



FCA
Facultad de Ciencias
Agropecuarias

Metodos cuantitativos para la investigación agropecuaria

2019



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons
Atribución – No Comercial – Sin Obra Derivada 4.0 Internacional.

Efecto de la densidad de siembra y dosis de fertilización nitrogenada sobre el rendimiento en cultivo de maíz (*Zea mays* L.)

Donadío, Nicolás M.

Pombo, Mayra S.

Tutor: Ing Agr. Paccioretti, Pablo

Co-tutor: Ing. Agr. Suarez, Franco



ÍNDICE DE CONTENIDOS

AGRADECIMIENTOS.....	6
RESUMEN	6
PALABRAS CLAVES	7
INTRODUCCIÓN	8
OBJETIVOS	12
Objetivo general	12
Objetivos específicos	12
MATERIALES Y MÉTODOS.....	12
Área de estudio	12
Datos.....	12
Análisis Estadístico	14
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	15
Ajuste de modelos.....	20
CONCLUSIÓN	22
BIBLIOGRAFÍA	23

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Dosis de fertilizante nitrogenado y densidad de siembra que determinaban cada tratamiento evaluado y cantidad de observaciones por tratamiento (n).....	14
Tabla 2. Frecuencias relativas por filas del tipo de dato resultante del proceso de depuración para los cuatro tratamientos evaluados.	16
Tabla 3. Medidas resumen del rendimiento del lote en estudio en 1696 sitios.....	16
Tabla 4. Estadística descriptiva para propiedades de suelo medidas en 1696 sitios.....	17
Tabla 5. Test t modificado. En el triángulo inferior coeficientes de correlación; en el triángulo superior p-valores.	19
Tabla 6. Rendimiento promedio ($qq\ ha^{-1}$) por tratamiento para cada zona delimitada por el método KM-sPC.....	20

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1. Ubicación del establecimiento en Nebraska, Estados Unidos (arriba). Mapa del lote en estudio (abajo).	13
Fig. 2. Distribución de los tratamientos en el lote estudiado. Trat. 1: 67 kg ha ⁻¹ y 66500 semillas ha ⁻¹ , Trat. 2: 83 kg ha ⁻¹ y 71500 semillas ha ⁻¹ , Trat. 3: 98 kg ha ⁻¹ y 81500 semillas ha ⁻¹ , Trat. 4: 113 kg ha ⁻¹ y 91500 semillas ha ⁻¹	14
Fig. 3. Distribución de frecuencias del rendimiento para cada tratamiento evaluado. Tratamiento 1: 67 kg ha ⁻¹ y 66500 semillas ha ⁻¹ ; Tratamiento 2: 83 kg ha ⁻¹ y 71500 semillas ha ⁻¹ ; Tratamiento 3: 98 kg ha ⁻¹ y 81500 semillas ha ⁻¹ y Tratamiento 4: 113 kg ha ⁻¹ y 91500 semillas ha ⁻¹	17
Fig. 4. Distribución de frecuencias para variables de suelo y topográficas. Pendiente; MO: materia orgánica; CEa 30: conductividad eléctrica aparente a 30 cm de profundidad; CEa 90: conductividad eléctrica aparente a 90 cm de profundidad; Aspecto; Elevación.....	18
Fig. 5. Potenciales zonas de manejo, determinadas por zonificación.....	20

AGRADECIMIENTOS

A nuestro tutor Ing. Agr. Paccioretti, Pablo y co-tutor Ing. Agr. Suarez, Franco por la predisposición y el acompañamiento en el desarrollo del trabajo investigativo.

A la cátedra de Estadística y Biometría de la Facultad de Ciencias Agropecuarias UNC, por brindarnos las herramientas necesarias para los procesos de investigación y desarrollo actuales.

A nuestras familias, amigos y compañeros por el apoyo incondicional a lo largo de estos años.

RESUMEN

Favorecidos por las tecnologías de precisión, numerosos ensayos de dosificación variable de insumos en campos de productores son llevados a cabo para determinar dosis óptimas. Además la utilización de covariables de sitio, como la conductividad eléctrica, contenido de materia orgánica y pendiente, permite determinar zonas homogéneas dentro del lote para un potencial manejo diferenciado del mismo. En este trabajo se analizaron datos de un ensayo de dosificación variable en maíz realizado en Nebraska, Estados Unidos. Utilizando modelos lineales mixtos se ajustaron rendimientos en función de la dosis de fertilizante y densidad de siembra. Se utilizó información auxiliar para delimitar potenciales zonas de manejo y se evaluó la conveniencia de un manejo diferencial. Los resultados sugirieron que hubo diferencia entre los niveles de fertilización y las diferentes densidades de siembra. La delimitación utilizando covariables de sitio correlacionadas con el rendimiento no arrojó diferencias significativas en relación con los tratamientos aplicados.

PALABRAS CLAVES

Agricultura de precisión, datos georeferenciados, estructura espacial, modelos lineales mixtos, zonas de manejo.

INTRODUCCIÓN

El maíz, a pesar de ser originario de América y no haber llegado a Europa hasta el siglo XVI, tras la colonización española, se ha convertido en un alimento básico para la población del mundo entero. Del maíz derivan multitud de productos, desde productos alimenticios e industriales que incluyen almidón, edulcorantes, aceites, bebidas, alcohol industrial y etanol. De todos los tipos de cereales y granos es el de mayor producción, por delante incluso del trigo o el arroz. Esto se debe también a su adaptabilidad genética, ya que es capaz de prosperar en climas tanto tropicales (Brasil), como subtropicales (Canarias) o templados (Francia).

Datos de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE), cuatro de los diez mayores productores de maíz del mundo son americanos: Estados Unidos, Brasil, Argentina y México los cuales en 2018 acumulaban casi el 50% de la producción mundial. De ellos, Estados Unidos, el país que encabeza la lista de productores, produjo el 32% de la producción mundial. Aproximadamente el 95% de la producción estadounidense se destina a la alimentación animal, especialmente cerdos y aves de corral. China fue el segundo país que más produjo en 2018, con un 23% del total mundial producido, una tendencia que va en aumento en los últimos años, no tanto como consecuencia de un cambio en su alimentación, sino como respuesta a la pujante industria ganadera asiática. Asimismo, el maíz se ha convertido en un alimento imprescindible en la dieta de la población africana, donde Sudáfrica, Nigeria y Etiopía lideran la producción en ese continente (Merino, 2019).

En relación con la campaña 2019/20, la producción de maíz en Argentina y Brasil se estimó que tuvo un volumen de 50 y 101 millones de toneladas respectivamente (Chacra y Campo Moderno, 2020). El reporte de oferta y demanda mundial del Departamento de Agricultura de Estados Unidos (por sus siglas en inglés, USDA) correspondiente a mayo muestra las primeras estimaciones de la campaña 2020/21. Estados Unidos alcanzaría un récord en la producción con 406,3 millones de toneladas, siendo la producción más alta de su historia. En 2005, el 28% de la superficie total sembrada con maíz fue cosechada utilizando maquinaria de precisión (Griffin y Erickson, 2009). En la actualidad las cosechadoras y maquinarias precisas permiten obtener gran cantidad de datos georreferenciados de rendimientos dentro de un lote o de otras propiedades sitio-específicas con los que se elaboran mapas de variabilidad espacial.

La Agricultura de Precisión (AP) es el conjunto de tecnologías que se aplican al trabajo en el campo, como satélites, sensores, imágenes y datos geográficos, que reúnen la información necesaria para entender las variaciones del suelo y los cultivos a una escala de lote. Favorecidos por la adopción de tecnologías de precisión por parte de los productores, numerosos experimentos son llevados a cabo, para estudiar el efecto de la dosificación variable de insumos

en sus lotes (Bullock et al., 2019). A partir de estos ensayos conducidos mediante AP, los productores pueden tomar decisiones más eficientes sobre la cantidad de insumos a utilizar como por ejemplo la densidad de siembra y la dosis de nitrógeno, además es posible predecir el rendimiento a cosecha. Estos avances permiten una reducción de los costos, debido a la utilización eficiente de insumos produciendo un aumento en los rendimientos y una mayor calidad del grano cosechado. La reducción en las dosis de insumos aplicados produce un menor impacto en el ambiente (Ag. Moderna, 2017).

Con la utilización de sensores proximales se puede obtener no sólo mediciones del rendimiento de cada sitio, sino también de otras características sitio-específicas que pueden afectar el rendimiento y podrían ser usadas para la delimitación de áreas homogéneas (Taylor et al., 2007). Diversas capas de datos con mediciones sobre distintos sitios del lote son actualmente utilizadas para la zonificación. Los patrones espaciales de variables de sitio, como las topográficas o las edafológicas, son más estables en el tiempo que aquellos asociados a factores transitorios que afectan la relación suelo-planta de manera diferente dependiendo del momento en el que se lo estudia (Scudiero et al. 2018). Entre las características de mayor estabilidad temporal, se citan propiedades de suelo tales como electro-conductividad aparente, la cual está correlacionada con la humedad, capacidad de intercambio catiónico, materia orgánica, textura y contenido de sales (Derby et al. 2007; Gili et al. 2017; Haghverdi et al. 2015; Peralta et al. 2015; Rossi et al. 2018; Tripathi et al. 2015) así como aquellas variables topográficas extraídas desde modelos digitales de elevación (Fraisse et al. 2001).

La conductividad eléctrica (CE) es un parámetro que muestra la capacidad de una disolución para transmitir corriente eléctrica. Esta aptitud depende principalmente del contenido, movilidad e interacción (fuerzas interiónicas) entre los iones (cationes y aniones) presentes en la disolución. Es decir que el valor de la CE depende de la concentración de sales disueltas. En agronomía, la CE se mide en el agua de riego o en la zona del suelo donde se expanden las raíces. Cada cultivo, por su característico sistema radical, es capaz de absorber, con más o menos facilidad, los nutrientes de la solución fertilizante dependiendo del valor de conductividad eléctrica. Si la conductividad eléctrica de la disolución o de las raíces se encuentra por encima del óptimo para el cultivo y variedad en cuestión, la planta tendrá que esforzarse más para poder absorber nutrientes. Esta situación conduce a la realización de un gasto de energía adicional por parte de la planta, y, en consecuencia, a la reducción del rendimiento productivo. Por el contrario, si la conductividad eléctrica se encuentra en su valor óptimo, la planta podrá nutrirse sin gastar apenas energía (Agri nova, 2019). La materia orgánica (MO) evita la disgregación de las partículas de suelo y disminuye su erosión, mantiene la humedad disponible para los cultivos y evita oscilaciones importantes de la temperatura, todo ello a la vez

que mejora la vida microbiana, favorece la población de micro y macroorganismos activos y aumenta la biodiversidad (Nieto del Rio, 2016). Las propiedades topográficas (elevación, pendiente y aspecto) influyen en el movimiento del agua y en el desarrollo del suelo a nivel del sitio intralote; por lo tanto, son indicadoras de variabilidad espacial del rendimiento (Peralta et al., 2012). La disponibilidad de nutrientes y de agua son limitantes para el crecimiento y desarrollo del cultivo y esto deriva en un cambio del rendimiento, ya que está fuertemente relacionado a las condiciones del suelo en donde se encuentre, la AP nos ayuda a determinar zonas de manejo las cuales son definidas por áreas del lote con factores limitantes similares, que luego podrán ser manejadas de manera diferencial (Córdoba, 2014). Estas áreas pueden ser delimitadas a partir del análisis conjunto de múltiples propiedades del sitio dentro del lote (Gambaudo et al., 2008).

El rendimiento en grano de un cultivo de maíz se compone del número de granos producidos y del peso medio de los mismos. Tanto el número como el peso de los granos responden a los cambios que experimentan las condiciones de crecimiento del cultivo (Cirilo y Andrade, 1994; Otegui, 1995). El número de granos cosechados en el cultivo responde a las variaciones en la tasa de crecimiento que experimenta el cultivo durante el período crítico (período de cuatro semanas centrado en la floración femenina), con una respuesta positiva del número de granos fijados ante aumentos en la tasa de crecimiento del cultivo hasta un valor a partir del cual el aumento del número de granos fijados se hace sensiblemente menor. Este comportamiento está relacionado con el estado fisiológico de las plantas individuales en el cultivo alrededor de la floración. Dicho estado se refleja en su tasa de crecimiento, y determina su capacidad para fijar granos durante esa etapa crítica (Vega et al., 2001). La relación es consistente aún para diversas situaciones de densidad de siembra, disponibilidad de agua, radiación, nitrógeno o régimen térmico que afectan la tasa de crecimiento de la planta (Andrade et al., 1999; Cantarero et al., 1999; Otegui y Andrade, 2000; Andrade et al., 2002), aunque se ha encontrado importante variabilidad genotípica en la respuesta ante estrés hídrico (Echarte y Tollenaar, 2006) o nitrogenado (D'Andrea et al., 2006). La fertilización con nitrógeno es indispensable ya que es uno de los nutrientes primarios que los cultivos requieren en mayores cantidades, éste incrementa el tamaño de las células, área foliar y la actividad fotosintética generando un impacto de manera positiva en el rendimiento del cultivo de maíz (Hashemi et al., 1994). Sin embargo, la respuesta del cultivo frente a diferentes dosis de fertilización nitrogenada o densidad de siembra depende de cada lote de producción y el análisis de ensayos conducidos en campos de productores para estimar el valor óptimo de insumo a aplicar aún no está ampliamente difundido.

La AP permite a los productores obtener información a través de variables de sitio de cada unidad productiva, la cual determina su capacidad de respuesta en los rendimientos, adecuando para cada lote una densidad de siembra y dosificación de fertilizante variable. Encontrar la dosis de N y la cantidad de semillas a sembrar óptima por unidad de superficie es uno de los desafíos a los que se enfrentan los sistemas agrícolas.

OBJETIVOS

Objetivo general

Comparar el efecto de la *densidad de siembra* y *dosis de nitrógeno* en el rendimiento de maíz considerando las características de sitio.

Objetivos específicos

- Determinar la existencia de correlación entre variables de sitio y rendimiento.
- Determinar la relación de la densidad de siembra y dosis de nitrógeno con el rendimiento.
- Determinar si es necesario un manejo diferencial del lote estudiado.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

Nebraska junto con otros estados, pertenecen al llamado cinturón del maíz o *Corn Belt*, en inglés, es una región del Medio Oeste de Estados Unidos donde el maíz ha sido, desde la década de 1850, la cosecha predominante. La región está formada por los estados de Iowa, Illinois, Indiana, Nebraska oriental, Kansas oriental, Minnesota meridional y partes de Misuri. Para el año 2008, los cuatro estados que producían más maíz eran Iowa, Nebraska, Illinois y Minnesota, donde el cultivo de maíz es preponderante y producen alrededor del 50% del maíz de Estados Unidos. La región se caracteriza por una tierra relativamente plana y suelos fértiles, profundos y con alto contenido de materia orgánica.

Datos

El ensayo fue realizado en un lote comercial de 63 ha con cultivo de maíz ubicado en el estado de Nebraska, Estados Unidos (40°19'00,5427" N; 97°02'01,4437" W). El lote contó con un pívot central de riego (Fig. 1).



Fig. 1. Ubicación del establecimiento en Nebraska, Estados Unidos (arriba). Mapa del lote en estudio (abajo).

El ensayo fue realizado bajo un diseño completamente aleatorizado. Para el análisis, el área de cada parcela fue dividida en cuatro, obteniendo así subparcelas (Fig. 2). Se evaluaron cuatro tratamientos conformados por diferentes niveles de densidad de siembra y dosis de fertilizante nitrogenado (Tabla 1). Se contó con datos georreferenciados de rendimiento ($qq\ ha^{-1}$), densidad de siembra ($semillas\ ha^{-1}$) y dosis de fertilizante nitrogenado aplicado ($kg\ ha^{-1}$). Además, para cada observación ($n=1840$) se midieron características edáficas y topográficas, tales como conductividad eléctrica aparente (CEa) medida en dos profundidades (30 cm y 90 cm), contenido de materia orgánica (MO), elevación (m), aspecto ($^{\circ}$) y pendiente (%).

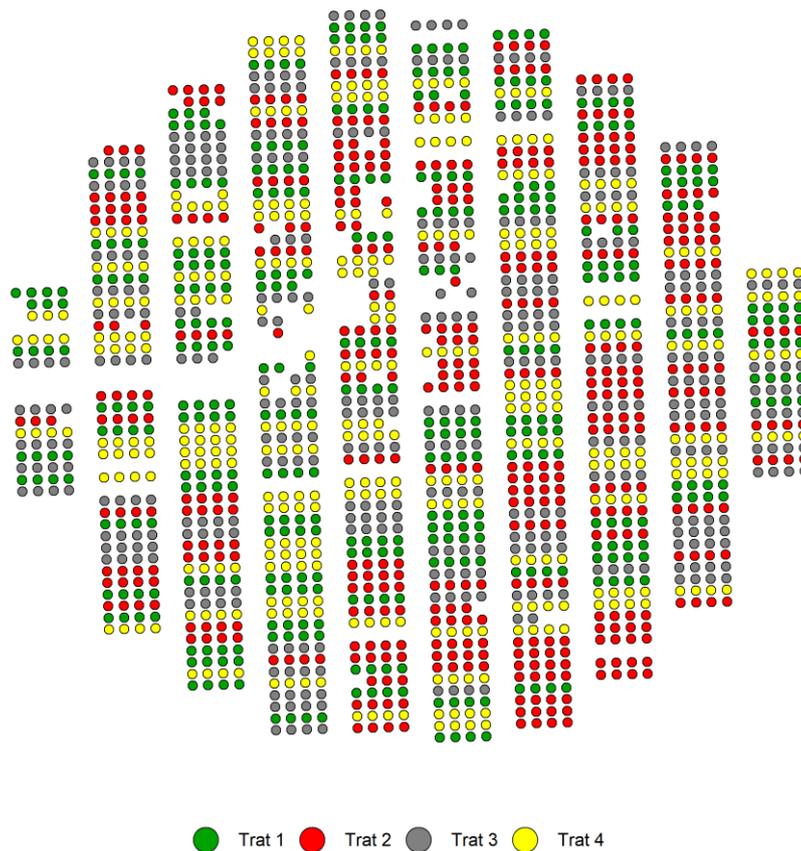


Fig. 2. Distribución de los tratamientos en el lote estudiado. Trat. 1: 67 kg ha⁻¹ y 66500 semillas ha⁻¹, Trat. 2: 83 kg ha⁻¹ y 71500 semillas ha⁻¹, Trat. 3: 98 kg ha⁻¹ y 81500 semillas ha⁻¹, Trat. 4: 113 kg ha⁻¹ y 91500 semillas ha⁻¹.

Tabla 1. Dosis de fertilizante nitrogenado y densidad de siembra que determinaban cada tratamiento evaluado y cantidad de observaciones por tratamiento (n).

Tratamiento	Dosis de Fert. Nitrogenado [kg ha ⁻¹]	Densidad de Siembra [semillas ha ⁻¹]	n
1	67	66500	410
2	83	71500	483
3	98	81500	411
4	113	91500	392

Análisis Estadístico

Se realizó una depuración de la variable rendimiento eliminando datos anormales que provinieron de errores de medición durante el proceso de la cosecha y que pueden afectar el resultado de los análisis. Se consideraron datos anormales (*outliers*) aquellas observaciones que se encontraron fuera del intervalo media ± 3 desvío estándar. Los *outliers* espaciales, conocidos también como *inliers*, son datos que difieren significativamente de su vecindario, pero se sitúan dentro del rango general de variación del conjunto de datos (Anselin, 1995). La eliminación de éstos se realizó utilizando Índice de Moran local (IM local). Para la construcción de la red de vecindarios, se consideraron vecinos aquellas observaciones que se encontraron a una distancia

menor de 100 metros. Este procedimiento fue realizado para cada tratamiento, de esta manera el efecto del tratamiento no incidía sobre la determinación de datos anormales.

Para saber si existió correlación entre las variables de sitio (elevación, pendiente, aspecto, CEa en ambas profundidades y MO), se realizó un test t modificado, el cual considera la correlación espacial de los datos. La correlación con el rendimiento se calculó sobre los residuos obtenidos mediante un modelo lineal donde se especificó como variable respuesta al rendimiento y como criterio de clasificación a los tratamientos, de esta manera la variable respuesta no contemplaba el efecto de estos últimos.

Además, se delimitaron potenciales zonas de manejo utilizando la clasificación KM-sPC la cual permite realizar una clasificación multivariada espacial (Córdoba, 2014). Para la delimitación se utilizaron las covariables de sitio (Conductividad eléctrica a 30 cm y materia orgánica). El número óptimo de zonas sugeridas se determinó en función del Índice Resumen el cual resume la información brindada por los índices de Xie Beni, Fukuyama Sugeno, el Coeficiente de Partición y Entropía de Partición, donde el menor valor indica el número de zonas sugeridas para el lote en estudio.

Para determinar el tratamiento óptimo y la conveniencia de un manejo por ambiente dentro del lote, se ajustaron modelos lineales mixtos los cuales incluían como efecto fijo el tratamiento, la zona y su interacción y como efecto aleatorio se especificó la parcela. Para evaluar la conveniencia de un término que contemple la correlación espacial de los datos, los errores se supusieron independientes y además, se contempló una correlación espacial de tipo exponencial. Para la selección del modelo de mejor ajuste se utilizaron el criterio de información de Akaike (AIC) y el criterio de información Bayesiano (BIC) (West et al., 2015). Mediante pruebas gráficas se comprobaron los supuestos de normalidad y homocedasticidad del análisis. Se realizaron las comparaciones de medias a través de LSD de Fisher. La importancia del estudio de la posible interacción entre los tratamientos y las zonas delimitadas radica en conocer si es apropiado adaptar dosis de nitrógeno y densidades de siembra diferenciadas para cada zona de manejo, logrando una mayor eficiencia en el uso de los insumos. El nivel de nivel significancia utilizado fue $\alpha=0,05$.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para todos los tratamientos, el proceso de depuración detectó y eliminó aproximadamente el 4% de los datos totales. Para el Tratamiento 2 y 4 se eliminó el 5% de las observaciones, mientras que para el tratamiento 1 se eliminó el 2% de las observaciones por

considerarse atípicas. La base de datos resultante de la depuración y la utilizada para los análisis contó con el 96% de los datos totales (n=1696) (Tabla 2).

Tabla 2. Frecuencias relativas por filas del tipo de dato resultante del proceso de depuración para los cuatro tratamientos evaluados.

Tratamiento	Tipo de dato		
	Normal	Outlier especial	Outlier global
1	0,98	0,01	0,01
2	0,95	0,03	0,02
3	0,96	0,02	0,02
4	0,95	0,02	0,03
Total	0,96	0,02	0,02

Luego de la depuración, se realizó un análisis descriptivo donde se calcularon medidas resúmenes del rendimiento para cada tratamiento (Tabla 3). Se observó una tendencia de aumento del rendimiento a medida que aumentaba la dosis de fertilizante nitrogenado y la densidad de siembra. Los tratamientos presentaron similar coeficiente de variación (CV), se observó que el tratamiento 3 (81500 semillas ha⁻¹ y 98 kg ha⁻¹) presentó la menor variabilidad (CV=4,12%). Por el contrario, las parcelas del tratamiento 1 (66500 semillas ha⁻¹ y 67 Kg ha⁻¹) presentó la mayor variación (CV= 5,02%). La similitud encontrada entre media y mediana para las variables medidas nos indicaría que las distribuciones podrían considerarse simétricas para todos los tratamientos (Fig. 3).

Tabla 3. Medidas resumen del rendimiento del lote en estudio en 1696 sitios.

Tratamiento	Media	D.E.	CV	Mediana
1	151,94	7,62	5,02	152,45
2	156,07	7,25	4,65	156,96
3	161,51	6,65	4,12	162,66
4	163,69	7,30	4,46	164,71

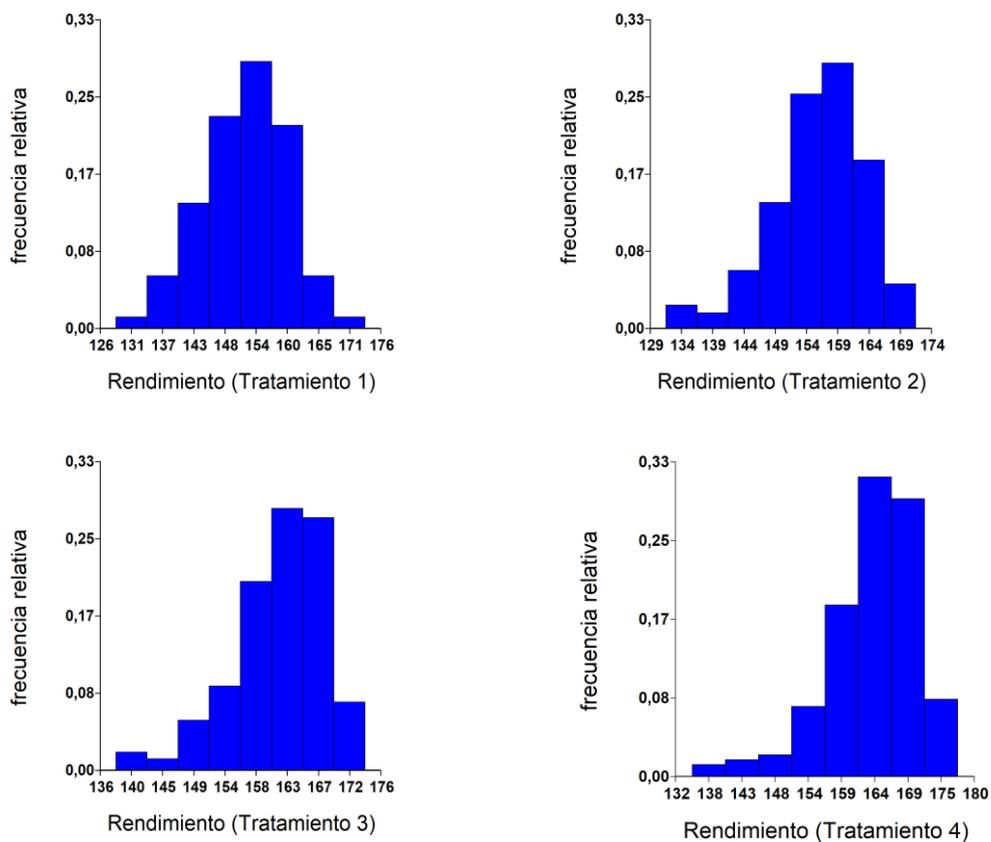


Fig. 3. Distribución de frecuencias del rendimiento (qq ha⁻¹) para cada tratamiento evaluado. Tratamiento 1: 67 kg ha⁻¹ y 66500 semillas ha⁻¹; Tratamiento 2: 83 kg ha⁻¹ y 71500 semillas ha⁻¹; Tratamiento 3: 98 kg ha⁻¹ y 81500 semillas ha⁻¹ y Tratamiento 4: 113 kg ha⁻¹ y 91500 semillas ha⁻¹.

Se realizó un análisis descriptivo para todas las covariables de sitio (Aspecto, CEa 90cm, CEa 30cm, elevación, MO y Pendiente) (Tabla 4). Se calcularon medias, medianas y coeficiente de variación (CV). Las variables Aspecto, Pendiente, CEa a 30cm y a 90cm de profundidad, presentaron una alta variación y valores de media mayores que la mediana, sugiriendo una distribución asimétrica. En cambio, la elevación y la MO presentaron bajos coeficientes de variación y una distribución más simétrica (Fig. 4).

Tabla 4. Estadística descriptiva para propiedades de suelo medidas en 1696 sitios.

Covariables	Media	CV	Mediana
Aspecto	168,86	50,68	148,66
CEa 90cm	55,59	28,03	54,41
CEa 30cm	27,65	31,89	26,81
Elevación	1432,47	0,20	1432,21
MO	1,72	3,01	1,72
Pendiente	2,06	56,42	1,88

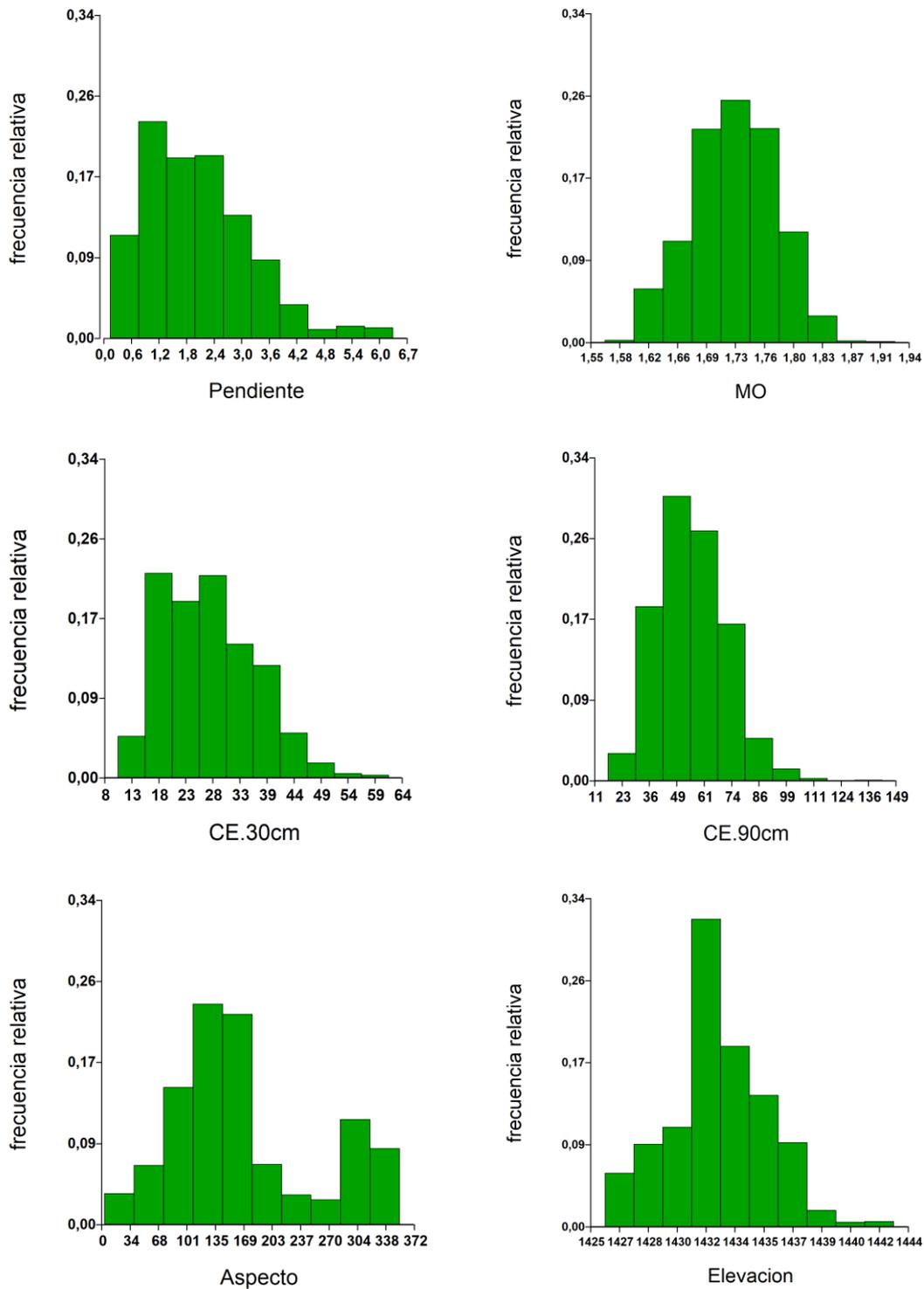


Fig. 4. Distribución de frecuencias para variables de suelo y topográficas. Pendiente (%); MO: materia orgánica (%); CEa 30: conductividad eléctrica aparente a 30 cm de profundidad ($dS\ m^{-1}$); CEa 90: conductividad eléctrica aparente a 90 cm de profundidad ($dS\ m^{-1}$); Aspecto ($^{\circ}$); Elevación (m).

Mediante el análisis Test t modificado, se observó que dos variables estuvieron correlacionadas con rendimiento, las cuales materia orgánica (MO) estuvo correlacionada de manera positiva, mientras que la conductividad eléctrica aparente a 30 cm estuvo

correlacionada de manera negativa. Independientemente del rendimiento la MO estuvo correlacionada de manera negativa con la conductividad eléctrica en ambas profundidades, mientras que la CEa 30cm se correlacionó con la pendiente y la elevación. No se observó correlación significativa entre el Aspecto y el resto de las variables evaluadas (Tabla 5). Las variables correlacionadas con el rendimiento (CEa 30cm y MO) fueron utilizadas para la delimitación de zonas de manejo. Los índices utilizados sugirieron que el número óptimo de zonas eran dos (Fig. 5). Los rendimientos obtenidos para los tratamientos en las diferentes zonas se muestran en la tabla 6. Se observaron bajas diferencias entre los tratamientos de cada zona (valores entre 2,14 qq ha⁻¹ y 3,60 qq ha⁻¹).

Tabla 5. Test t modificado. En el triángulo inferior coeficientes de correlación; en el triángulo superior p-valores.

Variable	Pendiente	Aspecto	Elevación	CEa 90cm	CEa 30cm	MO	Rendimiento
Pendiente	--	0,75	<0,05	<0,05	<0,05	0,31	0,18
Aspecto	-0,05	--	0,23	0,62	0,54	0,29	0,19
Elevación	0,46	0,20	--	<0,05	<0,05	0,09	0,63
CEa 90cm	0,37	0,04	0,29	--	<0,05	<0,05	0,13
CEa 30cm	0,36	0,04	0,31	0,81	--	<0,05	<0,05
MO	-0,10	-0,11	-0,21	-0,34	-0,42	--	<0,05
Rendimiento	0,14	-0,14	-0,04	-0,08	-0,20	0,18	--



Fig. 5. Potenciales zonas de manejo, determinadas por zonificación.

Tabla 6. Rendimiento promedio (qq ha⁻¹) por tratamiento para cada zona delimitada por el método KM-sPC.

Tratamiento	Zona 1	Zona 2
1	150,60	153,44
2	154,28	157,88
3	160,02	163,26
4	162,60	164,74

Ajuste de modelos

Al evaluar los modelos ajustados, uno asumiendo errores independientes y otro asumiendo errores correlacionados espacialmente, el modelo que presentó menor valor de AIC Y BIC era aquel que contemplaba una correlación espacial de tipo exponencial en los errores (Tabla 7).

Tabla 7. Criterio de Información de Akaike (AIC) y Criterio de Información Bayesiano (BIC) para cada uno de los modelos analizados a partir de datos provenientes de rendimiento de maíz. Menor valor indica mejor ajuste.

	AIC	BIC
Errores Independientes	10601,45	10655,77
Correlación espacial Exponencial	10475,12	10534,86

A partir del ajuste del modelo, se observó que hubo diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos y entre las zonas delimitadas (p -valor $< 0,05$); sin embargo, no se observó una interacción significativa entre los tratamientos y las zonas delimitadas (p -valor = 0,5463). Se compararon las medias de los tratamientos mediante una prueba LSD Fisher, se observó que todos los rendimientos presentaron diferencias significativas, los mayores rendimientos ($163,69 \text{ qq ha}^{-1}$) se obtuvieron con una densidad de siembra de $91500 \text{ semillas ha}^{-1}$ y una dosis de fertilizante nitrogenado de 113 Kg ha^{-1} (tratamiento 4). Los menores rendimientos ($151,94 \text{ qq ha}^{-1}$) se obtuvieron con el tratamiento 1 ($66500 \text{ semillas ha}^{-1}$ y 67 kg ha^{-1} de fertilizante) (Fig. 6). Dado que el ensayo no se realizó con un diseño factorial, es decir cruzando los cuatro niveles de ambos factores (dosis de fertilizante y densidad de siembra), no se pudo evaluar relaciones entre los tratamientos como la interacción entre los distintos niveles de fertilización y densidad de siembra, pudiendo perder valiosa información al momento del análisis.

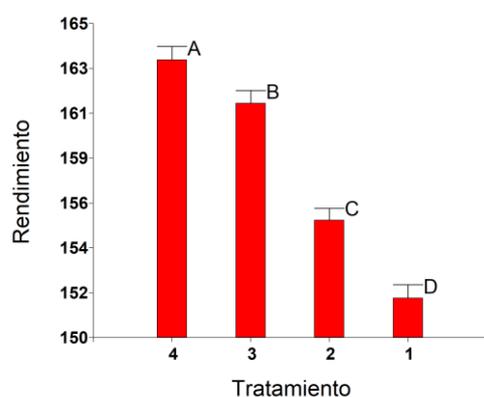


Fig. 6. Comparaciones LSD Fisher del rendimiento (qq ha^{-1}) en función de los tratamientos evaluados. Tratamiento 1: 67 kg ha^{-1} y $66500 \text{ semillas ha}^{-1}$; Tratamiento 2: 83 kg ha^{-1} y $71500 \text{ semillas ha}^{-1}$; Tratamiento 3: 98 kg ha^{-1} y $81500 \text{ semillas ha}^{-1}$ y Tratamiento 4: 113 kg ha^{-1} y $91500 \text{ semillas ha}^{-1}$.

Mediante una clasificación KM-sPC se determinaron dos zonas homogéneas dentro del área de estudio, en este trabajo los resultados sugirieron que no se justifica realizar un manejo diferencial entre las zonas delimitadas dado que no se encontró diferencias significativas en la interacción zona*tratamiento. Pueden ser necesarios varios años de estudios en el mismo lote para entender mejor las interacciones entre la variabilidad espacial en las propiedades del sitio

y la productividad de los cultivos (Bongiovanni et al., 2006). Estos resultados podrían estar influenciados por el efecto del riego dentro del lote. En este trabajo se encontró una respuesta favorable a la fertilización nitrogenada en maíz, concordando con Hashemi et al. (1994) la fertilización con Nitrógeno es indispensable ya que genera un impacto positivo en el rendimiento del cultivo de maíz.

CONCLUSIÓN

Para un mejor ajuste de los modelos es necesario considerar la correlación espacial de los datos. La realización de ensayos en un mismo lote durante diferentes años agrícolas podría ayudar a delimitar zonas de manejo de manera más eficiente. A través de los resultados obtenidos del modelo, y dado que la interacción entre los tratamientos y las zonas no resultó significativa, no sería beneficioso tratar el lote de manera diferencial.

Se recomienda que para futuros ensayos se realice una combinación entre las distintas densidades de siembra y dosis de nitrógeno para lograr una mayor variabilidad en la respuesta del rendimiento.

BIBLIOGRAFÍA

- Agri Nova Science (19 de julio de 2020) ¿Cómo entender la conductividad eléctrica de nuestro suelo? Recuperado 6 de noviembre del 2020. <https://www.agri-nova.com/noticias/como-entender-la-conductividad-electrica-de-nuestro-suelo>
- Agricultura Moderna (1 de noviembre de 2017) Agricultura de precisión ¿De qué se trata? Recuperado 18 de septiembre de 2020. <https://www.agmoderna.com.ar/tecnologia-en-el-campo/agricultura-de-precision-de-que-se-trata>
- Andrade F.H., C. Vega, S.A. Uhart, A.G. Cirilo, M.G. Cantarero y O. Valentinuz. 1999. Kernel number determination in maize. *Crop Sci.*:39:453-459.
- Anselin L. 1995. Local indicators of spatial association – LISA. *Geographical Analysis*, 27: 93-115
- Bongiovanni R., Montovani E.C., Best S. y Roel, A. 2006. Agricultura de precisión: Integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable. PROCISUR/ IICA, Montevideo, 246 pp.
- Bullock, D. S., Boerngen, M., Tao, H., Maxwell, B., Luck, J. D., Shiratsuchi, L., Puntel, L., & Martin, N. F. (2019). The Data-Intensive Farm Management Project: Changing Agronomic Research Through On-Farm Precision Experimentation. *Agronomy Journal*, 111(6), 2736–2746. <https://doi.org/10.2134/agronj2019.03.0165>
- Buratti E., Dominici E., Testa M., (2016) Comparación del rendimiento de soja (*Glycine max L.*) según dosis de fertilización fosforada y densidad de siembra variable en ensayos de agricultura de precisión.
- Cantarero M.G., A.G. Cirilo y F.H. Andrade. 1999. Night temperature at silking affects kernel set in maize. *Crop Sci.*, 39:703-710.
- Chacra y Campo Moderno (12 de mayo de 2020) La producción de maíz en Estados Unidos superaría las 400 millones de toneladas y sería récord. <https://www.revistachacra.com.ar/nota/34268-la-produccion-de-maiz-en-estados-unidos-superaria-las-400-millones-de-toneladas-y-seria-record>
- Cirilo, A.G. y Andrade F.H. (1994): Sowing date and maize productivity: I. Crop growth and dry matter partitioning. *Crop Sci.* 34:1039-1043.
- Cirilo, A. (2004). [Online] Retrieved November 15, 2018, from http://www.syngentaenvivo.com.ar/2014/manual/files/maiz_fecha_y_densidad_de_siembra.htm&strip=1&vwsrc=0
- Córdoba, M. A. (2014). Herramientas estadísticas para el monitoreo y uso de la variabilidad espacial del rendimiento y propiedades de suelo intralote.

- Córdoba M, Bruno C, Aguata F, Tablada M, Balzarini M. 2014. Análisis de la variabilidad espacial en lotes agrícolas. Manual de Buenas Prácticas. Ed. Balzarini, M. Eudecor. Córdoba, Argentina.
- D'Andrea K.E., Otegui M.E., Cirilo A.G. y Eyhérbide G. 2006. Genotypic Variability in Morphological and Physiological Traits among Maize Inbred Lines – Nitrogen Responses. *Crop Science*, 46:1266-1276.
- Derby, N. E., Casey, F. X. M., & Franzen, D. W. (2007). Comparison of Nitrogen Management Zone Delineation Methods for Corn Grain Yield. *Agronomy Journal*, 99(2), 405. <https://doi.org/10.2134/agronj2006.0027>
- Di Rienzo, J. A., Casanoves, F., Balzarini, M. G., Gonzalez, L. A., Tablada, E. M., Robledo, C. W. (2011). Infostat Software Estadístico. Córdoba, Argentina: URL <http://www.infostat.com.ar>. Retrieved December 11, 2018
- Echarte, L., y Tollenaar, M. 2006. Kernel set in maize hybrids and their inbred lines exposed to stress. *Crop Sci.* 46, 870–878
- Fraisse, C. W., Sudduth, K. A., & Kitchen, N. R. (2001). Delineation of Site-Specific Management Zones by Unsupervised Classification of Topographic Attributes and Soil Electrical Conductivity. *Transactions of the ASAE*, 44(1), 155–166. <https://doi.org/10.13031/2013.2296>
- Gambaudo, S., Fontanetto, H., Beccria, G., Boretto, D., Albrecht, J., & Tron, L. (2008). Recuperación de suelos halomórficos mediante la Agricultura de Precisión. Información técnica de cultivos de verano. *Publicación Miscelánea*, (112)
- García E., Flego F., Agricultura de precisión. Recuperado el 07 de julio de 2020 de <https://www.palermo.edu/ingenieria/downloads/pdfwebc&T8/8CyT12.pdf>
- Gili, A., Álvarez, C., Bagnato, R., & Noellemeyer, E. (2017). Comparison of three methods for delineating management zones for site-specific crop management. *Computers and Electronics in Agriculture*, 139, 213–223. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.05.022>
- Griffin, T., & Erickson, B. (2009). Adoption and use of yield monitor technology for US crop production. *Site Specific Management Center Newsletter*.
- Haghverdi, A., Leib, B. G., Washington-Allen, R. A., Ayers, P. D., & Buschermohle, M. J. (2015). Perspectives on delineating management zones for variable rate irrigation. *Computers and Electronics in Agriculture*, 117, 154–167. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.06.019>
- Hashemi, D.A.; Kocheiki, A. and Banaiyan, A. 1994. Increase Crop Yield. Translation. Mashmad University Press. 76 p. Recuperado el 07 de julio de 2020 de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342015000801903

- Lago González, C., Sepúlveda Peña, J. C., Barroso Abreu, R., Fernández Peña, F. Ó., Maciá Pérez, F., & Lorenzo, J. (2011). Sistema para la generación automática de mapas de rendimiento. Aplicación en la agricultura de precisión. *Idesia (Arica)*, 29(1), 59–69. <https://doi.org/10.4067/S0718-3429201100010000>
- Merino, A. (2019) Los países que más maíz producen. Organización para la cooperación y el desarrollo económico. Recuperado el 6 de noviembre de 2020 www.elordenmundial.com
- Montgomery, D. C. (2008). Design and analysis of experiments. John Wiley & Sons.
- Nieto del Río, J. (01 de diciembre de 2016). La importancia de la materia orgánica en el suelo. Informe agrícola donde la agricultura siempre es primero. <https://www.informeagricola.com/la-importancia-de-la-materia-organica-en-el-suelo>
- Otegui, M. (1995) Prolificacy and Grain Yierd Component in Modern Argentinian Maize Hybrids.
- Peralta N., Costa J.L., Castro Franco M. y Balzarini M. 2012. Delimitación de zonas de manejo con modelos de elevación digital y profundidad de suelo. *Interciencia* 38(6) 418–424.
- Rossi, R., Pollice, A., Bitella, G., Labella, R., Bochicchio, R., & Amato, M. (2018). Modelling the non-linear relationship between soil resistivity and alfalfa NDVI: A basis for management zone delineation. *Journal of Applied Geophysics*, 159, 146–156. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2018.08.008>
- Scudiero, E., Teatini, P., Manoli, G., Braga, F., Skaggs, T., & Morari, F. (2018). Workflow to Establish Time-Specific Zones in Precision Agriculture by Spatiotemporal Integration of Plant and Soil Sensing Data. *Agronomy*, 8(11), 253. <https://doi.org/10.3390/agronomy8110253>
- Taylor J.A., McBratney A.B. and Whelan B.M. 2007. Establishing Management Classes for Broadacre Agricultural Production. *Agron. J.* 99: 1366–1376
- Tripathi, R., Nayak, A. K., Shahid, M., Lal, B., Gautam, P., Raja, R., Mohanty, S., Kumar, A., Panda, B. B., & Sahoo, R. N. (2015). Delineation of soil management zones for a rice cultivated area in eastern India using fuzzy clustering. *Catena*, 133, 128–136. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.05.009>.
- Vega, C.R.C., F.H. Andrade, V.O. Sadras, S.A. Uhart, and O.R. Valentinuz. 2001b. Seed number as a function of growth. A comparative study in soybean, sunflower, and maize. *Crop Science* 41:748-754.
- West T.B., Welch K.B., Galecki A.T. 2015. Linear mixed models: a practical guide using statistical software. 2 ed. Chapman & Hall/CRC