

Comparación de dos métodos de análisis espacial en etapas de selección sin réplicas de caña de azúcar (*Saccharum spp.*) en Tucumán, R. Argentina*

Ernesto R. Chavanne**, Jorge V. Díaz**, María B. García** y María I. Cuenya**

RESUMEN

El propósito de este estudio fue comparar dos métodos de análisis espacial aplicados en la segunda etapa de selección del Programa de Mejoramiento Genético de la Caña de Azúcar (PMGCA) de la Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC), Tucumán, Argentina. Se analizaron dos ensayos experimentales sin repeticiones en edad soca 1, uno de los cuales contenía 200 clones con 20 pares de testigos (Santa Ana, Río Chico); y el otro, 25 clones con 4 pares de testigos (Las Talitas, Tafí Viejo). Para la comparación de los métodos de ajuste espacial se calcularon las eficiencias relativas del Índice Normalizado y del análisis espacial autorregresivo de primer orden, sobre cinco variables evaluadas: número de tallos por parcela, peso individual del tallo, rendimiento fabril % estimado y kilogramos de caña y de azúcar por parcela, respectivamente. La eficiencia relativa del Índice Normalizado fue poco consistente, variando desde 2,9% a 38,2% según la característica analizada en la localidad de Santa Ana; y desde 0% a 79,8% en Las Talitas. La eficiencia relativa del Análisis Espacial fue mayor que la del Índice Normalizado, oscilando desde 14,4% a 262,5% en Santa Ana; y desde 16,5% a 106,9% en Las Talitas. Los coeficientes de correlación entre los valores ajustados y sin ajustar fueron consistentemente superiores para el caso del análisis espacial autorregresivo de primer orden, indicando que este método puede ser utilizado para incrementar la eficiencia en la segunda etapa de selección del PMGCA de la EEAOC.

Palabras clave: eficiencia relativa, ensayos experimentales sin réplicas, análisis espacial.

ABSTRACT

Comparison of two spatial analysis methods used at early stages of sugarcane (*Saccharum spp.*) selection program in Tucumán, Argentina

This work compares the efficiency of two spatial analysis methods when used at the second stage of selection in the sugarcane breeding programme of Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (Tucumán, Argentina). Two trials that had been planted in May 2010 at first ratoon age were evaluated: one of them consisted of 200 clones Serie 2008 and 20 pairs of controls, planted in Santa Ana (Río Chico), and the other included 25 clones Serie 2008 and four pairs of controls, planted in Las Talitas (Tafí Viejo). Spatial data fitting methods were compared by calculating the relative efficiency of the normalization index and the first-order spatial autoregressive model in relation to the assessment of the following five variables: stalk number, individual stalk weight, estimated factory yield (%), and kilograms of cane and sugar per plot. The relative efficiency of the Normalized Index proved to be inconsistent and depended on the assessed parameter: it ranged from 2.9% to 38.2% in Santa Ana, and from 0.0% to 79.8% in Las Talitas. Spatial Analysis showed a higher relative efficiency, with values between 14.4% and 262.5% in Santa Ana, and between 16.5% and 106.9% in Las Talitas. Correlation coefficients between fitted and unfitted values were consistently higher in Spatial Analysis, thus demonstrating that this method can be used to improve procedures at early stages of sugarcane genotype selection.

Key words: relative efficiency, early stages of selection, spatial analysis.

Recibido: 4-10-17 - Aceptado: 14-06-19

*Trabajo presentado en la XXa Reunión Técnica Nacional de la Caña de Azúcar. Tucumán, Argentina. 6 - 8 de abril de 2016.

**Sección Caña de Azúcar, EEAOC. echavanne@eeaoc.org.ar

INTRODUCCIÓN

En las etapas tempranas de selección de los Programas de Mejoramiento Genético de caña de azúcar (*Saccharum* spp.), es frecuente la implantación de ensayos con un gran número de clones multiplicados en parcelas pequeñas sin repetición debido a la escasa disponibilidad de material de propagación y a que ocupan, en general, una importante superficie de experimentación (Jackson and Mc Rae, 2001). Como consecuencia de esto y debido a la existencia de gradientes de fertilidad de los suelos y a los efectos de competencia entre parcelas vecinas, frecuentemente se afecta la eficiencia de la selección, disminuyendo en consecuencia la precisión para detectar genotipos superiores (Becher, 1995).

Con el propósito de disminuir los efectos de competencia entre genotipos y la variabilidad atribuida a la heterogeneidad del suelo, se pueden utilizar diseños experimentales que permiten disminuir o corregir estos efectos negativos. Algunos de ellos son diseños aumentados o enriquecidos, bloques incompletos, diseños alfa látice en filas y columnas y modelos mixtos (Federer, 1961; Grondona *et al.*, 1996).

Para ensayos con numerosos genotipos de caña de azúcar sin repeticiones, el diseño aumentado o enriquecido fue primeramente recomendado por Federer (1961) y es utilizado por algunos programas de mejoramiento de Brasil para el control de la variabilidad espacial en etapas tempranas de selección clonal (Duarte and Vencovsky, 2005). Una alternativa de estos diseños aumentados es repetir varias veces las variedades utilizadas como testigos, siendo necesario que estos reaccionen del mismo modo que los materiales evaluados al suelo, al clima y a distintas prácticas agronómicas del experimento. De este modo, es preferible emplear al menos dos testigos para evitar que posibles interacciones de alguno de ellos con el ambiente invaliden su función como tal. A mayor cantidad y frecuencia de los testigos utilizados, se obtiene un mejor control de la variabilidad local (Chanda, 1994).

El método de corrección espacial denominado Índice Normalizado (IN) se aplica frecuentemente sobre macroparcels de soja (Devani *et al.*, 2001) y esta metodología fue adoptada en caña de azúcar a partir del año 2010, en los ensayos de la segunda etapa de selección del Programa de Mejoramiento Genético (PMGCA) de la Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC) (Informe Anual EEAOC, 2011). En estos ensayos, cada genotipo está representado por una parcela de 3 m de longitud, con un distanciamiento entre surcos de 1,6 m. En esta etapa se evalúan aproximadamente 5000 genotipos, de los cuales se selecciona alrededor del 10% superior - unos 500 clones sobresalientes-, los que pasan a la siguiente etapa de selección. De esta manera, el PMGCA decidió incrementar la cantidad de parcelas testigo tratando

de mantener una proporción de 10 clones por cada testigo, utilizando como controles de referencia las variedades TUCCP 77-42 y LCP 85-384, por tener ambas amplia difusión comercial en el área cañera de Tucumán, Argentina (Ostengo *et al.*, 2015).

En Australia, Stringe y Cullis (2002) aplicaron técnicas de análisis espacial (modelos mixtos autorregresivos de tipo AR1) para corregir la variabilidad espacial y los efectos de la competencia entre parcelas vecinas, en ensayos no repetidos en etapas tempranas de selección del programa de mejoramiento de caña de azúcar de ese país.

El objetivo de este trabajo fue comparar la eficiencia relativa de dos procedimientos estadísticos de corrección espacial (Índice Normalizado y análisis espacial autorregresivo de primer orden AR1), sobre ensayos sin réplicas de clones de caña de azúcar, correspondientes a la segunda etapa de selección del PMGCA de la EEAOC en Tucumán, Argentina.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para realizar este estudio se utilizó la información de dos ensayos correspondientes a la segunda etapa de selección del PMGCA. Uno de los ensayos, implantado en la localidad de Santa Ana (departamento Río Chico, Tucumán, Argentina), comprendió 200 clones y 20 pares de testigos intercalados en bloques incompletos (relación 10:1). El otro ensayo, ubicado en Las Talitas (departamento Tafí Viejo, Tucumán, Argentina) comprendió 25 clones y cuatro pares de testigos en bloques incompletos (relación 6:1). En ambos casos la distribución de los genotipos fue aleatoria y los testigos fueron intercalados en forma sistemática.

Las variables analizadas en la edad de soca 1 (año 2012) fueron: número de tallos/parcela (NUTA); peso por tallo (PPT) y rendimiento fabril % (RF%), obtenido a partir de muestras de 10 tallos en el mes de junio; kilogramos de caña por parcela (KCP), calculado como el producto entre NUTA y PPT; y finalmente, kilogramos de azúcar por parcela (KAP), estimado por el producto entre KCP y RF%.

En el análisis estadístico de los datos se utilizó la técnica del Índice Normalizado (IN), que consiste en obtener la semi suma del par de testigos de cada bloque incompleto, dividido en el promedio general de los testigos del ensayo (Devani *et al.*, 2001). Por otro lado, se aplicó la metodología de modelos mixtos (análisis espacial autorregresivo de primer orden), utilizando los programas estadísticos Infostat versión 2012 y R versión 3.1.3 (Di Rienzo *et al.*, 2012), considerando el genotipo como efecto aleatorio, y los testigos y bloques como efectos fijos, según el siguiente el modelo estadístico:

$$y_{ijk} = \mu + g_i + c_j + \beta_k + \varepsilon_{ijk}$$

donde μ es la media general, g_i es el efecto de genotipo (o clon) y el error experimental ϵ_{ijk} considerados como efectos aleatorios, mientras que c_j indica el efecto de los pares de testigos dentro de bloques β_k considerados como efectos fijos.

Para cada variable utilizada se realizó un análisis de la variancia convencional (ANAVA) que se comparó con el Análisis Espacial (AE). Para calcular la eficiencia relativa (ER%) del método espacial sobre la del ANAVA, se utilizaron los errores estándar de las diferencias (ERD) o de las predicciones, basada en la fórmula propuesta por Cullis y Gleeson (1991):

$$ER\% = [100 \times (ERD_{\text{estándar}}) / (ERD_{\text{espacial}})] - 100$$

Para los IN se calcularon las ER% en función de las reducciones de las variancias de los testigos no ajustados en comparación con los valores ajustados por este índice.

Se calcularon también los coeficientes de correlación de Pearson entre los valores ajustados y no ajustados de las cinco características evaluadas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En las Tablas 1 y 2 se muestran los resultados de eficiencia relativa (ER%) de los dos métodos de corrección

espacial utilizados en este estudio: Índice Normalizado (IN) y Análisis Espacial (AE), en los dos ensayos analizados en Etapa II: Santa Ana (Tabla 1) y Las Talitas (Tabla 2).

En la Tabla 1, se observa que aplicando el IN como técnica de ajuste espacial, la eficiencia relativa (ER%) aumentó con respecto a los datos sin ajustar en forma variable de acuerdo con la característica analizada, con valores que oscilaron entre el 2,9% para PPT y el 38,2% para NUTA. Para los caracteres KCP y KAP, la eficiencia relativa resultó negativa, indicando que las estimaciones de los errores estándar fueron mayores en los valores ajustados (Aj) que en los no ajustados (NAj). En la misma Tabla se observa que con la metodología del análisis espacial AR1, los valores de ER% fueron mayores que los de ER%, aplicando el IN para todas las variables analizadas.

En la Tabla 2, se observa que con la aplicación del IN y considerando las variables NUTA, PPT y RF%, la eficiencia relativa osciló entre 0% para PPT y 79,8% para RF%. Otra vez, la ER% resultó en valores negativos para KCP y KAP por idénticas causas que las recién explicadas para el ensayo de Santa Ana con respecto a los datos sin ajustar. Con la utilización del análisis espacial, la ER% obtenida en el ensayo de Las Talitas resultó mayor que la estimada a partir del IN para todas las variables.

Tabla 1. Eficiencia relativa (ER%) de dos métodos de corrección espacial: Índice Normalizado (IN) y Análisis Espacial (AE), aplicados sobre el análisis de la variancia convencional (ANAVA) en parcelas de genotipos no repetidos y testigos de la Etapa II del PMGCA. Localidad de Santa Ana (Río Chico), Tucumán.

Carácter	Índice Normalizado (IN)			ANAVA		Análisis Espacial (AE)		
	σ^2 Test. NAj	σ^2 Test. Aj	ER%	σ^2 E.E.	ERD ^(*)	Σ^2 ESP	ERD ^(*)	ER%
NUTA	119,25	86,27	38,23	221,34	52,61	172,27	25,77	104,15
PPT	0,35	0,34	2,94	0,01	0,02	0,01	0,01	100,00
RF%	2,34	1,88	24,47	0,77	1,45	3,21	0,40	262,50
KCP	505,73	655,30	-22,82	211,18	137,59	205,52	120,27	14,40
KAP	2,51	4,16	-39,66	3,22	1,71	3,22	1,31	30,53

Tabla 2. Eficiencia relativa (ER%) de dos métodos de corrección espacial: Índice Normalizado (IN) y Análisis Espacial (AE), aplicados sobre el análisis de la variancia convencional (ANAVA) en parcelas de genotipos no repetidos y testigos de la Etapa II del PMGCA. Localidad de Las Talitas (Tafi Viejo), Tucumán.

Carácter	Índice Normalizado (IN)			ANAVA		Análisis Espacial (AE)		
	σ^2 Test. NAj	σ^2 Test. Aj	ER%	σ^2 E.E.	ERD ^(*)	Σ^2 ESP	ERD ^(*)	ER%
NUTA	171,24	159,95	7,06	329,83	289,30	212,13	185,700	55,79
PPT	0,07	0,07	0	0,01	0,07	0,01	0,04	75,00
RF%	1,69	0,94	79,79	0,94	0,60	0,01	0,29	106,90
KCP	648,82	677,55	-4,24	227,59	128,78	227,59	106,13	21,34
KAP	4,55	5,13	-11,31	2,91	1,27	2,91	1,09	16,51

(*) Error Estándar promedio de las diferencias entre clones; NAj: Valores no ajustados; Aj: Valores ajustados; σ^2 E.E.: Variancia del Error Estándar; Σ^2 ESP: Estimación de la variancia del error por AE.

La eficiencia relativa puede ser tomada como un indicador indirecto de la existencia de heterogeneidad edáfica en los lotes experimentales y sugiere que en la segunda etapa de selección clonal del PMGCA se hace necesario utilizar técnicas de análisis espacial de manera rutinaria, a fin de incrementar la ganancia genética en las etapas tempranas de selección clonal de la caña de azúcar. Resultados similares fueron obtenidos por Stringer and Cullis (2002) en Australia y por Edmé *et al.* (2007) en Estados Unidos.

En la Tabla 3 se observa que el coeficiente de correlación de Pearson (*r*) entre las medias ajustadas y sin ajustar por ambos métodos de análisis espacial fueron altamente significativos ($P < 0,001$) en las cinco variables analizadas y en los dos sitios experimentales. En la mayoría de los casos, el método de análisis espacial evidenció mayores valores de correlación respecto a la técnica del IN. Los valores más elevados de correlación oscilaron entre 0,84 y 0,98 para RF% y los valores más bajos entre 0,57 y 0,73 para KAP. Las correlaciones altamente significativas detectadas para todas las características analizadas indicarían que los ajustes espaciales permiten incrementar la respuesta a la selección de los caracteres sujetos a selección al disminuir los efectos negativos de la variabilidad espacial dentro del soporte experimental.

Tabla 3. Coeficientes de correlación de Pearson entre medias ajustadas y no ajustadas por el Índice Normalizado (IN) y por Análisis Espacial (AE) en ensayos sin réplicas de la Etapa II del PMGCA, ubicados en las localidades de Santa Ana y Las Talitas, Tucumán.

Características	Santa Ana		Las Talitas	
	IN	AE	IN	AE
NUTA	0,73**	0,79**	0,87**	0,94**
PPT	0,86**	0,85**	0,85**	0,96**
RF%	0,92**	0,97**	0,84**	0,98**
KCP	0,65**	0,80**	0,62**	0,86**
KAP	0,67**	0,73**	0,57**	0,67**

** Altamente significativo ($P < 0,001$)

CONCLUSIONES

A partir de los resultados presentados en este estudio fue posible establecer las siguientes conclusiones:

- Se comprobó que la utilización de testigos repetidos y la posterior aplicación de técnicas de análisis espacial puede ser un recurso eficaz para incrementar la eficiencia relativa en ensayos sin réplicas de clones de caña de azúcar en etapas tempranas de selección.
- Se confirmó que la técnica de análisis espacial utilizando modelos AR1 tuvo mayor eficiencia relativa que la técnica del IN en todos los caracteres de interés económico evaluados en este estudio.

BIBLIOGRAFÍA CITADA

Becher, H. H. 1995. On the importance of soil homogeneity when evaluating field trials. *J. of Agron. & Crop Sci.* 174: 33-40.

Chanda, S. 1994. Efficiency of check-plot designs in unreplicated field trials. *Theor. Appl. Genet.* 88: 618-620.

Cullis, B. R. and A. C. Gleeson. 1991. Spatial analysis of field experiments-an extension to twodimensions. *Biometrics* 47:1449-1460.

Devani, M. R.; F. Ledesma; J. M. Lenis; L. D. Ploper; M. B. García; M. A. Zamorano; D. Gamboa; M. C. Hasán; G. López; C. Lamelas y J. Valderrábano. 2001. Red de evaluación de cultivares de soja para el NOA. Resultados de la campaña 2000/2001. EEAOC, Las Talitas, Argentina. Publ. Espec. (21).

Duarte, J. B. and R. Vencovsky. 2005. Spatial statistical analysis and selection of genotypes in plant breeding. *Pesq. agropec. bras., Brasília* 40 (2):107-114.

Di Rienzo J. A.; F. Casanoves; M. G. Balzarini; L. Gonzalez; M. Tablada y C. W. Robledo. InfoStat versión 2012. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>

Edmé, S. J.; P. Y. P. Tai and J. D. Miller. 2007. Relative efficiency of spatial analyses for non-replicated early-stage sugarcane field experiments. *Journal American Society of Sugar Cane Technologists* 27: 89-104.

Federer, W. T. 1961. Augmented designs with one-way elimination of heterogeneity. *Biometrics* 17 (3): 447-473.

Gronдона, M. O.; J. Crossa; P. N. Fox and W. H. Pfeiffer. 1996. Analysis of variety trials using two-dimensional separable ARIMA processes. *Biometrics* 52: 763-770.

Jackson, P. and T. A. Mc Rae. 2001. Selection of Sugarcane Clones in Small Plots: Effects of Plot Size and Selection Criteria. *Crop Sci.* 41: 315-322.

Ostengo, S.; M. A. Espinosa; J. V. Díaz; E. R. Chavanne; D. D. Costilla y M. I. Cuenya. 2015. Distribución de

variedades comerciales de caña de azúcar en la provincia de Tucumán, R. Argentina. Relevamiento de la campaña 2013/2014. Avance Agroindustrial 35 (4): 10-14.

Stringer, J. K. and B. R. Cullis. 2002. Application of spatial analysis techniques to adjust for fertility trends

and identify interplot competition in early stage sugarcane selection trials. Aust. J. Agric. Res. 53: 911-918.

Informe Anual EEAOC. 2011. Programa: Caña de Azúcar. Subprograma: Mejoramiento Genético. EEAOC (12): 17-24.