

# MÉTODOS ESTADÍSTICOS PARA ESTIMAR LA ESTABILIDAD Y ADAPTABILIDAD FENOTÍPICA PARA LA SELECCIÓN DE CULTIVARES DE CAÑA DE AZÚCAR

**Lic. Gudelia Pérez Chávez<sup>1</sup>.**

*Instituto de Investigaciones de la Caña de Azúcar. Km 1 ½ a la CUJAE, La Habana, Cuba. E-mail: gudelia.perez@inicavc.azcuba.cu*

## **Resumen**

El principal factor que dificulta el aumento de la producción caña de azúcar (*Saccharum* spp.) es la interacción genotipo ambiente. El cambio climático representa una seria amenaza por sus múltiples impactos previstos y en ese sentido es necesario orientar el mejoramiento genético y obtención de cultivares con cierto grado de tolerancia a la alteración significativa de clima global, importante además adecuar los ambientes de selección a los ambientes de destino. El objetivo de este trabajo fue hacer una revisión de estos aspectos y de los métodos estadísticos para estimar la estabilidad y adaptabilidad fenotípica para la selección de nuevos cultivares. Se concluyó que los Modelos de Efectos Principales Aditivos e Interacción Multiplicativa (AMMI) y los Modelos de Regresión por Sitio (SREG), están entre las principales herramientas estadísticas utilizadas para el análisis de datos en experimentos multiambientales, este último proporciona un análisis gráfico de fácil interpretación denominado biplot GGE.

*Palabras claves: Caña de azúcar; Interacción genotipo ambiente.*

---

## Introducción

La caña de azúcar (*Saccharum* spp.) es actualmente el cultivo agroalimentario más productivo del mundo. Debido a la naturaleza química y bioquímica de la materia prima que produce presenta gran potencial para la diversificación productiva (Cadena, 2017).

El cultivar ideal de caña de azúcar es el que presenta alta productividad cuando es cultivado bajo diversas condiciones ambientales. El principal factor que dificulta el aumento de la producción es la interacción genotipo ambiente (IGA), que se expresa en la heterogeneidad de los suelos, relieve accidentados y sobre todo en la irregularidad de las lluvias con largos períodos de seca (Núñez, 2014).

El cambio climático representa una seria amenaza para las sociedades centroamericanas por sus múltiples impactos previstos en la producción, la infraestructura, los medios de vida, la salud y la seguridad de la población, además de que debilitarán la capacidad del ambiente para proveer recursos y servicios vitales (CEPAL, 2010).

Se hace necesario profundizar en esta temática, si se considera que el clima global se ha alterado significativamente (Cambio Climático Global), como resultado del aumento de concentraciones de gases invernadero, incremento de la temperatura atmosférica y del nivel del mar, la reducción y la inestabilidad del régimen de lluvias, aunado a la intensificación de los fenómenos meteorológicos extremos (como las sequías y los huracanes), y el incremento de la concentración de CO<sub>2</sub> atmosférico (Rodríguez, 2012).

En ese contexto, una de las soluciones más prácticas y económicas se encuentra en la obtención de cultivares con cierto grado de tolerancia, mediante el desarrollo de programas de mejoramiento genético. Para esto 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, cuando la red para estudios multiambientales se redujo de 30 a 13 ambientes (García, 2007; Jorge et al., 2010).

Existen tres etapas conocidas para la cosecha de la caña de azúcar en Cuba (inicio, medio y final), sin embargo, constan pocos informes (Espinosa, 1980; López, 1986, Delgado et al., 2012 y González, 2019), donde se emplee este factor como causa de variación en investigaciones sobre IGA.

Existen diferencias marcadas entre los cultivares respecto a su curva de acumulación, la cual es también influenciada significativamente por los factores modificables del rendimiento citados en un principio, sobre todo los no controlables (Chávez, 1982).

Por ello debe tratar de hacerse coincidir el periodo de máxima concentración de sacarosa (madurez fisiológica) con la época de cosecha (madurez teórica), para lograr el mejor rendimiento y recordar que la edad (meses) no es sinónimo de madurez (Chávez, 1982).

Determinar la maduración de la caña de azúcar no solo es importante en la producción, para poder hacer una buena programación de la cosecha, sino también en la investigación, cuando se pretenden comparar cultivares 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 (Jorge et al., 2007).

Sin embargo, no existen informes anteriores sobre el estudio de la meseta de madures de cultivares de caña de azúcar, por ello, adquiere gran importancia definir la duración en días de esta meseta y determinar la variabilidad existente en diferentes períodos de evaluación.

Rodríguez (2018), planteó que cuando los cultivares presentan una respuesta diferencial a las diversas condiciones edafoclimáticas, es necesario disponer de aquellos que posean altos rendimientos y estables. Así mismo, señaló que la estabilidad permite al cultivar ajustar su capacidad productiva a la más amplia variación ambiental.

Así Gaikwad et al. (2014) también se refieren a la importancia que se concede a la adaptabilidad de los cultivares de caña de azúcar en su interacción con el ambiente.

Los ensayos comparativos de rendimiento multi-ambientales permiten identificar los cultivares de mejor rendimiento y los más estables, es decir, aquellos que mantienen su alto potencial productivo a través de un amplio rango de condiciones ambientales (Rea y De Sousa, 2002). Sin embargo, la selección de estos cultivares es ineficiente por efecto de la interacción cultivar por ambiente (IGA) que hace que estos se comporten diferencialmente en distintas localidades (Rea et al., 2014).

## **Desarrollo**

Se llama cambio climático a la modificación del clima con respecto al historial 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, etc. (Michael et al., 2006). El aumento de la temperatura global del planeta significa que los diferentes ecosistemas variarán, algunas especies se verán obligadas a abandonar sus hábitats debido a las condiciones cambiantes, mientras que otras estarán floreciendo (Botkin, 2007). 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). Los científicos en Colombia proyectan aumentos en la variabilidad climática, temperaturas más altas y precipitación errática. El aumento promedio previsto de la temperatura promedio anual para el 2050 se estima que sea de 2.5 °C; y es probable que la precipitación aumente en un 2.5% a mediados de siglo (Lau et al., 2011).

González y Rubio (2014), refieren como efectos generales del cambio climático sobre la agricultura, la afectación del drenaje de agua superficial y subterránea, la penetración del agua de mar en los estuarios y acuíferos, la pérdida de materia orgánica del suelo debido al calentamiento de éste. Las temperaturas más altas del aire las cuales pueden acelerar la descomposición de materia orgánica, e incrementar las tasas de otros procesos del suelo que afecten su fertilidad. Los climas más calientes propician condiciones más favorables para la proliferación de los insectos plagas; las temperaturas más cálidas en invierno pueden permitir a varias especies sobrevivir en áreas donde ahora están limitadas por el frío.

Según Pich (2013), las modificaciones del clima no pueden abordarse de forma aislada, sino en su interrelación con las problemáticas económicas, sociales, ambientales. Esto es coherente con la observación histórica de un incremento del 10-40% en las precipitaciones del norte de Europa durante el siglo pasado, mientras que en el sur las descendieron en un 20%. Se espera que este tema siga siendo de central importancia para muchos países productores de caña de azúcar, desde Australia a Centroamérica, dos regiones que se ven fuertemente afectadas por los fenómenos de El Niño/La Niña, dado que la variabilidad de los rendimientos se reduce enormemente, en una media del 20% (Chandiposha, 2013).

No obstante, se han redoblado los esfuerzos por desarrollar sofisticados mecanismos de alerta meteorológica, que van desde la sistemática difusión de mapas de precipitaciones y pronósticos de temperaturas, hasta complejos sistemas de ingeniería para hacer frente a precipitaciones extremas, como en el caso de Centroamérica. Todo ello representa un enorme paso adelante que podría ser crucial para garantizar el crecimiento de la productividad en el futuro (IPPC, 2007).

El estrés por temperatura comienza en torno a los 35° C y por encima de los 38° C pueden dar lugar a una reducción en el ritmo de crecimiento de la planta. Sin embargo, aumentos hasta niveles más extremos podrían venir acompañados de mayores concentraciones de CO<sub>2</sub>, lo que a su vez podría reducir la susceptibilidad del cultivo a mayores índices de sequía (Marin et al., 2013).

Los científicos proyectan que el 36% de los productos agrícolas enfrentarán aumentos de precipitación de más del 3%, en por lo menos el 60% de las áreas cultivadas. Los cambios en los patrones de precipitación pueden alterar las fechas de floración; afectar los factores

bióticos (plagas, enfermedades, malezas) en diferentes sistemas de producción, con el consecuente aumento de los costos de producción; y alterar la disponibilidad de agua en el suelo. Las lluvias intensas pueden resultar en inundaciones, erosión del suelo y grandes pérdidas de cultivos (Neumeister, 2010; Lau et al., 2011).

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, cultivares de mayor rendimiento que compensen el aumento de humedad o nuevas técnicas de gestión de la tierra para conservar recursos hídricos, entre otras (Marin et al., 2013).

Los productores de caña de azúcar, 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).

Otras medidas de mitigación contemplan la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero con el fin de frenar el ritmo del cambio climático. La Organización Meteorológica Mundial publicó un informe en el que estima que desde el comienzo de la era industrial en el año 1750 las emisiones totales de CO<sub>2</sub> habían alcanzado los 375 000 millones de toneladas. La concentración media estimada de CO<sub>2</sub> ascendió en 2011 a 390 ppm, frente a las 280 ppm del año 1750. Gran parte del aumento tuvo lugar en el periodo entre 1991 y 2011. El incremento medio de los niveles de CO<sub>2</sub> entre 1959 y la actualidad ha sido de 1,49 ppm al año. De todas formas, las estrategias de mitigación y adaptación pueden desarrollarse conjuntamente (Marin et al., 2013).

Además de los nuevos cultivares de caña de azúcar utilizadas para mitigar el efecto del cambio climático, los investigadores pueden usar la biotecnología para reducir el estrés asociado con los factores bióticos y abióticos (Cheavegatti-Gianotto et al., 2011). La caña de azúcar genéticamente modificada tiene un potencial de incremento en el rendimiento, tolerancia a la sequía y resistencia a las plagas.

En Cuba las precipitaciones se encuentran desigualmente distribuidas, tanto espacial como temporalmente, la diferencia en los valores de evaporación media anual es de más de 300 mm entre la provincia Pinar del Río (1700 mm) y Guantánamo (2005 mm). Este comportamiento, unido al de las lluvias, determina que el clima en su conjunto sea más árido en la región oriental (Rodríguez, 2012).

Desde finales de la década del 70 del pasado siglo, el clima en Cuba registra cambios importantes, como el aumento de la temperatura media del aire en 0,6°C, acompañado de una elevación del valor promedio de la mínima en 1,4°C (Lapinel et al., 2010).

La maduración de la caña de azúcar se describe, 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 (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).

La caña de azúcar se cultiva con el objetivo de utilizar la sacarosa que se acumula en sus tallos, contenido que depende de varios factores que lo determinan, principalmente ecofisiológicos y de manejo (Chávez, 1982). Este mismo autor plantea que el proceso de maduración se inicia tres meses antes del corte teórico con una reducción en el crecimiento, 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.

Chávez (1982), plantea que entre los factores que determinan la madurez y los rendimientos de la caña de azúcar se encuentran:

#### a) Elementos del Clima

La producción de sacarosa diferencial entre las zonas cañeras y entre los meses de zafra de una misma zona se debe en gran parte a las variaciones del clima.

Precipitación: durante la zafra, las lluvias causan una aceleración en el crecimiento de la planta y con ello la inversión de sacarosa, la cual es utilizada en la elongación de los tallos como fuente de energía, influenciado negativamente los contenidos de sacarosa.

Temperatura: el efecto de las temperaturas nocturnas elevadas es muy semejante al de la lluvia, donde la caña requiere para madurar noches frías y días calientes.

Nubosidad: la asimilación de la sacarosa está influida principalmente por la energía solar en forma de calor y luz, de manera que una alta nubosidad hace que la intensidad lumínica se

vea reducida, afectando tanto el fotoperiodismo como la actividad fotosintética; y con ello, la formación de azúcares en especial en contenido de sacarosa y la pureza de los jugos.

Vientos: afectan la tasa de transpiración, la fotosíntesis y tienen cierto efecto secante, además de causar rajaduras en las hojas, condición que influencia el rendimiento final de las cañas de azúcar.

b) Altitud: determina algunos de los elementos del clima y el ciclo vegetativo de la caña, regulando el grado de acumulación de sacarosa.

c) Características Edáficas: la condición textural del suelo, puede influir en el nivel de elongación de la caña de azúcar. Las texturas arcillosas tienen mayor capacidad de retención de agua (humedad) que las arenosas. Suelos con altos contenidos de materia orgánica mantienen un índice de crecimiento continuo, lo mismo que donde se realizan aplicaciones de materiales orgánicos.

d) Cultivar: no todas maduran en la misma época aunque sean influenciadas por los mismos factores, razón por la cual se ha establecido una clasificación de cultivares de acuerdo a su madurez, en:

- maduración precoz o temprana: con ellas se inicia la zafra.
- madurez intermedia: constituyen la materia prima que mantiene la mayor parte de la zafra.
- madurez tardía: aquellas donde el tiempo para lograr la madurez resulta más largo y se cortan al final de la zafra.

e) Época de Siembra: la fecha de siembra determina en parte la época de cosecha, la que se ve favorecida si existe riego.

f) Fertilización: debe ser racional en época, cantidad, momento y forma de aplicación. Fertilizaciones inadecuadas hacen que este cultivo, mantenga su crecimiento de manera continua y afecte la calidad de los jugos.

g) Prácticas Culturales: varias son las labores que se realizan tales como cultivar, sembrar, etc., lo cual incrementa los rendimientos.

h) Riego y/o Drenaje: hace que se incremente el desarrollo del cultivo, mientras que el exceso de humedad, además de que lo impide (condiciones de inundación) hace que la planta produzca jugos de baja calidad por impedimento del proceso de maduración.

i) Control de Madurez: representa una práctica elemental debido a que la caña de azúcar debe cortarse cuando su concentración de sacarosa es máxima.

j) Época de Cosecha: debe coincidir con la etapa de mayor contenido de sacarosa en la caña de azúcar.

La caña de azúcar debe ser cosechada para enviarse al central azucarero cuando alcanza el estado de madurez, ya que en ese momento su contenido de sacarosa es óptimo. La determinación del momento de maduración de la caña de azúcar no es una cuestión sencilla. En este proceso fisiológico influyen diversos factores del metabolismo de la planta, como son la humedad, el contenido de azúcares reductores en el jugo y la acumulación de sacarosa (Alexander, 1973).

Desde hace muchos años se busca un método que permita determinar la maduración de la caña de azúcar de forma precisa. Así Martín et al. (1987) plantearon métodos basados en el brix, la pureza, 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 cultivares 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; Jorge et al., 2007).

El Instituto de Investigaciones de la Caña de Azúcar (INICA) contaba con una infraestructura para la investigación–desarrollo, con 13 estaciones experimentales, una de cuarentena y otra de ingeniería agrícola. Además, poseía 30 bloques experimentales y 57 puntos para la extensión y validación de los cultivares recomendados, que incluían el desarrollo de tecnologías específicas para las diferentes condiciones agroclimáticas del país. Por limitaciones económicas imperantes, esta red de estudios multiambientales se redujo a 13 sitios, provocando ajustes necesarios en el programa de mejoramiento genético del cultivo, basado en la estrategia de que ambientes de destino y de selección estén lo más relacionado posible (Rodríguez, 2012).

Al realizar los ensayos en distintos ambientes se aumenta el espacio de inferencia y la potencia para explorar la interacción de los cultivares con los ambientes. Los ensayos comparativos de rendimiento multiambientales (ECRM), constituyen una colección de ensayos a través de los ambientes. Los ECRM se caracterizan por involucrar múltiples ambientes (localidades y/o años) en los que se evalúan varios cultivares, dentro de cada ambiente se sigue un diseño experimental particular, por ejemplo, un diseño en bloques completamente aleatorizados (con bloques completos o incompletos) (Balzarini et al., 2004).

Es importante mencionar ciertos términos y abreviaturas que están en correspondencia con aquellas de la bibliografía internacional:

Genotipo: se refiere a un cultivar, ya sea con material genéticamente homogéneo, tales como líneas puras y clones o heterogéneos tales como poblaciones de polinización abierta, más que al genoma del individuo.

Ambiente (A): 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). 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 (para perennes) (Annicchiarico, 2002).

Interacción Genotipo Ambiente (IGA): es directamente observable en ensayos multiambientales, sino que es un concepto usado para contemplar la inconsistencia de diferencias entre los desempeños de los cultivares a través de los ambientes. Los estudios de interacción permiten clasificar el entendimiento de adaptaciones en sentido amplio y en sentido estricto (o específicas de ambiente) (Kang et al., 2005).

El fin último es clasificar cultivares en relación a los ambientes. Algunas veces el interés principal se centra en los ambientes, pero el procedimiento de análisis no es muy diferente al usado cuando la finalidad está focalizada en los cultivares, ya que ambos son necesarios para que la interacción exista.

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 cultivares 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 u otros tipos de estrés (como los determinados por el clima, suelo, factores bióticos y de manejo).

La estructura genética del material vegetal puede también tener relación con la magnitud de la IGA. Los tipos de cultivares caracterizados por pocos niveles de heterogeneidad (líneas puras, clones, híbridos simples) o heterocigosis (líneas puras) tienden a interactuar con el ambiente más que los tipos de cultivares con comportamiento opuesto (poblaciones de polinización abierta, mezclas de líneas puras) porque son menos ricos en genes de adaptabilidad y su estructura genética los hace más susceptibles a las variaciones en las condiciones ambientales (Annicchiarico, 2002).

La IGA, puede dividirse en dos categorías: interacción cultivar ambiente con cambio de rango, también conocida como interacción crossover y sin cambio de rango o interacción noncrossover (Balzarini et al., 2004).

Los principales efectos genéticos, proporciona la única información pertinente cuando los efectos de la interacción cultivar-ambiente (IGA) están ausentes o ignorados. Sin embargo,

las diferencias entre los cultivares pueden variar ampliamente entre los ambientes en la presencia de grandes (IGA), como lo informó en extensas investigaciones (Annicchiarico, 2002).

El fenotipo de un individuo es determinado por el cultivar y por el ambiente. Estos dos efectos no siempre son aditivos, lo cual indica que las IGA están presentes. El resultado de esta interacción es la inconsistencia en el comportamiento de los cultivares en los ambientes (Martín, 2004).

Campbell y Jones (2005) definen la IGA, para un carácter dado, como la respuesta diferencial de un cultivar a través de diferentes ambientes, y precisan que es un fenómeno natural que forma parte de la evolución de las especies. Sus efectos permiten el cruzamiento de cultivares aptos a un ambiente específico, así como un comportamiento general aceptable a varios ambientes (Lavoranti, 2003).

El fenómeno de la IGA 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 cultivares 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 dichos ambientales propicios para una mayor productividad tanto en cantidad como en calidad.

Las subregiones pueden también ser definidas para la recomendación de cultivares. Cada subregión entonces coincide con un dominio de recomendación, agrupando aquellos sitios con el o los cultivares de mejor comportamiento (Gauch y Zobel, 1996). La definición de subregiones no es geográficamente exacta. La identificación de subregiones, aún cuando no se pretende mejorar para áreas específicas, podría ayudar a localizar sitios de prueba cruciales para selección de germoplasma. Las subregiones que son demasiado pequeñas para tener interés práctico a veces suelen ser fusionadas con algunas más grandes.

La evaluación en 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 cultivar-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).

Para caracterizar una localidad, es necesario tener presente sus características climáticas y dentro de ellas, como principal el régimen pluviométrico, así como el suelo, pero también tienen una gran influencia las cepas, edades y ciclos en la expresión de determinados caracteres. El manejo que se haga de estos factores y su óptima combinación en una plantación, son elementos básicos para obtener producciones elevadas (Castro, 1991).

En Cuba, en las últimas décadas, se han realizado numerosos estudios relacionados con el tema de la interacción genotipo ambiente. Gálvez (1978) clasificó los ambientes en la región occidental. En la zona centro oriental López (1986), analizó la influencia de algunos factores del ambiente sobre el rendimiento y aplicó tres métodos de estabilidad en los estudios de regionalización de cultivares de caña de azúcar en las provincias de Camagüey y Ciego de Ávila. Jorge (1996) y García (2004) desarrollaron estudios en la región central oriental de Cuba.

En estudios de regionalización de cultivares de la caña de azúcar Bernal (1986), clasificaron los ambientes en las provincias de Holguín, las Tunas y Granma en estudios de regionalización de cultivares de caña de azúcar, donde hace referencia de los métodos de regresión lineal de Finlay y Wilkinson (1963). Castro (1991) realizó evaluaciones de ambientes y de cultivares en las provincias de Holguín y las Tunas, respectivamente. En todos estos trabajos se utilizaron análisis de componentes principales (ACP) y de clúster análisis.

Los estudios de IGA anteriormente mencionados, se desarrollaron sin estrés ambiental, y que si en algún caso estuvo presente no se consideró como tal; por lo que reviste de gran importancia la evaluación de este fenómeno bajo niveles contrastantes como los que están presentes actualmente en más del 30,3% de las áreas cultivadas del país.

Por tanto, es primordial la revisión del efecto del ambiente, el cultivar y su interacción en cultivares que se liberan en áreas de producción. Esta revisión no solo es válida para la verificación de los resultados del Programa de Mejora de la Caña de Azúcar en Cuba, sino también para la selección y recomendación de los mismos a los productores (Gilbert et al., 2006).

Varios métodos estadísticos se utilizan para cuantificar el efecto de los cultivares (G), del ambiente (A) y de la interacción cultivar ambiente (IGA) (Gauch, 2013).

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

mejor), y su estabilidad (consistencia del rendimiento del cultivar comparado con otros). 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 cultivares de aprovechar ventajosamente los estímulos del ambiente.

Los términos de adaptabilidad y estabilidad se refieren a las dimensiones, espacial y temporal, respectivamente. Según Balzarini et al. (2004), la expresión estabilidad de rendimientos altos se refiere a la habilidad de los cultivares 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).

La adaptabilidad se refiere a la habilidad del cultivar 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 cultivar-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 (Crossa, 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).

De todos estos métodos, la regresión lineal (Eberhart y Rusell, 1966) es el más ampliamente usado en Cuba (Gálvez 1978, López, 1986 y Castro, 1991). Este método 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 cultivares depende no solo del grupo de ambientes incluido, sino también de otros cultivares incluidos en el análisis de regresión (Gálvez, 2010).

Un método no paramétrico se empleó en Cuba por Vega (1993). Este método se basa en los rangos de los cultivares en cada ambiente, considerando  $i$  cultivares y  $j$  ambientes. De la misma forma, se ha utilizado la Cartografía de los Residuos Individuales, como complemento de los análisis clásicos de adaptabilidad y estabilidad de Eberhart y Russell (1966).

Se han desarrollado procedimientos univariados (Finlay y Wilkinson, 1963; Eberhart y Russell, 1966) y multivariados para estimar la estabilidad y (IGA) (Crossa et al., 1990; Nassir y Ariyo 2011; Kipkorir et al., 2016; Santos et al., 2016).

Los métodos multivariados son más adecuados para evaluar la estabilidad porque permiten describir e interpretar los efectos de la (IGA). El modelo AMMI (additive main effects and multiplicative interactions) es uno de los más empleados para estimar la (IGA) (Crossa et al., 1990), ya que consideran que los efectos de los factores principales (cultivares y ambiente) son aditivos y lineales, lo que permite estimarlos a través del análisis de varianza; mientras que la (IGA) tiene efectos multiplicativos que pueden ser explicados por el análisis de componentes principales (ACP). Además, el modelo AMMI permite el análisis de la interacción con más de un procedimiento estadístico y disponer de estimados exactos del rendimiento (Gauch, 2006).

La aplicación de técnicas multivariadas al estudio de la interacción cultivar-ambiente ha mostrado ventajas, como son el enfoque global y la interpretación complementada con elementos gráficos. En este contexto y basado en el análisis de Coordenadas Principales, Westcott (1987) propuso un nuevo método de estabilidad. Este análisis es una generalización del análisis de componentes principales, pues usa cualquier medida de similitud entre los individuos (Martín, 2004).

Los Análisis Multivariados constituyen una herramienta eficaz en manos de los mejoradores de plantas para la evaluación de los resultados del trabajo, por ello han sido ampliamente utilizados en la clasificación de ambientes y cultivares (Nagatomi y Oshiro, 1983).

En Cuba se informa el uso de los análisis multivariados por diferentes investigadores, (Álvarez, 1984; Gálvez, 1978; López, 1986; Vega, 1993 y Delgado et al., 2015), pero fundamentalmente en etapas avanzadas del proceso de selección de cultivares de la caña de azúcar.

García (2004), planteó que, en el Análisis de Componentes Principales, los componentes entre cultivares y entre ambientes se extraen sucesivamente de forma tal que cada uno extraiga el máximo posible de variación en el sistema y todos son ortogonales entre sí. Este método se ha utilizado con éxito en las investigaciones agrícolas y corresponde a un modelo lineal de regresión, donde se parte de un conjunto de variables correlacionadas, buscándose un nuevo conjunto de variables independientes e incorrelacionadas (Linares et al., 1986), este tipo de

análisis es útil cuando es necesario reducir el número de datos, perdiendo el mínimo de información (Tomeu et al., 1984).

Tomeu et al. (1984) emplearon los análisis de Componentes Principales para la clasificación de cultivares de caña de azúcar cultivadas, en diferentes ambientes en las provincias occidentales de Cuba. Estos autores concluyeron que las t pol/ha son determinantes para caracterizar el resto de las variables.

Las técnicas de Análisis Multivariados pueden ser útiles, especialmente cuando los mejoradores están interesados en más de un carácter, tal como lo señaló Basford (1982), ello está en la correspondencia con el mejoramiento comercial de la caña de azúcar, en que la decisión de aceptación o rechazo depende generalmente de un conjunto de caracteres y no de uno en específico, aspecto este que puede ser extendido a los criterios para la selección de progenitores y familias.

Uno de los mayores valores de las técnicas multivariadas ha sido servir como un complemento eficaz de los Análisis Univariados en la evaluación de ambientes, cultivares y progenies (Castro, 1991). Bernal (1986) obtuvo los mejores resultados en la clasificación de ambientes cuando se combinaron adecuadamente las técnicas univariadas con las multivariadas.

En la clasificación de ambientes se utilizan de forma combinada el ACP conjuntamente con el análisis de varianza. Se puede aplicar en unos casos a la matriz de interacciones cultivar-ambiente (Modelos de Efectos Principales Aditivos e Interacción Multiplicativa, AMMI: *Additive Main Effects and Multiplicative Interaction model*) (Gauch, 1988) y en otros casos al residual que resulta de agregar el efecto del cultivar a la interacción cultivar-ambiente (Modelo de Regresión de Sitios, SREG: *Sites Regression model*) (Yan et al., 2000).

Los modelos de regresión por sitio (SREG) (Crossa y Cornelius, 1997), 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 cultivares 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.

Yan et al. (2000) señalaron que usualmente la componente principal uno (CP1) representa respuestas de los cultivares que son proporcionales a través de los ambientes las cuales se asocian con la (IGA) sin cambio de rango, mientras que la componente principal 2 (CP2)

representa respuesta de los cultivares no proporcionales a través de los ambientes, es decir aquellas responsables de la (IGA) con cambio de rango.

Si existe una alta correlación entre las medias de los cultivares y la CP1 podría interpretarse el GGE biplot de acuerdo a las sugerencias dada por Yan et al. (2000), es decir los cultivares con scores CP1 altos se interpretan como aquellos que tienden a tener mayores rendimientos y los ambientes con CP1 altos y CP2 cercanos a cero con los ambientes que facilitan la identificación de dichos cultivares.

Para explorar la interacción a partir de un modelo SREG es necesario primero ajustar un modelo de Análisis de la Varianza con efectos de ambiente (sin efectos de cultivar ni interacción). Luego realizar un Análisis de Componentes Principales sobre los residuos del modelo ajustado. De esta manera el residuo obtenido para cada observación (o el promedio de los residuos para las repeticiones de una combinación cultivar-ambiente) contiene además de una medida del error experimental el efecto de cultivar (G) y el de la (IGA).

El ACP es aplicado sobre esta matriz de residuos para rescatar las principales componentes de variación que se espera se relacionen con algún patrón sistemático debido a la suma G+GE y separar aquellas componentes asociadas no muestra patrón sino ruido. Ambos análisis son aplicados automáticamente cuando se solicita un análisis de interacción en Info-Gen y se especifica correctamente los términos del modelo de ANAVA a ajustar en la primera etapa (Balzarini et al., 2004).

El modelo de Regresión de sitios (SREG) o de Efecto Principal del Cultivar y Efecto de la (IGA), desarrollado por Yan et al. (2000), es similar al modelo AMMI; solo, que los efectos principales de los cultivares, que en el modelo AMMI se estiman como efectos aditivos, en este modelo se envían al residual junto con la interacción cultivar-ambiente, para modelarlos de forma multivariada mediante el ACP. Igualmente, se obtiene el biplot del modelo SREG, al unir en un plano bidimensional los marcadores de cultivares y ambientes.

Glaz y Kang (2008) en un estudio en caña de azúcar con 17 cultivares y nueve localidades en el sur de La Florida, utilizaron el modelo SREG para determinar la contribución de las localidades de prueba del Programa de Mejora, en cuanto a su capacidad de discriminación de cultivares y de obtención de información acerca de su semejanza o diferencia en la manifestación de los mismos.

Los modelos AMMI y SREG están entre las principales herramientas estadísticas utilizadas para el análisis de datos en experimentos multiambientales. El mérito relativo de un método con respecto al otro depende del propósito de la investigación (Gauch, 2006). El modelo de regresión de sitios (SREG) o GGE Biplot ha sido utilizado para la interpretación de la IGA y se basa en un modelo similar al modelo AMMI, pero los términos lineales de cultivares y ambientes no se consideran individualmente y se adicionan al término multiplicativo de la interacción cultivar x ambiente. En efecto, el modelo SREG,

que incluye G+GE en el término bilineal, proporciona un análisis gráfico de fácil interpretación denominado biplot GGE (Yan y Tinker, 2006), el cual ha sido utilizado en muchos estudios de interacción genotipo ambiente (Chavanne et al., 2007; Queme, et al., 2010; Nassir y Ariyo, 2011; Acuña and Wade, 2012; Rodríguez et al., 2012; Nassir et al., 2016; Cherinet et al., 2016).

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

## **Conclusiones**

La aplicación de técnicas multivariadas al estudio de la interacción cultivar-ambiente, permiten un enfoque global y la interpretación complementada con elementos gráficos. En la clasificación de ambientes se utilizan de forma combinada el Análisis de Componentes Principales (ACP) conjuntamente con el análisis de varianza. Los Modelos de Efectos Principales Aditivos e Interacción Multiplicativa (AMMI) y los Modelos de Regresión por Sitio (SREG), están entre las principales herramientas estadísticas utilizadas para el análisis de datos en experimentos multiambientales, este último proporciona un análisis gráfico de fácil interpretación denominado biplot GGE. 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. Estos métodos estadísticos permiten estimar la estabilidad y adaptabilidad fenotípica para la selección de cultivares de caña de azúcar.

## Bibliografía

- ACUÑA, B.T.L. and WADE, L.J. Genotype  $\times$  environment interactions for root depth of wheat. *Field Crops Research*, no. 137, 2012, pp. 117-125.
- ALEJOS, G., MONASTERIO, P., REA, R. Análisis de la interacción cultivar-ambiente para rendimiento de maíz en la región maicera del estado Yaracuy, Venezuela. *Agronomía Tropical*, no. 3, vol.56, 2006, pp. 369-384.
- ALEXANDER, A.G. Sugar cane physiology. Elsevier publishing Co. New Cork, 1973.
- ALEXANDER, A.G. and LEBRÓN. Isolation and purification of amylase from sugarcane leaves. *ISSCT 13*, 1968, pp. 514-521.
- ÁLVAREZ, M. Utilización de la clasificación automática para determinar los efectos de las localidades sobre los rendimientos azucareros de un grupo de cultivares de caña de azúcar en 6 regiones de la provincia Habana. *Jornada XX Aniversario INICA*, 1984, 12 p.
- ANNICCHIARICO, P. Defining adaptation strategies and yield stability targets in breeding programmes. In: KANG, M.S. (eds.), *Quantitative genetics, genomics, and plant breeding*. Wallingford, UK: CABI, 2002, pp. 365-383.
- ASFAW, A., ALEMAYEHU, F., GURUM, F. and ATNAF, M. AMMI and SREG GGE biplot analysis for matching varieties onto soybean production environments in Ethiopia. *Scientific Research and Essay*, no.11, vol. 4, 2009, pp. 1322-1330.
- BALZARINI, M., BRUNO, C. and ARROYO, A. Análisis de ensayos agrícolas multi-ambientales. Ejemplos con Info-Gen. *Estadística y Biometría*. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Universidad Nacional de Córdoba, 2004.
- BASFORD, J.E. The use of multidimensional scaling in analyzing multiattribute phenotype response across the environments. *Aust. J. Agric. Res.*, no. 33, 1982, pp. 473- 480.
- BILBRO, J.D. and RAY, L.L. Environment stability and adaptation of several cotton cultivars. *Crop Sci.*, no. 16, 1976, pp. 821-829.
- BOSE, L.K., JAMBHULKAR, N.N., PANDE, K. and SINGH, O.N. Use of AMMI and other stability statistics in the simultaneous selection of rice genotypes for yield and stability under direct-seeded conditions. *Chilean Journal of Agricultural Research*, no. 74, 2014, pp. 3-9.
- BOTKIN, D. Forecasting the Effects of Global Warning on Biodiversity. *BioScience*, no. 3, vol. 57, 2007, pp. 227-236.
- BUENAVENTURA, C. Control de la maduración de caña de azúcar. *Memorias*. Ed. por CARLOS BUENAVENTURA. Cali, Colombia, TECNICAÑA, 1986, pp. 299-308.
- CADENA, J. Agroproductividad. *Reservas de Derechos al Uso Exclusivo No. 04-2017-031313492200-203*. ISSN: 2594-0252, no. 11, vol. 10, 2017, pp. 112-115.

CAMPBELL, B.T. and JONES, M.A. Assessment of genotype  $\times$  environment interactions for yield and fiber quality in cotton performance trials. *Euphytica*, no. 144, 2005, pp. 69–78.

CASTRO, S. Evaluación de ambientes y cultivares de caña de azúcar en la provincia de Holguín. Tesis para optar por el grado de Doctor en Ciencias Agrícolas. INICA, MINAZ, 1991, 95 pp.

CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe). Efectos del cambio climático sobre la agricultura Editorial México, D.F, CEPAL, 2010, 76 p.

CHANDIPOSHA, M. Review Potential impact of climate change in sugarcane and mitigation strategies in Zimbabwe. *African Journal of Agricultural Research*, no.23, vol.8, (2013), pp. 2814-2818.

CHAVANNE, E.R., OSTENGO, S., GARCÍA, M.B. and CUENYA, M.I. 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.*, no.2, vol.84, 2007, pp. 19-24.

Chávez, S.M.A. 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. Memorias CAFESA / ATACORI / MAG/ LAICA, septiembre, 1982, pp. 28-40.

CHEAVEGATTI-GIANOTTO, A., ABREU, H.M.C., ARRUDA, P., BESPALHOK, F.J.C., BURNQUIST, W.L., CRESTE, S., CIERO, L., FERRO, J.A., OLIVEIRA, F.A.V., SOUSA, F.T., GROSSI-DE-SÁ, M.F., GUZZO, E.C., HOFFMANN, H.P., ANDRADE, L.M.G., MATSUOKA, S., CASTRO, R.F., ROMANO, E., SILVA, W.J., CASTRO, S.F.M. and CÉSAR, U.E. Sugarcane (*Saccharum officinarum*): A Reference Study for the Regulation of Genetically Modified Cultivars in Brazil. *Tropical Plant Biol*, no. 41, 2011, pp. 62-89.

CHERINET, A., ABEBE, W., MOLLA, M., TAZEBACHEW, A., DESALEW, F., ESMELEALEM, M. and ESMAEL, J. GGE Stability Analysis of Seed Yield in Sunflower Genotypes (*Helianthus annuus* L.) in Western Amhara Region, Ethiopia. *International Journal of Plant Breeding and Genetics*. *Int. J. Plant Breed. Genet.*, no. 2, vol.10, 2016, pp. 104-109.

CROSSA, J. Statistical analyses of multilocation trials. *Adv. Agron.*, no. 44, 1990, pp. 55–85.

CROSSA, J. and CORNELIUS, P. Sites regression and shifted multiplicative model clustering of cultivar trial sites under heterogeneity of error variances. *Crop Sci.*, no. 37, 1997, pp. 406-415.

DELGADO, I., SUÁREZ, H.J., GARCÍA, H., BERNAL, N., DÍAZ, F.R., BERNAL, A., GÓMEZ, J.R., ADAY, O., GONZÁLEZ, H., BUEDO, M., REYES, S., NÚÑEZ, D., BARROSO, J. y MACHADO, L.F. Potencialidades de familias de cultivares para

diferentes períodos de zafras en Cuba. Revista Cultivos Tropicales, no. 3, vol. 33, 2012, pp. 5-14.

DELGADO, I., JORGE, H.J., VERA, A., CÉSPEDES, A., TORRES, I., CRUZ, R., VAILLAN, Y., PUCHADES, Y., RODRÍGUEZ, R., PÉREZ, J.C., SANTOS, J.C., GUILLÉN, S., GARCÍA, H., DÍAZ, F.R., GONZÁLEZ, H., GÓMEZ, J.R., REYES, S., GALLARDO, A., BARROSO, J., MACHADO, L.F. y NÚÑEZ, D. Los momentos de cosecha en la caña de azúcar y la estabilidad en cinco ambientes de Cuba. Centro Agrícola, no. 1, vol. 42, 2015, pp. 63-68.

EBERHART, S.A. and RUSSELL, W.A. Stability parameters for comparing varieties. Crop Sci., no. 6, 1966, pp. 36-40.

ESPINOSA, R.B. Influencia de la fecha de plantación y las edades al momento de las cosechas sobre el rendimiento y sus componentes en la caña de azúcar (*Saccharum* spp.) Resumen de la tesis para optar por el grado de Doctor en Ciencias Agrícolas. INCA, La Habana, 1980, 32 p.

FINLAY, K.W. and WILKINSON, G.N. The analysis of adaptation in a Plant-Breeding Programme. Australian Journal of Agricultural Research, no. 5, vol.14, 1963, pp. 742-754.

GAIKWAD, D.D., RATHOD, B.G. and GOSAVI, S.R. Genotype x environment interaction and adaptability for productive traits in sugarcane. International Journal of Current Research, no. 2, vol. 6, 2014, pp. 5220-5224.

GÁLVEZ, G. Estudio de la interacción g x e y métodos de estabilidad en experimentos de cultivares de caña de azúcar (*Saccharum* spp híbrido). Tesis en opción al grado de Doctor en Ciencias Agrícolas. Ministerio de Educación Superior. Universidad Agraria de la Habana, La Habana, Cuba, 1978, 76 p.

GÁLVEZ, G. Interacción cultivar-ambiente en el mejoramiento de plantas en la era de genómica. ¿Dónde estamos?. Rev. Cuba & Caña, no. 1, 2010, pp. 57-67.

GARCÍA, H. Optimización del proceso de selección de cultivares 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. Ministerio de Educación Superior, Universidad Agraria de la Habana, La Habana, Cuba, 2004, 95 p.

GARCÍA, H. 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, (2007, 30 p.

GAUCH, H.G. A simple protocol for AMMI analysis of yield trials. Crop Science, no. 53, 2013, pp. 1860-1869.

GAUCH, H.G. Model selection and validation for yield trials with interaction. Biometrics, no. 44, 1988, pp. 705-715.

GAUCH, H.G. Statistical Analysis of Yield Trials by AMMI and GGE. Crop Sci. no. 46, 2006, pp. 1488–1500.

GAUCH, H.G. and ZOBEL, R.W. AMMI analysis of yield trials. In Genotype-by-Environment Interaction. Kang MS and Gauch HG (eds), CRC Press, Boca Raton, Florida, no. 222, 1996, 85 p.

GILBERT, R.A., SHINE, J.M., MILLER, J.D., RICE, R.W. and RAINBOLT, C.R. The effect of genotype, environment and time of harvest on sugarcane yields in Florida, USA. Field Crops Research, no. 95, 2006, pp. 156-170.

GLAZ, B. and KANG, S.M. Location Contributions Determined via GGE Biplot Analysis of Multienvironment Sugarcane Genotype-Performance Trials. Crop Sci., no. 48, 2008, pp. 941-950.

GONZÁLEZ, O. y RUBIO, A. Cambio Climático y la percepción de los campesinos sobre la cultivar café Robusta En la zona de “La Torcaza”, Sierra Maestra, Cuba. Revista Batey. Revista Cubana de Antropología Sociocultural, vol. 6, 2014.

GONZÁLEZ, R.M. Variedades de caña de azúcar cultivada en Cuba. Cronología, legislación, metodologías y conceptos relacionados. Editorial ICIDCA, La Habana, Cuba. Primera edición. ISBN: 978-959-7165-58-3, 2019: 216 p.

GORDON, M.R., CAMARGO, B., FRANCO, B. y GONZÁLEZ, S. Evaluación de la adaptabilidad y estabilidad de 14 híbridos de maíz, Azuero, Panamá. Agronomía Mesoamericana, no. 2, vol. 17, 2006, pp. 189-199.

HANSON, W.D. Distance statistics and interpretation of Southern states regional soybean tests. Crop Sci., no. 6, vol. 34, 1994, pp. 1498-1504.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change Secretariat) (2007) Fourth Assessment Report. Geneva, Switzerland. Synthesis Report, [www.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/ar4/syr/en/spms3.html](http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/syr/en/spms3.html).

JORGE, H. 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. Universidad Agraria de la Habana, Cuba, 1996, 90 p.

JORGE, H., GARCÍA, H., BERNAL, N., JORGE, I., VERA, A. y SUÁREZ, O. Cultivares de caña de azúcar en Cuba. Una nueva concepción y manejo. XXX Convención Nacional ATAM. Veracruz. 2007.

JORGE, H., GARCÍA, H., JORGE, I., BERNAL, N., MARRERO, A., DELGADO, J., CABRERA, L., DELGADO, I., DÍAZ, M., VERA, A., CÉSPEDES, A., OJEDA, E., VALLADARES, F., CASTRO, S., CRUZ, R., PEÑA, L., PUCHADES, Y. y RODRÍGUEZ, R. Red experimental para el desarrollo de las investigaciones de la caña de azúcar en Cuba. ¿Necesarias? Rev. Cuba & Caña, no. 2, 2010, pp. 33-48.

KANG, M.S. Using genotype-by-environment interaction for crop cultivar development. Adv Agron, no. 62, 1998, pp. 199-252.

KANG, M.S., AGGARWAL, V.D. and CHIRWA, R.M. Adaptability and stability of bean cultivars as determined via yield stability statistic and GGE Biplot analysis. *J. Crop Improve*, no. 15, 2005, 97–120.

KIPKORIR, R.J., KIMUTAI, E., ODONGO, J., WANJIKU, V., KINYORO, J., OWUOCHE, J., OYIER, M. and MACHIO, A. 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*, 2016.

LAPINEL, B., CUTRE, V. y FONSECA, C. ¿Se humedecerá la sequía? *Granma*, Cu, junio 12, 2010, pp. 8.

LAU, C., JARVIS, A. y RAMÍREZ, J. Agricultura colombiana: Adaptación al cambio climático. *CIAT Políticas en Síntesis no. 1*. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia, 2011, 4 p.

LAVORANTI, J.O. Estabilidade e adaptabilidade fenotípica através da reamostragem “bootstrap” no modelo AMMI. Tese apresentada a Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Doctor em Agronomia. Área de Concentração: Estatística e Experimentação Agronômica. Piracicaba, 2003, 166 p.

LINARES, F.G., ACOSTA, R. y SISTACHS, V. *Estadística Multivariada*. La Habana, Cuba, 1986, 320 p.

LÓPEZ, E. Influencia de algunos factores del ambiente sobre el rendimiento y aplicación de tres métodos de estabilidad en los estudios de regionalización de cultivares de caña de azúcar en las provincias de Camagüey y Ciego de Ávila. Tesis en opción al grado de doctor en Ciencias Agrícolas. Ministerio de Educación Superior. Universidad Agraria de la Habana, La Habana, Cuba, 1986, 198 p.

MARIN, F.R., JAMES, W.J., SINGELS, A., ROYCE, F., ASSAD, E.D., PELLEGRINO, G.Q. and JUSTINO, F. Climate change impacts on sugarcane attainable yield in southern Brazil. *Climate Change*, no. 1-2, vol. 117, 2013, pp. 227-239.

MARTÍN, J.R., GÁLVEZ, G., DE ARMAS, R., ESPINOSA, R., VIGOA, R. y LEÓN, A. *La caña de azúcar*. Editorial Científico-Técnica. La Habana, 1987.

MARTÍN, J.A. A comparison of statistical methods to describe genotype x environment interaction and yield stability in multi-location maize trials. Thesis for the degree Magister Scientiae Agriculture. Bloemfontein, South Africa, Faculty of Agriculture, Department of Plant Sciences at the University of the Free State, 2004, 100 p.

MAYHEW, P., GARETH, B. and TIMOTHY, G. A long-term association between global temperature and biodiversity, origination and extinction in the fossil record. *Proceedings of the Royal Society B.*, no. 275, 2007, pp. 47.

- NAGATOMI, S. and OSHIRO, Y. Classifications for sugar cane wild germplasm by methods of numerical taxonomy. Proc. ISSCT, vol. 2, 1983, pp. 650-660.
- NASSIR, A.L. and ARIYO, O.J. Genotype x Environment Interaction and Yield-Stability Analyses of Rice Grown in Tropical Inland Swamp. Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca, no. 1, vol. 39, 2011, pp. 220-225.
- NASSIR, A.L., ALAWODE, Y.O. and PERTANIKA, J. Stability Analysis of Panicle and Grain Traits of Rainfed Upland Rice in Two Tropical Ecologies of Nigeria. Tropical Agricultural Science Trop Agric Sci, no. 4, vol. 39, 2016, 483 - 494.
- NEUMEISTER, L. Crop protection: Anything can happen. PAN Asia and the Pacific. Penang, Malaysia, 2010.
- NÚÑEZ, J.D. Caracterización de cultivares de caña de azúcar de madurez temprana, para el inicio de la zafra azucarera en suelos Sialitizados no cálcicos. Tesis de Ingeniero Agropecuario. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. Facultad de Ciencias Agropecuarias, Villa Clara, Cuba, 2014, 33p.
- PICHS, R. Economía política del cambio climático. Revista Temas, no. 73, 2013, pp. 9-16.
- QUEME, J.L., OROZCO, H. and MELGAR, M. 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.
- REA, R.O., DÍAZ, A., RAMÓN, M., BRICEÑO, R., GEORGE, J. y NIÑO, M. Genotype-environment interaction in sugarcane by AMMI and site regression models in Venezuela. Rev Fac Agron (LUZ), no. 31, 2014, pp. 362-376.
- REA, R. y DE SOUSA, O. Genotipe x environment interaction in sugarcane yield trials in the central western region of Venezuela. Interciencia, no. 11, vol. 27, 2002, pp. 620-624.
- RODRÍGUEZ, R. Perfeccionamiento del programa de mejora genética de la caña de azúcar (*Saccharum spp.*) para la obtención de nuevos cultivares tolerantes al estrés por déficit hídrico. Tesis presentada en opción al grado Científico de Dr. en Ciencias Agrícolas. Universidad Agrararia de la Habana, La Habana, Cuba, 2012, 100 p.
- RODRÍGUEZ, R., PUCHADES, Y., BERNAL, N., JORGE, H. y GARCÍA, H. Métodos estadísticos multivariados en el estudio de la interacción cultivar ambiente en caña de azúcar. Ciencia en su PC, no. 1, 2012, pp. 47-60.
- RODRÍGUEZ, S. 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, Cuba, 2018.
- SÁENZ, J.O. Experiencias en la optimización de la maduración inducida en el cultivo de caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) en Guatemala. USAC, 2004, 59 p.

SANTOS, A., CECCON, G., TEODORO, P.E., CORREA, A.M., ALVAREZ, R.C.F., DA SILVA, J. and BATISTA, V. Adaptability and stability of erect cowpea genotypes via REML/BLUP and GGE Biplot. *Bragantia*, no. 3, vol. 75, 2016, pp. 299-306.

SHUKLA, G.K. Some statistical aspects of partitioning genotype-environmental components of variability. *Heredity*, no. 29, 1972, pp. 237-245.

STORCK, L. and VENCOSKY, R. Stability analysis on a bi-segmented discontinuous model with measurement errors in the variables. *Revista Brasileira de Genética*, no. 1, vol.17, 1994, pp. 75-81.

TOMEU, A., ÁLVAREZ, M., MÉNDEZ, F. y JORGE, I. Clasificación de cultivares de caña de azúcar cultivadas en diferentes ambientes de las provincias orientales. Memoria 44 Congreso de la ATAC, Cuba, 1984.

VARELA, M. y CASTILLO, J. Modelos con término multiplicativo. Aplicación en el análisis de la interacción Cultivar Ambiente. *Rev. Cultivos Tropicales*, no. 3, vol. 26, 2005, pp. 71-75.

VARELA, M., VICENTE, J.L. BLÁZQUEZ, A., CASTILLO, G.L. y ESTÉVEZ, A. Una generalización de los modelos AMMI basada en el algoritmo de Tuckals3 para el análisis de componentes de tres modos. *Rev. Cultivos Tropicales*, no. 1, vol. 29, 2008, pp. 69-72.

VEGA, A. Evaluación de algunos aspectos relacionados con la etapa intermedia de selección de la caña de azúcar en Cuba. Tesis en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Agrícolas. Ministerio de Educación Superior, Universidad Agraria de la Habana, La Habana, Cuba, 1993, 103 p.

WESTCOTT, B. A method of assessing the yield stability of crop genotypes. *J. Agric. Sci.*, no. 108, 1987, pp. 267-274.

WRICKE, G. Über eine Methode zur Erfassung der ökologischen Streubreite in Feldversuchen. *Z. Pflanzenzuchtg.*, no. 47, 1962, pp. 9296.

YAN, W. and TINKER, N.A. Biplot analysis of multi-environment trial data: Principles and applications. *Can. J. Plant Sci.*, no. 86, 2006, pp. 623-645.

YAN, W., HUNT, L.A., SHENG, Q. and SZLAVNICS, Z. Cultivar evaluation and mega-environment investigation based on the GGE biplot. *Crop Sci.*, no. 40, 2000, pp. 597-605.

YAN, W. and HUNT, L.A. Biplot Analysis of Diallel Data. *Crop Sci.*, no. 42, 2002, pp. 21-30.