dos híbridos (Tabla 7 y Tabla 8). Es por ello que se decidió agregar a la evaluación de retorno económico, la comparación entre la optimización económica de la densidad de siembra para el lote completo sin zonas de manejo, y la densidad de siembra utilizada normalmente por el productor para híbridos DK en general (75000 semillas ha⁻¹). En las Tabla 9 y Tabla 10 se ilustra lo expuesto.

Tabla 7. Diferencias de retorno económico a la densidad entre la práctica de densidad variable por zona de manejo y la densidad fija para el híbrido DK 692 VT 3P.

DK 692 VT 3P	Sin Zonificar	Zonificado	
		BP	AP
DOES (semillas ha ⁻¹)	67551,44	67682,93	67682,93
Superficies (ha)	105	105	105
Proporción (%)	1	0,37	0,63
Rendimiento (kg ha ⁻¹)	8507,88	8365,88	8365,88
Ingreso Bruto(U\$Dha ⁻¹)	1396,80	1396,80	
Costo Semilla(U\$Dha ⁻¹)	151,99	152,28	
Resultado Económico(U\$Dha ⁻¹)	1244,81	1244,51	
Dif. Retorno a D en favor de ZM(U\$Dha⁻¹)		-0,29	

Tabla 8. Diferencias de retorno económico a la densidad entre la práctica de densidad variable por zona de manejo y la densidad fija para el híbrido DK 7210 VT 3P.

DK 7210 VT 3P	Sin Zonificar	Zonificado	
		BP	AP
DOES (semillas ha ⁻¹)	75659,17	70044,42	70044,42
Superficies (ha)	105	105	105
Proporción (%)	1	0,37	0,63
Rendimiento (kg ha ⁻¹)	9024,88	8276,47	8276,47
Ingreso Bruto(U\$Dha ⁻¹)	1384,29	1384,29	
Costo Semilla(U\$Dha ⁻¹)	170,23	168,09	
Resultado Económico(U\$Dha ⁻¹)	1214,05	1216,20	
Dif. Retorno a D en favor de ZM(U\$Dha⁻¹)		2.14	

Tabla 9. Comparación entre la optimización económica de la densidad de siembra para el lote completo sin zonas de manejo (SZM), y la densidad de siembra utilizada normalmente por el productor (DP) para el híbrido DK 692 VT 3P.

DK 692 VT 3P	SZM	DP
Semillas ha ⁻¹	73335,08	75000
Superficies (ha)	105	105
Proporción (%)	1	1
Rendimiento (kg ha ⁻¹)	8507,88	8583,81
Precio Semilla (USD S ⁻¹)	0,00225	0,00225
Precio Maíz (USD kg)	0,167	0,167
Ingreso Bruto(USDha ⁻¹)	1420,82	1433,50
Costo Semilla(USDha ⁻¹)	151,99	168,75
Res. Económico(USDha ⁻¹)	1268,83	1264,75
DIF SZN-DP(USDha⁻¹)		4.08

Tabla 10. Comparación entre la optimización económica de la densidad de siembra para el lote completo sin zonas de manejo (SZM), y la densidad de siembra utilizada normalmente por el productor (DP) para el híbrido DK 7210 VT 3P.

DK 7210 VT 3P	SZM	DP
Semillas ha ⁻¹	75659,17	75000
Superficies (ha)	105	105
Proporción (%)	1	1
Rendimiento (kg ha ⁻¹)	9024,88	9015,85
Precio Semilla (USD S ⁻¹)	0,002525	0,002525
Precio Maíz (USD kg)	0,167	0,167
Ingreso Bruto(USDha ⁻¹)	1507,15	1505,65
Costo Semilla(USDha ⁻¹)	170,23	168,75
Res. Económico(USDha ⁻¹)	1336,92	1336,90
DIF SZN-DP(USDha⁻¹)		0.03

Se observa que no existió una diferencia de retorno económico a la densidad variable por ZM, y que la diferencia de retorno económico de la dosis productor vs optimización económica para el cálculo de la DOES sin zonificar el lote, es insignificante.

En ambos casos, tanto en la comparación de retorno económico con ZM vs sin ZM y la comparación de retorno económico de la optimización económica sin ZM vs la dosis productor sin ZM, no existen diferencias apreciables entre un híbrido u otro.

Los resultados obtenidos con respecto a la utilización de la densidad variable por ZM, se contradicen con los obtenidos por Bragachini, *et al.* (2012), quienes afirman que en un ensayo de larga duración, en todos los años se obtuvieron beneficios a favor de esta tecnología. Los valores obtenidos no superan el costo de indiferencia de la dosificación variable (4 U\$D ha⁻¹) mencionado por Bragachini *et al.* (2009).

CONCLUSIÓN

Con base en lo encontrado, se puede afirmar que la densidad óptima de siembra de maíz depende del híbrido empleado, pero no interacciona con las zonas de manejo en este lote de producción del Sur de Córdoba para la campaña evaluada, razón por la cual no se genera un mayor retorno económico de la densidad variable respecto a la fija.

Es altamente probable que la respuesta de la densidad de siembra a las ZM sea dependiente de la pluviometría del año en estudio, siendo necesario repetir la misma experiencia en diferentes años con diferentes pluviometrías. Sería recomendable 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.

A partir de estos resultados, sería recomendable que las decisiones de manejo como densidad de siembra, cantidad de fertilizante y/o uso de agroquímicos se apoyen en estudios que determinen los niveles óptimos agronómicos y económicos de éstos insumos.

BIBLIOGRAFIA

- AKAIKE, H. 1974. *A new look at the statistical model identification*. IEEE Transactions on Automatic Control. 19(6): 716–723.
- ANDRADE, F. y P. ABBATE. 2005. *Response of maize and soybean to variability in stand uniformity*. Agrom. J. 97: 1263-1269.
- ANDRADE, F., A. CIRILO, S. UHART, M., OTEGUI. 1996. En: *Ecofisiología del cultivo de maíz. Densidad de plantas*. Editorial La Barrosa. Balcarce, Buenos Aires, Argentina. 227-251p.
- ANDRADE, F.; y V. SADRAS. 2000. *Bases para el Manejo del Maíz, el Girasol y la Soja*. Ed. Médica Panamericana S.A ISBN, Buenos Aires. 443p.
- ANSELIN, L. 1988. *Spatial Econometrics: Methods and Models*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands.
- ANSELIN, L. 1999. *Spatial Econometrics*. Staff paper. Bruton Center, School of Social Sciences, University of Texas at Dallas, Richardson. 31 pp.
- ARNO, J., J.A. MARTÍNEZ CASASNOVAS, M. RIBES DASI, J.R. ROSELL. 2011. *Clustering of grape yield maps to delineate site-specific management zones*. Span. J. Agric. Res. 9(3): 721–729.
- BCC. Bolsa de Comercio de Córdoba. Datos climáticos campaña 2013/2014. Córdoba, Argentina.
- BCR. Bolsa de Comercio de Rosario. Estimaciones agrícolas-Cereales-Maíz. En: <https://www.bcr.com.ar/Pages/gea/estimaProd.aspx>. Consultado: 13/06/2016.
- BRAGACHINI, M. 2000. *Manejo Sitio Específico de Cultivos*. Estación Experimental Agropecuaria Manfredi. Proyecto Agricultura de Precisión. INTA Manfredi, Córdoba, Argentina.
- BRAGACHINI, M.; A. MENDEZ; F. SCARAMUZZA; F. PROIETTI. 2006. Monitoreo de rendimiento y elaboración de mapas. Libro agricultura de precisión: Integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable. Editorial PROCISUR. Cap.3. p: 45-55.
- BRAGACHINI, M., M. MENÉNDEZ, F. SCARAMUZZA, J. VÉLEZ., D. VILLAROEL. 2009. *Determinación de Viabilidad Económica de la Tecnología de Dosis Variable de Insumos en Maíz*. Estación Experimental Agropecuaria Manfredi. Proyecto Agricultura de Precisión. INTA Manfredi, Córdoba, Argentina.
- BRAGACHINI, M., M. MENÉNDEZ, F. SCARAMUZZA, J. VÉLEZ., D. VILLAROEL. 2012. *Ensayo de larga duración de manejo de insumos en forma variable*. Estación

- Experimental Agropecuaria Manfredi. Proyecto Agricultura de Precisión. INTA Manfredi, Córdoba, Argentina.
- BONGIOVANNI, R. 2002. *A Spatial Econometric Approach to the Economics of Site-Specific Nitrogen Management and Corn Production*. PhD Dissertation, Department of Agricultural Economics, Purdue University, West Lafayette, IN.
- BONGIOVANNI, R. 2006. *Econometría espacial. Libro agricultura de precisión: Integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable*. Editorial PROCISUR. Cap.8.2. p: 162-165.
- BONGIOVANNI, R. y J. LOWENBERG-DEBOER. 2006. *Agricultura de precisión: Integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable. Viabilidad económica*. Editorial PROCISUR. Cap.9. p: 171-184.
- BORETTO, D.; S. MUÑOZ, L. CORDERA. 2013. *Optimización de la fertilización nitrogenada por ambientes mediante modelos de respuesta sitio-específica*. Curso Internacional de Agricultura de Precisión. 12°, 17 al 19 de julio de 2013. Manfredi, Córdoba. Argentina.
- BULLOCK, D. G., R. L. NIELSEN, W. E. NYQUIST. 1988. *A growth analysis comparison of corn grown in conventional and equidistant plant spacing*. Crop Science, vol. 28, no 2, p. 254-258.
- BULLOCK, D.S., N. KITCHEN, D.G. BULLOCK. 2000. *Multidisciplinary Teams: A Necessity for Research in Precision Agriculture Systems*. Crop Science. 47:1765–1769.
- CERLIANI, C; M. GÓMEZ; R. NAVILLE; G. BALBOA y G. ESPÓSITO. 2014. Densidad de siembra óptima de maíz (*Zea mays* L.) ajustada por zonas de manejo. X Congreso Argentino de Maíz. AIANBA y EEA INTA Pergamino, 3 al 5 de septiembre, Rosario, Argentina.
- CISNEROS, J; C. CHOLAKY; A. CANTERO GUTIÉRREZ; J. GONZÁLEZ; M REINERO; A. DIEZ & L. BERGESIO (eds.). 2012. *Erosión hídrica: principios y técnicas de manejo*. Editora: Universidad de Río Cuarto. Río Cuarto, Córdoba, Argentina.
- CÓRDOBA, M., C. BRUNO, J. COSTA, & M. BALZARINI. 2016. *Variabilidad espacial de suelo a escala de lote y su relación con los rendimientos*. *Presidente*, 42(1), 47.
- DARDANELLI J., D. COLLINO, M.E. OTEGUI y V.O. SADRAS. 2003. *Producción de cultivos para grano. Bases funcionales para el manejo del agua en los sistemas de producción de los cultivos de grano*. Fac. Agr. UNBA. Buenos Aires, Argentina.
- DIEZ, E. 2012. *Relación entre la fracción de cobertura vegetal verde y el óptimo económico de la fertilización nitrogenada en maíz*. Tesis de Grado. Facultad de Agronomía y Veterinaria, Universidad Nacional de Río Cuarto, Río Cuarto, Argentina. 16-19p.

- DILLON, J. y J. ANDERSON. 1990. *The Analysis of Response in Crop and Livestock Production*. Pergamon Press, New York, EEUU.
- EMMEN, D. 2004. *La agricultura de precisión: una alternativa para optimizar los sistemas de producción*. Invest. Pens. Crit, 2: 68-74.
- ESPÓSITO, G; G BALBOA; C CASTILLO; R BALBOA & A DEGIOANNI. 2012. *Fecha de siembra y fertilización variable de maíz sobre Haplustoles de Córdoba*. 19° Congreso Latinoamericano y 23° 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. Argentina.
- FAO. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Estadísticas-Cereales. En: <http://www.fao.org/worldfoodsituation/csdb/es/>. Consultado el 13/06/2016.
- FRIDGEN, J.J. 2000. Development and evaluation of unsupervised clustering software for sub-field delineation of agricultural fields. M.S. thesis. Univ. of Missouri, Columbia.
- FRIDGEN, J.J.; N.R. KITCHEN; K.A. SUDDUTH; S.T. DRUMMOND; W.J. WIEBOLD y C.W. FRAISSE. 2004. Management zone analyst (MZA): software for subfield management zone delineation. *Agron. J.* 96: 100-108.
- GARDNER, B.R, R.B PEARCE y R MITCHEL. 1985. *Physiology of crop plants*. Iowa State University Press. USA. 327p.
- GEOINTA. Foto satelital. En: <http://geointa.inta.gov.ar/visor/?p=857>. Consultado el 05/05/2016.
- GHIRONI, E., A. C. MOLAS, A. GILI, E. HEVIA, & H. REINOSO. 2012. *Manejo sitio-específico de densidades en los cultivos de girasol, maíz y sorgo en la región semiárida pampeana central*. *Contenidos*, 21-55.
- GREGORET, M.C.; M. DÍAZ ZORITA; J. DARDANELLI; y R. BONGIOVANNI. 2011. *Regional model for site-specific corn nitrogen fertilization rainfed in Haplustolls of the central pampas, Argentina*. *Precision Agriculture*. 12:831-849.
- HORBE, T.A.N, T.J.C AMADO, A.O. FERREIRA y P. J. ALBA. 2013. *Optimization of corn plant population according to management zones in Southern Brazil*. *Precision Agriculture*. 14:450-465.
- INTA. 1986. *Carta de Suelos de la República Argentina. Hoja 3363-34 La Cesira*. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Ministerio de agricultura, ganadería y recursos renovables, Córdoba, Argentina. 27-31 p.

- KRUK, B. y E. H. SATORRE. 2003. *Producción de granos, bases funcionales para su manejo. Densidad y arreglo espacial del cultivo*. Editorial de la Facultad de Agronomía de la Universidad de Buenos Aires. Buenos Aires, Argentina. 270-316 p.
- LARK, R.M.; STAFFORD, J.V. 1997. *Classification as a first step in the interpretation of temporal and spatial variation of crop yield*. Appl. Biol. 130:111–121.
- LUDWIG, B.; D. GEISSELER; K. MICHEL; R.G. JOERGENSEN; E. SCHULZ; I. MERBACH; J. RAUPP; R. RAUBER; K. HU; L. NIU y X. LIU. 2011. *Effects of fertilization and soil management on crop yields and carbon stabilization in soils. A review*. Agron. Sustain. Dev. 31:361-372.
- MANTOVANI, E. C., F. CARVALHO PINTO, y D. MARCAL DE QUEIROZ. 2006. *Agricultura de precisión: integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable. Introducción a la agricultura de precisión y Tecnología de dosis variable*. Ed: Bongiovani et al. Montevideo, Uruguay: PROCISUR/IICA. 1:13-22p.
- MARTINEZ BOLOGNA, G., S. CASTRO, C. CERLIANI, G. BALBOA, R. NAVILLE, & G.ESPÓSITO. 2014. *Densidad de siembra de maíz asociada a la variabilidad espacial del suelo*. Facultad de Agronomía y Veterinaria, Universidad Nacional de Rio Cuarto, Rio Cuarto, Argentina.
- MÉNDEZ, A.; J. P. VÉLEZ, D. VILLARROEL. 2013. *Protocolo de dosificación variable de insumos en cultivo de maíz*. Estación Experimental Agropecuaria Manfredi. Proyecto Agricultura de Precisión. INTA Manfredi, Córdoba, Argentina.
- MORAN, P.A.P. 1950. Notes on Continuous Stochastic Phenomena. Biometrika 37(1):17–23.
- PALIWAL R.L.2001. *El Maíz en los trópicos: mejoramiento y producción: Introducción al maíz y su importancia*. FAO.
- PARUELO, J. M.; J. P. GUERSCHMAN, S. R. VERÓN. 2005. *Expansión agrícola y cambios en el uso del suelo*. Ciencia hoy, 15(87):14-23.
- PEDROL, H.M.; J.M. CASTELLARÍN y F. SALVAGIOTTI. 2004. *Sustentabilidad y diversificación de riesgos productivos. Importancia del maíz en la rotación de los cultivos*. IDIA 21°. a. 4, no. 6. INTA. Buenos Aires. AR. p. 141-146.
- QUANTUM GIS DEVELOPMENT TEAM. 2016. **Quantum GIS Geographic Information System**. Versión: Quantum Gis 2.8.1-Wien. Open Source Geospatial Foundation Project. <http://qgis.osgeo.org>.
- ROEL A. y J. TERRA 2006. *Agricultura de precisión: integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable. Muestreo de suelos y factores limitantes del rendimiento*. Ed: Bongiovani et al. Montevideo, Uruguay: PROCISUR/IICA. 4:65-80p.

- ROSS, F. 2012. *Densidad de plantas en maíz: ajuste por ambiente*. Informaciones agronómicas de Hispanoamérica – IPNI 8: 11-14.
- SATORRE, E.H. 1999. *Wheat: Ecology and Physiology of yield determination. Plant density and distribution as modifiers of growth and yield*. E.H. Satorre, and G.A Slafer (eds.), The Haworth Press, Inc. New York, London. Oxford. 141-159p.
- SATORRE, E.H. 2008. *Producción de Maíz. Elección del híbrido*. Suarez, M. Moreno, M. (eds.) Ciudad Autónoma de Buenos Aires, AACREA. 41-42p.
- SCHWARTZ, G. E. (1978). *Estimating the dimension of a model*. Annals of Statistics 6(2): 461–464.
- 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*. 12° Reunión Argentina de Agrometeorología, 8 al 10 de octubre de 2008. San Salvador de Jujuy. Argentina.
- SHANAHAN, J. F., T.A. DOERGE, J. J. JOHNSON, M. F. VIGIL. 2004. *Feasibility of Site-Specific Management of Corn, Hybrids and Plant Densities in the Great Plains*. Precision Agriculture, 5:207–225.
- TOLLENAAR, M. (1977). *Sink-source relationships during reproductive development in maize. A review*. Maydica 22:49-75.
- TUKEY, J.W. 1977. *Exploratory data analysis*. Addison-Wesley Reading, MA. 688pp.
- USDA. Departamento de Agricultura de Estados Unidos. *Producción mundial de Maíz*. En: <https://www.produccionmundialmaiz.com/>. Consultado: 13/06/2016.
- VIDELA MENEGUE, H.; A. CANALE; S. MUÑOZ. 2014. *Evaluación de diferentes densidades de plantas de maíz en siembras tempranas en ambientes contrastantes del territorio sudeste de Córdoba*. 13°Curso Internacional de Agricultura de Precisión. Manfredi, Córdoba. Argentina.
- WELLS, R. 1993. *Dynamics of soybean growth in variable planting patterns*. Agron. J. 85: 44-48.