

Estudio de la interacción genotipo-ambiente en cultivares de caña de azúcar, con el empleo de nuevas herramientas estadísticas

Irenaldo Delgado-Mora^{1*}, Héctor Jorge-Suárez², José Ramón Gómez-Pérez¹
y María Teresa Cornide-Hernández²

1. Estación Territorial de Investigaciones de la Caña de Azúcar (ETICA). Grupo Empresarial AZCUBA. Autopista Nacional, Km 246. Ranchuelo, Villa Clara, Cuba.

* ireinaldo.delgado@inicavc.azcuba.cu

2. Instituto de Investigaciones de la Caña de Azúcar (INICA). Grupo Empresarial AZCUBA. Carretera al CAI Martínez Prieto, Km 2 ½. Boyeros. Ciudad de La Habana, Cuba.

RESUMEN

Las implicaciones de la interacción genotipo-ambiente, en la selección y recomendación de cultivares de caña de azúcar, quizás sea una de las problemáticas más abordadas en Cuba, a través de disímiles métodos de análisis univariados y multivariados. Sin embargo, aún están limitados por referirse a zonas y períodos específicos, por lo que resultaría provechosa su ampliación, a la luz de nuevos métodos y herramientas estadísticas. Por ello, el presente trabajo tiene como objetivo estudiar la interacción genotipo-ambiente de la caña de azúcar, en cuatro zonas contrastantes del país, mediante el modelo lineal bilineal de la regresión de sitios. Se estudiaron 19 cultivares de caña de azúcar, con un diseño de bloque completamente al azar con tres repeticiones, en la variable porcentaje de pol en caña, en las cepas de caña planta y retoño. Las cosechas se realizaron desde noviembre hasta mayo, con edades entre 14 y 15 meses. Resultó que con el uso del Modelo Lineal Bilineal de Regresión de Sitios, se pudieron determinar las interacciones cruzadas entre los ambientes en estudio, así como identificar aquellos más discriminatorios y representativos. Los grupos no asociados a ambientes constituyen un caso especial, pues no mostraron asociación (adaptación general) con los ambientes (momentos evaluativos o localidades) y presentaron los menores valores de pol en sentido general. Se identifican los cultivares más destacados por momentos evaluativos y localidades con la confirmación estadística y la interpretación gráfica.

Palabras clave: megambientes, maduración, interacciones cruzadas y no cruzadas, discriminatorio, representatividad.

ABSTRACT

The implications of the genotype-environment interaction, in the selection and recommendation of sugarcane cultivars, is perhaps one of the most addressed problems in Cuba, through dissimilar univariate and multivariate analysis methods. However, they are still limited because they refer to specific areas and periods, so it would be useful to expand them in light of the use of new statistical methods and tools. For this reason, the present work aims to study the Genotype Environment Interaction of sugarcane, in four contrasting areas of the country, through the bilinear linear model of site regression. 19 sugarcane cultivars were studied, using a completely randomized block design with three repetitions, in the variable percentage of pol in cane, in the plant and shoot cane strains. The harvests were carried out from November to May, with ages between 14 and 15 months. It was obtained as a result that with the use of the linear bilinear model of Regression of Sites, it was possible to determine the cross interactions between the environments under study, as well as to identify those that were more discriminatory and representative. The groups not associated with environments constitute a special case, since it did not show an association (general adaptation) with the environments (evaluati-

ve moments or localities), presenting the lowest values of pol in a general sense. The most outstanding cultivars are identified by evaluative moments and localities with statistical confirmation and graphic interpretation. **Key words:** mega-environments, maturation, cross and non-cross interactions, discriminatory, representativeness.

INTRODUCCIÓN

La caña de azúcar (*Saccharum* spp.) es un cultivo importante en la economía mundial, como materia prima para la producción de azúcar, alcohol, levadura y otros derivados (1). Es altamente productiva por poseer un mecanismo fotosintético tipo C4 y por su potencial para la diversificación.

Las tendencias actuales en la agricultura cañera requieren, para su implementación, que se establezcan las bases científico-técnicas para enfrentar las variaciones del clima, que incidirán a mediano y largo plazo en el área del Caribe (2). En ese contexto, una de las soluciones más prácticas y económicas se encuentra en la obtención de genotipos con cierto grado de tolerancia, mediante el desarrollo de programas de mejoramiento genético. Para ello será necesario acercar, lo más posible, los ambientes de selección de los cultivares a los ambientes de destino, distanciados en los últimos años a causa de las limitaciones económicas del país, debido a que la red para estudios multiambientales se redujo de 30 a 13 sitios de prueba (3, 4 y 2), lo que repercutió de manera significativa en los estudios para la determinación de la adaptabilidad y estabilidad genotípica.

Las implicaciones de la interacción genotipo-ambiente (IGA), en la selección y recomendación de cultivares de caña de azúcar, quizás sea una de las problemáticas más abordadas en Cuba (5, 6, 7 y 2), a través de disímiles métodos de análisis univariados y multivariados; sin embargo, aún están limitados por referirse a zonas y períodos específicos, por lo que resultaría provechosa su ampliación a la luz de nuevos métodos y herramientas estadísticas. Por ello, el presente trabajo tiene como objetivo estudiar la interacción genotipo-ambiente en cultivares de caña de azúcar, mediante el empleo de nuevas herramientas estadísticas en cuatro zonas contrastantes del país.

MATERIALES Y MÉTODOS

Los ensayos de campo se establecieron en los sitios de prueba (LOC) de Jovellanos, Espartaco, Florida y La Mantonia, correspondientes a las provincias de Matanzas, Cienfuegos, Camagüey y Santiago de Cuba, respectivamente. Se estudiaron 19 cultivares (VAR) de caña de azúcar (tabla 1), obtenidos por el Programa de Mejoramiento del Instituto de Investigaciones de la Caña de Azúcar (INICA) (8); dos comerciales establecidos (C1051-73, C323-68) y 17 liberados a extensión entre los años 1997 y 2004, que requerían actualizar sus parámetros de estabilidad y adaptabilidad.

Los experimentos se plantaron convenientemente para tener cosechas desde noviembre hasta mayo (MEval), con edades entre 14 y 15 meses, en cada una de las localidades. Cada unidad experimental se plantó en campo, según un diseño de bloques al azar con tres réplicas, parcelas unitarias de 48 m² (cuatro surcos de 7.5 m x 1.6 m de ancho, 12 plantones por surco), de acuerdo con las normas metodológicas del Programa de Mejoramiento Genético de la Caña de Azúcar en Cuba del INICA (9).

Como rendimiento azucarero se consideró el porcentaje de pol en caña (PPC), para lo cual se tomó una muestra de 1 m lineal en el centro de los surcos segundo o tercero de cada parcela, y su procesamiento según las técnicas del Manual Azucarero de Control Unificado (MACU) (10). Los valores observados del porcentaje de pol en caña (PPC) en los momentos de la cosecha (momentos evaluativos: MEval 1 (noviembre), MEval 2 (diciembre), MEval 3 (enero), MEval 4 (febrero), MEval 5 (marzo), MEval 6 (abril) y MEval 7 (mayo)) conformaron una serie de datos agrupados en el tiempo de los 19 genotipos, a la vez que fueron replicados en espacio, en cada localidad.

Tabla 1. Cultivares estudiados y sus progenitores

Nº	Cultivares	Progenitor femenino	Progenitor masculino	Nº	Cultivares	Progenitor femenino	Progenitor masculino
1	C1051-73	B42231	C431-62	11	C89-250	Eros	Ja64-11
2	C323-68	B4362	C87-51	12	C89-372	NCo310	C187-68
3	C86-12	Desconocido		13	C90-317	C187-68	B6368
4	C86-156	C16-56	C87-51	14	C90-469	C87-51	Ja60-5
5	C86-165	B42231	C227-59	15	C90-501	C266-70	Ja60-5
6	C86-251	CP29-103	Co421	16	C90-530	My5514	Co421
7	C86-56	NCo310	C187-68	17	C91-115	C1616-75	Ja64-19
8	C88-380	B7542	B63118	18	C91-356	C389-52	CP1165
9	C89-148	B6368	CP70-1143	19	C91-367	C266-70	C323-68
10	C89-176	NCo310	C187-68				

Procesamiento estadístico general

Comprobada la significación estadística de las interacciones de dos efectos principales fijos en análisis parciales (Modelos Bifactoriales VAR-LOC y VAR-MEVal), se procedió a la determinación de la adaptabilidad y estabilidad de los genotipos, a través del Modelo Lineal tradicional (LM) de efectos fijos (modelo 1), mediante el programa *Infogen* (11), que se utiliza para procesar la información original asumiendo normalidad y obtener la matriz de dos entradas (GxE) sobre la que aplica el Modelo Lineal-Bilineal de Regresión de Sitios (SREG o GGE biplot) (*Genotypic main effect plus Genotype-by-Environment interaction*), según (12) y (13).

$$\text{Modelo 1. En los bifactoriales: } Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + e_{ijl} \quad \text{Ec. 1}$$

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \varphi_k + (\alpha\varphi)_{ik} + e_{ikl} \quad \text{Ec. 2}$$

Donde:

Y_{ijk} : valor fenotípico del i -ésimo genotipo obtenido en el j -ésimo ambiente (y/0 j -ésimo ambiente).

μ : efecto de la media general, obtenida de las observaciones o valores fenotípicos de los i -ésimo genotipos obtenido en el j -ésimo ambiente.

α_i : efecto fijo del i -ésimo genotipo (variedad).

β_j : efecto fijo del j -ésimo ambiente (localidad).

φ_k : efecto fijo del k -ésimo ambiente (momento evaluativo).

$(\alpha\beta)_{ij}$, $(\alpha\varphi)_{ik}$, $(\beta\varphi)_{jk}$, $(\alpha\beta\varphi)_{ijk}$: efectos fijos de las tres interacciones de primer y de segundo orden.

e_{ijkl} : error residual o término del error aleatorio.

Esta ecuación es equivalente a la mencionada por Cornelius, P. L. *et al.* (14), al unificar en una metodología general los Modelos Lineales-Bilineales AMMI y sus derivados.

Los gráficos se centraron en ambientes (por convención, las columnas), no se transformaron ni se aplicaron escalas a las variables. Para obtener la salida del biplot, se usó la preservación métrica del ambiente y para la clasificación de genotipos por sus medias y estabilidad, según el método de la Coordinación Ambiental Media (AEC, *Average Environment Coordination*), la preservación métrica del genotipo (15, 13 y 16).

El GGE biplot fue complementado con el trazado: del Eje del Ambiente Medio (AEA, *Average Environment Axis*) para ser usado como abscisa del AEA y con un vector que, pasando por el centro del gráfico, cortase al AEA en ángulo recto, apuntando en ambas direcciones hacia una mayor variabilidad (peor estabilidad), para ser usado como la ordenada del AEA (17 y 13). Las asociaciones entre ambientes, genotipos y las interacciones cruzadas reveladas por los gráficos GGE-biplot

fueron confirmadas mediante ANOVA de clasificación simple y las medias fueron comparadas con la prueba de Tukey ($P < 0.05$) (18-22).

Finalmente, se complementó la definición de los ambientes de prueba, con la determinación de su habilidad discriminadora y representatividad. En todos los casos las dos cepas estudiadas (caña planta y retoño) fueron analizadas separadamente.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las fuentes principales de los efectos fijos y su interacción de los Modelos Bifactoriales VAR-LOC y VAR-MEVal fueron significativas ($P < 0.0001$) en todos los casos, con excepción de MEVal 3 en caña planta, en la que la interacción no fue significativa. Comprobada la significación estadística de las interacciones de dos efectos principales fijos, se determinó la adaptabilidad y estabilidad de los genotipos, mediante el Modelo Lineal-Bilineal de Regresión de Sitios (SREG o GGE biplot), que ofrece varias interpretaciones en los gráficos obtenidos; en la parte superior izquierda (A) se muestra la interpretación del biplot, con la clasificación de los ambientes por cuadrantes, el poder discriminario o representatividad de estos y los genotipos asociados a ellos.

En la parte superior derecha (B) de la figura, se muestra la determinación de los rangos relativos de los cultivares estudiados por su media y estabilidad para apoyar su recomendación; así como su confirmación estadística por asociación de ambientes. Por cuestiones de espacio en el documento, solo se expondrán algunos ejemplos en cada bifactorial y cepa.

Agrupamientos de las localidades por momentos evaluativos (Modelo Bifactorial VAR-LOC), PPC. Cepa caña planta

En la cepa de caña planta el número de agrupamientos de las localidades varió de 2-3, según el modelo biplot GGE. En el primer momento evaluativo (MEVal 1), se formaron tres grupos de las localidades en estudio, en el plano de las dos primeras componentes (CP1 y CP2) se explica el 76.9 % de la variación fenotípica total (figura 1).

En la parte superior izquierda (A) se expresó que los vectores de LOC 2 y LOC 1, ubicados en un mismo sector del polígono, formaron un ángulo agudo ($< 90^\circ$), que demuestra correlación positiva entre ellos y ángulos obtusos con LOC 4 ($> 90^\circ$), que sugieren una interacción cruzada. Similar correlación existe entre los vectores LOC 2 y LOC 3, pero situados en sectores diferentes del polígono; además, son las localidades que presentan mayor longitud de sus vectores e indican que son los ambientes más informativos y de mayores valores discriminativos, útiles para seleccionar genotipos con adaptación específica en presencia de varios megambientes.

Un ambiente de prueba que no discrimine ofrece poca información sobre los genotipos (13). Sin embargo, los vectores de LOC 1 y LOC 3 también localizados en sectores diferentes muestran correlación positiva. Se ofrece, además, el eje del promedio ambiental (AEA), aspecto que fue añadido por (17) para estudiar la representatividad de los ambientes de prueba. LOC 1 es el más representativo, pues forma un ángulo pequeño con respecto al promedio ambiental; sin embargo, LOC 4 es el más alejado, es decir, el menos representativo.

En la parte superior derecha (B) de la figura, se muestra el grupo formado por los cultivares C86-12, C1051-73, C88-380 y C86-56, identificados en los ambientes LOC 1 y LOC 2, que ofrecen los mayores valores de rendimientos, aunque sin diferencias estadísticas significativas con el agrupamiento de C90-501, C91-367, C90-469 y C91-115 en LOC 3; siendo este último cultivar el de mayor estabilidad dentro del grupo de mayor rendimiento azucarero. Se destaca que el grupo no asociado a ambientes ofrece los menores valores de PPC. La presencia de las interacciones cruzadas sugieren que los tres sectores del polígono donde se ubican los ambientes involucrados (localidades), pudieran ser

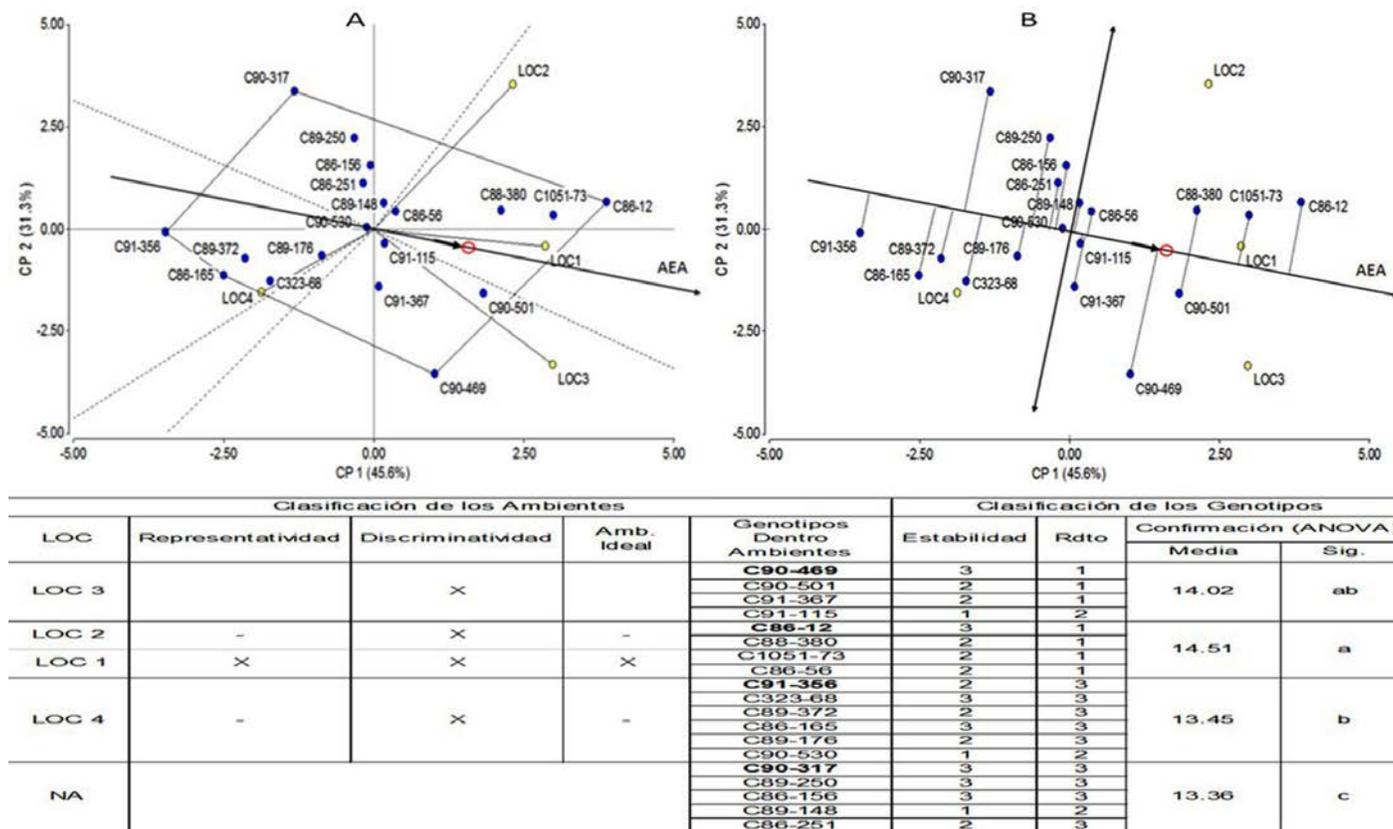


Figura 1. Clasificación de ambientes y genotipos en el GGE Biplots. Momento evaluativo 1 (MEval 1), cepa caña planta

En la parte superior izquierda (A) se exhibe la interpretación del biplot según el método conocido como (Which-Won-Where); y a la derecha (B) la determinación de los rangos relativos de los cultivares estudiados por su media y estabilidad para apoyar su recomendación. Rdto 1: Rendimiento Alto con rango de (14.12-14.98); Rdto 2: Rendimiento Medio con rango de (13.55-13.91); Rdto 3: Rendimiento Bajo con rango de (12.70-13.36); NA: No asociado. Estabilidad alta: <1.0 cm; Estabilidad media: 1.0-2.0 cm; Estabilidad baja: >2.0 cm, todos en base al tamaño original del grafico.

candidatos a megambientes diferentes, resultado que debe ser confirmado mediante la estabilidad en diferentes años de los mismos patrones de asociación de ambientes y genotipos.

La interacción cruzada es la más interesante para el mejorador, porque indica una adaptación específica, alcanzada después de generaciones de selección en diferentes ambientes. Estos estudios son importantes para identificar cultivares con altos rendimientos para una región dada, determinar los sitios que mejor se representen y estimar la estabilidad de los genotipos (13).

En el segundo (MEval 2) y tercer (MEval 3) momentos evaluativos, se formaron tres grupos de las localidades en estudio con interacción cruzada entre ellas. Sin embargo, el quinto (MEval 5), sexto (MEval 6) y séptimo (MEval 7) momentos evaluativos, formaron dos grupos de las localidades en estudio, pero no presentan interacciones cruzadas, con excepción del último. La interacción no cruzada o cuantitativa se presenta cuando los cultivares difieren en su respuesta a los ambientes, sin alterar sus rangos o posiciones relativas, y puede deberse a que los cultivares son genéticamente diferentes para el carácter, pero los ambientes no lo son tanto como para producir una respuesta cruzada (13).

El momento evaluativo MEval 4 formó dos grupos de las localidades en estudio, que explica el modelo biplot GGE en el plano de las dos primeras componentes (CP1 y CP2), el 82.7 % de la variación fenotípica total. Mantiene al grupo formado por los genotipos no asociados a ambientes, como los de más bajos valores de rendimiento de PPC (figura 2).

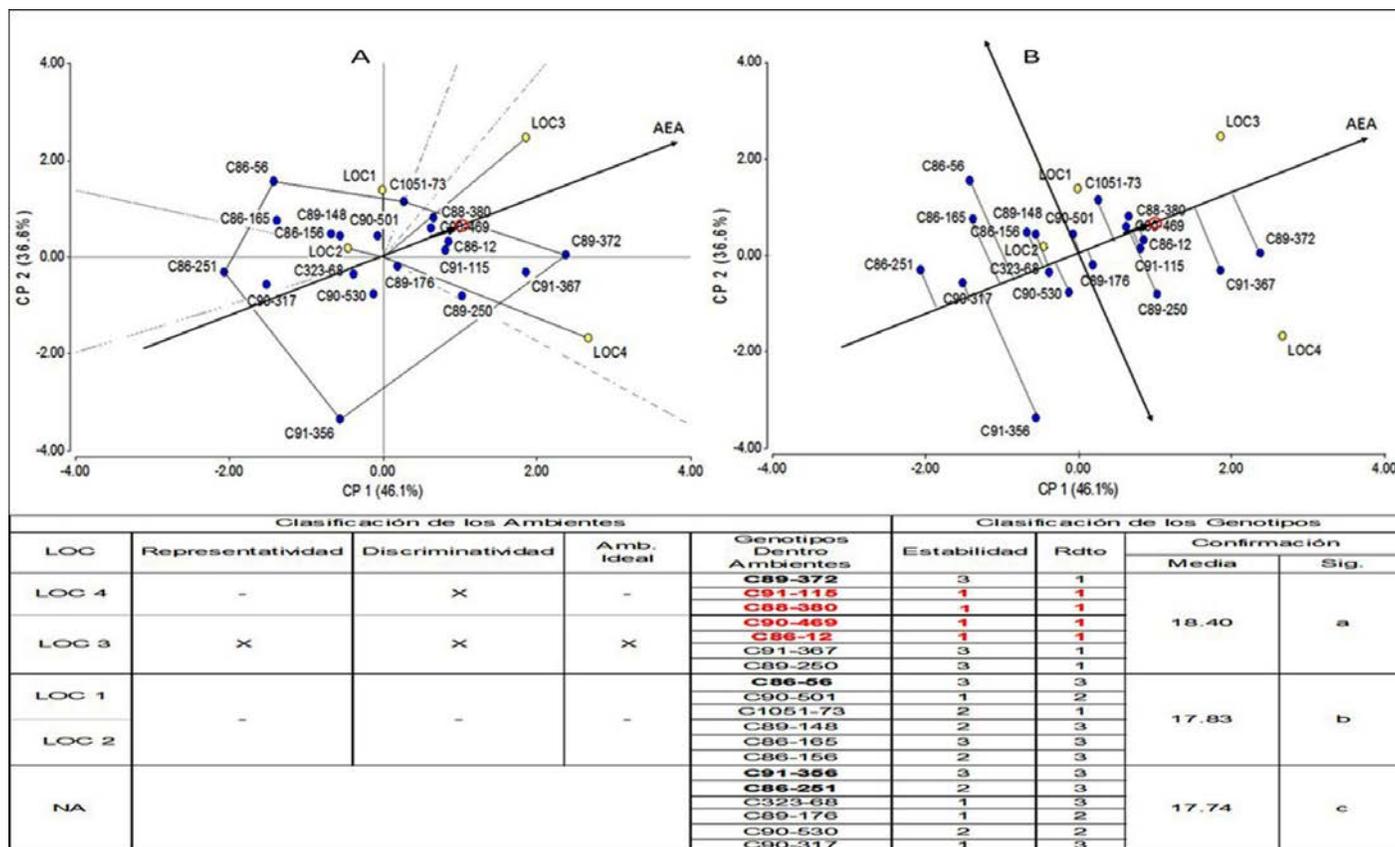


Figura 2. Clasificación de ambientes y genotipos en el GGE Biplot. Momento evaluativo 4 (MEval 4), cepa caña planta.

En la parte superior izquierda (A) se exhibe la interpretación del biplot según el método conocido como (Which-Won-Where); y a la derecha (B) la determinación de los rangos relativos de los cultivares estudiados por su media y estabilidad para apoyar su recomendación; Rdto 1: Rendimiento Alto con rango de (18.23-18.81); Rdto 2: Rendimiento Medio con rango de (17.75-18.10); Rdto 3: Rendimiento Bajo con rango de (17.12-17.67). NA: No asociado. Estabilidad alta: <1.0 cm; Estabilidad media: 1.0-2.0 cm; Estabilidad baja: > 2.0cm, todos en base al tamaño original del grafico.

Agrupamientos de las localidades por momentos evaluativos (Modelo Bifactorial VAR-LOC), PPC. Cepa de retoño

El número de agrupamientos de las localidades varió de 2-4 durante el periodo estudiado, según el modelo biplot GGE; logró en todos los momentos evaluativos una interacción cruzada, excepto en MEval 4. Los momentos evaluativos MEval 1, MEval 2 y MEval 3 formaron entre tres y cuatro grupos de las localidades en estudio y el cuarto momento evaluativo (MEval 4 y MEval 5) alcanzó tres grupos. MEval 6 y MEval 7 formaron dos agrupamientos; sin embargo, presentan interacciones cruzadas entre localidades, sugiere que los sectores del polígono donde se ubican los ambientes involucrados, pudieran ser candidatos a megambientes.

Comportamiento medio y estabilidad de los genotipos

Los cultivares se agruparon por su adaptación a las localidades en momentos evaluativos sucesivos. En la evaluación inicial [MEval 1] de la cepa caña planta se diferenciaron cuatro grupos: con adaptación específica al grupo ambiental (LOC 1, LOC 2) resultaron los cultivares: C86-12 (testigo comercial), C86-56, C88-380 y C1051-73. Así como a LOC 3, los cultivares C90-469, C90-501, 91-115 y C91-367, y a LOC 4, resultaron los cultivares C323-68, C86-165, C89-176, C89-372, C90-530 y C91-356. Un grupo no asociado a ambientes (adaptación general), que estuvo compuesto en la etapa inicial [MEval 1-3] por los cultivares C89-250, C89-148, C90-317, C86-156 y C86-251.

Durante las evaluaciones finales [MEval 5-7], correspondientes a la etapa final de la curva de maduración se observaron: dos grupos de localidades (LOC 1, LOC 2, LOC 4) y (LOC 3), además de un grupo no asociado a ambientes con adaptación general, que estuvo compuesto por los cultivares C90-530, C91-356 y el referido cultivar C86-251, que lo mantuvo durante las siete evaluaciones.

En la cepa de retoño, la totalidad de los cultivares se asociaron a algunas de las localidades del ensayo: con adaptación específica a LOC 1, resultaron los cultivares: C90-530, C91-367, C86-12 (testigo comercial) y C1051-73; los dos últimos mantuvieron el patrón de adaptación específico mostrado en la cepa caña planta; en LOC 2 los cultivares: C90-317, C89-372, C89-176, C89-250, C86-251, C86-165 y C86-56; esta última mantuvo el patrón de adaptación específico mostrado en la cepa caña planta. En LOC 3 se destacaron los cultivares C88-380, C323-68 y C90-501; este último mantuvo el patrón de adaptación específico mostrado en la cepa de caña planta, y a LOC 4 los cultivares C90-469, C86-156, C91-115, C89-148 y C91-356; este último mantuvo el patrón de adaptación específico mostrado en la cepa caña planta.

Agrupamientos de los momentos evaluativos por localidades (Modelo Bifactorial VAR-MEval), PPC. Cepa caña planta

En la cepa de caña planta, el número de agrupamientos de los momentos evaluativos por localidad varió de 2-3, según el modelo biplot GGE y logró interacciones cruzadas entre todas las localidades. En LOC 1, LOC 3 y LOC 4, se forman tres grupos y en LOC 2 dos grupos de los momentos evaluativos en estudio.

Agrupamientos de los momentos evaluativos por localidades (Modelo Bifactorial VAR-MEval), PPC. Cepa retoño

En la cepa de retoño, el número de agrupamientos en los momentos evaluativos en cada localidad fue de dos, según el modelo biplot GGE en todas las localidades. En LOC 2 las dos primeras componentes (CP1 y CP2) explican el 85.6 % de la variación fenotípica total (figura 3). Los vectores MEval 5, MEval 6 y MEval 7, ubicados en un mismo sector del polígono, formaron un ángulo agudo ($< 90^\circ$), que demostró correlación positiva; al igual que MEval 1, MEval 2, MEval 3 y MEval 4 de otro sector del polígono. Existe una interacción cruzada entre los ambientes MEval 5, MEval 6, MEval 7 y MEval 3, MEval 4.

Comportamiento medio y estabilidad de los genotipos

Los cultivares se agruparon por su adaptación a los momentos evaluativos en las localidades sucesivas. En la cepa de caña planta, en [LOC 1], se diferenciaron cuatro grupos, correspondientes al inicio, medio y final de la cosecha: Con adaptación específica al grupo ambiental (MEval 1 y MEval 2) resultó el cultivar C1051-73; a MEval 4, los cultivares C86-12, C90-469, C88-380 y C86-56; y a MEval 5, MEval 6 y MEval 7, resultaron los cultivares C89-148, C89-176 y C86-251.

Asimismo, un grupo no asociado a ambientes (adaptación general), que estuvo compuesto por C86-165, C323-68, C91-367, C89-372, C90-317, C89-250, C86-156, C90-501, C90-530, C91-115 y C91-356.

El resto de las localidades no lograron formar este tipo de agrupamiento bien definido, ya que se entrecruzan en ocasiones los momentos evaluativos (MEval 3, MEval 4 y MEval 5), con la unión de MEval 1 y MEval 2, así como con MEval 6 y MEval 7; sin embargo, en LOC 2 y LOC 3 el cultivar C1051-73 mostró adaptación específica al grupo ambiental inicial (MEval 1 y MEval 2) y con el medio (MEval 3 y MEval 4).

En la cepa de retoño, no se formaron los cuatro grupos en ninguna de las localidades evaluadas; donde los agrupamientos fueron más variables que en la cepa de caña planta.

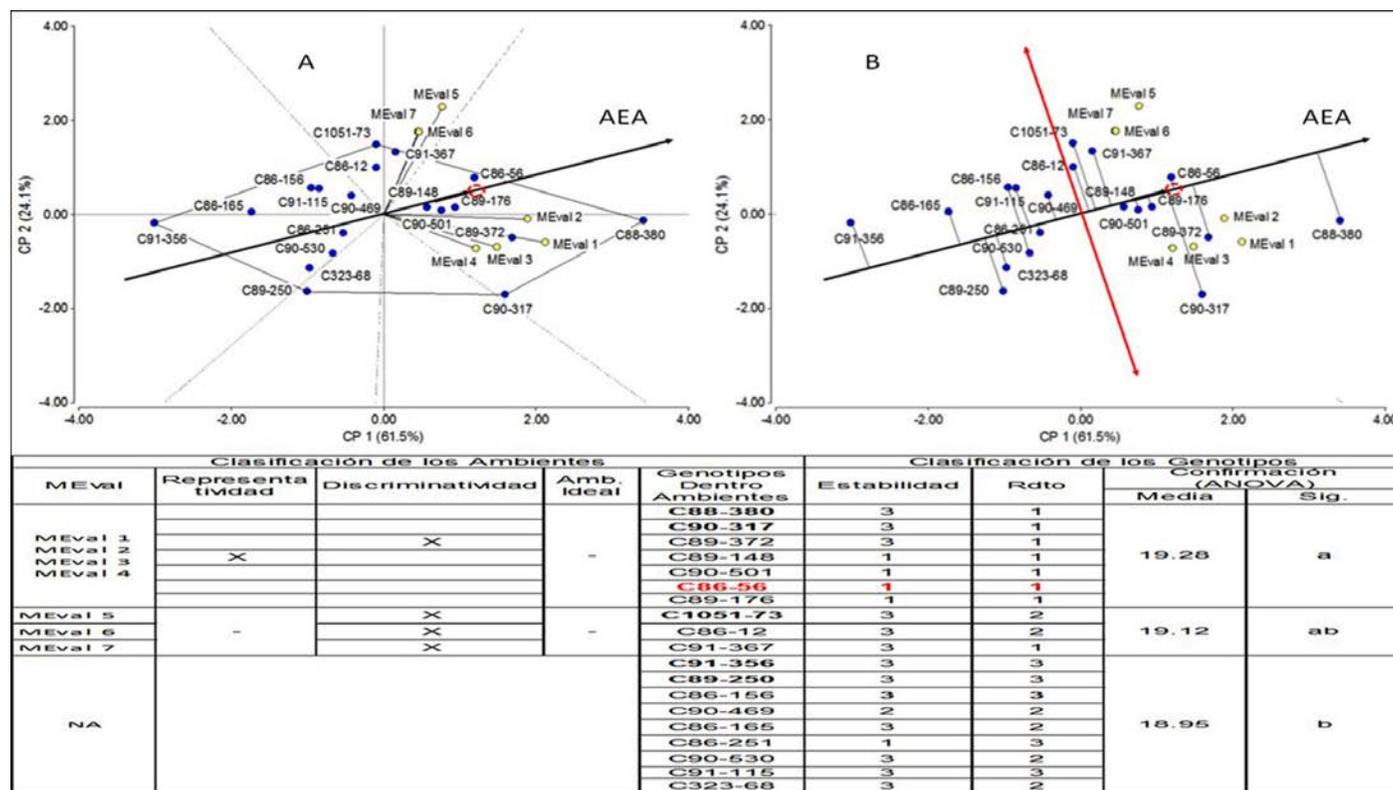


Figura 3. Clasificación de ambientes y genotipos en el GGE Biplots. Localidad 2 (LOC 2), cepa retoño.

En la parte superior izquierda (A) se exhibe la interpretación del biplot según el método conocido como (Which-Won-Where); y a la derecha (B) la determinación de los rangos relativos de los cultivares estudiados por su media y estabilidad para apoyar su recomendación; Rdto 1: Rendimiento Alto con rango de (19.25-20.18); Rdto 2: Rendimiento Medio con rango de (18.96-19.16); Rdto 3: Rendimiento Bajo con rango de (18.00-18.88). NA: No asociado. Estabilidad alta: <1.0 cm; Estabilidad media: 1.0-2.0 cm; Estabilidad baja: >2.0cm, todos en base al tamaño original del grafico.

Confirmación de los resultados de la interpretación de los GGE biplots, mediante técnicas estadísticas entre los grupos asociados y no asociados en ambas variables

Los ambientes formados en cada cepa, ofrecieron diferencias estadísticas significativas en todos los casos; excepto en el bifactorial VAR-LOC en MEval 3 de la cepa de caña planta y en MEval 6 y MEval 7 de la cepa de retoño. Los grupos no asociados a ambientes (adaptación general) presentaron los menores valores, en sentido general (tablas 2 y 3).

Un caso especial lo constituye el grupo de cultivares de composición variable, que no mostró asociación con los ambientes (momentos evaluativos o localidades) determinados por el método de GGE biplot, en ambas cepas. Cinco de estos cultivares presentaron características similares en las dos primeras evaluaciones, en la cepa de caña planta. Un caso extremo de no asociación fue C86-251, que se mantuvo no asociada durante un período más prolongado en caña planta, entre MEval 1 hasta MEval 7.

Tabla 2. ANOVA entre los grupos Asociados y no Asociados (GLIMMIX-1 VAR-LOC parcial), cepa caña planta y retoño

ANOVA A LOS GRUPOS ASOCIADOS Y NO ASOCIADOS PPC PLANTA																					
MEval1			MEval2			MEval3			MEval4			MEval5			MEval6			MEval7			
PPC	MS	F	p	MS	F	p	MS	F	p	MS	F	p	MS	F	p	MS	F	p	MS	F	p
GPO	13.95	3.486	0.0166	23.41	10.03	0.000	7.14	1.69	0.187	9.70	6.13	0.003	36.675	6.97	0.001	31.472	3.609	0.029	29.47	3.272	0.040
Error	4.00			2.33			4.23			1.58			5.26			8.72			9.01		
COMPARACIÓN DE MEDIAS																					
GPO	MEval1		MEval2			MEval3			MEval4			MEval5			MEval6			MEval7			
	PPC	Sig	GPO	PPC	Sig	GPO	PPC	Sig	GPO	PPC	Sig	GPO	PPC	Sig	GPO	PPC	Sig	GPO	PPC	Sig	
A2	14.51	a	A2	16.11	a	NS			A1	18.40	a	A2	18.94	a	A2	19.09	a	A2	18.33	a	
A1	14.02	ab	A3	15.55	ab				A2	17.83	b	A1	18.17	b	A1	18.30	b	A1	18.01	b	
A3	13.45	b	A1	14.97	b				NA	17.74	c	NA	17.64	c	NA	17.71	c	NA	17.27	c	
NA	13.36	c	NA	14.81	c				NA			NA			NA			NA			
ANOVA A LOS GRUPOS ASOCIADOS Y NO ASOCIADOS PPC RETOÑO																					
MEval1			MEval2			MEval3			MEval4			MEval5			MEval6			MEval7			
PPC	MS	F	p	MS	F	p	MS	F	p	MS	F	p	MS	F	p	MS	F	p	MS	F	p
GPO	20.098	3.486	0.017	13.33	3.96	0.009	25.41	14.29	0.000	10.86	9.82	0.000	9.82	8.86	0.000	1.63	0.73	0.482	3.89	0.635	0.531
Error	5.77			3.37			1.78			1.11			1.11			2.23			6.13		
COMPARACIÓN DE MEDIAS																					
GPO	MEval1		MEval2			MEval3			MEval4			MEval5			MEval6			MEval7			
	PPC	Sig	GPO	PPC	Sig	GPO	PPC	Sig	GPO	PPC	Sig	GPO	PPC	Sig	GPO	PPC	Sig	GPO	PPC	Sig	
A2	15.33	a	A2	17.05	a	A1	18.25	a	A2	19.22	a	A1	19.30	a	NS			NS			
A1	15.24	a	NA	16.80	b	A2	17.93	a	A1	19.07	a	A2	19.13	a							
A3	14.30	b	A1	16.77	b	A3	17.28	b	A3	18.94	a	A3	18.65	b							
A4	14.18	b	A3	15.88	c	NA	16.84	c	NA	18.33	b	NA	18.36	b							
NA	-	-	A4	-	-	A4	-	-	A4	-	-	A4	-	-							

Nota: A1: ambiente 1; A2: ambiente 2; A3: ambiente 3; NA: no asociado, a-c: medias con letras no coincidentes difieren significativamente según la prueba de comparaciones múltiples de Tukey ($P < 0.001$).

Tabla 3. ANOVA entre los grupos Asociados y no Asociados (GLIMMIX-1 VAR-MEVal parcial), cepa caña planta y retoño

ANOVA A LOS GRUPOS ASOCIADOS Y NO ASOCIADOS PPC PLANTA												
LOC 1			LOC 2			LOC 3			LOC 4			
PPC	CM	F	p									
GPO	25.72	3.451	0.0167	31.19	12.16	0.0000	102.1	11.83	0.0000	32.92	10.45	0.0000
Error	7.45			2.57			8.6			3.15		
COMPARACIÓN DE MEDIAS												
LOC 1			LOC 2			LOC 3			LOC 4			
GPO	PPC	Sig	GPO	PPC	Sig	GPO	PPC	Sig	GPO	PPC	Sig	
A2	18.46	a	A1	18.90	a	A2	17.78	a	A2	15.18	a	
A3	18.26	ab	A2	18.81	ab	A3	17.47	a	A1	15.13	a	
A1	18.25	ab	NA	18.03	b	A1	16.96	b	A3	14.50	b	
NA	17.48	b				NA	15.64	c	NA	13.96	c	
ANOVA A LOS GRUPOS ASOCIADOS Y NO ASOCIADOS PPC RETOÑO												
LOC 1			LOC 2			LOC 3			LOC 4			
PPC	CM	F	p									
GPO	43.2	5.81	0.0033	4.0	4.1	0.0168	80.2	16.04	0.0000	30.1	6.89	0.0011
Error	7.4			1.0			5.0			4.4		
COMPARACIÓN DE MEDIAS												
LOC 1			LOC 2			LOC 3			LOC 4			
GPO	PPC	Sig	GPO	PPC	Sig	GPO	PPC	Sig	GPO	PPC	Sig	
A1	18.11	a	A1	19.28	a	A2	18.30	a	A1	17.17	a	
A2	17.64	b	A2	19.12	ab	A1	17.72	a	A2	16.51	b	
NA	17.03	c	NA	18.95	b	NA	16.83	b	NA	16.27	c	

Nota: A1: ambiente 1; A2: ambiente 2; A3: ambiente 3; NA: no asociado, a-c: medias con letras no coincidentes difieren significativamente según la prueba de comparaciones múltiples de Tukey ($P < 0.001$).

CONCLUSIONES

1. Con el uso del Modelo Lineal Bilineal de Regresión de Sitios (SREG) o GGE biplot, se pudieron determinar las interacciones cruzadas entre los ambientes en estudio, así como identificar aquellos más discriminatorios y representativos.
2. Los grupos no asociados a ambientes constituyen un caso especial, pues no mostraron asociación (adaptación general) con los ambientes (momentos evaluativos o localidades); por tanto, presentan los menores valores de pol, en sentido general.
3. Se identifican los cultivares más destacados por momentos evaluativos y localidades con la confirmación estadística y los resultados de la interpretación de los GGE biplots, donde C86-12, C1051-73, C88-380 y C86-56 mostraron los mayores valores de rendimiento en los ambientes LOC 1 y LOC 2; así como C90-501, C91-367, C90-469 y C91-115 en LOC 3, este último cultivar resultó ser el más estable.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Pereira, Laís F.M.; Vilma M. Ferreira; N.G. de Oliveira; P. L.V.S. Sarmiento; L. Endres and I. Teodoro. 2017. Sugars levels of four sugarcane genotypes in different stem portions during the maturation phase. *Anais da Academia Brasileira de Ciências* (2017) 89(2): 1231-1242. Printed versión ISSN 0001-3765 / Online versión ISSN 1678-2690.
2. Rodríguez, R. 2012. Perfeccionamiento del programa de mejora genética de la caña de azúcar (*Saccharum spp.*) para la obtención de nuevos genotipos tolerantes al estrés por déficit hídrico. Tesis presentada en opción al grado Científico de Dr. en Ciencias Agrícolas. INICA, La Habana, Cuba. 2012, 100 p.
3. García, H. 2007. Fitomejoramiento Participativo en caña de azúcar, complementación necesaria de la mejora convencional. Propuesta de Proyecto de Investigación. La Habana, ETICA Villa Clara – Cienfuegos. INICA. Ministerio del Azúcar, 30 p.
4. Jorge, H.; Jorge, I. y Bernal, N. (Editores). 2010. Catálogo. Nuevas Variedades de Caña de Azúcar. La Habana, Cuba. INICA. 100 p.
5. Gálvez, G. 1978. Estudio de la interacción $g \times e$ y métodos de estabilidad en experimentos de variedades de caña de azúcar (*Saccharum spp* híbrido). Tesis en opción al grado de Doctor en Ciencias Agrícolas. La Habana, Cuba. Ministerio de Educación Superior. Universidad Agraria de La Habana. 76 p.
6. Bernal, N. 1986. Clasificación de ambientes en las provincias de Holguín, Las Tunas y Granma en los estudios de regionalización de variedades de caña de azúcar. Tesis para optar por el grado C. Dr. en Ciencias Agrícolas. INICA, MINAZ, 106 pp.
7. Jorge, H. 1996. Estudio genético del componente agroazucareros en las etapas clonales del esquema de selección partiendo de posturas aviveradas de caña de azúcar (*Saccharum spp*). Tesis en opción al Grado científico de Doctor en Ciencias Agrícolas. INICA. MINAZ, 90 pp.
8. INICA. 2019. XXV Reunión Nacional de Variedades, Semillas y Sanidad Vegetal. Marzo de 2019.
9. Jorge, H.; González, R.; Casas, M. y Jorge, I. 2011. Normas y Procedimientos del Programa de Mejoramiento Genético de la Caña de Azúcar en Cuba. La Habana, Cuba, Publicinica. 308 p.
10. ICINAZ-Instituto Cubano de Investigaciones Azucareras. 1996. Manual de Métodos Analíticos para el Control Unificado. Azúcar Crudo (Partes I y II). Ministerio del Azúcar, La Habana, Cuba.
11. Balzarini M.G., Di Rienzo J.A. 2016. InfoGen versión 2016. FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.info-gen.com.ar>.

12. Gabriel, K.R. .1971. The biplot graphic display of matrices with application to principal component analysis. *Biometrika* 58, 453–467.
13. Yan, W. y N. A. Tinker. 2006. Biplot analysis of mulit-environment trial data: Principles and applications. *Canadian Journal of Plant Science*, pp. 623-645.
14. Cornelius, P. L.; J. Crossa, y M. Seyedsadr. 1996. Statistical tests and estimators of multiplicative models for cultivar trials. En: Kang, M.S. y H. G. Gauch Jr. (eds) *Genotype-by-Environment Interaction*. CRC Press, Boca Raton, Florida, pp. 199–234. Citado por Crossa y Cornelius, 2002.
15. Yan, W., Hunt, L.A.; Sheng, Q. and Szlavncs. Z. 2000. Cultivar evaluation and mega-environment investigation based on the GGE biplot. *Crop Sci.* 40: 597-605.
16. Todd, J. Yong-Bao Pan, Collins Kimbeng, Edwis Dufrene Jr., Herman Waguespack Jr., Michael Pontif. 2018. Analysis of Genotype by Environment Interaction in Louisiana Sugarca-
ne Research Plots by GGE Biplots. *Sugar Tech* (July-Aug 2018) 20(4):407–419. <https://doi.org/10.1007/s12355-017-0565-z>.
17. Yan, W. 2001. GGEbiplot – a Windows application for graphical analysis of multienvironment trial data and other types of two-way data. *Agronomy Journal* 93(5), 1111.
18. Gauch, H.G. 2006. Statistical analysis of yield trials by AMMI and GGE. *Crop Sci.* 46:1488–1500.
19. Yan, W., M. S. Kang, B. Ma, Sheila Woods, y P. L. Cornelius. 2007. GGE Biplot vs. AMMI Analysis of Genotype-by-Environment Data. Published in *Crop Sci* 47:641–653 (2007). doi: 10.2135/cropsci2006.06.0374. © Crop Science Society of America. 677 S. Segoe Rd., Madison, WI 53711 USA.
20. Gauch, Jr., G. Hugh, Hans-Peter Piepho, y Paolo Annicchiarico. 2008. Statistical analysis of yield trials by AMMI and GGE: Further considerations. *Crop Sci.* 48:866–889.
21. Yang, R. C., J. Crossa, P. L. Cornelius, and J. Burgueño. 2009. Biplot analysis of genotype x environment interaction: Proceed with caution. *Crop Sci* 49: 1564-1576.
22. Yan, W., Karl D. Glover, and Manjit S. Kang. 2010. Statistical test of genotype-by-environment interaction patterns observed from a biplot. *Crop Science*, vol. 50, 2010, pp. 1121-1123.