

Evaluación del comportamiento productivo de cultivares de caña de azúcar (*Saccharum* spp.) a través de diferentes ambientes en Tucumán, aplicando la técnica estadística “GGE biplot”

Ernesto R. Chavanne*, Santiago Ostengo*, María B. García* y María I. Cuenya*

RESUMEN

En el presente trabajo, se utilizó la técnica estadística “GGE biplot” como herramienta de análisis para explorar el efecto combinado del genotipo y de la interacción genotipo-ambiente en dos grupos de cultivares de caña de azúcar evaluados en seis localidades del área cañera de Tucumán entre 2002 y 2006. Los ensayos fueron implantados de acuerdo a un diseño en bloques completos al azar con tres repeticiones. En este estudio se analizaron los datos de rendimiento de azúcar/ha determinados en el mes de mayo. El análisis “GGE biplot” permitió discriminar a los genotipos de acuerdo a su producción de azúcar/ha y a su estabilidad relativa a través de ambientes. Los genotipos más destacados fueron identificados como aquellos que mostraron mayores valores de CP1 y valores de CP2 próximos a cero. La aplicación de este método de análisis permitió además, detectar genotipos adaptados a ambientes específicos. Los análisis “GGE biplot” explicaron el 58% y 64% de los efectos combinados de genotipo y de interacción genotipo-ambiente en los grupos 1 y 2 de cultivares de caña de azúcar, respectivamente. Se destaca en general la simplicidad del gráfico de “GGE biplot” para la identificación de genotipos superiores de caña de azúcar, cuando estos son evaluados a través de diferentes ambientes.

Palabras clave: ensayos multiambientales, análisis “biplot”, rendimiento de azúcar, genotipos de caña de azúcar.

ABSTRACT

Assessment of sugarcane cultivars (*Saccharum* spp.) productive behaviour through different environments in Tucumán by means of “GGE biplot” technique

“GGE biplot” technique was used in this work to analyze the effects of genotype and genotype-environment interaction on sugarcane yield per ha during May, considering two sugarcane genotype groups evaluated from 2002 to 2006 on six different sites in the sugarcane growing area in Tucumán. The trials were conducted using a randomized complete block design with three replications. Data concerning sugar yield during May were analyzed. The “GGE biplot” technique allowed identifying genotypes with higher sugar yield per ha in May and their relative stability through environments. The outstanding genotypes were identified as those that showed higher PC1 values and PC2 values close to zero. This method also allowed detecting the adaptability of genotypes to specific environments. The “GGE biplot” analysis accounted for 58% and 64% of the combined effects of genotype and genotype-environment interaction in groups 1 and 2, respectively. The simplicity of the “GGE biplot” display for identifying outstanding sugarcane genotypes evaluated through different environments is remarkable.

Key words: multienvironment trials, biplot analysis, sugar yield, sugarcane genotypes.

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

INTRODUCCIÓN

Para analizar la interacción genotipo-ambiente en diferentes cultivos se han desarrollado numerosos métodos de análisis, entre los cuales se pueden citar el coeficiente de regresión de Finlay y Wilkinson (1963), los desvíos a la regresión de Eberhart y Russell (1966), los modelos estadísticos de efecto principal aditivo e interacción multiplicativa -denominados modelos AMMI- de Gauch (1988) y el método "GGE biplot" de Yan *et al.* (2000).

Yan *et al.* (2000) propusieron utilizar los efectos combinados de genotipos (G) y de interacción genotipo-ambiente (IGA) en la evaluación del rendimiento en cultivos de trigo, obteniéndose los gráficos denominados "GGE biplot" que facilitan la identificación visual de los genotipos y los ambientes de evaluación. Generalmente, los gráficos "GGE biplot" se confeccionan utilizando los dos primeros componentes principales (CP1 y CP2), derivados en este caso, de la descomposición de los efectos combinados de G + IGA. La primera componente, CP1, cuando se encuentra altamente correlacionada con el efecto principal de genotipo, representa la proporción del rendimiento que se debe solo a las características del genotipo. La segunda componente, CP2, representa la parte del rendimiento debida a la interacción genotipo-ambiente (Yan *et al.*, 2001). Con estos gráficos, los genotipos pueden ser evaluados en ambientes individuales o a través de ambientes, con respecto a su comportamiento promedio, a la estabilidad y a la capacidad de adaptación general o específica (Yan *et al.*, 2000; Yan *et al.*, 2001; Yan, 2002; Yan y Kang, 2002 y Yan y Tinker, 2005). Simultáneamente, los ambientes también pueden evaluarse visualmente considerando sus aptitudes para discriminar los genotipos superiores. En resumen, estos gráficos permiten identificar el genotipo de mayor potencial en cada ambiente y luego se pueden agrupar los genotipos y ambientes con patrones similares de respuesta.

Otra ventaja de usar la metodología de "GGE biplot" consiste en determinar los patrones de respuesta denominados "quien-gana-dónde" (Yan *et al.*, 2000; Yan *et al.*, 2001; Yan, 2002; Yan y Kang, 2002 y Yan y Tinker, 2005). Esta técnica permite trazar una línea llena entre los marcadores de los genotipos más alejados del punto de origen (0,0), formando un polígono de forma tal que contenga a los marcadores de los genotipos restantes. El polígono puede ser luego dividido en diferentes sectores trazando líneas perpendiculares a sus lados hasta el punto de origen del gráfico. De esta forma, el genotipo ubicado en el vértice de cada sector es el que representa el mejor comportamiento productivo en los sitios de ese sector particular. De esta forma, también es posible la identificación en forma gráfica de grupos de ambientes que son capaces de discriminar esos genotipos superiores.

Como consecuencia de la aplicación de la técnica estadística "GGE biplot", Yan *et al.* (2001) concluyeron que

los genotipos con altos valores de CP1 tienden a tener elevados valores de rendimiento y los genotipos con valores cercanos a cero de CP2, se pueden considerar como los más estables. De igual manera, los ambientes con valores altos de CP1 y valores cercanos a cero de CP2, posibilitarían la identificación de tales genotipos.

En la Argentina, esta técnica de análisis fue utilizada en los últimos años para el análisis de los datos provenientes de ensayos comparativos de rendimientos multiambientales en maíz (Ibáñez *et al.*, 2006) y en soja (Dardanelli *et al.*, 2006). En la última etapa de selección del Programa de Mejoramiento Genético de la Caña de Azúcar (PMGCA) de la Estación Experimental Agroindustrial "Obispo Colombres" (EEAOC), se conducen ensayos comparativos de variedades regionales que son evaluados durante cuatro años sucesivos, replicados en diferentes condiciones ambientales representativas del área cañera de la provincia de Tucumán. Con los resultados obtenidos de la red de ensayos comparativos de variedades regionales, de naturaleza multiambiental, es posible aplicar distintos métodos de análisis de la interacción genotipo-ambiente (IGA) sobre alguna característica de interés económico. Esta tarea tiene como objetivo la detección de cultivos con comportamiento productivo sobresaliente, con una amplia adaptación a diferentes tipos de suelo y clima, o bien con una adaptación a ambientes agroecológicos particulares.

En este trabajo, se utiliza la metodología de análisis "GGE biplot" con el propósito de comparar los patrones de respuesta combinados del genotipo (G) y de la interacción genotipo-ambiente (IGA) en dos grupos de genotipos de caña de azúcar, pertenecientes al PMGCA de la EEAOC, en diferentes ambientes agroecológicos del área cañera de Tucumán.

MATERIALES Y MÉTODOS

En este estudio se utilizó la información del comportamiento productivo de dos grupos de genotipos de caña de azúcar, con la sigla de identificación TUC, procedentes de la red de ensayos comparativos de variedades que el PMGCA de la EEAOC conduce en seis localidades representativas de diferentes ambientes agroecológicos del área cañera de Tucumán. En todos los casos se incluyeron como testigos a las variedades de amplia difusión comercial: CP 65-357, TUCCP 77-42 y LCP 85-384.

El grupo 1 estuvo constituido por 14 variedades evaluadas durante los años 2002 a 2005 en las siguientes localidades y departamentos de la provincia de Tucumán: Campo Alegre-Simoca (CAL), Fronterita-Famaillá (FRO), La Banda-Famaillá (LBA), Mercedes-Lules (MER), Palá-Palá-Leales (PAL) y Santa Ana-Río Chico (SAN). El grupo 2 estuvo constituido por 19 variedades evaluadas durante los años 2003 a 2006 en las localidades y departamentos de: Fronterita-Famaillá (FRO), La Banda-Famaillá (LBA), Los Córdoba-Río Chico (LCO), Mercedes-Lules (MER),

Palá-Palá-Leales (PAL) y Yaquilo-J.B. Alberdi (YAQ). El primer grupo de variedades fue evaluado en 24 situaciones ambientales diferentes y el segundo grupo en 23 ambientes (no fue evaluado en 2006 en YAQ).

Algunas características edáficas y climáticas de las localidades con ensayos comparativos de rendimiento involucradas en este estudio, se detallan en la Tabla 1.

El diseño estadístico utilizado en los ensayos fue el de bloques completos aleatorizados con tres repeticiones que, en los casos analizados, contenían entre 14 a 22 tratamientos y parcelas experimentales de tres surcos de 10 m de longitud, distanciados a 1,6 m.

La característica analizada en este estudio fue el rendimiento de azúcar por hectárea determinado en el mes de mayo (AZM). Los valores de la misma fueron el resultado de realizar el producto entre el rendimiento cultural (expresado como toneladas de caña por hectárea) y el rendimiento fabril % estimado en el mes de mayo. El primero fue obtenido a partir del peso total de la parcela y el segundo, a través del análisis de los jugos de muestras de 10 tallos molibles maduros, según los procedimientos analíticos y de cálculos utilizados por la Sección Química de la EEAOC.

Los datos en este estudio se analizaron con el programa SAS (SAS, 1999) utilizando las rutinas desarrolladas por Burgeño *et al.* (2007). Se obtuvieron en primer lugar los ANOVA individuales de cada experiencia y luego se efectuó la prueba de homogeneidad de varianzas de Bartlett, a fin de combinar posteriormente los datos de diferentes ensayos regionales (Becker, 1975).

Para generar el gráfico “GGE biplot”, primero se estandarizaron los datos de AZM de cada ambiente y luego se calcularon los dos primeros componentes principales (CP1 y CP2), según el modelo estadístico dado por Yan *et al.* (2000):

$$(Y_{ij} - \beta_j) / s_j = \lambda_1 \xi_{i1} \eta_{1j} + \lambda_2 \xi_{i2} \eta_{2j} + \varepsilon_{ij}$$

Donde: Y_{ij} es el rendimiento del genotipo i en el ambiente j ; β_j es el rendimiento promedio del ambiente j ; s_j es la desviación estándar en el ambiente j ; λ_1 y λ_2 son los valores singulares de CP1 y CP2, respectivamente; ξ_{i1} y ξ_{i2} son los vectores del genotipo i para CP1 y CP2, respectivamente; η_{1j} y η_{2j} son los vectores del ambiente j para CP1 y CP2, respectivamente; y ε_{ij} es el residual asociado con el genotipo i en el ambiente j .

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de los análisis de la variancia para los datos de rendimiento de azúcar del mes de mayo, se resumen en la Tabla 2. En ella se observan las magnitudes relativas de los términos de variancia correspondientes a los efectos de genotipo (G), de ambiente (A) y de interacción genotipo-ambiente (IGA). Se aprecia que el efecto atribuido al ambiente fue la fuente de variación del rendimiento de azúcar más importante en los dos grupos de genotipos, explicando entre el 70 y el 74% de la suma de los efectos G+A+IGA, lo que justificaría la aplicación de esta metodología de análisis para la evaluación de cultivos a través de ensayos multiambientales. Por otro lado, el mayor efecto relativo de IGA con respecto a G sugiere la posible existencia de subgrupos de ambientes con capacidades discriminatorias similares, denominados en la bibliografía como mega-ambientes (Fox y Rosielle, 1982).

En la Figura 1 se muestra el gráfico “GGE biplot” correspondiente al rendimiento de azúcar determinado en

Tabla 1. Características de clima y de suelo de las diferentes localidades de Tucumán, con ensayos comparativos de variedades de caña de azúcar.

Localidades	Precipitación total anual (mm)*	Características edáficas		
		Textura	Materia orgánica	Drenaje
Fronterita (FRO)	1.453	Franco arenoso	Alta	Bueno
La Banda (LBA)	1.325	Franco arcilloso	Alta	Impedido
Mercedes (MER)	1.142	Arenoso franco	Media	Bueno
Palá-Palá (PAL)	929	Franco limoso	Med.-Baja	Impedido
Santa Ana (SAN)	1.194	Franco arenoso	Alta	Bueno
Los Córdoba (LCO)	1.194	Franco arenoso	Media	Bueno
Yaquilo (YAQ)	1.200	Franco arenoso	Alta	Bueno
Campo Alegre (CAL)	1.140	Franco arenoso	Alta	Bueno

* Datos normales del período 1961-1990.

Tabla 2. Términos de variancia del efecto genotipo (G), ambiente (A) e interacción genotipo-ambiente (IGA) para el rendimiento de azúcar por hectárea de dos grupos de genotipos de caña de azúcar evaluados en Tucumán.

Grupos de genotipos	Fuente de variación	GL	Suma de cuadrados	% de G+A+IGA	Prueba F
1	G	13	16.674,10	10,4	29,3***
	A	23	118.817,20	73,7	118,0***
	IGA	299	25.605,70	15,9	1,9***
2	G	18	27.837,20	14,4	35,9***
	A	22	136.178,70	70,4	144,0***
	IGA	396	29.396,10	15,2	1,7***

***: significativo al nivel de probabilidad ($p < 0,001$).

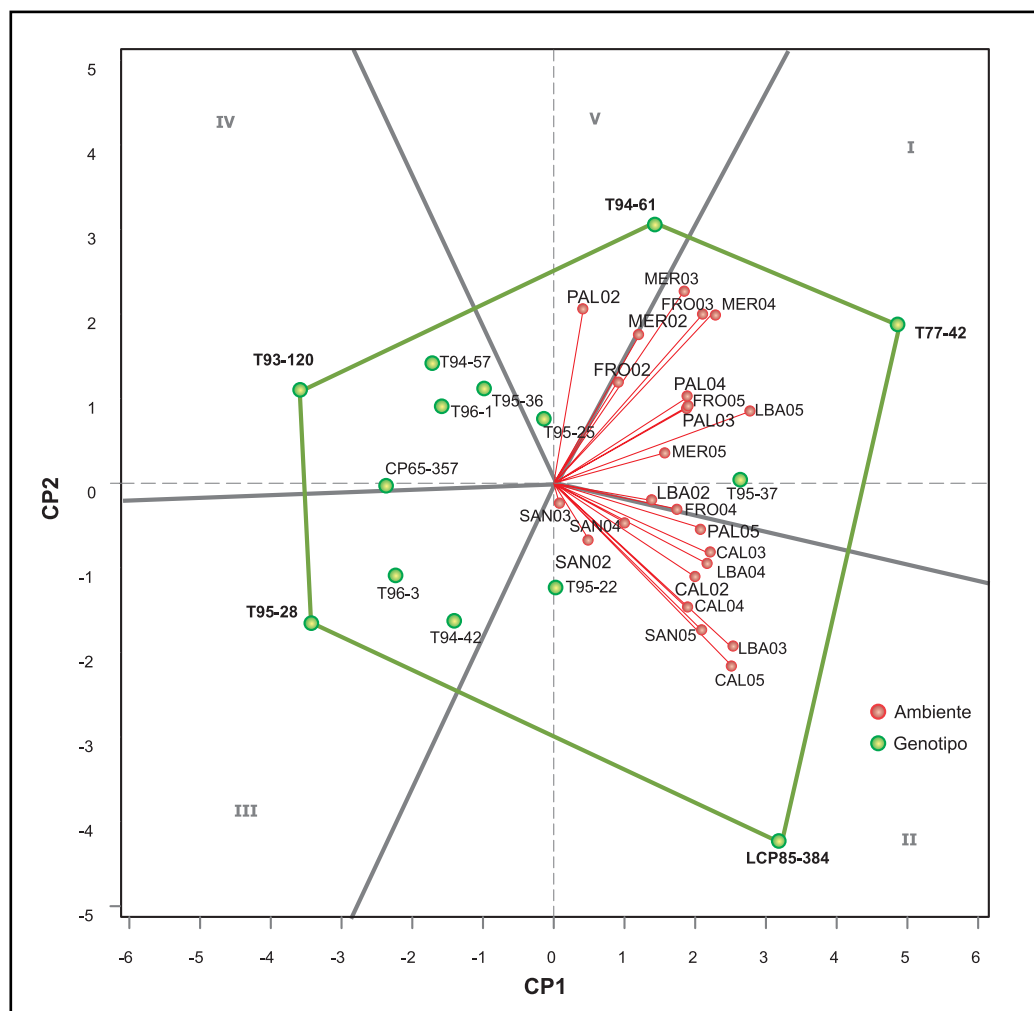


Figura 1. Gráfico "GGE biplot" del grupo 1 de genotipos de caña de azúcar evaluados entre los años 2002 y 2005, en localidades de la provincia de Tucumán.

el mes de mayo del grupo 1, constituido por 14 genotipos de caña de azúcar evaluados en 24 situaciones ambientales diferentes. Los ambientes fueron representados gráficamente con líneas vectores que parten del origen. En la figura se puede visualizar también un polígono formado por cinco lados entre los genotipos que evidenciaron las respuestas más extremas, tanto positivas como negativas. De este modo, los genotipos TUCCP 77-42 (abreviado en

la figura como T77-42), LCP 85-384 y los genotipos TUC 95-28, TUC 93-120 y TUC 94-61 (indicados en el gráfico como LCP85-384, T95-28, T93-120 y T94-61, respectivamente), fueron los genotipos extremos en este conjunto de ambientes analizados. A su vez, el trazado de perpendiculares en cada lado del polígono, pasando por el origen, permite obtener cinco sectores con el genotipo extremo ubicado en el vértice del mismo (los sectores fueron iden-

tificados con números romanos en el sentido de las agujas del reloj)). En el sector I se destacó el genotipo comercial T77-42, que presentó los valores de CP1 más altos dentro de este grupo, evidenciando el mayor rendimiento de azúcar promedio (datos no mostrados en este estudio); en el sector II el genotipo extremo fue LCP 85-384, genotipo ampliamente difundido comercialmente en el área cañera de Tucumán; en el sector III el genotipo extremo fue T95-28, aunque próximos a este, se encontraron los genotipos T96-3 y T94-42; en el sector IV el genotipo extremo fue T93-120, presentando valores de CP1 negativos y finalmente, en el sector V se destacó el genotipo T94-61.

También se observó que los genotipos T95-37 y CP65-357 presentaron valores de CP2 próximos a cero, indicando una elevada estabilidad del comportamiento de estos genotipos de caña de azúcar a través de ambientes. Se destacó T95-37 que, además de ser el cultivar más estable del grupo 1, se ubicó como la variedad en tercer orden de mérito con respecto al comportamiento productivo. Por el contrario, los genotipos T94-61, T77-42 y LCP85-384 mostraron

altos valores de PC2, indicando una alta inestabilidad de sus comportamientos frente al ambiente.

Relacionando las variedades y sus ambientes de expresión, T77-42 mostró su mayor potencial productivo en los ambientes cuyos vectores se encuentran más próximos al punto que la representa, o sea MER, FRO y PAL. El genotipo LCP 85-384, una variedad típicamente adaptada a suelos fértiles y sin déficit hídrico, se mostró en la figura muy próximo con ambientes de esas características (CAL, SAN y LBA).

Se destaca además que este análisis "biplot" explicó el 58,4% de la suma de efectos atribuibles tanto a genotipo (G) como a la interacción genotipo-ambiente (IGA), siendo el CP1 el que explica el 45,7% y el CP2 el 12,7% de la variabilidad total, respectivamente.

La Figura 2 ilustra las respuestas observadas de los 19 genotipos en 23 situaciones ambientales diferentes pertenecientes al grupo 2, aplicando el método de "GGE biplot". En la misma, también se confeccionó un polígono de cinco lados con los genotipos extremos, de manera similar a la

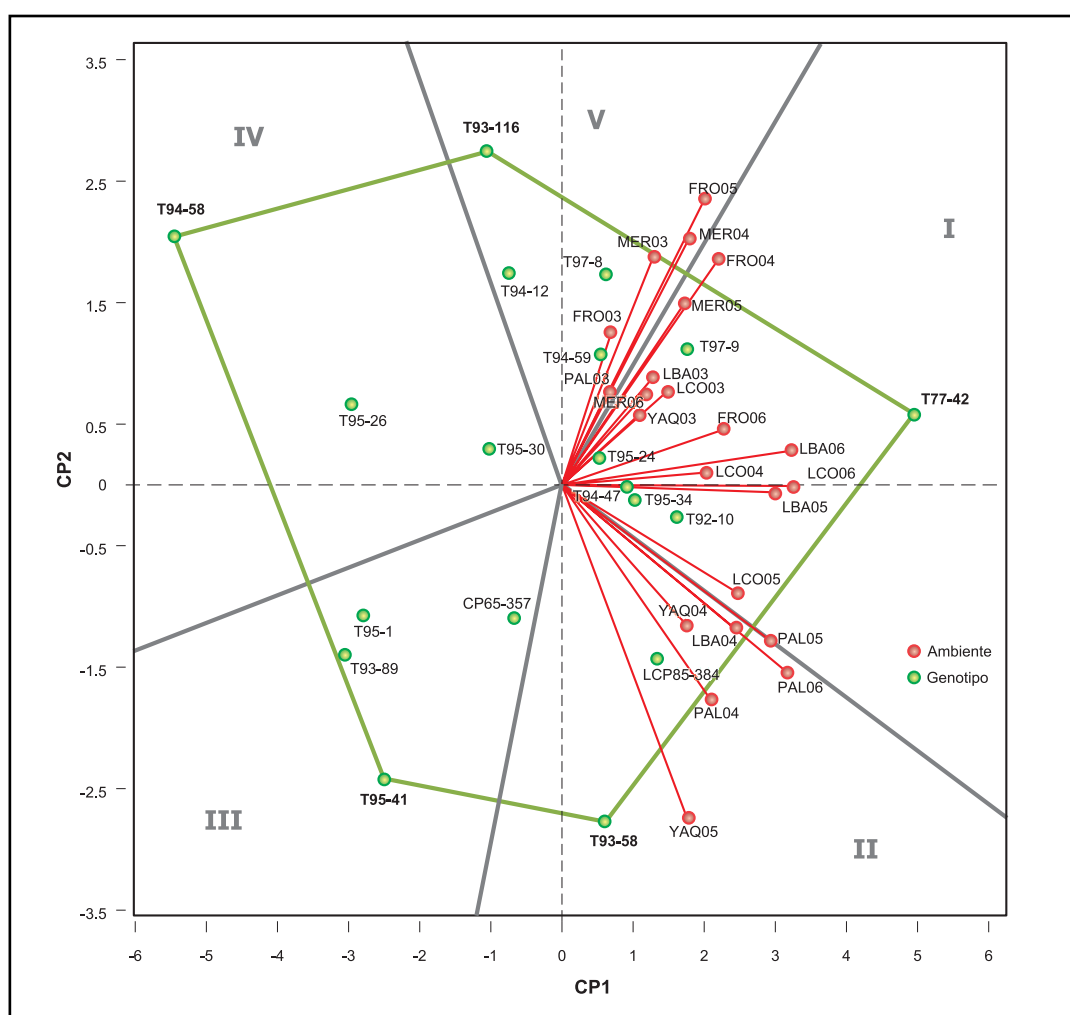


Figura 2. Gráfico "GGE biplot" del grupo 2 de genotipos de caña de azúcar evaluados entre los años 2003 y 2006, en localidades de la provincia de Tucumán.

Figura 1. En el sector I se destacó el genotipo T77-42, con altos valores de CP1 asociados a elevados niveles de rendimiento de azúcar/ha, y relativamente bajos valores de CP2, indicando un comportamiento estable a través de ambientes. Cabe destacar que la estabilidad de T77-42 a través de ambientes es característica de este testigo del PMGCA, resultando la situación de relativamente mayor inestabilidad, detectada en el grupo 1, un comportamiento inusual del mismo (Chavanne y Mariotti, 1988). En el sector II, el genotipo extremo fue T93-58, resultando un cultivar de baja producción de azúcar/ha y de mayor inestabilidad dentro de este grupo. En el sector III, el genotipo de comportamiento extremo resultó ser T95-41, con muy baja producción y una inestabilidad relativamente alta. En el sector IV se ubicó T94-58, de peor producción dentro del grupo 2, y de una alta inestabilidad. Finalmente en el sector V, T93-116 aparece como un cultivar de baja productividad y de alta inestabilidad. Se destaca que T95-41 y T93-116 (sectores III y V, respectivamente) presentan un comportamiento similar con respecto a producción y estabilidad; sin embargo, su ubicación opuesta en la figura indica una adaptación diferencial a ambientes.

En este caso, el análisis con "GGE biplot" de dos componentes principales, explicó el 64,3% de los efectos combinados de genotipo (G) y de la interacción (IGA), siendo el CP1 el que explica el 55,2% y el CP2 el 9,1% de la variabilidad total, respectivamente.

CONCLUSIÓN

De acuerdo a los resultados obtenidos en este estudio, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- El análisis "GGE biplot" permitió discriminar a los genotipos dentro de cada grupo de acuerdo a su producción de azúcar/ha y a su estabilidad relativa a través de ambientes. Los genotipos más destacados fueron identificados como aquellos que mostraron mayores valores de CP1 y valores de CP2 próximos a cero.
- La aplicación de este método de análisis permitió además, detectar genotipos adaptados a ambientes específicos.
- Los análisis "GGE biplot" explicaron el 58% y 64% de los efectos combinados de genotipo y de interacción genotipo-ambiente en los grupos 1 y 2 de cultivares de caña de azúcar, respectivamente.
- Se destaca en general la simplicidad del gráfico de "GGE biplot" para la identificación de genotipos superiores de caña de azúcar, cuando estos son evaluados a través de diferentes ambientes.

BIBLIOGRAFÍA CITADA

- Becker, W. A. 1975.** Manual of quantitative genetics. 3. ed. Washington State University Press, Pullman, Washington.
- Burgeño, J.; J. Crossa and M. Vargas. 2007.** SAS program for graphing GE and GGE biplot. Biometrics and Statistics Unit. CIMMYT. México. [En línea]. Disponible en <http://www.cimmyt.org/spanish/wps/biometrics> (consultado 10 enero 2007).
- Chavanne, E. R. y J. A. Mariotti. 1988.** Análisis de estabilidad en tres genotipos de caña de azúcar. Rev. Ind. y Agríc. de Tucumán 65 (1-2): 213-223.
- Dardanelli, J. L.; M. Balzarini; M. J. Martínez; M. Cuniberti; S. Resnik; S. F. Ramunda; R. Herrero and H. Baigorri. 2006.** Soybean maturity groups, environments, and their interaction define mega-environments for seed composition in Argentina. Crop Sci. 46: 1939-1947.
- Eberhart, S. A. and W. A. Russell. 1966.** Stability parameters for comparing varieties. Crop Sci. 6: 36-40.
- Finlay, K. W. and G. N. Wilkinson. 1963.** The analysis of adaptation in a plant breeding program. Aust. J. Agric. Res. 14: 742-754.
- Fox, P. N. and A. A. Rosielle. 1982.** Reducing the environmental main effects on pattern analysis of plant breeding environments. Euphytica 31: 645-656.
- Gauch, H. G. 1988.** Model selection and validation for yield trials with interaction. Biometrics. 44: 705-715.
- Ibáñez, M. A.; M. M. Cavanagh; N. C. Bonamico y M. A. Di Renzo. 2006.** Análisis gráfico mediante "biplot" del comportamiento de híbridos de maíz. RIA, Rev. Investig. Agrop. 35 (3): 83-93.
- SAS Institute, Inc. 1999.** SAS, Version 8. Cary, NC, USA.
- Yan, W. 2002.** Singular-value partitioning in biplot analysis of multi-environment trial data. Agron. J. 94: 990-996.
- Yan, W.; P. L. Cornelius; J. Crossa and L. A. Hunt. 2001.** Two types of GGE biplots for analyzing multi-environment trial data. Crop Sci. 41: 656-663.
- Yan, W.; L. A. Hunt; Q. Sheng and Z. Szlavniks. 2000.** Cultivar evaluation and mega-environment investigation based on the GGE biplot. Crop Sci. 40 (3): 597-605.
- Yan, W. and M.S. Kang. 2002.** GGE biplot analysis: a graphical tool for breeders, geneticists and agronomists. CRC Press, Boca Raton, FL, USA.
- Yan, W. and N. A. Tinker. 2005.** An integrated biplot analysis system for displaying, interpreting, and exploring genotype x environment interaction. Crop Sci. 45: 1004-1016.