



**Ministerio de Educación Superior
Facultad de Ciencias Agrarias
Carrera de Agronomía**

**RESPUESTA DEL RENDIMIENTO AZUCARERO DE NUEVOS CULTIVARES DE CAÑA
DE AZÚCAR (*Saccharum* Spp.) EN DIFERENTES MOMENTOS EVALUATIVOS EN
SUELOS SIALITIZADOS NO CÁLCICOS**

TESIS EN OPCIÓN AL TÍTULO DE INGENIERO AGRÓNOMO

Diplomante: Delvis Arocha Álvarez

Tutor: MSc. Irenaldo Delgado Mora

CIENFUEGOS, 2020

“Año 62 de la Revolución”

RESUMEN

Cuando los cultivares presentan una respuesta diferencial a las diversas condiciones edafoclimáticas, es necesario disponer de genotipos con altos rendimientos y estables, que permita al genotipo ajustar su capacidad productiva a la más amplia variación ambiental. Bajo estas nuevas premisas se desarrolló este estudio en el Bloque experimental de Espartaco; perteneciente a la Estación Territorial de Investigaciones de Villa Clara, con el objetivo de evaluar la respuesta del rendimiento azucarero de nuevos cultivares de caña de azúcar en diferentes momentos de cosecha en los suelos sialitizados no cálcicos de la provincia de Cienfuegos. Entre los meses de septiembre a octubre del 2016, fue plantado un experimento con 10 cultivares, en bloques completamente al azar con tres repeticiones. La variable evaluada fue el porcentaje de pol en caña (ppc). Se obtuvo como resultado que, con el empleo del modelo de regresión por sitios, se pudo evaluar y seleccionar genotipos de adaptación general y específicos para un ambiente de prueba promedio. Así como se definió al ambiente C1M2 (diciembre) como el más discriminatorio y representativo. La evaluación mensual de los cultivares confirmó que la mayoría de los genotipos presentan alta inestabilidad del rendimiento, solo dos (C89-148 y C86-251) son los más estables. En el período de noviembre y diciembre los cultivares C89-250, C86-251 y C89-176 alcanzan los máximos valores de pol; sin embargo, a partir del mes de enero existió similitud en el rendimiento de los cultivares, siendo el más destacado C89-176, así como C86-165 los menores valores. Se recomienda económicamente no cosechar los cultivares C86-165, C86-56, C89-148 y C90-469 en la etapa inicial de la zafra, por presentar valores de pol muy inferiores (1.35 de pol menos) al testigo comercial C86-12.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	4
2.1. Particularidades en la Caña de Azúcar (<i>Saccharum spp.</i>)	4
2.2. Impacto del cambio climático en la agricultura cañera	7
2.3. Maduración de la caña de azúcar	9
2.4. Mejoramiento de la caña de azúcar en Cuba. Sitios de selección y destino de los cultivares ..	10
2.5. Ensayos multiambientales y la interacción genotipo-ambiente en el cultivo de la caña de azúcar.....	12
2.6. Estabilidad y adaptabilidad fenotípica. Evolución histórica de los métodos estadísticos para su estimación	14
2.7. Modelo de Regresión de Sitios (SREG y Biplot GGE).....	15
3. MATERIALES Y MÉTODOS	19
3.1. Determinar la adaptabilidad y estabilidad fenotípica de nuevos cultivares de caña de azúcar en un ambiente promedio	19
3.2. Determinar el rendimiento azucarero de nuevos cultivares de la caña de azúcar en diferentes momentos de cosechas	21
3.3. Determinar el análisis económico ambiental	22
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	23
4.1. Determinación de la adaptabilidad y estabilidad fenotípica de nuevos cultivares de caña de azúcar en un ambiente promedio.....	23
4.2. Determinación del rendimiento azucarero de nuevos cultivares de la caña de azúcar en diferentes momentos de cosechas.	26
4.3. Determinación del análisis económico ambiental.....	30
5. CONCLUSIONES	32
6. RECOMENDACIONES	32
7. BIBLIOGRAFÍA	

1. INTRODUCCIÓN

La caña de azúcar es originaria de Nueva Guinea, que pertenece al género *Saccharum*, del cual son reconocidas cinco especies: *S. spontaneum*, *S. robustum*, *S. sinense*, *S. barberi* y *S. officinarum*. Esta última fue la especie más utilizada por mucho tiempo para el consumo humano directo y precisamente su origen se presume producto de la domesticación llevada a cabo por el hombre. Y hasta principio del siglo XX la industria azucarera dependió de las variedades de *S. officinarum* (González *et al.*, 2018).

Según Moore y Botha (2014), expresan que *Saccharum officinarum* L., fue de las primeras especies en la producción de azúcar, y que los cultivares de caña de azúcar son híbridos de diferentes especies del género *Saccharum*. Estos autores informan además de la diferencia significativa en los niveles de acumulación de sacarosa en los tallos de *Saccharum* spp.

El azúcar constituye, desde cientos de años, uno de los componentes más importantes y universalmente utilizados de la dieta humana. Su importancia viene dada por su aporte energético a bajo costo, en combinación con su capacidad de endulzar. Se produce en las más diversas condiciones climáticas, prácticamente en todos los países del orbe.

El programa cubano de variedades garantiza que constantemente se estén incorporando a la producción nuevos individuos para sustituir variedades que van degenerando y comienzan a ser susceptibles a plagas y enfermedades (López, 1986; Delgado, 2008, Delgado *et al.*, 2012 y Delgado *et al.*, 2012). La selección de aquellas variedades de alto contenido azucarero que produzcan la mayor cantidad de azúcar por unidad de área, con un volumen mínimo de materia prima para procesar industrialmente, es un objetivo de trabajo prioritario para muchos países productores de azúcar, empeñados en lograr mayores beneficios económicos en la explotación del cultivo (Delgado, 2008).

El incremento en la productividad de azúcar requiere de la disponibilidad de cultivares de caña de azúcar de alta capacidad productiva, con elevados contenidos de azúcar. Este objetivo exige la

utilización de distintas estrategias de manejo que permiten la expresión del potencial azucarero de las variedades difundidas. Gaikwad *et al.* (2014), plantearon que cuando los cultivares presentan una respuesta diferencial a las diversas condiciones edafoclimáticas, es necesario disponer de genotipos con altos rendimientos y estables, así mismo, señalaron que la estabilidad permite al genotipo ajustar su capacidad productiva a la más amplia variación ambiental.

Motivado por esta situación se plantea el siguiente problema científico:

Problema Científico

¿Cuál serían las mejores respuestas de rendimiento azucarero de nuevos cultivares de la caña de azúcar para diferentes momentos de cosecha en suelos salinizados no cálcicos de la provincia de Cienfuegos?

Al considerar los aspectos abordados anteriormente se realizó el presente trabajo bajo la hipótesis:

Hipótesis

“La evaluación del rendimiento azucarero de nuevos cultivares de la caña de azúcar cosechados en diferentes momentos de cosecha, permitirán un manejo más racional de los mismos, con un incremento en los rendimientos y mayores niveles de rentabilidad del cultivo”.

Objetivo general

Evaluar la respuesta del rendimiento azucarero de nuevos cultivares de caña de azúcar en diferentes momentos de cosecha en los suelos salinizados no cálcicos de la provincia de Cienfuegos.

Objetivos específicos

1. Determinar la adaptabilidad y estabilidad fenotípica de nuevos cultivares de caña de azúcar en un ambiente promedio.
2. Determinar el rendimiento azucarero de nuevos cultivares de la caña de azúcar en diferentes momentos de cosechas.
3. Evaluar económicamente la respuesta de los cultivares cosechados en diferentes momentos evaluativos.

La novedad científica

“Por primera vez se logran caracterizar nuevos cultivares de caña de azúcar en diferentes períodos de cosechas, en suelos sialitizados no cálcicos de la provincia de Cienfuegos. Se define la adaptabilidad y estabilidad de nuevos cultivares de caña de azúcar, en un ambiente promedio de la contienda azucarera; así como los ambientes más representativos y discriminatorios; permitiéndolo familiarizarse con su comportamiento y realizar recomendaciones sobre bases científicas”.

Aplicación práctica:

- Se logra recomendar los cultivares más destacados en cada ambiente.
- Se establece la adaptabilidad y estabilidad de nuevos cultivares de caña de azúcar, en un ambiente promedio de la contienda azucarera en la provincia de Cienfuegos; así como los ambientes más representativos y discriminatorios.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. Particularidades en la Caña de Azúcar (*Saccharum spp.*)

La caña de azúcar es una planta proveniente del sureste asiático. Fue llevada a la Península Ibérica por los árabes, donde se cultivaba principalmente en las tierras costeras de Málaga y Granada. En este sitio todavía se conserva el más antiguo trapiche de Occidente. Posteriormente los europeos llevaron la planta, primero a las islas Canarias, y luego a las Indias Occidentales, en muchas de cuyas zonas el clima era más favorable que en la Península Ibérica, por lo que casi se abandonó el cultivo en ésta.

La caña de azúcar pertenece al género *Saccharum*, del cual son reconocidas cinco especies: *S. spontaneum*, *S. robustum*, *S. sinense*, *S. barberi* y *S. officinarum*. Por ello, se define a *Saccharum officinarum* L., una de las especies del complejo *Saccharum*, que corresponde con las cañas nobles, es decir, con adaptación por cambios en su hábitat, originado por causas accidentales, como cambios climáticos, de suelo, afectaciones de enfermedades, etc. Sin embargo, *Saccharum spp.* es para las plantas cultivadas, que son conocidos sus progenitores, es decir, plantas cultivadas comercialmente, modificadas por el hombre a través del mejoramiento genético (Moore y Botha, 2014).

El término variedad, es un vocablo proveniente del latín *varietate*, que significa variedad. Este término fue publicado por primera vez en 1751 por Linneo, en su libro clásico *Philosophia Botanica* y permanece inalterado. En él se expone que la variedad es una adaptación de la especie provocada por cambios en su hábitat, originado por causas accidentales, como cambios climáticos, de suelo, afectaciones de enfermedades, etc. Se distingue por caracteres morfológicos y fisiológicos permanentes.

El descubrimiento de la fertilidad de la semilla botánica de la caña de azúcar en Barbados en el año 1858, marcó el inicio de los trabajos de mejoramiento genético del cultivo. En el año 1921 se obtuvo el cultivar POJ 2878, hecho que selló una nueva era para el cultivo de la caña de azúcar. El término cultivar es referido para evitar confusiones con el término de variedad. Barnes y Beard (1992) lo

definieron como un conjunto de plantas cultivadas, que se distinguen por caracteres permanentes, morfológicos, fisiológicos, citológicos, químicos, etc, desarrollados para la agricultura.

Arévalo *et al.* (2006), especificaron que este término es para ser utilizado en plantas obtenidas por selección genética, lo definen además, como plantas cultivadas comercialmente, modificadas por el hombre a través del mejoramiento genético. Por lo que, variedad es aquella que la naturaleza selecciona y cultivar es aquello que el hombre selecciona. Señalaban estos autores, que con el surgimiento de los cultivares comenzaron a aparecer confusiones en la terminología.

Actualmente no existe razón para la utilización del término variedad para su uso comercial, pero lo cierto es que aún se dice variedad cuando se debe decir cultivar. Un ejemplo de ello, lo informan (Santana *et al.*, 2014) que expusieron que el término cultivar es más afín desde el punto de vista científico, pero como el instructivo técnico era destinado a investigadores y productores utilizarían ambos términos indistintamente. No obstante, en trabajos relacionados con la liberación o divulgación de cultivares por instituciones ligadas al sector azucarero, es común observar “erróneamente empleado” el término variedades, debido a la fuerza de la costumbre y la tradición.

Arévalo *et al.* (2006), señalan que los conocimientos de la taxonomía de la caña de azúcar, tienen gran importancia para determinar la posición de las variedades y de los cultivares dentro del Reino Plantae. El término variedad es una jerarquía taxonómica entre la especie y el cultivar. Para muchas especies la última jerarquía taxonómica es la variedad. El Cuadro 1 ilustra la posición ocupada por las variedades y por los cultivares, a partir de una determinada especie.

Para ejemplificar esta confusión terminológica, en el Congreso Internacional de la ISSCT- International Society Sugar Cane Technologists, realizado en Brisbane, Australia en el 2001, fueron presentados 13 trabajos de mejoramiento de caña de azúcar, de los cuales, nueve utilizaron el término variedades, en cuanto que lo correcto sería el término cultivar. De estos nueve trabajos, apenas tres, utilizan el término variedad, exclusivamente. En el resto de los trabajos, el término variedad está combinado con los términos cultivar, clones y genotipo. Ninguno de los trabajos utilizó exclusivamente el término cultivar.

CUADRO 1. Taxones de la caña de azúcar⁽¹⁾

I	Super-Reino	Eucariota
II	Reino	Plantae
III	División	Spermatophyta
IV	Sub-división	Magnoliophytina
V	Clase	Liliatae
VI	Sub-Clase	Liliidae
VII	Orden	Poales
VIII	Familia	Poaceae
IX	Sub-Familia	Panicoideae
X	Tribus	Andropogoneae
XI	Sub-Tribus	Saccharastrae
XII	Especie	Saccharum spp.
XIII	Variedades	Black Cheribon, Criolla, etc
XIV	Cultivares	IAC91-3186; RB72454, etc

¹Adaptado de Strasburger *et al.* (1988).

Por lo tanto, González *et al.* (2018) dejan claro el significado preciso de cada término, pero considerándolas en completa sinonimia contextual, emplean indistintamente ambas denominaciones. Por ello, a partir de estas referencias y para una mejor comprensión de la tesis, expresamos ambos términos.

La caña es un cultivo de la zona tropical o sub tropical del mundo. Requiere agua y de suelos adecuados para crecer bien. Es una planta que asimila muy bien la radiación solar, teniendo una eficiencia cercana a 2% de conversión de la energía incidente en biomasa. Un cultivo eficiente, puede producir 150 toneladas de caña por hectárea por año (con 14% de sacarosa, 14% de fibra y 2% de otros productos solubles). Su periodo de crecimiento varía entre 11 y 17 meses, dependiendo de la variedad de caña y de la zona. Requiere de nitrógeno, potasio y elementos menores para su fertilización. En zonas salinas se adiciona azufre para controlar el sodio. Se puede cosechar a mano o a máquina. Una persona puede cosechar entre 5 y 7 toneladas por día de caña quemada y 40% menos de caña sin quemar.

La cosecha mecánica se hace con cosechadoras que cortan la planta y separan los tallos de las hojas con ventiladores. Una máquina puede cosechar 30 toneladas por hora. La producción mundial de caña de azúcar en el 2005 fue de 1,267 millones de toneladas, siendo el principal productor Brasil con 34 % de la producción mundial, India 18 %, China 7 %, Pakistán 4 %, México 4 %, Tailandia

3%, Colombia 3% y otros países representan el 27%; para la India, Pakistán, Cuba y Turquía, representa la base fundamental de su economía. (Wikipedia, 2005).

2.2. Impacto del cambio climático en la agricultura cañera

Se llama cambio climático a la modificación del clima con respecto al historial climático a una escala global o regional. Tales cambios se producen a muy diversas escalas de tiempo y sobre todos los parámetros climáticos: temperatura, precipitaciones, nubosidad, etcétera (Michael *et al.* 2006). Mayhew *et al.* (2007) señalan que las temperaturas globales previstas para los próximos siglos pueden poner en marcha un nuevo evento de extinción masiva, en el cual el 50% de las especies de animales y plantas sería aniquilado.

En la última década, las variaciones climáticas relacionadas con el fenómeno de El Niño y La Niña han traído serios retos para la agricultura, demostrando que muchos agricultores no tienen la capacidad de manejar efectivamente el riesgo y de adaptarse a fluctuaciones climáticas y catástrofes (Lau, *et al.* 2011). El estrés por temperatura comienza en torno a los 35° C y unas temperaturas por encima de los 38° C pueden dar lugar a una reducción en el ritmo de crecimiento de la planta. Sin embargo, aumentos de temperatura hasta niveles más extremos podrían venir acompañados de unas mayores concentraciones de CO₂, lo que a su vez podría reducir la susceptibilidad del cultivo a mayores índices de sequía (Marin *et al.* 2013).

Indistintamente de la temperatura, las hojas superiores interceptan más del 70% de la radiación solar, por lo que el sombreado que se produce en las hojas inferiores hace que disminuya su producción de fotosintatos. Por esta razón, es muy importante tomar en cuenta la densidad de población para fomentar una mayor intercepción de radiación solar, lo que mantendrá por más tiempo las hojas verdes en la planta y al prolongar su actividad fotosintética, se propiciará una mejor y mayor acumulación de azúcares (CONADESUCA, 2015).

Si la humedad relativa está alrededor de 80% y abundante luminosidad durante el crecimiento vegetativo (>25 MJ/m²), estimulará un crecimiento acelerado de los tallos, por la formación y elongación de sus entrenudos, así como el ahijamiento. En contraste, durante la maduración se

requiere un ambiente más bien seco (humedad relativa inferior a 65%), ya que las lluvias intensas disminuyen significativamente la calidad del jugo, propicia mayor crecimiento vegetativo, aumenta la humedad en el tejido vegetal y dificulta las maniobras durante la cosecha (CONADESUCA, 2015).

La adaptación al cambio climático en la agricultura normalmente se asocia al despliegue de nuevas tecnologías, como por ejemplo el desarrollo de nuevas semillas con mejor resistencia a las enfermedades o mayor tolerancia a la sequía, variedades de mayor rendimiento que compensen el aumento de humedad o nuevas técnicas de gestión de la tierra para conservar recursos hídricos, entre otras (Knox *et al.* 2010; Marin *et al.* 2013; Biggs *et al.* 2013; Everingham *et al.* 2013; Sexton *et al.* 2013; Everingham *et al.* 2014; Stokes *et al.* 2014).

Los productores de caña podrían tener que dedicar un esfuerzo cada vez mayor en la adopción de técnicas de mitigación y adaptación al cambio climático. Entre las medidas de mitigación se encuentran las de un uso más eficiente de los fertilizantes para frenar las emisiones de nitrógeno y el perfeccionamiento de la gestión de tierras y aguas, mejorar la eficiencia energética en el agro, la eliminación de la quema de la caña, y los sistemas de cogeneración con bagazo (Lau *et al.* 2011).

Desde finales de la década del 70 del pasado siglo, el clima cubano registra cambios importantes, como el aumento de la temperatura media del aire en 0,6° Celsius, acompañado de una elevación del valor promedio de la mínima en 1,4° Celsius. (Lapinel *et al.* 2010). Los estudios realizados en Cuba indican que la agricultura se desenvolverá en un ambiente climático adverso (Planos, 2014).

El impacto directo del aumento de las temperaturas y la reducción de las precipitaciones afectará la productividad de cultivos importantes tales como papa, soya, frijol, arroz, yuca, maíz y caña de azúcar, y la cría de animales. Se requerirá de investigaciones sobre los mecanismos de su respuesta adaptativa favorable para obtener materiales mejorados y de mayor valor nutricional, así como un manejo que los estimule, y la búsqueda de nuevas fuentes genéticas, preferentemente autóctonas o por introducción de nuevos cultivos (Cornide *et al.* 2017).

2.3. Maduración de la caña de azúcar

La maduración de la caña de azúcar ha sido descrita por Clements (1940), como la culminación del proceso fisiológico que ocurre en dos fases: una del tejido meristemático, cuando se van formando entrenudos anatómicos completos pero inmaduros, en proceso de alargamiento y el segundo incluye todo lo relacionado con la acumulación de sacarosa en los entrenudos totalmente desarrollados; por lo que la idea de que la maduración está completa cuando caen las hojas es del todo errónea.

Esta fase depende de factores variables, nutricionales y ecológicos. Relativamente poco se conoce acerca del efecto de los factores ambientales sobre el almacenamiento de la sacarosa; aunque mucha información empírica ha sido publicada en relación con los efectos del agua, la temperatura y los factores nutricionales. La maduración de la caña de azúcar no va paralela con la edad. Si el agua y el nitrógeno se mantienen abundantes, la planta nunca madura, el exceso de nitrógeno disponible en época de cosecha es la principal causa de los bajos contenidos de sacarosa (Martín *et al.* 1987).

Fisiológicamente, la maduración es un proceso metabólico en el cual la planta cesa su tasa de crecimiento vegetativo y empieza a acumular energía en forma de sacarosa en los tejidos parenquimatosos del culmo o tallo aéreo (Sáenz, 2004). Las condiciones favorables para la maduración natural de la caña de azúcar son: períodos de poca lluvia, temperaturas bajas con oscilación entre el día y la noche de 11 °C y bastante luz solar en un periodo de 4 a 6 semanas antes de la cosecha (Buenaventura, 1986).

Chavez, (1982) plantea que el proceso de maduración se inicia tres meses antes del corte teórico con una reducción en el crecimiento y la conservación de azúcares reductores a sacarosa, donde la planta tiene en este momento de 8-9 hojas verdes y tanto la humedad como el nitrógeno de la sección 8-10 del tallo deben disminuir y que entre los factores que determinan la madurez y los rendimientos de la caña de azúcar tenemos: el clima, las precipitaciones, la temperatura, la nubosidad y los vientos.

Las variedades de caña de azúcar, no todas maduran en la misma época aunque sean influenciadas por los mismos factores, razón por la cual se ha establecido una clasificación de variedades de acuerdo a su madurez, en : variedades de maduración precoz o temprana: con ellas se inicia la zafra,

variedades de madurez intermedia: constituyen la materia prima que mantiene la mayor parte de la zafra y variedades de madurez tardía: cañas cuyo tiempo para lograr la madurez es largo, son las que se cortan de último (Chavez, 1982).

Dillewijn (1975) expresó que habían cultivares de maduración temprana y maduración tardía, con muchas formas intermedias y que las características estaban estrechamente relacionadas con la duración del período de crecimiento, por lo que los cultivares de período de crecimiento corto, por lo general maduraban antes, y viceversa.

Desde hace muchos años se busca un método que permita determinar la maduración de caña de azúcar de forma precisa. Así Martín *et al.* (1987) han planteado métodos basados en la pureza de los jugos, el brix, el porcentaje de pol de los jugos, los azúcares reductores, o relaciones entre ellos.

Determinar la maduración de la caña de azúcar no solo es importante en la producción, para poder hacer una buena programación de los cortes, sino también en la investigación, cuando se pretenden comparar variedades que poseen diferentes ciclos de maduración, o se estudian variantes que influyen en el proceso de maduración de las distintas formas, adelantándolo o retardándolo. Esto justifica la necesidad de buscar métodos cada vez más precisos, pero fáciles, que permitan realizar esta tarea (Alexander, 1968 y Jorge *et al.* 2007).

Los cultivares constituyen un factor intrínseco de gran importancia en la maduración, registrándose entre ellos diferencias en la modalidad y en la producción de azúcar por hectárea (Romero *et al.* 2012).

2.4. Mejoramiento de la caña de azúcar en Cuba. Sitios de selección y destino de los cultivares

Las variedades modernas de la caña de azúcar provienen de una limitada serie de cruces experimentales efectuados hace apenas un siglo que dieron inicio a su mejoramiento. Ha sido cruzada con sus parientes más cercanos, las diferentes especies del “Complejo *Saccharum*” que forman parte de su genoma (Castillo *et al.* 2013).

El conocimiento y manejo de estas características determinan la eficiencia de los programas de mejoramiento. La obtención de resultados adecuados, está sujeta a un elevado número de factores,

entre los que sobresalen la experiencia del mejorador, la intensidad de selección aplicada y el número y tipo de caracteres involucrados en la selección; la mayoría de herencia poligénica, que se realizan según la teoría científica y los métodos de la Genética Cuantitativa; estudios que han hecho posible los avances del mejoramiento, el diseño y perfeccionamiento gradual de los esquemas que hoy se emplean (Mesa, 1995 y Mesa *et al.* 2018).

Tienen una incidencia decisiva en los resultados de la selección, la competencia, el efecto del ambiente y el de su interacción con los genotipos (Queme *et al.* 2010).

El esquema de selección, del programa comercial de obtención de variedades, pasa por cuatro etapas hasta la liberación de los materiales a los estudios de extensión y validación (Jorge *et al.* 2011): lote de posturas, primer y segundo lote clonal y estudios multiambientales; desarrollándose dos interfase, una para producir la semilla que requieren los estudios multiambientales y la otra para la realización de las pruebas de resistencia genética a las principales plagas que afectan el cultivo, ésta última de manera paralela a la cuarta etapa.

Desde la plantación de las posturas hasta el final del proceso de selección pueden transcurrir entre 10-15 años para recomendar 1-2 variedades, de una población inicial de 175-200 mil posturas (Jorge *et al.* 2011).

La etapa final del programa, los estudios multiambientales se replican: en tiempo en tres épocas de plantación (primaveras del año con riego, primavera de ciclo largo y frío en seco), correspondiente a los tres períodos de plantación en la producción; y dos cosechas como mínimo; planta y primer retoño); y espacio, ubicando los ensayos en cada punto de la red experimental, para un mínimo de cuatro ambientes por localidad o sitio de prueba.

Los principales programas de fitomejoramiento del mundo cañero prestan atención a la clasificación de los ambientes de prueba, con el objetivo de verificar las similitudes y disimilitudes entre los mismos y cuál es su origen (Glaz y Kang, 2008), reducir aquellos ambientes con similar poder de discriminación de los genotipos y la adopción de los más ventajosos de acuerdo con las posibilidades prácticas de conducir los estudios en los mismos.

2.5. Ensayos multiambientales y la interacción genotipo-ambiente en el cultivo de la caña de azúcar

Los ensayos multiambientales son comunes en la evaluación de germoplasma vegetal y al ser replicados, constituyen una colección de ensayos en diferentes ambientes (localidades y/o años) en los que se evalúan varios genotipos, dentro de cada ambiente. Estos son montados según un diseño experimental. Por ejemplo, un diseño en bloques completamente aleatorizados (con bloques completos o incompletos) (Balzarini *et al.* 2004).

Un cultivar, ya sea con material genéticamente homogéneo, tales como líneas puras y clones o heterogéneos tales como poblaciones de polinización abierta, se le denomina genotipo y el ambiente se relaciona al conjunto de climas, suelos, factores bióticos (plagas y enfermedades) y condiciones de manejo en un ensayo individual llevado a cabo en una localidad dada en un año particular (en el caso de cultivos anuales) o en varios años (en el caso de cultivos perennes) (Annicchiarico, 2002).

En ensayos repetidos en el tiempo un ambiente se define a partir de la combinación de los factores localidad y año (para anuales) o de la combinación de los factores localidad y ciclo de cultivo. (Como se sitó en Perennes, Annicchiarico, 2002)

Por lo tanto, como lo señaló Baker (1990), la Interacción Genotipo x Ambiente (IGA) (GEI, *Genotype-environment Interaction*) es la respuesta diferencial de un genotipo o cultivar a través de diferentes ambientes.

La IGA no es directamente observable en ensayos multiambientales, es un concepto que resulta en el comportamiento variable de los genotipos a través de los ambientes. Los estudios de interacción permiten tipificar adaptaciones en sentido amplio y en sentido estricto (o específicas de ambiente) (Kang *et al.* 2005).

Las causas de la ocurrencia de la IGA son muy discutidas (Kang, 1998; Ramburan *et al.* 2011; Bose *et al.* 2014). Una interacción de magnitud importante puede provenir de una alta variación entre los genotipos para caracteres morfofisiológicos de resistencia (o de escape) a uno más tipos de stress, o

de una alta variación entre ambientes para la incidencia del mismo o mismos tipos de stress (como los determinados por clima, suelo, factores bióticos y de manejo).

La IGA, puede dividirse en dos categorías: la interacción cruzada (COI, *Crossover interaction*) que se evidencia con cambio de rango varietal; y la interacción genotipo ambiente no cruzada (NCOI, *Non crossover Interaction*) (Balzarini *et al.* 2004).

Los principales efectos genéticos, proporciona la única información pertinente cuando los efectos de la (IGA) están ausentes o ignorados. Sin embargo, las diferencias entre los genotipos pueden variar ampliamente entre los ambientes en la presencia de grandes (IGA), como lo informaron en extensas investigaciones (Annicchiarico, 2002).

El fenómeno de la interacción genotipo-ambiente es preocupación de los mejoradores, por dos razones: primero, porque reduce el progreso de selección y segundo, porque hace imposible interpretar los efectos principales (debidos exclusivamente a los genotipos o al ambiente) (Asfaw *et al.* 2009).

Mega-ambientes: Los sitios que son similares en términos de respuesta genotípica suelen ser agrupados por diferentes métodos, y cada grupo puede identificar un área de cultivo que es relativamente uniforme porque los efectos de la interacción son limitados o despreciables. Tales áreas (posibilidad del objeto de mejoramiento específico) han sido definidas por diferentes autores como subregiones, subzonas, subáreas, macro-ambientes o mega-ambientes (Yan y Hunt, 2002).

La identificación de mega-ambientes se asocia con la exploración de los patrones de la IGA repetibles a través de los años, e incluso más allá de su connotación en mejoramiento genético pueden ser utilizadas desde un punto de vista productivo, ya que permiten señalar nichos ambientales propicios para una mayor productividad tanto en cantidad como en calidad.

La evaluación de genotipos a través de distintos ambientes es una de las prácticas más usuales para la recomendación de nuevos cultivares a los productores (Gordon *et al.* 2006). A menudo, la ocurrencia de la interacción genotipo-ambiente en ensayos multiambientales exige la realización de

estudios adicionales, con el propósito de precisar la selección de individuos con adaptabilidad general y específica (Alejos *et al.* 2006).

En Cuba, en las últimas décadas, se han realizado numerosos estudios relacionados con el tema de la interacción genotipo-ambiente, Gálvez (1978), Bernal (1986), López (1986), Castro (1991), González (1995), Jorge (1996), García (2004) y Rodríguez (2012); en todos los anteriormente mencionados los estudios revelan, una elevada proporción del componente ambiental, superior para el rendimiento agrícola que, para el industrial, y la importancia de la replicación de los estudios en tiempo y espacio para explotar de manera conveniente la interacción genotipo-ambiente existente.

Varios métodos estadísticos son utilizados para cuantificar el efecto de los genotipos (G), del ambiente (A) y de la interacción genotipo ambiente (IGA) (Gauch, 2013).

2.6. Estabilidad y adaptabilidad fenotípica. Evolución histórica de los métodos estadísticos para su estimación

Finlay y Wilkinson (1963) definieron la estabilidad media de una forma dinámica, para caracterizar un cultivar cuya producción varía de acuerdo con la capacidad de los ambientes.

Para Eberhart y Russel (1966) la adaptabilidad se refiere a la capacidad de los genotipos de aprovechar ventajosamente los estímulos del ambiente. Fox *et al.* (1997) usaron los términos de adaptabilidad y estabilidad para referirse a las dimensiones, espacial y temporal, respectivamente.

Bilbro y Ray (1976) señalaron que para obtener éxito en un programa de mejoramiento genético, este debe enfocar sus esfuerzos sobre el rendimiento del genotipo (la media de rendimiento comparado con el testigo), su adaptación (en qué ambiente el genotipo responde mejor), y su estabilidad (consistencia del rendimiento del genotipo comparado con otros).

Balzarini *et al.* (2004), definen el concepto de estabilidad como la habilidad de los genotipos de comportarse consistentemente, ya sea con altos o bajos niveles de rendimiento, a través de un amplio rango de ambientes. Las medidas de estabilidad pueden ser relativas a diferentes conceptos, estabilidad bajo el concepto “estático” (Tipo 1) o bajo el concepto “dinámico” (Tipo 2) (Becker y León, 1988).

Adaptabilidad: Se refiere a la habilidad del genotipo de tener buen desempeño (por ej. altos rendimientos) con respecto a determinadas condiciones ambientales. La información provista por los ensayos multi-ambientales permite evaluar adaptabilidad e identificar el tipo y tamaño de la IGA esperada en una región dada para definir, si es necesario, una estrategia de cultivo exitosa con respecto a los efectos de interacción (Balzarini *et al.* 2004).

Dentro de los métodos propuestos para estudiar la estabilidad y adaptabilidad fenotípicas, se encuentran los procedimientos basados en los estimados de la varianza de la interacción genotipo-ambiente (Wricke, 1962 y Shukla, 1972), la regresión lineal simple (Finlay y Wilkinson, 1963; Eberhart y Russell, 1966; Bilbro y Ray, 1976) y la regresión múltiple (Storck y Vencovsky, 1994).

También se encuentran otros métodos multivariados, como el Análisis de Componentes Principales (Cossa, 1990), Análisis de Agrupamiento (Hanson, 1994), Análisis de Coordenadas Principales (Westcott, 1987); y métodos que integran el análisis de varianza (método univariado) con el Análisis de Componentes Principales (método multivariado), como el modelo AMMI (Gauch, 1988) y el modelo de Regresión de Sitios (Yan *et al.* 2000).

La regresión lineal tiene como limitaciones fundamentales que en algunos casos la respuesta de los cultivares no se presenta de manera lineal y que tratan de explicar la interacción a partir de un solo término multiplicativo, lo cual en muchas ocasiones resulta insuficiente (Varela y Castillo, 2005; Varela *et al.* 2008).

La mayor limitación biológica del método está dada en que la estabilidad genotípica relativa de cualquier pareja de genotipos depende no solo del grupo de ambientes incluido, sino también de otros genotipos incluidos en el análisis de regresión (Gálvez, 2010).

2.7. Modelo de Regresión de Sitios (SREG y Biplot GGE)

Los primeros modelos para el análisis de la interacción genotipo-ambiente fueron modelos: bifactoriales de efectos fijos que sumaban cero para todas las restricciones (Ecuación 1); y de regresión lineal simple de los rendimientos del genotipo en las medias ambientales (Kang, 2002).

Los modelos de regresión por sitio (SREG, Cornelius *et al.* 1996; Crossa y Cornelius, 1997 y 2002) son modelos lineales-bilineales que remueven el efecto de sitio y sólo expresan a la respuesta en función de G+GE. Son aconsejables cuando los sitios (o ambientes) constituyen la fuente de variación más importante en relación a la contribución de los genotipos y la (IGA) sobre la variabilidad total, situaciones éstas muy comunes en la práctica.

Para visualizar los patrones de interacción con remoción de los efectos de ambiente (datos centrados por sitio), Yan *et al.* (2000) proponen los gráficos GGE biplots. A partir de estos gráficos se puede investigar la diferenciación de mega-ambientes entre los ambientes en estudio y seleccionar cultivares superiores en un mega-ambiente dado.

El procesamiento de este análisis se describe de la forma siguiente:

–Análisis según el modelo de bifactorial de efectos fijos (antes descrito), que según la simbología usada por Cornelius *et al.* (1996) al unificar en una metodología general de los modelos Lineales–Bilineales AMMI y sus derivados, y la estimación de sus efectos por el método de los mínimos cuadrados, es el siguiente:

$$y_{ij} = \mu + \tau_i + \delta_j + \tau\delta_{ij} + \varepsilon_{ij} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde:

y_{ij} : valor fenotípico observado para la variable dependiente;

μ : media general de todos los genotipos en todos los ambientes, estimada por $[\bar{y}]$.

τ_i : efecto aditivo del genotipo i , estimado por $[\bar{y}_i - \bar{y}]$; que cumple $\sum_i \tau_i = 0$.

δ_j : efecto aditivo del ambiente j , estimado por $[\bar{y}_j - \bar{y}]$; que cumple $\sum_j \delta_j = 0$.

$(\tau\delta)_{ij}$: efecto no aditivo del genotipo i en ambiente j , estimado por $[\bar{y}_{ij} - \bar{y}_i - \bar{y}_j + \bar{y}]$; que cumple $\sum_i \sum_j (\tau\delta)_{ij} = \sum_i (\tau\delta)_{ij} = \sum_j (\tau\delta)_{ij} = 0$.

ε_{ij} : media de los errores que contribuyen las mediciones del genotipo i en el ambiente j ; que cumple $NID(0, \sigma^2/n)$ donde, es la varianza agrupada dentro del error.

En 1953, E. J. Williams, (Freeman, 1973) asoció el referido modelo bifactorial con el análisis de componentes principales: demostró que el término de interacción podía representarse por la suma de los valores en una matriz. Gollob (1968) y Mandel (1971) introdujeron el modelo Lineal–Bilineal (LBM, Linear–Bilinear Model) según:

$$y_{ij} = \mu + \tau_i + \delta_j + \sum_{k=1}^t \lambda_k \alpha_{ik} \gamma_{jk} + \varepsilon_{ij} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde:

λ_k : parámetro de escala o valor singular del k-ésimo componente bilineal (multiplicativo) ordenados $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_t$.

α_{ik} , γ_{jk} : elementos de los vectores singulares, izquierdo y derecho, del k-ésimo componente multiplicativo; sujetos a las premisas de normalidad $\sum_i \alpha_{ik} = \sum_j \gamma_{jk} = 1$, y ortogonalidad, $\sum_i \alpha_{ik} \alpha_{ik'} = \sum_j \gamma_{jk} \gamma_{jk'} = 0$ para $k \neq k'$; γ_{jk} : respuestas genotípicas a un factor ambiental hipotético, en el j-ésimo ambiente cuyo nivel está representado por el elemento γ_{jk} del vector singular de la derecha para el componente k-ésimo.

Gabriel (1978) demostró que era posible una solución para los parámetros del modelo Lineal-bilineal (Ecuación 4) tomando los estimados de los términos bilineales como los t mayores componentes de la descomposición del valor singular de la matriz Z compuesta por los efectos aditivos μ , τ_i y δ_j , obtenidos por el método de los mínimos cuadrados, del análisis bifactorial:

$$[Z] = [z_{ij}] = [\bar{y}_{ij} - \bar{y}_{i.} - \bar{y}_{.j} + \bar{y}] \quad (\text{Ecuación 3})$$

Zobel *et al.* (1988) y Gauch (1988) nombraron al modelo expresado en la ecuación 4, modelo de Efecto principal aditivo e interacción multiplicativa (AMMI, *Additive Main Effect and Multiplicative Interaction Models*) del cual se derivaron otros modelos y se extendieron variantes para adecuarlos al interés práctico, entre estos, a los ensayos multiambientales de campo (Crossa y Cornelius, 2002; Balzarini, 2002; Yan y Tinker, 2006).

Uno de estos modelos, recomendado para estudiar los genotipos es la Regresión de sitios (SREG) (Gauch y Zobel, 1997) o GGE–biplot (Yan *et al.* 2000).

La descomposición en vectores y valores singulares de la matriz del modelo GGE centrado en ambientes (columnas) es:

$$[\bar{y}_{ij} - y_{.j}] = \lambda_1 \alpha_{i1} \gamma_{j1} + \lambda_2 \alpha_{i2} \gamma_{j2} + \varepsilon_{ij} \quad (\text{Ecuación 4})$$

Donde: \bar{y}_{ij} : media del rendimiento del genotipo i en el ambiente j ; $y_{.j}$: media del rendimiento de todos los genotipos en el ambiente j ; λ_1, λ_2 : valores singulares para PC1 y PC2; α_{i1}, α_{i2} : coordenadas en PC1 y PC2 del genotipo i ; γ_{j1}, γ_{j2} : coordenadas en PC1 y PC2 del ambiente j ; y ε_{ij} : residual del modelo asociado con el genotipo i en el ambiente j .

3. MATERIALES Y MÉTODOS

Los estudios se desarrollaron sobre suelos Sialitizados no cálcicos (Cambisoles), en el Bloque experimental de Espartaco, Cienfuegos; perteneciente a la Estación Territorial de Investigaciones de Villa Clara, según Hernández *et al.*, (1975) y Hernández *et al.*, (1999). Fue plantado un experimento el período septiembre – octubre 2016, en bloques completamente al azar con tres replicas, en secano. El área de las parcelas es de 48 m², con un largo de 7.5 m, por un ancho de 1.60 m, con cuatro surcos de ancho (Jorge *et al.*, 2011).

Se evaluaron un total de 10 cultivares, los que aparecen en la tabla 1, dos de los cuales fueron testigo teniendo en cuenta la madurez, C86-12 de maduración temprana-media y C323-68 de maduración tardía.

Tabla 1. Cultivares estudiados y sus progenitores

Nº	Cultivares	Progenitor femenino	Progenitor masculino
1	C323-68 (T)	B4362	C87-51
2	C86-12 (T)	Desconocido	
3	C86-156	C16-56	C87-51
4	C86-165	B42231	C227-59
5	C86-251	CP29-103	Co421
6	C86-56	NCo310	C187-68
7	C89-148	B6368	CP70-1143
8	C89-176	NCo310	C187-68
9	C89-250	Eros	Ja64-11
10	C90-469	C87-51	Ja60-5

(T)- Testigos

Los experimentos fueron cosechados entre noviembre 2017 a mayo de 2018 en la cepa de caña planta con edades entre 13 - 19 meses, la variable evaluada fue el porcentaje de pol en caña (% pol en caña), según la metodología establecida por el INICA (Jorge *et al.*, 2011).

3.1. Determinar la adaptabilidad y estabilidad fenotípica de nuevos cultivares de caña de azúcar en un ambiente promedio

Comprobada la significación estadística de las interacciones de dos efectos principales fijos, se procedió a la determinación de la adaptabilidad y estabilidad de nuevos cultivares de caña de azúcar

en un ambiente promedio, a través del Modelo Lineal tradicional (LM) de efectos fijos (Modelo I) mediante el programa *Infogen* (Balzarini y Di Rienzo, 2016); el cual se utiliza para procesar la información original asumiendo normalidad y obtener la matriz de dos entradas (GxE), sobre la que aplica el modelo multivariado de efectos principales de los genotipos, más efectos de la interacción genotipo-ambiente, también llamado como: modelo Lineal-bilineal de Regresión de Sitios (SREG: *Sites Regression model o biplots GGE*) (*Genotypic main effect plus Genotype-by-Environment interaction*) (Gabriel, 1971; Crossa y Cornelius, 1997; Yan *et al.*, 2000; Yan y Tinker, 2006). Finalmente se complementó la definición de los ambientes de prueba, con la determinación de su habilidad discriminatoria y representatividad.

Donde se definen como ambientes los siete meses de evaluación en la cepa de caña planta (tabla 2) y como genotipos a los cultivares en estudio.

Tabla 2. Ambientes en estudio.

Ambientes	Definición
C1M1	Cepa Caña planta en el mes de noviembre
C1M2	Cepa Caña planta en el mes de diciembre
C1M3	Cepa Caña planta en el mes de enero
C1M4	Cepa Caña planta en el mes de febrero
C1M5	Cepa Caña planta en el mes de marzo
C1M6	Cepa Caña planta en el mes de abril
C1M7	Cepa Caña planta en el mes de mayo

En este modelo los efectos principales de los genotipos, se envían al residual junto con la interacción genotipo-ambiente para modelarlo de forma multivariada, mediante análisis de componentes principales (Yan y Tinker, 2006).

Se llamará modelo SREG de orden M a la expresión:

$$E(y_{ij}) = \mu + \beta_j + \varphi + e_{ij}$$

$$\varphi = y_{ij} - \mu - \beta_j = \sum_{m=1}^M \lambda_m u_{m_i} v_{m_j}$$

Donde: Y_{ij} : observación correspondiente a la combinación de niveles ij ; μ : media general, β_j : efecto del ambiente j ; Φ : efecto del genotipo más la interacción del genotipo-ambiente; λ_m : corresponde al valor singular de orden m ; u_{mi} : coordenada i -ésima del vector singular asociado a λ_m ; v_{mj} : coordenada j -ésima del vector singular asociado a λ_m ; e_{ij} : residuo.

A partir de la descomposición en valores y vectores singulares del efecto del genotipo más la interacción del genotipo-ambiente (Φ) se obtiene la representación bidimensional (biplots) del modelo de Regresión de Sitios. Estas representaciones se realizan al unir en un plano bidimensional los llamados “marcadores” de genotipos y ambientes. Estos “marcadores” se obtuvieron al multiplicar el valor singular λ a los resultados de los vectores de genotipos (\mathbf{u}_g) y ambientes (\mathbf{v}_e), utilizándose para esto la escala simétrica ($\lambda^{0.5}\mathbf{u}_g$ y $\lambda^{0.5}\mathbf{v}_e$).

Los datos originales fueron comprobados para su ajuste a la normalidad mediante la prueba de Bartlett, con su correspondiente Chi cuadrado.

3.2. Determinar el rendimiento azucarero de nuevos cultivares de la caña de azúcar en diferentes momentos de cosechas

Para determinar el rendimiento azucarero de nuevos cultivares de la caña de azúcar en diferentes momentos de cosechas, se realizó la evaluación estadística de los resultados utilizando un ANOVA simple de efecto fijo para cada momento de cosecha en la cepa evaluada, considerando como causa de variación las variedades, utilizando la probabilidad de ($P < 0.05$) de no cometer error. Para esto se tomó como factor los genotipos mediante el siguiente modelo:

$$Y_{ik} = \mu + G_i + e_{ik}$$

Donde: Y_{ik} . Es la observación k del genotipo i

μ . Media general

G_i . Efecto del i -ésimo genotipo

e_{ik} . Error asociado a la k -ésima observación del i -ésimo genotipo

La comparación de medias se realizó mediante prueba múltiple de rango con dócima de Tukey ($P < 0.05$). Los datos originales fueron comprobados para su ajuste a la normalidad mediante Bartlett-test, con su correspondiente Chi cuadrado. Los paquetes estadísticos utilizados fueron: STATISTICA 10.0. sobre Windows e InfoGen versión 2016.

3.3. Determinar el análisis económico ambiental

Se realizó un análisis medioambiental del manejo de los cultivares, así como se calculó el promedio del pol el testigo comercial y se comparó con el de los demás cultivares en dos etapas (al inicio de la zafra y del medio hasta el final).

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Determinación de la adaptabilidad y estabilidad fenotípica de nuevos cultivares de caña de azúcar en un ambiente promedio

Al evaluar el análisis de varianza del bifactorial variedad*mes de evaluación (tabla 3), se pudo contactar la diferencia estadística significativa existente entre cada uno de los efectos principales y su interacción. Por ello realizamos la representación gráfica de esa interacción a través del modelo lineal-bilineal de Regresión de Sitios (SREG) o GGE-biplot (fig. 1), el cual es uno de los más utilizados en estudios de IGA en la actualidad (Chavanne *et al.* 2007; Nassir y Ariyo, 2011; Rodríguez *et al.* 2012; Queme, *et al.* 2010; Acuña y Wade, 2012; Nassir *et al.*, 2016; Cherinet *et al.* 2016; Branco *et al.* 2016; Kipkorir *et al.* 2016; Santos *et al.* 2016; Delgado *et al.* 2019).

Tabla 3. Análisis de la Varianza del bifactorial variedad*mes de evaluación (SC tipo III)

Fuentes de Variación	Cuadrado Medio	F	p-valor
Variedades (VAR)	4.12	136.35	<0.0001
Mes de evaluación (MEval)	72.13	2386.61	<0.0001
VAR*MEval	1.6	52.87	<0.0001
Error	0.03		

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
PPC	210	0.99	0.99	0.95

Evaluación de ambientes en la variable (PPC) en el Biplot GGE

En la figura 1 se muestra el gráfico del modelo biplot GGE, en el plano de las dos primeras componentes (CP1 y CP2) que explican el 79.7 % de la variación fenotípica total, donde los cultivares C89-250, C86-12, C86-251, C89-176, C90-469 y C323-68 forman el vértice del polígono, los cuales son de comportamiento extremo, por ser los más alejados del origen del gráfico.

Los ambientes de febrero, marzo, abril y mayo (C1M4, C1M5, C1M6 y C1M7 respectivamente), forman un ángulo agudo entre ellos, es decir, presentan correlación positiva, así como estos con los ambientes C1M2 (diciembre) y C1M3 (enero), pero menos pronunciado. Rodríguez (2018), en un estudio del cultivares en similares ambientes, obtuvo una explicación del 69.5 % de la variación

fenotípica total en el plano de las dos primeras componentes (CP1 y CP2), donde los ambientes de marzo, abril y mayo forman un ángulo agudo con el mes de febrero.

Sin embargo, en la figura 1 se observa que C1M1(noviembre) forma un ángulo obtuso con los ambientes C1M4, C1M5, C1M6 y C1M7, es decir, ofrece correlación negativa; cuando aumenta uno puede disminuir el otro o viceversa; y mientras que con los demás ambientes presenta un ángulo agudo ($<90^\circ$) correlación positiva (Yan *et al.* 2000).

Los ambientes C1M1(noviembre) y C1M2 (diciembre) presentan largas longitudes de sus vectores, indicando que son ambientes informativos y discriminativos, útiles para seleccionar genotipos con adaptación específica e inestables, coincidiendo por lo informado por Delgado *et al.* (2019) en un estudio de ambientes de prueba conformados por cuatro localidades y dos cepas; sin embargo, un ambiente de prueba que no discrimine ofrece poca información sobre los genotipos (Yan y Tinker, 2006). Siendo una necesidad del mejoramiento genético y del sector azucarero del país, obtener genotipos con altos rendimientos para esta etapa de inicio de la zafra.

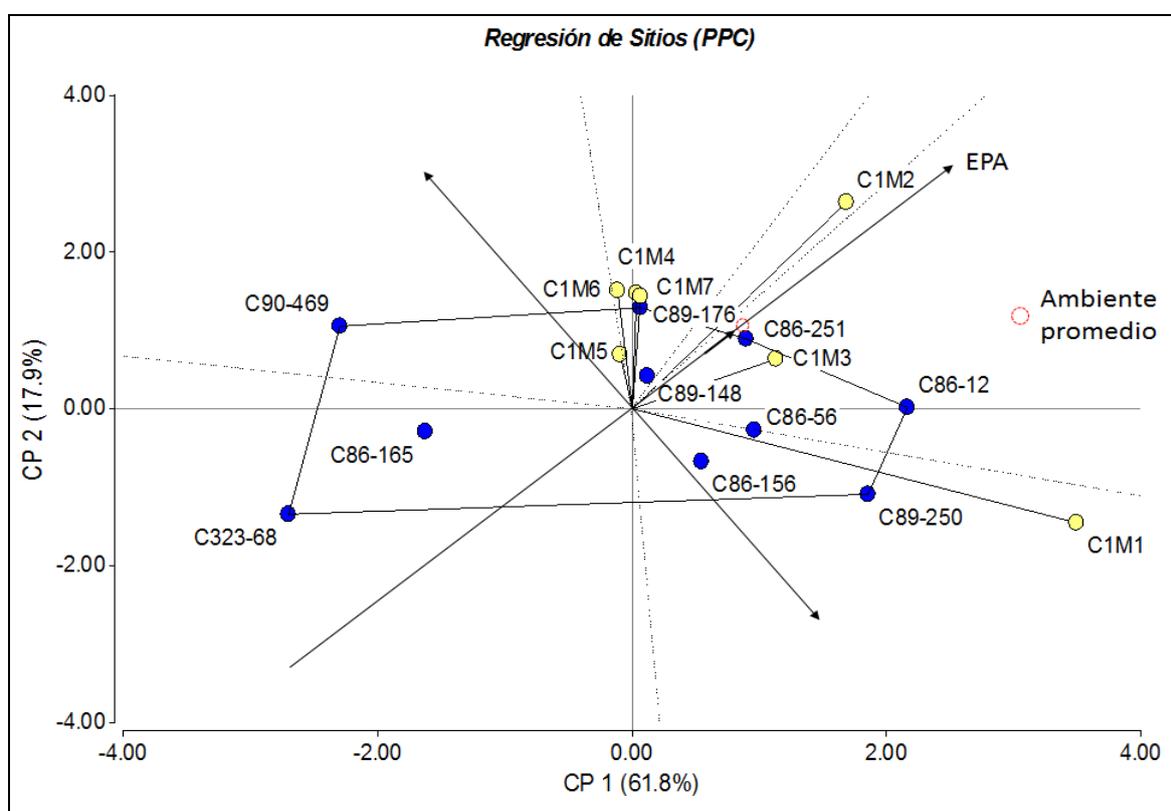


Figura 1. Habilidad discriminatoria y representatividad de los ambientes de prueba mediante los vectores ambientales resultantes del análisis GGE biplot

El ambiente C1M2 es el más representativo, formando un ángulo pequeño (agudo) con respecto al eje promedio ambiental (EPA) (figura 7); además, es el mes más cercano al ambiente promedio, sin embargo, C1M1 es el más alejado, es decir, el menos representativo. En resumen, el ambiente C1M2 es el más discriminatorio y representativo a la vez. Yan y Tinker, (2006) expresan que dentro de un mega-ambiente, el ambiente de prueba ideal debe ser discriminatorio y representativo de ese ambiente, es decir, son buenos para seleccionar genotipos de adaptación amplia.

Yan y Tinker, (2006) definen que los puntos situados en el eje del promedio ambiental en dirección (positiva) más representativa cuya distancia del origen del biplot, es igual al vector mayor de todos los ambientes, es decir, el vector más informativo. Aquel ambiente que esté más cercano a dicho punto, es el más recomendable. Camargo *et al.* (2011) identificaron ambientes representativos y discriminatorios para seleccionar genotipos de arroz mediante el Biplot GGE, logrando separar las localidades más discriminatorias y las más representativas, permitiendo priorizar la investigación en aquellas localidades más apropiadas para identificar genotipos superiores.

Comportamiento medio y estabilidad de los genotipos.

La figura 2 ofrece el biplot GGE con el comportamiento y estabilidad de los genotipos, basado en el eje promedio ambiental; la línea de una flecha sola está en la abscisa del eje promedio ambiental, este punto tiene alto rendimiento medio ambiental y la línea de doble flecha que está en la ordenada del gráfico, tiene este punto gran variabilidad (estabilidad pobre) en una u otra dirección (Yan y Tinker, 2006). Por ello C86-12 posee el rendimiento más alto, sin embargo, es inestable, es decir, presenta alto rendimiento en este ambiente, pero bajo en otro; así como C323-68 que posee los más bajos valores de rendimiento medio y alta inestabilidad.

La mayoría de los genotipos evaluados presentan alta inestabilidad del rendimiento, solo dos son estables. El genotipo C86-251 es de alto rendimiento y el más estable, junto a C89-148 aunque con menor rendimiento que éste último. Mientras que solo tres cultivares poseen valores por debajo de la media genotípica: C323-68, C86-165 y C90-469. Rodríguez (2018), en estudios realizados en similares tipos de suelo pero con diferentes cultivares, ofreció que C88-380 es de alto rendimiento y

muy estable, mientras que C91-115 es de bajo rendimiento, pero estable; sin embargo, C91-367 tiene mayor rendimiento que este, pero es muy inestable. Shitahun *et al.*, (2017), expresaron resultados similares en la evaluación de la estabilidad de genotipos de caña de azúcar en tres tipos de suelos.

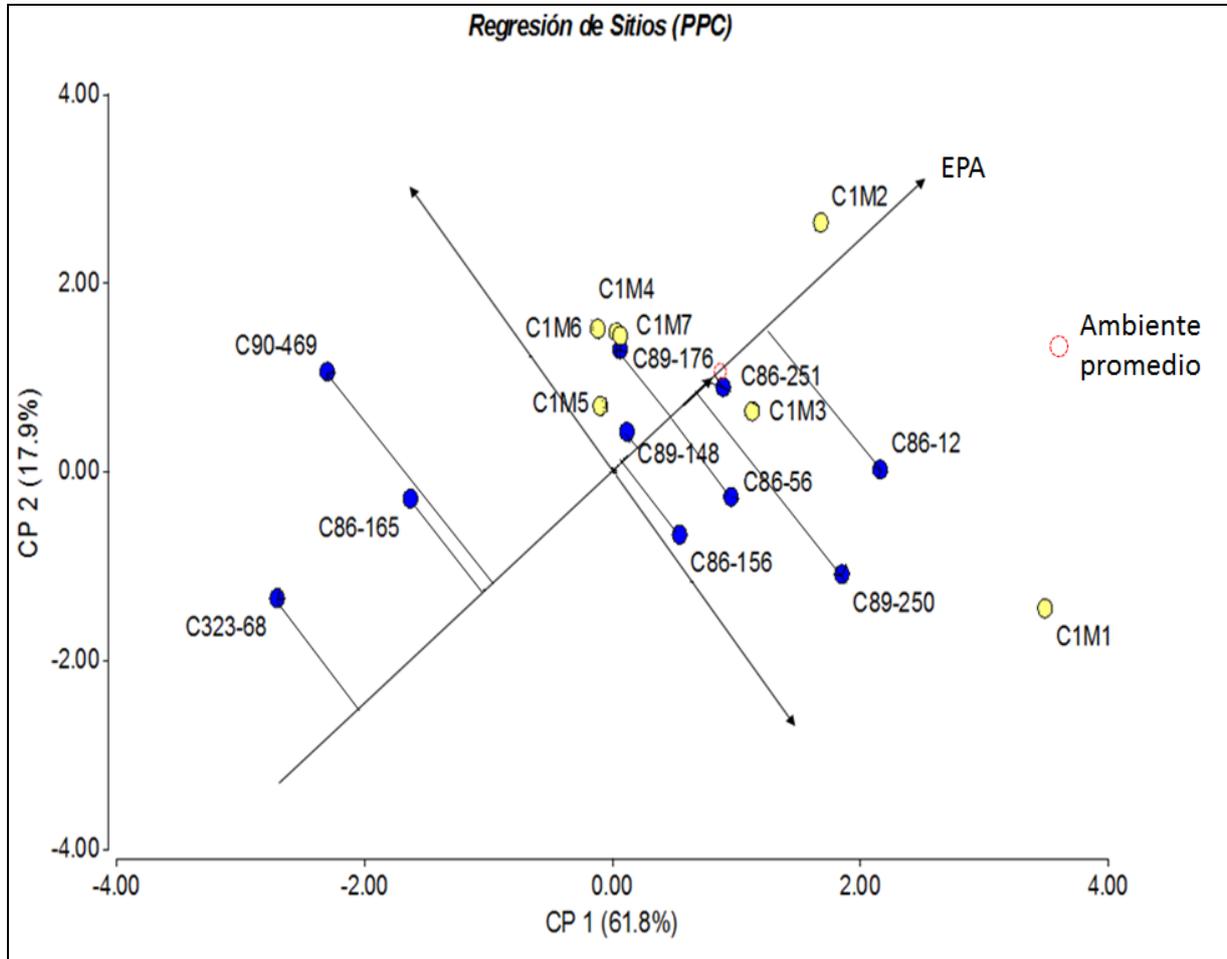


Figura 2. Comportamiento y estabilidad de los genotipos basado en el eje de coordenadas del ambiente promedio, mediante el análisis GGE biplot

4.2. Determinación del rendimiento azucarero de nuevos cultivares de la caña de azúcar en diferentes momentos de cosechas

Al observar el análisis de varianza de clasificación simple de los diferentes meses de evaluación (tabla 4), ofreció diferencias estadísticas significativas entre las variedades. Por ello, desarrollamos la comparación de medias de las variedades, identificando las más destacadas por cada mes.

Tabla 4. Análisis de la Varianza Simple de los diferentes meses de evaluación

Meses	Noviembre			Diciembre			Enero			Febrero		
Fuentes variación	CM	F	p-valor	CM	F	p-valor	CM	F	p-valor	CM	F	p-valor
Variedades	6.71	209.6	<0.0001	2.8	82.5	<0.0001	1.2	57	<0.0001	0.75	49.98	<0.0001
Error	0.03			0			0			0.02		
Meses	Marzo			Abril			Mayo					
Fuentes variación	CM	F	p-valor	CM	F	p-valor	CM	F	p-valor			
Variedades	0.89	19.8	<0.0001	0.7	43.1	<0.0001	0.8	15	<0.0001			
Error	0.05			0			0.1					

Nota: CM: Cuadrado medio

En el mes de noviembre, el cultivar C89-250 alcanza los resultados más destacados junto al testigo de madurez temprana C86-12 (fig. 3); sin embargo, el otro testigo C323-68 de maduración tardía posee resultados negativos, lo que es de esperar para este cultivar por su madurez, no obstante, C86-165 y C90-469 muestran valores similares e inferiores a este cultivar, recomendando la no utilización en esta etapa.

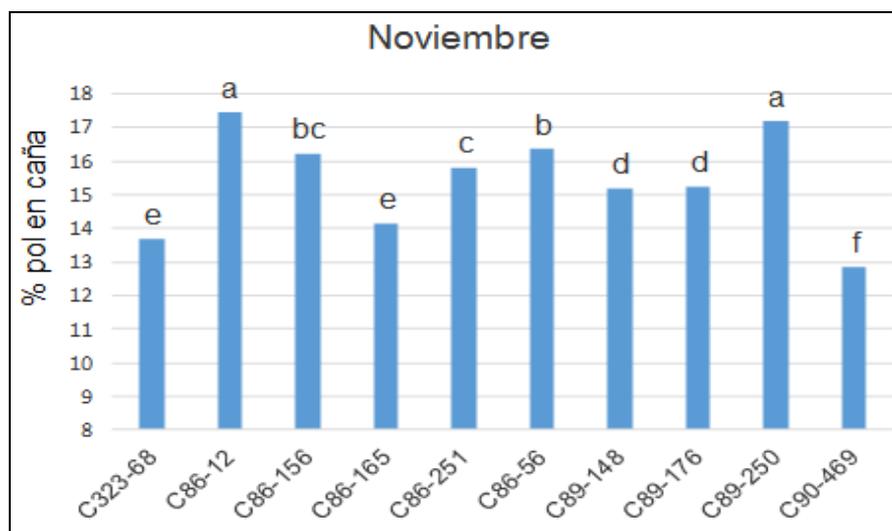


Figura 3. Comparación de cultivares en el mes de noviembre

En el mes de diciembre, los cultivares C86-251 y C89-176 alcanzan los resultados más destacados junto al testigo de madurez temprana C86-12 (fig. 4), lo que demuestra las potencialidades de estos cultivares para el inicio de la zafra; sin embargo, el otro testigo C323-68 de maduración tardía mantiene los más bajos valores en esta etapa.

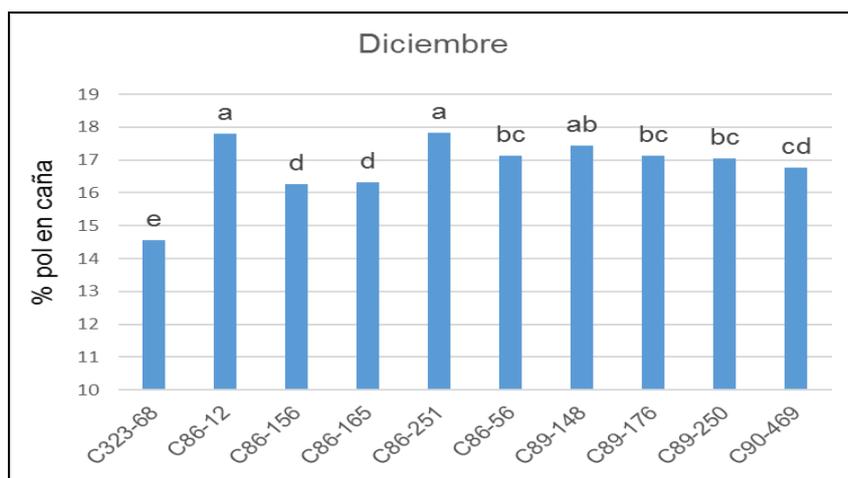


Figura 4. Comparación de cultivares en el mes de diciembre

En el mes de enero, la mayoría de los cultivares alcanzan valores similares o superiores al testigo C86-12, lo que ofrece buena oportunidad en este período con varios cultivares con grandes potencialidades productivas y mayor variabilidad, siendo las más destacados C89-250 y C86-251 (fig. 5); sin embargo, el otro testigo C323-68 de maduración tardía y C86-165 ofrecen los más bajos valores en esta etapa.

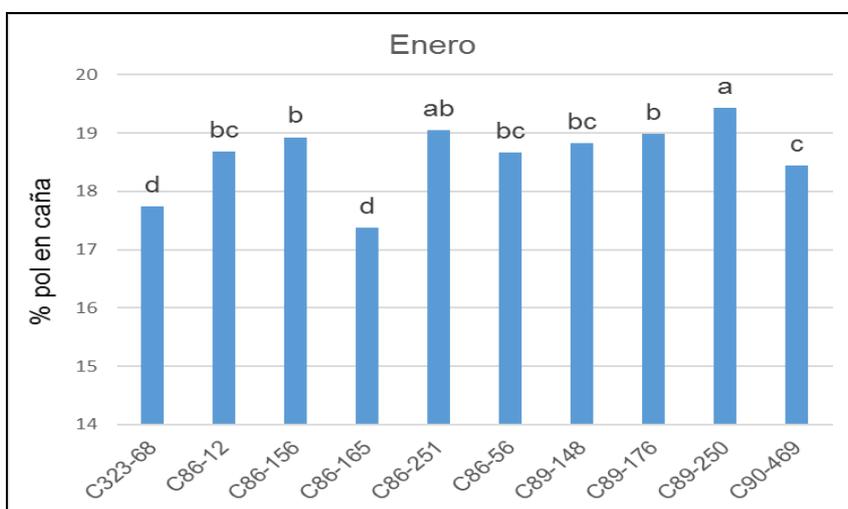


Figura 5. Comparación de cultivares en el mes de enero

En el mes de febrero, existe una similitud del rendimiento de los cultivares en estudio, ya que, la mayoría de los mismos alcanzan valores similares a los dos testigos; no obstante, el cultivar C86-251 alcanza los mejores resultados, seguido por C89-148 y C89-176 (fig. 6). Nuñez (2014), obtuvo valores de rendimientos muy parejos en esta misma etapa en un grupo de cultivares estudiados, en ambas cepas.

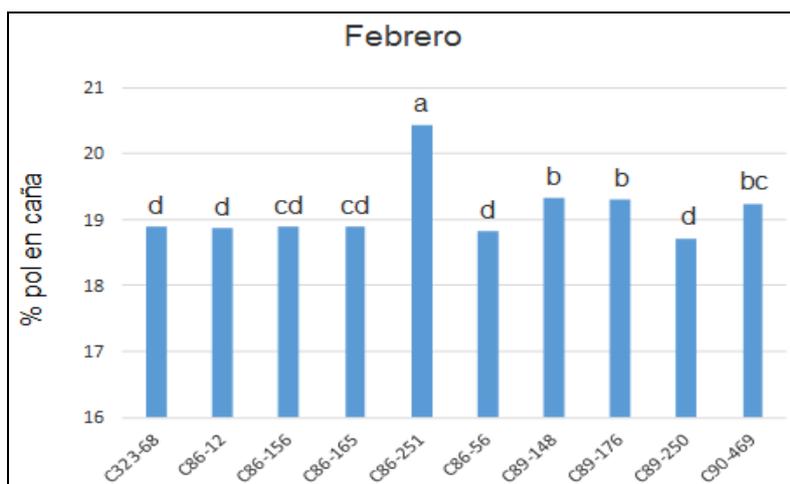


Figura 6. Comparación de cultivares en el mes de febrero

En el mes de marzo, el cultivar C89-176 muestra valores similares a los dos testigos, y estos últimos a su vez a cuatros genotipos más. Sin embargo, C86-165, C86-251 y C89-250 presentan los resultados más negativos en este mes (fig. 7).

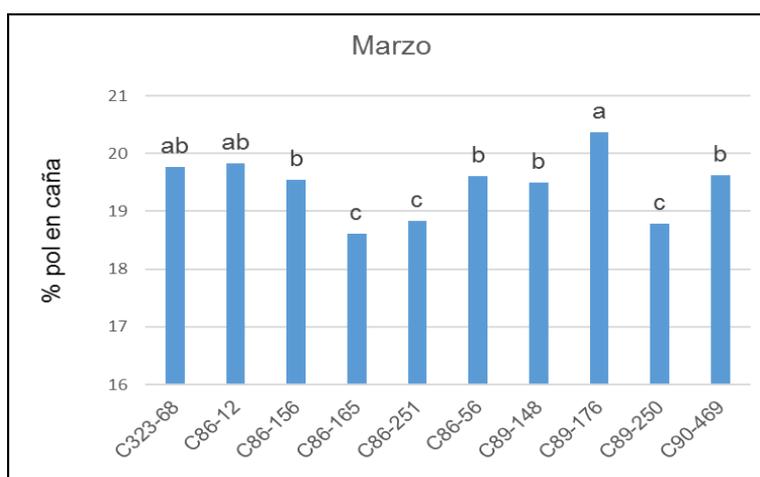


Figura 7. Comparación de cultivares en el mes de marzo

En el mes de abril, el cultivar C89-176 mantiene los resultados alcanzados en el mes de febrero, muy superiores a los demás, sin embargo, otros cuatro genotipos (C90-469, C89-148, C86-251, C86-156) logran valores estadísticos similares al testigo C86-12. Es de destacar en esta etapa de la producción cañera que la mayoría de los cultivares en estudio muestran valores superiores al testigo C323-68, no obstante, similar a este se encuentran C86-165 y C86-56 (fig. 8).

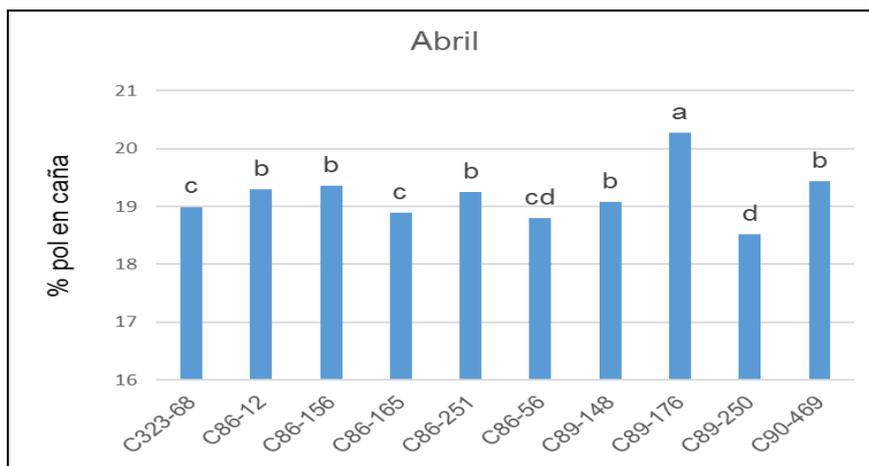


Figura 8. Comparación de cultivares en el mes de abril

En el mes de mayo en el período de finalización de la zafra, el cultivar C89-176 alcanza los resultados más alentadores en esta etapa, muy superiores a los demás, sin embargo, otros tres genotipos (C90-469, C86-56, y C86-165) logran valores estadísticos similares al testigo C86-12. Mientras que el testigo C323-68 ofrece los valores más bajos, sin diferencias con C89-250 y C89-148 (fig. 9).

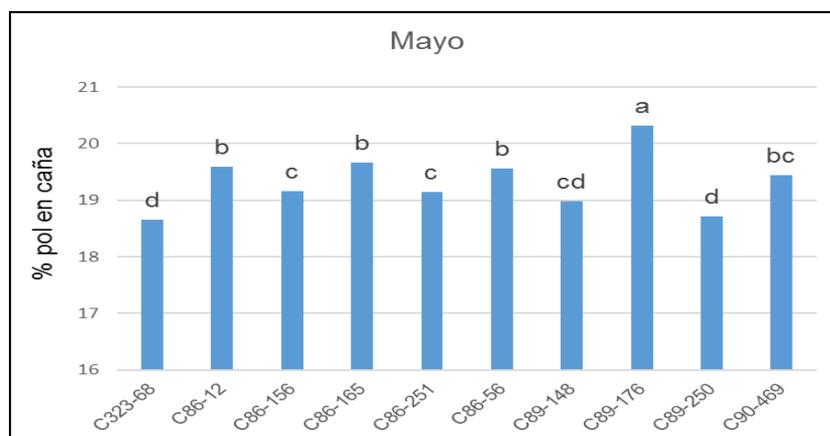


Figura 9. Comparación de cultivares en el mes de mayo

En sentido general se pudo observar que existió mayor variabilidad de los cultivares en el período de noviembre-enero, ya que, desde febrero hasta el final fue menor la diferencia entre los mismos.

4.3. Determinación del análisis económico ambiental

Los resultados obtenidos confieren un valor económico-ambiental, ya que permite perfeccionar la programación de la zafra en que debe cosecharse las diferentes variedades de caña de azúcar (principio, mitad o final). Además, la utilización adecuada de cada cultivar y en su momento óptimo.

El impacto económico se refleja mediante los resultados de una programación de cosecha teniendo en cuenta el mejor momento para cada variedad.

Por ejemplo, teniendo en cuenta la etapa inicial de la zafra (noviembre-diciembre-enero), en la tabla 5 comparamos a los cultivares C86-165, C86-56, C89-148 y C90-469 con el testigo comercial C86-12, donde se muestra como cada una de estos cultivares si son cosechados en esta etapa pierden rendimiento, con un promedio de 1.35 de pol menos; sin embargo, si lo analizamos en el período del mes de febrero hasta mayo, la diferencia en menos acentuada con tan solo un promedio de diferencia de 0.11 de pol menos, por ello, la recomendación es de cosechar estos cultivares en la etapa media final de la contienda azucarera.

Tabla 5. Comparación de la producción del porcentaje de pol en caña

Períodos de cosecha	Cultivares	C86-12	C86-165	C86-56	C89-148	C90-469
Nov-Dic-Ene	PPC	17.98	15.94	17.39	17.15	16.06
	Diferencia	-	2.04	0.59	0.83	1.92
Feb-Mar-Abr-May	PPC	19.33	19.02	19.2	19.22	19.44
	Diferencia	-	0.31	0.13	0.11	-0.11

5. CONCLUSIONES

1. Con el empleo del modelo de regresión por sitios (SREG) y el biplot GGE, se pudo evaluar y seleccionar genotipos de adaptación general y específicos para un ambiente de prueba promedio. Así como se definió al ambiente C1M2 (diciembre) como el más discriminatorio y representativo a la vez
2. La evaluación mensual de los cultivares confirmó los análisis realizados por el modelo de regresión por sitios (SREG) y el biplot GGE, donde la mayoría de los genotipos presentan alta inestabilidad del rendimiento, ofreciendo con más estabilidad a C89-148, C86-251 y C89-176.
3. En el período de noviembre y diciembre los cultivares C89-250, C86-251 y C89-176 alcanzan los máximos valores de pol; sin embargo, a partir del mes de enero existió similitud en el rendimiento de los cultivares, siendo el más destacado C89-176, así como C86-165 los menores valores.
4. Económicamente no se recomienda cosechar para las condiciones similares de la tesis, a los cultivares C86-165, C86-56, C89-148 y C90-469 en la etapa inicial de la zafra, por presentar valores de pol muy inferiores (1.35 de pol menos) al testigo comercial C86-12, pudiendo provocar grandes afectaciones en el proceso fabril.

6. RECOMENDACIONES

1. Evaluar los cultivares en estudio en la cepa de retoño, para una confirmación integral de cada uno, así como de los ambientes.
2. Desarrollar similar estudio en diferentes tipos de suelos del territorio.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Alejos G, Monasterio P, Rea R. (2006). Análisis de la interacción genotipo-ambiente para rendimiento de maíz en la región maicera del estado Yaracuy, Venezuela. *Agronomía Trop.* 56(3): 369-384.
- Alexander AG y Lebrón J.(1968). Isolation and purification of amylase from sugarcane leaves. *ISSCT*, 13:514-521.
- Annicchiarico P. (2002). Defining adaptation strategies and yield stability targets in breeding programmes. In: Kang, M.S., (eds.) *Quantitative genetics, genomics, and plant breeding*. Wallingford, UK: CABI, pp. 365-383.
- Arévalo RA, Bertoncini EI, Guirado N, y Chaila S. 2006. Los términos cultivar o variedad de caña de azúcar (*Saccharum spp.*). *Chapingo Serie Horticultura* 12(1): 5-9.
- Asfaw A, Alemayehu F, Gurum F y Atnaf M. (2009). AMMI and SREG GGE biplot analysis for matching varieties onto soybean production environments in Ethiopia. *Scientific Research and Essay* 4(11): 1322-1330.
- Balzarini M, Bruno C, y Arroyo A. (2004). Análisis de ensayos agrícolas multi-ambientales. Ejemplos con Info-Gen. *Estadística y Biometría*. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Universidad Nacional de Córdoba.
- Balzarini M, Di Rienzo JA. (2016). *InfoGen versión 2016*. FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. Recuperado de URL <http://www.info-gen.com.ar>.
- Balzarini M. (2002). *Applications of Mixed Models in Plant Breeding*. En: Kang, Manjit S. (ed.). *Quantitative Genetics, Genomics and Plant Breeding*. Manjit S. Kang (ed.) CABI Publishing, CAB International. Wallingford Oxon, UK– New York, USA. Cap 23, pp. 353-363.
- Barnes FR y Beard JB. (1992). *A Glossary of Crop Science Terms*. Madison, Wisconsin, USA. Crop Science Society of America. pp. 35-38.
- 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 de grado) C. Dr. en Ciencias Agrícolas. INICA, MINAZ.
- Biggs JS, Thorburn PJ, Crimp S, Masters B y Attard SJ. (2013). Interactions between climate change and sugarcane management systems for improving water quality leaving farms in the Mackay W hitsunday region, Australia. *Agr Ecosyst Environ* 180(0): 79-89.
- Bilbro JD y Ray LL. (1976). Environment stability and adaptation of several cotton cultivars. *Crop Sci.* 16: 821-829.

- Bose L, Namdeorao N y Pande K. (2014). Genotype by Environment interaction and stability analysis for rice genotypes under Boro condition-. *Genetika*, Vol 46, No. 2, 521-528.
- Branco LC, Damasceno-Silva KJ, de Moura Rocha M y Oliveira GC. (2016). Evolution of methodology for the study of adaptability and stability in cultivated species. Vol. 11(12), pp. 990-1000, 24 March, DOI: 10.5897/AJAR2015.10596 Article Number: 4A3B10257666 ISSN 1991-637X.
- Camargo I, Quirós E, Gordón R. (2011). Identificación de ambientes representativos y discriminatorios para seleccionar genotipos de arroz mediante el biplot GGE. *AGRONOMÍA MESOAMERICANA* 22(2):245-255. 2011 ISSN: 1021-7444
- Castillo RO, Dookun-Saumtally A, D'hont A, Jackson P, Rossi-Machado G, Hale A, Sampaio M, Hoffman HP, Haihua D, Mirkov E, Mota C y Souza G. (2013). "Breaking Breeding and Biotechnology Paradigms-Towards a complementary approach in sugar cane research: A Summary of the 10th ISSCT Breeding and Germplasm and 7th Molecular Biology Workshops", *Proc. Int. Soc. Sugar Cane Technol.*, Vol. 28, pp. 1-6.
- Castro S. (1991). Evaluación de ambientes y genotipos de caña de azúcar en la provincia de Holguín. Tesis para optar por el grado de C. Dr. en Ciencias Agrícolas. INICA, MINAZ, 95 pp.
- CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe). (2010). Efectos del cambio climático sobre la agricultura Editorial México, D.F.: CEPAL, (2010) Descripción 76 p.: COSTA RICA.
- Chavanne ER, Ostengo S, García MB y Cuenya MI. (2007). 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". *Rev. Ind. y Agríc.* 84 (2): 19-24.
- Chavez MA. (1982). La maduración, su control y la cosecha de la caña de azúcar. Seminario de Tecnología Moderna de la Caña de Azúcar", 2, San José, Costa Rica, (1982). Memorias. San José, CAFESA / ATACORI / MAG/ LAICA, setiembre. p: 28-40.
- Cherinet A, Abebe Worku, Molla Mekonnen, Tazebachew Asres, Desalew Fentie, Esmelealem Mihiretu and Jemal Esmael. (2016). *Int. J. Plant Breed. Genet.*, 10 (2): 104-109, GGE Stability Analysis of Seed Yield in Sunflower Genotypes (*Helianthus annuus L.*) in Western Amhara Region, Ethiopia. *International Journal of Plant Breeding and Genetics*
- Clements HF. (1940). Integration of physiologic and climatic factors with referent to production of sugarcane. *Haw. Plant. Rec.*, 44:210-233.
- CONADESUCA. 2015. Ficha Técnica del Cultivo de la Caña de Azúcar (*Saccharum officinarum L.*). Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar. Mexico.

- Cornelius PL, Crossa J y Seyedsadr M. (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).
- Cornide MT, Torres W, Pichs R, Capote RP y Capote A. (2017). La seguridad alimentaria y nutricional. Una visión cubana. *Seguridad alimentaria y nutricional en américa. Retos y oportunidades para este siglo*.
- Crossa J y Cornelius PL. (1997). Sites regression and shifted multiplicative model clustering of cultivar trial sites under heterogeneity of error variances. *Crop Sci.* 37: 406-415.
- Crossa J y Cornelius PL. (2002). Linear–Bilinear Models for the Analysis of Genotype–Environment Interaction. En: *Quantitative Genetic, Genomics and Plant Breeding*. Ed. M. S. Kang. CAB International Publications, (2002), Cap. 20, pp. 305-363.
- Crossa, J. (1990). Statistical analyses of multilocation trials. *Adv. Agron.* 44: 55–85.
- Delgado I, Jorge H, Pérez L y Cornide MT. (2019). Análisis de la interacción genotipo ambiente en diferentes condiciones edafoclimáticas en Cuba mediante el GGE biplots. *Revista ICIDCA*. Vol 53. No. 1. (2019).
- Delgado I, Jorge H, García H, Bernal N, Díaz F.R, Bernal A, Gómez JR, Aday O, González H, Buedo M, Reyes S, Núñez D, Barroso J y Machado LF. (2012). Potencialidades de familias de variedades para diferentes períodos de zafas en Cuba. *Revista Cultivos Tropicales*, vol. 33, no. 3, p. 5-14 julio-septiembre.
- Delgado Mora, I. Dunia Nuñez Jaramillo, H. Suarez, S. Guillén Sosa, F. R. Díaz Mujica, J. R. Gómez Pérez, O. Suárez Benitez, J. L. Montes de Oca Suarez. (2016). Evaluación de cultivares de caña de azúcar de madurez temprana, para el inicio de la zafra azucarera en suelos sialitizados no cálcicos. *Centro Agrícola*, 43 (2): 5-13; abril-junio. ISSN papel: 0253-5785 ISSN on line: 2072-2001 CE: 6015 CF: cag012162070.
- Delgado I. (2012). Caracterización de genotipos de caña de azúcar resistentes a condiciones adversas por déficit hídrico, atendiendo a indicadores de la calidad de los jugos. Informe Final del Proyecto de Investigación. INICA.
- Delgado, I. (2008). Manejo Sostenible de variedades de caña de azúcar en Cuba. Tesis presentada en opción al Título Académico de Master en Agricultura Sostenible. UCLV.
- Delgado, I., H. Jorge, N. Bernal, H. García, F. R. Díaz, J. R. Gómez, Aydiloide Bernal, F. Barroso, Mayelín Buedo, Dunia Jaramillo, Susana Reyes, Aylín Gallardo, J. Barroso, L. F. Machado.

- (2014). Manejo sostenible de variedades de caña de azúcar en Cuba. *Centro Agrícola*, 41(4):69-74.
- Eberhart SA y Russell WA. (1966). Stability parameters for comparing varieties. *Crop Sci.* 6: 36-40.
- Everingham Y, Inman-Bamber G, Sexton J y Stokes C. (2014). A dual ensemble agroclimate modelling procedure to assess climate change impacts on sugarcane production in Australia. *Agr Forest Meteorol* (resubmitted).
- Everingham Y, Sexton J y Timbal B. (2013). Downscaled rainfall projections for the Burdekin, Mackay and NSW. *Proc Aust Soc Sug Cane Technol* 35: USB.
- Finlay KW y Wilkinson GN. (1963). The analysis of adaptation in a Plant-Breeding Programme. *Australian Journal of Agricultural Research*, 14(5): 742-754.
- Freeman GH. (1973). Statistical methods for the analysis of genotype-environment interactions. *Heredity* 31(3), 339–354.
- Gabriel KR. (1971). The biplot graphic display of matrices with application to principal component analysis. *Biometrika* 58, 453–467.
- Gabriel KR. (1978). Least squares approximation of matrices by additive and multiplicative models. *Journal of the Royal Statistical Society, Series B* 40, 186–196.
- Gaikwad, D. D., Rathod, B. G. and Gosavi, S. R. (2014). Genotype x environment interaction and adaptability for productive traits in sugarcane. *International Journal of Current Research* Vol. 6, Issue, 02, pp.5220-5224, February, (2014).
- Gálvez G. (1978). Estudio de la interacción g x 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.
- Gálvez G. (2010). Interacción genotipo-ambiente en el mejoramiento de plantas en la era de genómica. ¿Dónde estamos?. *Rev. Cuba & Caña* 1: 57-67.
- García H. (2004). Optimización del proceso de selección de variedades de caña de azúcar tolerantes al estrés por sequía y mal drenaje en la región central de Cuba. Tesis en opción al grado Científico de Doctor en Ciencias Agrícolas. La Habana, Cuba. Ministerio de Educación Superior, Universidad Agraria de la Habana. 95 p.
- 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.
- Gauch HG y Zobel EW. (1997). Identifying mega-environments and targeting genotypes. *Crop Science* 37, 311–326.

- Gauch HG. (1988). Model selection and validation for yield trials with interaction. *Biometrics* 44: 705-715.
- Gauch HG. (2006). Statistical analysis of yield trials by AMMI and GGE. *Crop Sci.* 46:1488–1500.
- Gauch HG. (2013). A simple protocol for AMMI analysis of yield trials. *Crop Science* 53: 1860-1869.
- Glaz B. y Kang SM. (2008). Location Contributions Determined via GGE Biplot Analysis of Multienvironment Sugarcane Genotype-Performance Trials. *Crop Sci.* 48: 941-950.
- Gollob HF. (1968). A statistical model which combines features of factor analytic and analysis of variance. *Psychometrika* 33, 73–115.
- González A. (1995). Caracterización del efecto ambiental en estudios de regionalización de variedades de caña de azúcar (*Saccharum spp* híbrido) en la provincia de las Tunas. Tesis en opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias Agrícolas. Universidad Agraria de La Habana, 100 pp.
- González RM, Mesa JM y Hernández G. (Editores). (2018). Folleto. Cronología de las variedades de caña de azúcar cultivadas en Cuba. Legislación, metodologías y conceptos relacionados. La Habana.
- González RM. (2019). Variedades de caña de azúcar cultivadas en Cuba. Cronología, legislación, metodologías y conceptos relacionados. Editorial ICIDCA, La Habana, Cuba. Primera edición. ISBN: 978-959-7165-58-3. 216pp.
- Gordon, M., R.; Camargo, B.; Franco B, y González S. (2006). Evaluación de la adaptabilidad y estabilidad de 14 híbridos de maíz, Azuero, Panamá. *Agronomía Mesoamericana* 17(2): 189-199.
- Hanson, W.D. (1994). Distance statistics and interpretation of Southern states regional soybean tests. *Crop Sci.* 34(6): 1498-1504.
- Hernández A, Pérez JM, Bosch D y Castro N. (2015). Clasificación de los suelos de Cuba. Instituto de Suelos. La Habana, Cuba: INCA, 92 pp.
- Hernández A, Pérez JM, Bosch D y Rivero L. (1999). Nueva versión de clasificación genética de los suelos de Cuba. Instituto de Suelos. AGROINFOR, 64 pp. ISBN: 959-246-022-1.
- Hernández; A., J. Pérez, O. Ortega, L. Avila, A. Cárdenas, A. Marrero y N. Companioni. (1975). II Clasificación genética de los suelos de Cuba. *Revista Agricultura.* VIII (1): 47-69.
- 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.

- Jorge H, García H, Bernal N, Jorge I, Vera A y Suárez O. (2007). Variedades de caña de azúcar en Cuba. Una nueva concepción y manejo. XXX Convención Nacional ATAM. Veracruz.
- 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, Publinica. 308 p.
- Jorge, H. (1996). Estudio genético de los 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.
- 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, PUBLINICA. 308 p.
- Kang MS, Aggarwal VD y Chirwa RM. (2005). Adaptability and stability of bean cultivars as determined via yield stability statistic and GGE Biplot analysis. *J. Crop Improve.* 15:97–120.
- Kang MS. (1998). Using genotype-by-environment interaction for crop cultivar development. *Adv. Agron.* 62: 199-252.
- Kang MS. (2002). Genotype–Environment Interaction: Progress and Prospects. En: Kang, Manjit S. (ed.). *Quantitative Genetics, Genomics and Plant Breeding.* Manjit S. Kang (ed.) CABI Publishing, CAB International. Wallingford Oxon, UK– New York, USA Cap. 15, pp. 221-243.
- Kipkorir J, Kimutai E, Odongo J, Wanjiku V, Kinyoro J, Owuoche J, Oyier M, y Machio A. (2016). Adaptability and Stability Study of Selected Sweet Sorghum Genotypes for Ethanol Production under Different Environments Using AMMI Analysis and GGE Biplots. *Hindawi Publishing Corporation Scientific World Journal Volume, Article ID 4060857, 14 pages* <http://dx.doi.org/10.1155/2016/4060857>. *The Scientific World Journal*.
- Knox JW, Rodríguez JA, Nixon DJ y Mkhwanazi M. (2010). A preliminary assessment of climate change impacts on sugarcane in Swaziland. *Agr Syst* 103(2), 63-72.
- Lapinel B, Cutre V y Fonseca C. (2010). ¿Se humedecerá la sequía? *Granma, Cu*, junio 12: 8.
- Lau, C.; Jarvis, A.; Ramírez, J. (2011). *Agricultura colombiana: Adaptación al cambio climático.* CIAT Políticas en Síntesis no. 1. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia. 4 p.
- López, E. (1986). Influencia de algunos factores del ambiente sobre el rendimiento y aplicación de tres métodos de estabilidad en los estudios de regionalización de variedades de caña de azúcar en las provincias de Camagüey y Ciego de Avila. Tesis en opción al grado de doctor en Ciencias Agrícolas. Camagüey, Cuba. Ministerio de Educación Superior. Universidad Agraria de la Habana. 198 p.

- Mandel J. (1971). A new analysis of variance model for non-additive data. *Technometrics* 13, 1–18.
- Marin FR, James WJ, Abraham S, Royce F, Assad ED, Pellegrino GQ y Justino F. (2013). Climate change impacts on sugarcane attainable yield in southern Brazil, *Climate Change*, March (2013), Volume 117, Issue 1-2, p. 227-239 36.
- Martín JR, Gálvez G, de Armas R, Espinosa R, Vigoa R y León A. (1987). *La caña de azúcar*. Editorial Científico-Técnica. La Habana.
- Mayhew, P.; Gareth, B. and Timothy, G. (2007). A long-term association between global temperature and biodiversity, origination and extinction in the fossil record. *Proceedings of the Royal Society B*. 275. p.47.
- Mendes PM y de Souza JC. (2016). BLUP assessment of maize single-crosses performance using similarity in state and relationship coefficients. *Maydica*, vol. 61.
- Mesa JM, García H, Jorge I, Santana I y Cornide MT. 2018. Mejoramiento genético de la caña de azúcar. En: *Genética, Genómica y Fitomejoramiento*, M.T Cornide (ed). Tomo II, p. 367-428. Editorial UH, (2018), La Habana, Cuba. ISBN:978-959-7211-89-1, Obra completa, ISBN:978-959-7211-91-4, Tomo II.
- Mesa JM. (1995). “Algunas estimaciones de parámetros genético-estadísticos y simulación de la eficiencia de la selección en poblaciones de caña de azúcar (*Saccharum spp.*)”, Tesis en opción al grado científico de Dr. en Ciencias Agrícolas, Universidad Agraria de La Habana.
- Michael, A.J.; Woodruff, R. and Hales, S. (2006). Climate change and human health: present and future risks. *Lancet*. 367(9513): 859-69.
- Moore PH y Botha FC. (2014). *Sugarcane: Physiology, Biochemistry, and Functional Biology*, first Edition. Published (2014) by John Wiley & Sons, Inc.
- Nassir AL y Ariyo OJ. (2011). Genotype x Environment Interaction and Yield-Stability Analyses of Rice Grown in Tropical Inland Swamp. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 39(1), 220-225.
- Nassir AL, Alawode YO y Pertanika J. (2016). *Trop. Agric. Sci.* 39 (4): 483 - 494 *Tropical Agricultural Science. Stability Analysis of Panicle and Grain Traits of Rainfed Upland Rice in Two Tropical Ecologies of Nigeria*.
- Núñez Jaramillo, Dunia. (2014). Caracterización de cultivares de caña de azúcar de madurez temprana, para el inicio de la zafra azucarera en suelos Sialitizados no cálcicos. Tesis para aspirar al título de Ingeniero Agropecuario. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Cuba. 33p.

- Planos GE. (2014). Síntesis informativa sobre impactos del cambio climático y medidas de adaptación en Cuba. Basal (Bases Ambientales para Sostenibilidad Alimentaria Local) 26 pp. ISBN: 978-959-300-044-4; 2014.
- Queme JL, Orozco H y Melgar M. (2010). GGE Biplot analysis used to evaluate cane yield of sugarcane (*Saccharum* spp.) cultivars across sites and crop cycles. En: Proc. ISSCT Congress, 27, Veracruz, Mexico, 2010, pp. 584-590.
- Ramburan S, Zhou M y Labuschagne M. (2011). Interpretation of genotype \times environment interactions of sugarcane: Identifying significant environmental factors. *Field Crops Research* 124: 392-399.
- 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.
- Rodríguez S. (2018). Respuesta de cultivares de caña de azúcar (*Saccharum* spp.) en diferentes períodos de evaluación en la provincia de Cienfuegos. Trabajo de Diploma en Opción al Título de Ingeniera Agrónoma. Universidad Fructuoso Rodríguez. Cienfuegos.
- Romero ER, Scandaliaris J, Digonzelli PA, Leggio MF, Giardina JA, Fernández de Ullivarri J, Casen SD, Tonatto MJ y Alonso LG. (2012). Página Web de NETAFIM, <http://www.sugarcancrops.com/introduction/>.
- Santos A, Ceccon G, Teodoro PE, Correa AM, Rita de Cássia F, da Silva J F, Batista V. (2016). Adaptability and stability of erect cowpea genotypes via REML/BLUP and GGE Biplot. *Bragantia*, Campinas, v. 75, n. 3, p.299-306.
- Sexton J, Everingham Y y Skocaj D. (2013). Regional climate change projections for the Tully sugar region. 20th International Congress on Modelling and Simulation held in Adelaide, Australia. pp 2792-2798.
- Shitahun Alemu, Hussein Mohammed & Feyissa Tadesse. *Journal of Agricultural Science and Research (JASR)* Vol. 4, Issue 1, Jun (2017), 13-18 © TJPRC Pvt. Ltd. Stability of sugarcane (*Saccharum Officinarum* L.) genotypes for sugar yield under three soil types.
- Stokes C, Inman-Bamber G, Everingham Y y Sexton J. (2014). Measuring and modelling CO₂ effects on sugarcane. *Agri Forest Meteorol* (resubmitted).
- Storck L y Vencovsky R. (1994). Stability analysis on a bi-segmented discontinuous model with measurement errors in the variables. *Revista Brasileira de Genética*, 17 (1): 75-81.

- Varela M y Castillo J. (2005). Modelos con término multiplicativo. Aplicación en el análisis de la interacción Genotipo Ambiente. *Rev. Cultivos Tropicales* 26(3): 71-75.
- Varela M, Vicente JL, Purificación G, Blázquez A, Castillo GL y Estévez A. (2008). Una generalización de los modelos AMMI basada en el algoritmo de Tuckals3 para el análisis de componentes de tres modos. *Rev. Cultivos Tropicales*, 29(1): 69-72.
- Westcott B. (1987). A method of assessing the yield stability of crop genotypes. *J. Agric. Sci.* 108: 267-274.
- Wikipedia. (2005). <http://wikimediafoundation>. Enciclopedia libre.
- Yan E y Hunt LA. (2002). “Biplot Analysis of Multi-environment Trial Data”, Manjit S. Kang, ed. *Quantitative Genetics, Genomics and Plant Breeding*, CAB International Publishing, UK-New York, Capítulo 19, pp. 289-303.
- Yan W y Tinker NA. (2006). Biplot analysis of mulit-environment trial data: Principles and applications. *Canadian Journal of Plant Science*, pp. 623-645.
- Yan W, Hunt LA, Sheng Q y Szlavnic Z. (2000). Cultivar evaluation and mega-environment investigation based on the GGE biplot. *Crop Sci.* 40: 597-605.
- Zobel RW, Wrighty MJ y Gauch HG. (1988). Statistical analysis of a yield trial. *Agronomy Journal* 80, 388–393.