

**UNIVERSIDAD DE SANCTI SPÍRITUS
JOSÉ MARTÍ PÉREZ**



**MANEJO DE VARIEDADES DE CAÑA DE AZÚCAR (*SACCHARUM*
SPP.) EN DOS LOCALIDADES AFECTADAS POR DÉFICIT
HÍDRICO EN LA EMPRESA AZUCARERA SANCTI SPÍRITUS.**

Tesis presentada en opción al título académico de
Máster en Ciencias Agrícolas.

Autor: Ing. Néstor Domínguez Gámez.

Tutores: MSc. Ing. Irán Rodríguez Delgado.

Dr. C. Ing. Víctor Caraballosa Torrecilla.

Sancti Spíritus, 2012.

PENSAMIENTO.

La vida debe ser diaria, movible, útil y el primer deber de un hombre de estos días es ser un hombre de su tiempo.

No aplicar teorías ajenas, sino descubrir las propias.

José Martí.

DEDICATORIA.

- *A mis padres, por guiarme toda la vida por caminos seguros a pesar de las dificultades.*
- *A mis hijos, por ser mi mayor inspiración en esta ardua tarea de varios años.*
- *A mi esposa, por dar sobre todas las cosas, apoyo incondicional en mis estudios.*

AGRADECIMIENTOS.

- *Al colectivo de profesores de la Maestría en Ciencias Agrícolas de la Universidad de Sancti Spiritus.*
- *A mis tutores MSc Irán Rodríguez Delgado y Dr. C. Víctor Caraballos Torrecilla por la dedicación en la guía de la investigación realizada.*
- *A la Revolución por permitirme estudiar en lo más puro de su seno, con la guía de nuestro Comandante en Jefe Fidel Castro Ruz.*

Resumen

La economía cubana depende considerablemente del sector agrícola, y dentro de éste, la caña de azúcar es el cultivo de mayor importancia. La agricultura moderna debe tener como objetivo alcanzar la máxima expresión del rendimiento potencial de las variedades explotando convenientemente la influencia de la interacción genotipo-ambiente. En las Unidades Empresariales de Base de la empresa azucarera Sancti Spíritus no se encuentran identificadas las variedades en relación con las limitantes climáticas y su interrelación con el estrés por déficit hídrico. El objetivo es definir el manejo de un grupo de variedades, en dos localidades con afectaciones por déficit hídrico, su relación con las lluvias y los cambios que provocan en algunas variables fisiológicas, para lo cual se evaluaron 22 cultivares. Para ello se utilizaron variables de lluvia, suelo, rendimiento cañero, % de pol en caña y rendimiento en azúcar, las que se asociaron a variables morfofisiológicas. Se aplicaron métodos uní y multivariados de análisis para evaluar ambientes y genotipos lográndose la definición del efecto de la interacción genotipo-ambiente, la estimación de la influencia que producen las lluvias sobre el rendimiento agrícola y la determinación del cambio que se produce en algunas variables fisiológicas, obteniéndose a partir de las variables, una clasificación de dos grupos de genotipos de caña de azúcar, con respecto a su tolerancia al estrés por déficit hídrico. Se recomendaron para ser manejadas por el SERVAS en sus proyectos, las variedades más tolerantes a estas condiciones.

Abstract

The Cuban economy depends considerably of the agricultural sector, and in this one, the sugar cane is the cultivation of importance major. The modern agriculture must have as objective it reaches the maximum expression of the potential performance of the variety show exploding conveniently the influence of the genotype interaction-gives atmosphere. In the managerial units of base of the sugar undertaking Sancti Spíritus not find to him identified the variety show with regard to the climatic limit and your interrelation with the stress for hydric deficit. The objective is to define the handling of a group of variety show, in two locations with affectations for hydric deficit, your report with the showers and the changes they cause in some physiologic variables, for the who evaluated 22 cultivate. For it used variables of sugar cane dealer shower, earth, performance, % of pol in cane and performance in sugar, those who became a partner of variable morfophysiológis applied methods united and multivariate of analysis to evaluate environments and genotypes by achieving the definition of the effect of the genotype interaction-gives atmosphere, the esteem of the influence they produce the showers on the agricultural performance and the determination of the change that it takes place in some physiologic variables, by obtaining as of the variables, a classification of two groups of genotypes of sugar cane, with respect to your tolerance to the stress for hydric deficit. It is recommended to be managed by the SERVAS in your projects, the more tolerant variety show to these conditions.

ÍNDICE

RESUMEN

1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	6
2.1. El cultivo de la caña de azúcar. La agroindustria azucarera cubana.....	6
2.2. Mejoramiento genético de la caña de azúcar.....	9
2.3. Interacción genotipo-ambiente en el cultivo de la caña de azúcar.....	11
2.4. Estabilidad y adaptabilidad fenotípica. Métodos estadísticos para su estimación.....	14
2.4.1. Modelo AMMI.....	16
2.5. Variedades de caña de azúcar.....	16
2.6. Manejo de las variedades de la caña de azúcar.....	17
2.7. El régimen hídrico y los procesos fisiológicos de las plantas.....	18
2.8. Requerimientos hídricos de la caña de azúcar.....	19
2.9. La sequía agrícola en Cuba.....	21
2.10. Fisiología de las plantas en estrés por déficit hídrico.....	24
2.11. Mecanismos de resistencia al estrés por déficit hídrico.....	24
2.12. Indicadores morfofisiológicos de la tolerancia al estrés por déficit hídrico.	26
2.13. Sistema radical de la caña de azúcar y su relación con el estrés por déficit hídrico.....	28
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	31
3.1. Datos generales del experimento.....	31
3.1.1. Ubicación de las localidades evaluadas.....	31
3.1.2. Diseño experimental.....	36
3.2. Definición del efecto interacción genotipo-ambiente en dos localidades con suelos secantes de la empresa azucarera de Sancti Spiritus.....	37
3.3. Estimación de la influencia que producen las lluvias sobre los rendimientos agrícolas en las localidades analizadas.....	39
3.4. Determinación del cambio que se produce en algunas variables fisiológicas	

dentro de las variedades tolerantes al estrés por déficit hídrico.....	39
3.4.1. Análisis del sistema radical.....	40
3.4.2. Análisis del área foliar.....	41
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	42
4.1. Definición del efecto interacción genotipo-ambiente en dos localidades con suelos secantes de la empresa azucarera de Sancti Spíritus.....	42
4.1.1. Pol en caña (%)......	42
4.1.2. Rendimiento agrícola (t. de caña ha ⁻¹)......	45
4.1.3. Rendimiento en azúcar (t. pol ha ⁻¹)......	47
4.2. Estimación de la influencia que produce las lluvias sobre los rendimientos agrícolas en las localidades analizadas	50
4.3. Determinación del cambio que se produce en algunas variables fisiológicas dentro de las variedades tolerantes al estrés por déficit hídrico.....	54
4.3.1. Análisis del sistema radical.....	54
4.3.2. Análisis del área foliar.....	55
5. CONCLUSIONES.....	58
6. RECOMENDACIONES.....	59
7. BIBLIOGRAFÍAS	
8. ANEXOS	

1. INTRODUCCIÓN

La caña de azúcar (*Saccharum* spp.) es una de las plantas de más alto rendimiento en biomasa por área y unidad de tiempo, produce junto con el azúcar (el alimento energético de consumo humano más completo, y difundido en el mundo), una parte de sus necesidades de fertilizante, la energía necesaria para su elaboración industrial y es materia prima de alrededor de un centenar de productos derivados de diferentes generaciones. A estas cualidades excepcionales se suma su adaptabilidad a condiciones adversa del medio ambiente, resistencia a plagas y enfermedades, la fijación de CO₂ comparable a los de bosques tropicales, característica que la convierte en el cultivo por excelencia, paradigma de una agricultura sostenible (Cuellar *et al.*, 2003).

Estimaciones y estudios actuales indican que la caña de azúcar tiene potencial, bajo condiciones adecuadas, para producir 250 t/ha/año. El contenido azucarero parece tener límites más estrechos para el Germoplasma actual. Estimaciones de varios especialistas en diferentes países apuntan hacia las nuevas variedades como responsables de, al menos, 50% de los incrementos de producción agrícola y contenido azucarero en algunos países (Pérez *et al.*, 1997).

La industria azucarera y sus derivados ocupan un importante espacio en las estrategias de desarrollo del país, aspecto que ha sido expresado por nuestro Comandante en Jefe (Castro, 1975; 1980; 1986; 1991; 1997).

La economía cubana depende considerablemente del sector agrícola, y dentro de éste, la caña de azúcar es el cultivo de mayor importancia, el cual ha superado el 43% del fondo de tierras disponibles (Morales, 1993).

En junio del 2002 se planteó la reestructuración de la industria azucarera, cuyo objetivo es la eficiencia económica, la cual se alcanzará con incrementos eficientes de la producción de caña, azúcar, derivados y otras producciones, así como lograr producciones de azúcar competitivas que en las condiciones actuales y futuras, proporcionen ingresos al país (Rosales, 2002).

En Cuba el níquel, el azúcar y los productos para la salud de la industria biotecnológica constituyen los tres principales renglones de exportación (Castro, 2008). En los dos últimos años se comienzan a materializar los resultados

esperados del proceso de perfeccionamiento del sector azucarero; se detuvo el decrecimiento de la producción de azúcar y se muestran signos alentadores de recuperación de los niveles requeridos (Castro, 2011). Estos elementos, unido al alza de los precios del azúcar en los mercados internacionales, demanda una mayor eficiencia en todo el proceso desde la agricultura hasta la industria.

De las tierras resultantes del proceso de perfeccionamiento de la agricultura cañera, aún existen áreas que potencialmente puede afectarse por estrés por déficit hídrico, debido a sus limitaciones en cuanto a drenaje excesivo en combinación con un bajo nivel de precipitaciones (Villegas y Benítez, 2003). Con estas características se agrupa el 7.6% del área cañera de la provincia que representan 3268.97 ha del total del fondo de tierra dedicado al cultivo (43012.78 ha)

Si a las limitaciones anteriores se le añade el efecto que desde finales del pasado siglo produce el cambio climático (aumento de la temperatura mínima y media del aire en 1.4 y 0.6 °C respectivamente e incremento de los eventos de sequía meteorológica con déficit anual de 57 mm de lluvia, (Centella *et al.*, 2006) y que las capacidades de regadío solo satisfacen el 3.7% del área cañera, puede comprenderse la necesidad de buscar una solución, que permita elevar los potenciales de producción de esas áreas que apenas rebasan el 60% (MINAZ, 2009).

Muchos aspectos biológicos y no biológicos están asociados a este cultivo, entre ellos la obtención y selección de nuevas variedades que garanticen la continuidad de esta industria (Castro, 1992; Cuellar *et al.*, 2003).

En la agricultura moderna, la adaptación de las variedades de cualquier cultivo a ambientes específicos, fundamentalmente determinados por el tipo de suelo, topografía, condiciones climáticas particulares, etc., debe tener como objetivo alcanzar la máxima expresión de su rendimiento potencial explotando convenientemente la influencia de la interacción genotipo-ambiente (Ibarra *et al.*, 2007; Barroso *et al.*, 2007).

Estas razones motivaron el desarrollo de proyectos de investigación con vistas a establecer las bases para la concepción de un Programa de Fitomejoramiento para la obtención de variedades tolerantes al estrés por sequía (Cruz, 2000).

En ese contexto, una de las soluciones más prácticas y económicas se encuentra en la obtención de genotipos con cierto grado de tolerancia, mediante el desarrollo de programas de mejoramiento genético. Para esto será necesario acercar cuanto más se pueda, 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.*, 2010a).

En Cuba se han realizado numerosos estudios relacionados con la evaluación de genotipos en diferentes ambientes de producción y sus implicaciones en el mejoramiento de los rendimientos cañeros y azucareros (Gálvez, 1978; Bernal, 1986; López, 1986; Castro, 1991; Vega, 1993; González, 1995; Jorge, 1996). Los resultados de estos estudios reiteran la importancia y significación de la interacción genotipo-ambiente, lo que apunta a la necesaria evaluación multiambiental de los cultivares durante el proceso de selección, fundamentalmente en las etapas finales (Gilbert *et al.*, 2006).

Los trabajos de mejoramiento genético en relación a la sequía agrícola, desarrollados con anterioridad en el país, se han limitado en la región oriental a zonas específicas de la provincia Holguín (Cruz, 2000) y los restantes a Villa Clara y Cienfuegos en el centro de Cuba, cuyos resultados indican que la selección para este tipo de estrés solo será efectiva bajo tales condiciones (García, 2004).

Por otra parte el conocimiento de la arquitectura y distribución del sistema radical de la caña de azúcar y su relación con la respuesta de los cultivares al estrés por sequía agrícola es muy limitado y su estudio poco frecuente (Sakaigaichi *et al.*, 2007; Chopart *et al.*, 2008).

En las Unidades Empresariales de Base (UEB) de la empresa azucarera Sancti Spíritus no se encuentran identificadas las variedades en relación con las limitantes edafoclimáticas y su interrelación con el estrés por déficit hídrico y la fisiología del cultivo.

Problema científico

En la empresa azucarera de Sancti Spíritus, no existe un manejo sobre bases científicas de las variedades de caña de azúcar en función de las limitantes edafoclimáticas, que provocan el estrés por déficit hídrico y los cambios que se producen en la fisiología de la planta, que afectan los rendimientos agroindustriales.

Hipótesis

La valoración de variedades de caña de azúcar en dos localidades de la empresa azucarera de Sancti Spíritus, en función de las limitantes edafoclimáticas que provocan el estrés por déficit hídrico y los cambios que se producen en la fisiología de la planta, permitirá sentar las bases para el manejo de nuevos cultivares con vista a incrementar los rendimientos agroindustriales.

Objetivo general

Valorar el manejo de un grupo de variedades, en dos localidades de la empresa azucarera de Sancti Spíritus en función de las limitantes edafoclimáticas que provocan el estrés por déficit hídrico y los cambios que se producen en la fisiología de la planta que afectan los rendimientos agroindustriales.

Objetivos específicos

1. Identificar el fenómeno de la interacción genotipo-ambiente en dos localidades con suelos secantes de la empresa azucarera de Sancti Spíritus para las variables agro-azucareras.
2. Evaluar la influencia de las variables edafoclimáticas sobre el rendimiento agrícola en las localidades objeto de la investigación.
3. Determinar el cambio que se produce en las variables fisiológicas evaluadas en las variedades estudiadas de ambas localidades.

Novedad científica

1. La introducción de variedades y sus resultados, ante la tolerancia al estrés por déficit hídrico, en las localidades evaluadas de las UEB en la empresa azucarera Sancti Spíritus.
2. Determinación de los potenciales de producción de variedades en condiciones contrastantes de sequía agrícola.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. El cultivo de la caña de azúcar. La Agroindustria azucarera cubana

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).

La caña de azúcar es cultivada en el mundo por más de 100 países sobre un área de 22 millones de hectáreas, que representan aproximadamente el 0.5% del total dedicado a la agricultura (FAOSTAT, 2008). La producción mundial de azúcar para el período 2009-2010 se estimó en 159.6 millones de toneladas; además, se registró una tendencia al incremento de los precios del azúcar (IAPSIT, 2009).

El inicio de la Industria Azucarera en Cuba se remonta a principios de 1523, cuando por una orden del rey de España se les facilitó 4000 pesos en oro, en calidad de préstamo, a todas aquellas personas residentes en el país que estuvieran interesadas en construir ingenios para la producción de azúcar. Sin embargo, no es hasta los años 1844 y 1845 que la industria azucarera cobró gran impulso, debido al azote de dos intensos huracanes que arrasaron con, prácticamente, todas las plantaciones cafetaleras. Desde ese momento, Cuba se convirtió hasta la década del 80, en uno de los principales productores y exportadores de azúcar (Castro, 2002).

El desaprovechamiento de la superficie agrícola y los bajos rendimientos cañeros, unido a lo obsoleto de la mayor parte de la tecnología industrial, indicaron la necesidad de reformular la agroindustria azucarera (Pérez *et al.*, 2004). Esta situación condujo al Grupo Azucarero a realizar una evaluación de la aptitud física de las tierras que reservara la producción de caña en los mejores suelos (aptos y moderadamente aptos) (Villegas y Benítez, 2003).

Sobre la base de la evaluación de la aptitud física de las tierras, se procedió al reordenamiento de la agroindustria azucarera en Cuba, lo que condujo a una reducción de los centrales azucareros, quedando activos solo 56 de los 71 que existían anteriormente. (Jorge *et al.*, 2010b). De esta manera, los trabajos de

Fitomejoramiento deberán estar encaminados a enfrentar la diversificación de la industria azucarera.

Este proceso tiene como base la evaluación de la aptitud física de las tierras (Villegas y Benítez, 2003) y se ha dispuesto que la producción de caña esté sustentada en los suelos de mayor calidad (Aptos (A1) y moderadamente aptos (A 2)), no obstante aún no podrá prescindirse de áreas dentro de esas categorías con limitaciones, donde la acción combinada de los bajos acumulados anuales de precipitaciones y la escasa retención de humedad puedan producir estrés por sequía agrícola.

A pesar de que en su acepción más común se define la sequía como un período de escasas precipitaciones (Centella, 2002), su desarrollo gradual, la difícil percepción de su comienzo y final y su impacto sumamente variado, hacen compleja e inútil la utilización de un concepto único, por tanto existen tantas definiciones de sequía como objetivos hay para definir las (agrícola, hidrológica, meteorológica, etc.). Se considera sequía agrícola cuando la humedad del suelo es tan baja que limita el crecimiento y la producción de los cultivos (Pérez, 2004b), por lo que puede no haber sequía y existir sequía agrícola, porque la reserva de humedad del suelo depende más del tipo y del cultivo que de las lluvias. Es de esperar entonces que los suelos de texturas más ligeras, de mayores velocidades de infiltración y de menor área para explorar por los sistemas radicales sean los de mayores probabilidades de ocurrencia de estrés por déficit de humedad.

Resultados del proceso de evaluación de tierras del Ministerio del Azúcar (Villegas y Benítez, 2003), señalan que los suelos aptos pueden en un 30.3% presentar estrés por sequía a causa de su excesivo drenaje, lo que en términos prácticos se conoce por suelos "secantes". Situación que se torna más crítica en el 3.2% del área, donde se combinan el factor anterior con la escasa profundidad efectiva.

Estas razones han motivado el desarrollo de proyectos de investigación con vistas a establecer las bases para la concepción de programas de mejoramiento específico de obtención de variedades para condiciones de estrés por mal drenaje (Ojeda, 2009), hidrosalino (Cruz, 2000) y posteriormente estudios específicos sobre la selección de variedades de caña tolerantes a condiciones de sequía

(inferior a 1 000 mm de lluvia anuales (Cruz, 2000). Las investigaciones con relación a la sequía han sido ejecutadas en zonas de las provincias de Holguín, Villa Clara y Cienfuegos fundamentalmente en etapas iniciales e intermedias del proceso de selección de variedades. Los resultados alcanzados aún son insuficientes para la última etapa de selección de variedades por localidades con relación a la tolerancia a la sequía (García, 2006). Las investigaciones continúan a través del presente trabajo, que se ejecuta en las UEB de la empresa azucarera de la provincia en las dos localidades con precipitación por debajo de la media y en suelos de alto drenaje interno con escasa profundidad efectiva, donde la sequía es un factor determinante en la producción de caña.

La magnitud del estrés por sequía agrícola alcanza 30.3% del área nacional y de manera particular la provincia Sancti Spíritus el 7.6%, ante tal situación se torna más crítica en el 0.7% del área, donde se combinan el factor alto drenaje interno con la escasa profundidad efectiva. Ante tales limitaciones una de las soluciones más práctica y económica, lo constituye la evaluación de los individuos obtenidos y seleccionados por el programa de mejoramiento genético del país con cierto grado de tolerancia a la sequía.

Si bien es cierto que con el proceso de reordenamiento de la industria azucarera cubana a muchas de las áreas de mayores probabilidades de presentar este tipo de estrés se le destinó otro tipo de uso, aún no podrá prescindirse de la totalidad de ellas e incluso en una buena parte de las que propone mantener el cultivo, se cumple la sentencia de que muchos problemas agrícolas se deben a la existencia de tierras “buenas” en zonas de condiciones climáticas no muy favorables (De Armas *et al.*, 1988).

Tabla 1. Distribución de los suelos aptos¹ con drenaje excesivo² (porcentaje del área total) en relación con la profundidad efectiva.

Provincia	Profundidad efectiva			Total (%)
	< 20 cm	20-50 cm	> 50 cm	
P. del Río	-	-	-	-
Habana	23.4	3.0	13.2	39.6
Matanzas	-	1.2	3.5	4.7
Villa Clara	4.0	27.5	8.4	42.9
Cienfuegos	2.9	28.8	15.5	47.2
S. Spíritus	0.7	4.7	2.3	7.6
C. Ávila	0.5	13.3	17.1	30.9
Camagüey	2.4	39.5	9.1	51.0
Las Tunas	4.9	31.4	2.0	38.3
Holguín	-	0.7	0.3	1.0
Granma	1.6	20.0	13.3	35.0
Santiago de Cuba	0.3	14.2	1.3	15.8
Guantánamo	0.1	-	-	0.1
Total	3.2	18.9	8.2	30.3

Fuente: Base de datos Evaluación de tierras del MINAZ-INICA, 2001

¹ Incluye las categorías A1, A2 y A3

² Incluye las categorías altamente drenados y muy altamente drenados.

La situación expuesta plantea un gran desafío en la búsqueda y aplicación de soluciones, y en el diseño de estrategias para superar los actuales valores de producción de azúcar por unidad de superficie; donde las investigaciones continúan a través del presente trabajo de investigación, con las evaluaciones de variedades en las diferentes zonas afectadas por estrés ambiental, en este caso por sequía agrícola (Jorge, 2008).

2.2. Mejoramiento Genético de la caña de azúcar

Los cultivares comerciales de caña de azúcar son híbridos originados de progenies de cruces entre cañas “nobles” (*Saccharum officinarum* L.) y silvestres (*S. spontaneum* L., *S. sinense* Roxb., o *S. barberi* Jesw.), que fueron retrocruzados con *S. officinarum* en un proceso llamado “nobilización” (Edmé *et al.*, 2005). El objetivo central de cualquier programa de mejoramiento de un cultivo de importancia económica es la liberación de cultivares más productivos, resistentes a las principales plagas y adaptados a las más disímiles condiciones de explotación comercial (Bernal *et al.*, 1997).

En los principales cultivos de los Estados Unidos se ha estimado que la contribución del Mejoramiento Genético al incremento de los rendimientos es de alrededor del 50% (Frisvold *et al.*, 1999). Por su parte, Hogarth (1976), en Australia, atribuyó al Mejoramiento Genético el 75% del incremento de los rendimientos de la caña de azúcar. Similar estimación se ha hecho en otros cultivos, con vistas a trazar una estrategia necesaria para lograr mayores avances en este aspecto (Lauer *et al.*, 2001).

Heinz (1980) señaló que la mayoría de los éxitos alcanzado en el mejoramiento genético de la caña de azúcar se han logrado a partir de los primeros híbridos obtenidos en Java de la India, mientras otros autores han subrayado la limitada base genética de los híbridos actuales, enfatizando la necesidades de ampliar ésta.

Los primeros trabajos de mejora consistieron en la recopilación de panículas fecundadas libremente. Los resultados que se podían esperar por este método dependían, en gran medida, del progenitor que producía la semilla y de la proximidad de progenitores masculinos adecuados (Pérez *et al.*, 1997).

Muy pronto se tuvo en cuenta buscar un mejor control de los cruzamientos. Así, en Java, comenzaron a emplearse como progenitores femeninos, variedades que producían poco o ningún grano de polen, situándolas en forma de tableros de ajedrez junto a variedades seleccionadas productoras de grano de polen. Posteriormente, comenzaron a controlarse los cruzamientos mediante linternas de cristal o bolso de tela para proteger el progenitor femenino, mientras que,

diariamente, se espolvoreaba el grano de polen de los masculinos sobre las primeras (Pérez *et al.*, 1997).

En Cuba los trabajos de mejoramiento se iniciaron, en 1905, por R. H. Grey, en el jardín botánico de la universidad de Harvard, en Cienfuegos. Posteriormente en 1943 aunque en forma inestable, comenzaron trabajos en este sentido en la estación experimental agronómica de Santiago de las Vegas, en 1948 en el entonces central Jaronú, a partir de 1952 en el antiguo central Presto. Los trabajos iniciados en Santiago de las Vegas pasaron a partir de 1949, para la nueva estación experimental de Jovellanos la cual adoptó, como tarea principal el mejoramiento genético del cultivo, en 1964, se fusionaron todos los trabajos que hasta entonces se había desarrollado en el país, a la vez se creaba el Instituto de Investigación de la Caña de Azúcar (INICA), que mantiene entre sus objetos principales la obtención y selección de nuevas variedades de caña de azúcar (González, 2005).

En el contexto de la agricultura cañera cubana, con la creación del (INICA) en 1964, el resultado más relevante se ha obtenido en el mejoramiento genético del cultivo. Esto se ha reflejado en el incremento de los cultivares nacionales, en la composición varietal del país; si en 1943 solo el 2% del área cañera nacional era ocupada por cultivares cubanos, en 1979 era de un 36% (Bernal *et al.*, 1997), y ya al cierre de 2010 era de un 84.8% (INICA-MINAZ, 2011).

Otra línea del Mejoramiento Genético de la caña de azúcar en el país ha sido la obtención de cultivares de alto contenido azucarero (González *et al.*, 2001). También se ha trabajado en la obtención de genotipos para la producción de biomasa, con la finalidad de ser utilizada como alimento animal (Jorge *et al.*, 2010a) o para la producción de energía (Campo *et al.*, 1998); de ahí que se inicien los primeros pasos para dar respuestas a las áreas afectadas por sequía agrícola, salinidad y mal drenaje (Cruz, 2000).

2.3. Interacción genotipo-ambiente en el cultivo de la caña de azúcar

La creación del Instituto de Investigaciones de la Caña (INICA) en 1964 integró el Mejoramiento Genético en el país. A partir de esta fecha se comenzó a desarrollar un trabajo más profundo en el establecimiento de programas, estrategias y normas metodológicas, se implementó un Esquema de Selección que responde a una Red Experimental y se ampliaron las investigaciones multidisciplinarias en función de la actividad de obtención de nuevas variedades.

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

Campbell y Jones (2005) definen la interacción genotipo-ambiente, para un carácter dado, como la respuesta diferencial de un genotipo o 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 genotipos aptos a un ambiente específico, así como un comportamiento general aceptable a varios ambientes (Lavoranti, 2003).

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).

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).

Kang (1998) al referirse a las causas que determinan la existencia de interacción genotipo-ambiente, planteó que la mayor interacción puede esperarse cuando, por una parte, existe una amplia variabilidad entre los genotipos para caracteres morfofisiológicos que confieren la resistencia (o susceptibilidad) a uno o más tipos

de estrés y, por otra, cuando es apreciable una amplia variación entre los ambientes para la incidencia de los mismos factores de estrés (determinados por el clima, el suelo, factores bióticos, y factores de manejo).

En Cuba, en las últimas tres décadas, se han realizado numerosos estudios relacionados con el tema de la interacción genotipo-ambiente. En la región occidental se destaca el trabajo de Gálvez (1978), en la zona central los estudios de López (1986), Jorge (1996) y García (200) y en la oriental los trabajos de Bernal (1986), Castro (1991) y González (1995). Estos estudios revelan, comúnmente, 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. No obstante, el estudio de este aspecto no ha sido abordado con amplitud en los últimos 15 años, a pesar de los grandes cambios producidos en la industria azucarera cubana.

Los estudios de interacción genotipo-ambiente anteriormente mencionados, fueron desarrollados sin estrés ambiental, y que si en algún caso estuvo presente no fue considerado 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 genotipo 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 en estos materiales que se liberan, sino también para la selección y recomendación de los mismos a los productores (Gilbert *et al.*, 2006).

Para el cultivo de la caña de azúcar, el ambiente es una integración de un conjunto de factores, entre los que se destacan el suelo con todas sus características y el clima con sus elementos, siendo los más importantes las precipitaciones y su distribución, la temperatura y la humedad relativa. Estos factores y elementos pueden proporcionar una gama de combinaciones tan disímiles y, a veces impredecibles, que provocan una gran variación en las

respuestas de los genotipos, pero observándose siempre grandes efectos modificadores del ambiente, como lo reportan González (1994) y Mesa (1995).

Un genotipo puede expresar diferentes fenotipos en dependencia del ambiente donde este se exprese, todos sus componentes pueden resultar de interés fitotécnico. Los genotipos relativamente no tienen la capacidad de expresarse de la misma manera en cualquier ambiente, lo que tiene que ver con su sensibilidad al cambio ambiental, sea este ambiente de expresión una diferente localidad, año agrícola o tratamientos agrícolas tales como riego, fertilización, densidad o época de siembra, heterogeneidad del suelo por citar algunos de ellos. Por lo que se puede hacer referencia a genotipos más o menos estables en la expresión de sus atributos. Si los genotipos muestran diferencias y estas se mantienen constantes en los diferentes ambientes, entonces puede decirse que no ha ocurrido interacción genotipo-ambiente. De suceder lo contrario, si se modifican las diferencias de expresión por cada ambiente, entonces si ocurre interacción genotipo-ambiente (García, 2004).

Este autor, en un estudio realizado bajo condiciones de estrés hídrico, en la región central del país, señaló la no existencia de solapamientos entre los diferentes ambientes estudiados, y una mayor magnitud de la contribución del ambiente respecto a otros reportes. Esto hace suponer que en estas condiciones de sequía su efecto se acentúa, lo que sugiere que la selección para este tipo de estrés solo será efectiva bajo tales condiciones. Este mismo autor, al tener en cuenta las variables hidrofísicas del suelo y fisiológicas que se asociaron con el estrés por sequía, recomienda que los trabajos de mejora deberán encaminarse hacia la búsqueda de genotipos con sistemas radicales capaces de aprovechar el agua muy eficientemente, así como, de masa foliar provista de mecanismos que le permitan atenuar el desbalance entre la lluvia y la evapotranspiración.

2.4. Estabilidad y adaptabilidad fenotípica. Métodos estadísticos para su estimación

En el contexto de la evolución biológica la adaptación es un proceso, es el nivel de adaptación de la planta a un ambiente dado, y la estabilidad, es la habilidad de

mostrar buena adaptación en un rango amplio de ambientes (Tigerstedt, 1994). En el contexto del mejoramiento de plantas, los dos conceptos relacionan a una condición, en lugar de un proceso, indicando la habilidad del material de ser de alto rendimiento con respecto a unas condiciones dadas (Gallais, 1992; Cooper y Byth, 1996).

En el mejoramiento para una amplia adaptación (adaptabilidad), el objetivo es obtener una variedad con un buen funcionamiento en casi todos los ambientes; en el mejoramiento para una adaptación específica, el objetivo es obtener una variedad que funcione bien en un subconjunto definido de ambientes dentro de una región designada. La respuesta adaptativa de una variedad se evalúa con respecto a otros genotipos y tiende a modificarse según la calidad de los genotipos disponibles (Annicchiarico, 2002).

Algunos autores han aplicado el concepto de estabilidad del rendimiento a la consistencia en el tiempo de la respuesta genotípica, usando el concepto de adaptabilidad, con respecto a la consistencia en el espacio (Barah *et al.*, 1981; Lin y Binns, 1988; Evans, 1993).

En la determinación de la adaptabilidad y estabilidad del rendimiento se han desarrollado variados métodos para estudiar el comportamiento de los genotipos, de ellos el de la regresión lineal (Eberhart y Rusell, 1966) ha sido el más ampliamente usado, teniendo como limitaciones fundamentales, que no en todos los casos la respuesta de las variedades se presenta de manera lineal, así como la dependencia al grupo de genotipos estudiados, pues el índice ambiental responde al promedio de todos en cada ambiente evaluado (Gálvez, 1978).

Aplicando técnicas de análisis multivariados y basado en el análisis de Coordenadas Principales, Westcott (1987) propuso un nuevo método de estabilidad, el cuál mediante un modelo estima la similitud entre dos genotipos en un ambiente.

En el cultivo de la caña de azúcar Jorge *et al.* (1996), mediante el estudio de 10 variedades, evaluadas en nueve ambientes, arribaron a conclusiones similares en cuanto a las ventajas del método de Coordenadas Principales sobre el de la regresión lineal, e incluso sobre otros métodos como el de la Ecovalencia (Wright,

1971) y el coeficiente de determinación (Bilbro y Ray, 1976) con los que también fue comparado. En la determinación de la estabilidad de las familias, en etapas iniciales de selección, también fue ensayado con éxito este nuevo método de estabilidad (Jorge, 1996).

Más recientemente bajo condiciones de estrés por sequía y mal drenaje, García (2004), aplicó con éxito ese propio método en la caracterización de combinaciones y variedades de caña de azúcar en la región central de Cuba.

La técnica que más se está utilizando en la actualidad para el estudio de la interacción genotipo-ambiente se encuentra el método efectos principales aditivos e interacciones multiplicativas (AMMI) propuesto por Gauch y Zobel (1988) y que se está empleando en caña de azúcar (Manigbas, 2002; Rodríguez *et al.*, 2008; Handj, 2009).

2.4.1. Modelos AMMI

El método AMMI no sólo permite estimar estabilidad sino también evaluar localidades y como consecuencia clasificar ambientes (Crossa *et al.*, 1990; Saindon y Schaalje, 1993); además de permitir una representación bidimensional (*Biplot*) de filas (genotipos) y columnas (ambientes), según (Borrero *et al.*, 2004); (Queme *et al.*, 2005 y 2007).

2.5. Variedades de caña de azúcar

No existen dudas acerca de que el aumento o disminución de los rendimientos en las áreas cañeras, se encuentran estrechamente relacionados con el éxito o el fracaso de las variedades predominantes. La caña de azúcar posee mecanismos fisiológicos eficientes para la producción y acumulación de sacarosa en el tallo y para la producción de biomasa, los que el hombre ha ido perfeccionando con la obtención de nuevas variedades, las que emplean con mayor eficiencia la luz, los nutrientes y, en particular, el agua. Las variedades de caña de azúcar en el país y en el mundo azucarero están sujeta al deterioro que obliga a su renovación y reemplazo irreversible por nuevos cultivares de mejor adaptabilidad a diferentes condiciones edafoclimáticas y con requisito agroindustriales y fitosanitarios

superiores a los existentes. Para lograr estos objetos, es necesario mantener un programa de mejoramiento que garantice la continuidad de la producción azucarera (Jorge *et al.*, 2001).

El INICA tiene como objetivo central la obtención, selección y recomendación de variedades de caña de azúcar para dar respuestas a las necesidades existentes. No obstante del trabajo desplegado y la primera recomendación de 12 variedades de caña de azúcar (My53108, My5329, My5464, My5465, My5469, My53174, My5369, C51-51, C86-51, C87-51, CG127-45 y Co421), realizada por el INICA, se mantiene la línea de explotación de un solo cultivar (Jorge *et al.*, 2001).

En 1976 la variedad B4362 ocupó el primer lugar como variedad comercial con el 45.4 % del área nacional, seguida por Ja60-5 (17.9%), elevándose los porcentajes de otras variedades como C87-51 (8.4%) y PR980 (6.2%); no obstante el incremento de estas nuevas variedades cubanas se mantuvo una inclinación hacia la explotación monovarietal del cultivo (Jorge *et al.*, 2001).

El perfeccionamiento del Programa de Fitomejoramiento establecido por el INICA ha permitido dar continuidad al trabajo de obtención de variedades, recomendándose un grupo de genotipos para las diferentes regiones agro climáticas del país o condiciones específicas, teniendo como requisito indispensable la resistencia probada a las principales patologías del cultivo (Jorge *et al.*, 2008).

2.6. Manejo de las variedades de caña de azúcar

En Cuba desde el año 1965, periódicamente se realiza una revisión de los cultivares existentes y su capacidad para dar respuesta a diferentes condiciones ambientales y estrategias de cosecha, incluidas entre ellas: aptitud para la mecanización, comportamiento ante plagas y enfermedades, adaptabilidad a diferentes tipos de suelos, y en cuanto a su maduración si son capaces de satisfacer los diferentes períodos de cosecha, garantizando altos rendimientos agrícolas e industriales (Jorge *et al.*, 2001).

En 1998 comenzó a implementarse y se completó en el 2001 a todas las empresas del país, el servicio de variedades y semilla (SERVAS), resultado de

más de 40 años de trabajo en el mejoramiento genético, introducción y evaluación de cultivares, que comprende un conjunto de métodos y procedimientos para su ordenamiento y manejo de la semilla, con el propósito de optimizar el aprovechamiento del potencial genético, disponible para la producción cañera y minimizar el desfavorable impacto de las plagas y enfermedades.

El SERVAS ofrece al productor seguridad en la correcta ubicación de las variedades e información acerca de la composición de variedades con perspectivas, necesidades de semilla por categoría y época de plantación y la aplicación de tecnologías de producción de semilla que propicien reducir el costo y la duración de la cadena, entre otros (González *et al.*, 1999).

El SERVAS ha devenido en una poderosa herramienta para la organización, efectiva ejecución y control de las actividades de la producción cañera. Los proyectos de variedades elaborados y monitoreados por esa tecnología, contribuyeron a acelerar la necesaria reducción de la Ja60-5, que entre 1991 y 1996 había decrecido menos del 6% (González *et al.*, 2007).

2.7. El régimen hídrico y los procesos fisiológicos de las plantas

El déficit hídrico se produce siempre que la pérdida por transpiración sea mayor que la absorción y está caracterizado por una reducción del contenido hídrico, el potencial osmótico y del potencial de agua, acompañado por la pérdida de turgencia, el cierre de los estomas, la reducción de la actividad fotosintética y por ende del crecimiento. El déficit hídrico del medio día se produce por el retraso de la absorción respecto a la transpiración, ya que ambos factores son independientes.

Casi todos los procesos fisiológicos en la planta se ven afectados por el déficit de agua. Veamos sólo los más importantes:

a) **Fotosíntesis:** Este proceso se afecta debido a las siguientes causas:

- El cierre hidro-activo de los estomas provoca la reducción del suministro de CO₂.

- Afectación en la translocación de los fotosíntatos. El déficit de agua disminuye la translocación de los productos de la fotosíntesis y la acumulación de ellos en el sitio de producción provoca la limitación de la fotosíntesis, aun cuando otros factores no son limitantes.
- El estrés de agua en la ultra estructura del citoplasma afecta la actividad enzimática.
- La deshidratación de la cutícula de las paredes celulares y de la membrana celular de la epidermis disminuye su permeabilidad al CO₂.

En el cultivo de la caña de azúcar si se varia la humedad del suelo, la recuperación de la fotosíntesis no es tan rápida como la de humedad del suelo, debido a que el protoplasma necesita un cierto tiempo para restablecer sus capacidades metabólicas, destacándose que a medida que se repiten los ciclos de sequía las plantas recuperan más rápido su nivel de actividad fotosintética, como si ésta se adaptara a los ciclos repetidos de sequía.

b) Respiración: Debido a que la mayoría de las reacciones bioquímicas de la respiración y la estructura y función de las enzimas respiratorias son afectadas por el déficit de agua,

c) Crecimiento: La falta de agua afecta el crecimiento debido a la inhibición que se produce en la síntesis de sustancias reguladoras del crecimiento, así como directamente sobre los procesos de elongación y división celular.

d) Absorción y traslado de nutrientes: Las raíces no pueden absorber los iones que no llegan a su superficie y el agua es la encargada de trasladarlos en el suelo. Posteriormente el movimiento del agua por el xilema, a través de las corrientes transpiratorias, se encarga de trasladarlos.

e) Metabolismo del carbono: El metabolismo del carbono está determinado por tres procesos fundamentales: la fotosíntesis, la respiración y la foto-respiración, cualquiera de los cuales se afecta con la carencia de agua.

2.8. Requerimientos hídricos de la caña de azúcar

Reynoso (1878), definió en su ensayo a la caña de azúcar como una planta de regadío, resaltando sus exigencias en ese sentido. Al respecto Fonseca y García (1987), confirmaron el efecto determinante de las épocas de plantación, la evapotranspiración real y la lluvia aprovechable en la definición de las necesidades de agua para la caña de azúcar en el occidente de Cuba.

El elemento climático más variable es la lluvia, con un acumulado medio anual para Cuba de 1 375 milímetros (mm). En el período lluvioso se registra aproximadamente el 80% del total de lluvia anual y en el seco el 20% restante. Del potencial hidráulico del país, 83.2% son recursos superficiales y 16.8% son subterráneos. De estos recursos potenciales, son aprovechables, el 75% de las aguas superficiales y 25% de las subterráneas. La infraestructura hidráulica sólo permite utilizar el 57% de los recursos aprovechables. Lo anterior significa que es imprescindible para el porvenir, el desarrollo de una acertada política de uso y aprovechamiento de los recursos hidráulicos, de manera tal que los mismos satisfagan las necesidades del desarrollo nacional en concordancia con los principios de sostenibilidad y de la preservación de la calidad de vida y medio ambiente (Saborit, 2003; Rábago, 2005).

González y Cruz (1987), determinaron que en los suelos Ferralíticos rojos, la norma neta total y el número de riegos varía en correspondencia con el año climático y la fecha de plantación o del corte y que los mayores requerimientos, correspondieron a la cepa de caña planta de frío una norma total de 7 650–8 100 m³ ha⁻¹ entregados en 17–18 riegos en años secos medios, por otra parte Del Rosario y Viqueira (1992), mediante el análisis de 260 cosechas de experimentos donde participaron 21 variedades, diferentes zonas climáticas, tipos de suelo, cepas, ciclos, técnica y régimen de riego, obtuvieron que las normas de riego y las producciones complementarias de caña variaron significativamente con los ciclos de cosecha, donde las plantaciones en época de frío ofrecieron la mayor producción pero requirieron de los mayores volúmenes de agua.

Con un enfoque genético – fisiológico de este aspecto y a partir del estudio de un grupo de variedades de caña de azúcar de alta, media y baja sensibilidad al riego,

(Ferrer *et al.*, 2000) encontraron que variables fisiológicas y biofísicas como los contenidos de fibra, número de hojas activas, termo resistencia de las membranas celulares y los parámetros de fluorescencia variable de los pigmentos clorofílicos, tuvieron un papel importante en la respuesta hídrica de la caña de azúcar.

Guntín y Tejeda (2007), en el norte de la provincia Las Tunas, señalaron diferencias en las necesidades hídricas de la caña de azúcar por tipo de suelo, con normas netas de riego de 287 mm para los suelos Pardos Sialíticos y 316 mm para los Vertisoles. (García *et al.*, 2003), en un estudio sobre sistema de riego por goteo en dos unidades de producción cooperativa de las provincias La Habana y Granma y en cepas de caña planta, cosechadas con 19 y 20 meses de edad, obtuvieron rendimientos de 206 a 223 t caña ha⁻¹, respectivamente. De manera general, estos autores coinciden en resaltar la variación que introduce en los resultados la utilización de diferentes cultivares. Esto presupone una respuesta genética factible de ser mejorada, con la finalidad de obtener genotipos capaces de aportar producciones económicamente ventajosas en condiciones de estrés por déficit hídrico; lo cual es común aún en condiciones de suelos favorables, donde estas situaciones se presentan en determinados períodos.

Los estudios científicos sobre variedades adaptadas a condiciones de estrés hídrico y salino, las tecnologías para áreas marginales, el uso del riego con técnicas ahorradoras de agua y de energía, entre otros, ponen a Cuba en condiciones de contribuir a la mitigación por los efectos del cambio climático que se producirá sobre la agricultura (García y Jorge, 1994).

2.9. La sequía agrícola en Cuba

El territorio cubano está situado en la zona de climas tropicales y subtropicales. La extensión total es de 110 922 km², con una longitud de este a oeste de 1 200 km y un ancho que varía entre 31 y 190 km. La lluvia se encuentra desigualmente distribuida, tanto espacial como temporalmente (Pérez *et al.*, 2004b). En las zonas evaluadas en ambas UEB, los acumulados medios anuales de lluvias alcanzan los 1 136.3 mm, por debajo de la media provincial (1 425.3 mm). Las magnitudes de sus acumulados reflejan acentuada estacionalidad, con un período estacional

lluvioso de mayo a octubre, que acumula el 80% del total anual; y un período poco lluvioso de noviembre a abril, que recibe el resto de las precipitaciones (Centella *et al.*, 2006).

Por otra parte, la diferencia en los valores de evaporación media anual es de más de 300 mm entre la provincia Pinar del Río (1 700 mm) y Guantánamo (2 005 mm). Este comportamiento, unido al de las lluvias, determina que el clima en su conjunto sea más árido en la región oriental (Pérez *et al.*, 2004b).

En el contexto de la agricultura, la sequía no comienza cuando cesa la lluvia, sino cuando las raíces de las plantas no pueden obtener más humedad del suelo (Centella *et al.*, 2006). Según la Organización Meteorológica Mundial “hay Sequía Agrícola cuando la cantidad de precipitación y su distribución, las reservas de agua del suelo y las pérdidas debido a la evaporación se combinan para causar disminuciones considerables del rendimiento de los cultivos y del ganado” (ONS, 2008; Rodríguez, 2012). Existen tantas definiciones de sequía como objetivos hay para definir las; sin embargo, un denominador común en todas las definiciones es la escasez de precipitaciones con respecto a un comportamiento normal.

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 °C, acompañado de una elevación del valor promedio de la mínima en 1.4 °C. En el caso particular de la sequía meteorológica, los eventos moderados y severos se duplicaron en el período de 1961 a 1990 con respecto al período anterior de 1931 a 1960, con un déficit en los acumulados anuales de lluvias de un 10%. Esa disminución se concentra en los meses del período húmedo mayo-octubre (Lapinel *et al.*, 2010a).

En la región oriental los eventos de sequía han sido más acentuados. En el período que abarca desde 1991 a 2005 el déficit acumulado de precipitaciones fue de 800 mm, para un promedio anual de 57 mm (Centella *et al.*, 2006). Recientemente, durante los años 2008 y 2009, ocurrió otro significativo período seco, que afectó extensas zonas agrícolas (Lapinel, 2010b) (Figura 1).

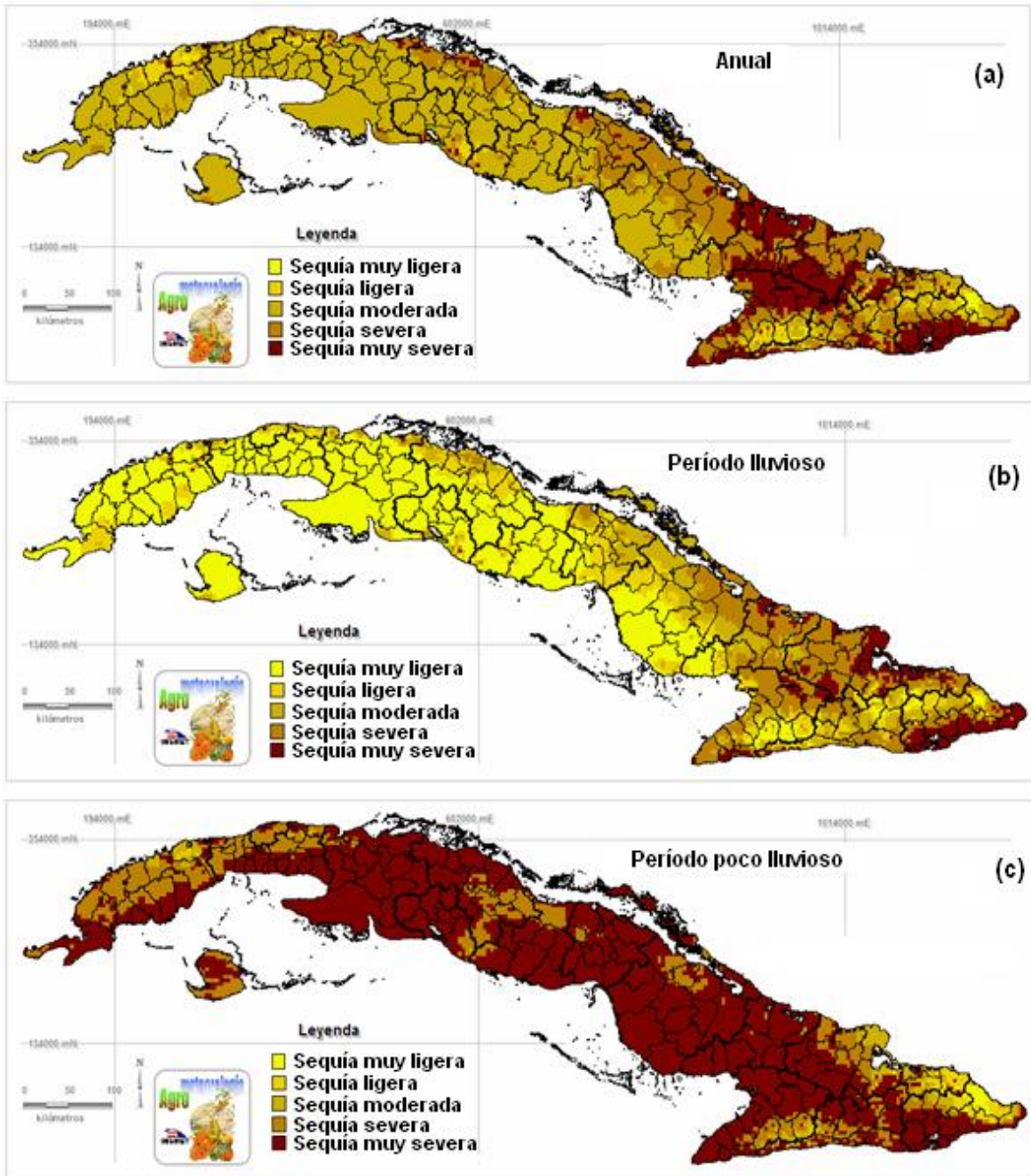


Figura 1. Diagnóstico de la intensidad de la sequía agrícola en Cuba para un año normal: anual (a), período lluvioso (b) y período poco lluvioso (c).

2.10. Fisiología de las plantas en estrés por déficit hídrico

Cuando una planta está sometida a condiciones significativamente diferentes de las óptimas para la vida, se dice que está sometida a estrés. Existen evidencias

que indican una alta sensibilidad de la fotosíntesis en las plantas C4, como la caña de azúcar, al estrés por déficit hídrico (Ghannoum, 2009). La respuesta del organismo puede ser una deformación o cambio físico (rotura de membranas celulares, flujo citoplasmático, etc.) o una deformación química (cambios en la síntesis de metabolitos) (Valladares, 2004).

La pérdida de agua por transpiración es inevitable, pues la planta necesita abrir los estomas para facilitar la absorción de CO₂. Esta absorción es consecuencia de la pérdida de humedad por transpiración, lo cual indica el equilibrio de estos dos procesos, que son signos del estado hídrico de la planta. Cuando este equilibrio se pierde, las células y tejidos se deshidratan y como consecuencia incrementan su temperatura (Henckel, 1964). A partir de este momento se inicia una serie de ajustes: cierre estomático, reducción del contenido de agua en las hojas y asimilación de CO₂, disminución del proceso fotosintético y transpiratorio, suspensión de la división celular y descenso del alargamiento, alteración de los procesos hormonales y, como consecuencia, la reducción del crecimiento (Ghannoum, 2009).

2.11. Mecanismos de resistencia al estrés por déficit hídrico

El conocimiento de los mecanismos de resistencia al estrés permite comprender los procesos evolutivos implicados en la adaptación de las plantas a un ambiente adverso y predecir hasta cierto punto la respuesta vegetal al incremento de la adversidad (Valladares, 2004). La resistencia a la sequía agrícola es conferida a las plantas por alguno o por la combinación de cuatro mecanismos: escape, evasión, tolerancia y recuperación (Figura 2). Cada uno estos mecanismo incluye varios caracteres, que pueden ser manejados por los mejoradores de plantas (Arrandea, 1989).

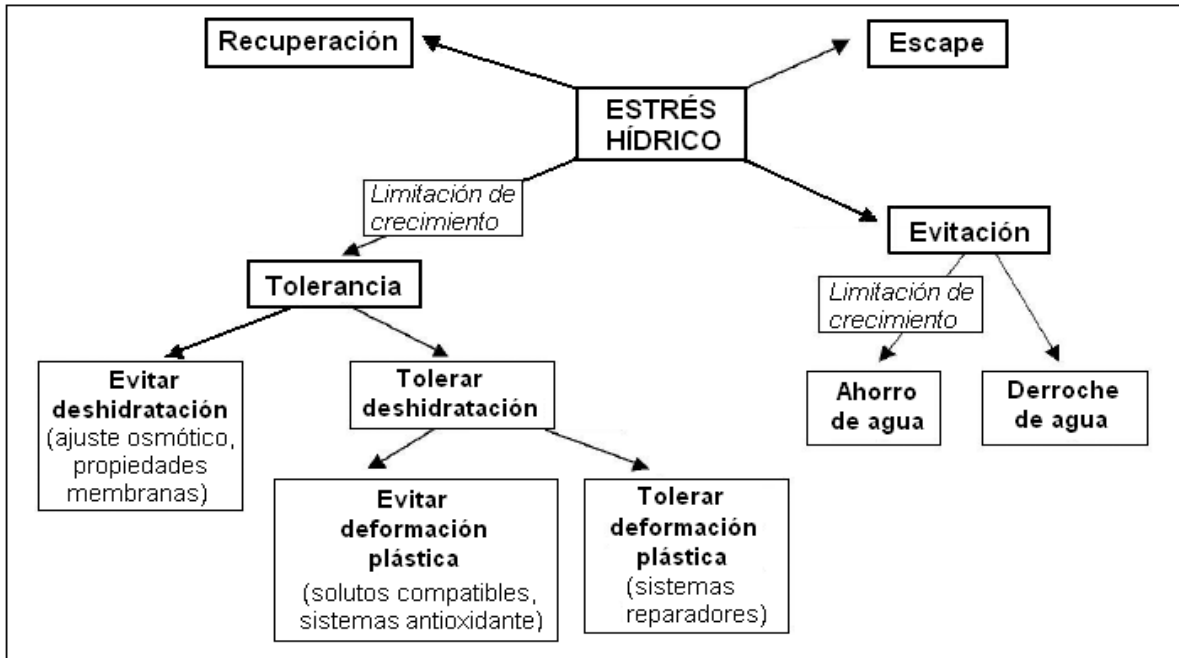


Figura 2. Mecanismos fisiológicos de resistencia al estrés por déficit hídrico (según Valladares, 2004).

Las especies evitadoras de la sequía serían especies homeohídricas (comportamiento hídrico estable) o bien “reguladoras”, ya que con la regulación de la transpiración evitarían tensiones excesivas en el xilema; mientras que las especies tolerantes serían “conformistas” (Valladares, 2004). Otro tipo de estrategia es la estrategia elusiva o de escape de la sequía, que es aquella en la cual las plantas completan su ciclo vital antes de la llegada del estrés hídrico.

Según Levitt (1980), las especies con estrategia tolerante son las plantas que soportan la afectación del estrés en sus tejidos. Estas especies tienen mecanismos que minimizan o eliminan la deformación que pueden sufrir como consecuencia del estrés, pues logran alcanzar un equilibrio termodinámico con el estrés sin sufrir daños. Un aspecto importante de esta estrategia son los mecanismos reparadores de ese estrés, que la planta pone en funcionamiento cuando este ha dejado de actuar.

2.12. Indicadores morfofisiológicos de la tolerancia al estrés por déficit hídrico

Se han desarrollado varias pruebas para evaluar los cultivares que pueden ofrecer buenos rendimientos bajo condiciones adversas. Entre estas se destaca, por su rapidez y bajo costo, la tolerancia al calor (Chen *et al.*, 1982; Gómez *et al.*, 1981) a partir de que en el campo se ignora hasta qué punto las plantas se ven afectadas por las altas temperaturas, estudiaron dos variedades de caña de azúcar resistentes a la sequía agrícola (My5465 y My5715) y una susceptible (C87-51), a la cual le realizaron una prueba de tolerancia al calor. Estos autores pudieron comprobar que la variedad susceptible se afectó en mayor grado por los aumentos de temperatura.

En otros trabajos (Gómez *et al.*, 1986) evaluaron 19 cultivares en tres localidades de la provincia La Habana, lo que permitió estratificarlos en tres grupos (resistentes, moderadamente resistentes y susceptibles) de acuerdo con su tolerancia al calor, con una alta correlación con su resistencia a la sequía agrícola en el campo. Por su parte, (Mojena *et al.*, 1990a) utilizaron este método para evaluar la resistencia al estrés por déficit hídrico en nueve cultivares de caña de azúcar, de estos se reportaron como resistentes al calor los genotipos C290-73 y C439-72 y como susceptibles B63118, C1051-73, C1616-75 y C87-51, resultados que más tarde se correspondieron con el comportamiento de esas variedades en la práctica comercial, lo que avaló la fiabilidad de ese método en la detección de la tolerancia de los cultivares al estrés por déficit hídrico.

Otro de los ensayos desarrollados con los propósitos anteriores, es la determinación de la pérdida de agua en hojas separadas, ya que el contenido relativo de agua (CRA) bajo un estrés dado constituye una medida de la tolerancia de las plantas a la sequía agrícola. Este método desarrollado por Slávik (1974), se basa en las pérdidas ocurridas por transpiración en ciclos largos, bajo condiciones de sequía artificial y en la capacidad hidrorreguladora de las plantas de contrarrestar los efectos de la deshidratación, a la vez que permite determinar los límites de la variabilidad adaptativa y con ello establecer el grado de resistencia de las plantas a la sequía agrícola (Kozhusko, 1982).

Estudios de (Gómez *et al.*, 1990), efectuados para valorar la eficiencia del CRA en caña de azúcar a diferentes tiempos de desecación, concluyeron que los mejores ajustes para cada variedad se obtienen con el modelo logarítmico. A partir de las pendientes y los términos independientes del modelo, se pueden agrupar las variedades en dependencia de su grado de resistencia a la sequía agrícola, por lo que el método puede constituir un criterio útil para la evaluación de la resistencia de las variedades. Igualmente, García (2004), en un estudio de 16 variedades en la provincia de Cienfuegos, utilizó con éxito este indicador en la predicción de la tolerancia a la sequía agrícola, además le añadió a este indicador el déficit de saturación hídrica, ancho del limbo e índice de área foliar, como otros criterios de la tolerancia.

Las posibilidades de la resistencia eléctrica como método de diagnóstico de tolerancia al estrés a condiciones adversas por déficit de humedad en el suelo, fueron investigadas por (Ferrer *et al.*, 1987). Estos investigadores determinaron que la resistencia del tejido a la corriente eléctrica varió en correspondencia con la resistencia de las variedades a la sequía agrícola, ya que el testigo resistente Ja60-5 presentó el porcentaje de variación más bajo y C87-51 patrón susceptible que resultó mucho más alto.

Por otra parte, el enrollamiento foliar (ERF) como indicador del estado hídrico de las plantas, ha sido objeto de estudio en arroz (*Oryza sativa*, L.) y trigo (*Triticum aestivum*, L.). Con este mecanismo se han obtenido resultados satisfactorios, pues el mismo reduce el área foliar efectiva y la transpiración; de esta manera se convierte en un recurso potencialmente útil en la disminución de la sequía agrícola en zonas áridas (Clarke, 1996).

Barquié *et al.* (1997) utilizaron este indicador para clasificar la respuesta de nueve genotipos de caña de azúcar plantados en suelos afectados por la salinidad y la sequía. Los resultados de este estudio expresan una fuerte y positiva correlación entre el enrollamiento foliar y el tiempo de exposición de las hojas e indirecta de estos con el CRA ya que las variedades de mejor crecimiento y desarrollo presentaron mayores valores de CRA y de recuperación hídrica, así como menores valores de ERF y de área foliar.

Otros indicadores morfológicos y fisiológicos, ampliamente utilizados en la determinación de la resistencia a la sequía agrícola, son: densidad estomática (Diez *et al.*, 1987), contenidos de clorofila a y b y carotenoides (Gómez *et al.*, 1981), actividad de la nitrato reductasa (Viqueira *et al.*, 1981), contenido de prolina libre (Mojena *et al.*, 1990; García y Medina, 2003, Errabii *et al.*, 2006), pigmentos totales y proteínas (Torres *et al.*, 1994; Trujillo *et al.*, 2009).

Además de los métodos anteriores, se han empleado otros, tales como: salida de electrolitos de una muestra foliar una vez sumergida en agua destilada (Hernández y Amaya, 2002), número y longitud de las raíces (García y González, 1997), índices de fosfatos y de esclerofilia, grado de succulencia, así como número de hojas activas (Torres *et al.*, 2001). Estos métodos presentan mayor o menor grado discriminatorio, en dependencia de su uso y de los objetivos que se persigan en cada caso.

A pesar de los resultados anteriores, el Programa de Mejora cubano para la obtención de nuevas variedades, aún no se dispone de una metodología donde estén integrados los métodos anteriores lo que sugiere su estudio por lo ventajoso que resultaría disponer de tal herramienta.

2.13. Sistema radical de la caña de azúcar y su relación con el estrés por déficit hídrico

Las raíces son importantes por su papel en la nutrición vegetal. Uno de los factores de mayor relevancia relacionado con el complejo planta-agua-suelo es la arquitectura y distribución del sistema radical, así como su dinámica de crecimiento (Vasconcelos, 2002; Clark *et al.*, 2003).

Cuando se planta una estaca de caña, se desarrollan dos clases de raíces; primero, las raíces del esqueje y luego, las raíces de los vástagos. Las raíces del trozo, originadas en el anillo radical de la estaca, son delgadas y muy ramificadas; mientras que las raíces de los vástagos son gruesas, carnosas, blancas y menos ramificadas. Estas raíces van saliendo de los anillos radicales superiores y se van haciendo gradualmente más delgadas (Miller y Gilbert, 2010).

El estudio de la masa radical es poco frecuente, debido a múltiples causas; entre estas se encuentran el uso inapropiado de tecnologías de muestreo, variabilidad en las condiciones físicas, químicas y biológicas del suelo, con influencia en la distribución de las raíces, y finalmente no valoración de la importancia de su estudio (Vasconcelos *et al.*, 2003).

Las características genéticas de los cultivares de caña de azúcar determinan diferencias en cuanto al desarrollo y distribución del sistema radical. Existen cultivares con mayor concentración de raíces en la superficie, mientras otros presentan una distribución más uniforme. Algunos cultivares presentan mayor proporción de raíces finas y delicadas; sin embargo, en otros predominan raíces gruesas y resistentes (Landell *et al.*, 2005).

Un sistema radical profundo debe ser una característica deseable para los cultivares de caña de azúcar plantados en regiones que sufren estrés por déficit hídrico, debido a que aseguraría su habilidad para tolerar estas condiciones (Smith *et al.*, 2005). En ese sentido, Matta (2004) plantea que las plantas tolerantes a la sequía agrícola se caracterizan por un sistema radical vigoroso y profundo.

Pinheiro (2004) observó que la mayor penetración del sistema radical pudiera estar asociada con un mayor abastecimiento hídrico en condiciones limitantes de agua en el suelo. En este sentido, (González *et al.*, 2005) señalaron que el grado de penetración de las raíces en variedades de trigo pudiera ser un criterio efectivo para la evaluación y selección de variedades con tolerancia a la sequía agrícola. Medrano *et al.* (1998) enfatizaron que existe una fuerte correlación positiva entre la profundidad que exploran las raíces, el crecimiento y el rendimiento en diversas especies vegetales, a la vez que recomiendan utilizar estos indicadores para la selección en los programas de mejora destinados a condiciones de estrés por déficit hídrico.

Otros trabajos, encaminados al estudio del sistema radical de la caña de azúcar, se han focalizado en su relación con las propiedades físicas de los suelos (Roldós, 1986), las tecnologías de cosecha (Álvarez *et al.*, 2000; Vasconcelos *et al.*, 2003; Chopart *et al.*, 2010), las tecnologías de preparación de suelos (Carvalho *et al.*, 2011) y las diferencias cuantitativas y cualitativas entre genotipos (Landell *et al.*,

2005; Sakaigaichi *et al.*, 2007). Sin embargo, el conocimiento actual de la arquitectura y distribución del sistema radical en genotipos de caña de azúcar es muy limitado y su estudio poco frecuente (Chopart *et al.*, 2008; Sakaigaichi *et al.*, 2007; Vasconcelos *et al.*, 2003; Rodríguez, 2012), conociéndose aún de que puede estar directamente relacionado con la respuesta de los cultivares al estrés por déficit hídrico.

Leyva *et al.* (2000) encontraron una relación inversa entre la profundidad y el número de raíces. Por su parte, Vasconcelos *et al.* (2003) informan que el 72% del total de raíces fue encontrado en los primeros 40 cm de profundidad.

Landell *et al.* (2005) hallaron diferencias en seis genotipos de caña de azúcar, en cuanto a la cantidad total de raíces presentes en el suelo y el diámetro relativo de las mismas. Estos autores señalaron que la rusticidad del cultivar IACSP93-3046 puede ser debido a la mayor densidad de raíces que este presenta con respecto al resto de los genotipos evaluados en el mismo ensayo, así como al diámetro de sus raíces. Los propios autores acotaron que los cultivares con una distribución más uniforme en profundidad pueden estar relacionados con un mejor aprovechamiento del agua en las capas más profundas del suelo, lo que explica las altas producciones de esos cultivares.

En este sentido Sakaigaichi *et al.* (2007) realizaron estudios en macetas con dos clones comerciales de caña de azúcar y encontraron diferencias en cuanto a la densidad y distribución de las raíces, así como en profundidad, resultados que le permitieron sugerir que la longitud y profundidad del sistema radical se incluyeran dentro de los criterios de selección de los objetivos de los programas de mejoramiento genético para la tolerancia al estrés por déficit hídrico.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Datos generales del experimento

3.1.1. Ubicación de las localidades evaluadas

La provincia de Sancti Spíritus se encuentra al centro del país, limita por el este con Ciego de Ávila y por el oeste con Villa Clara y Cienfuegos; y por el norte y el sur limita con el mar (Figura 3).

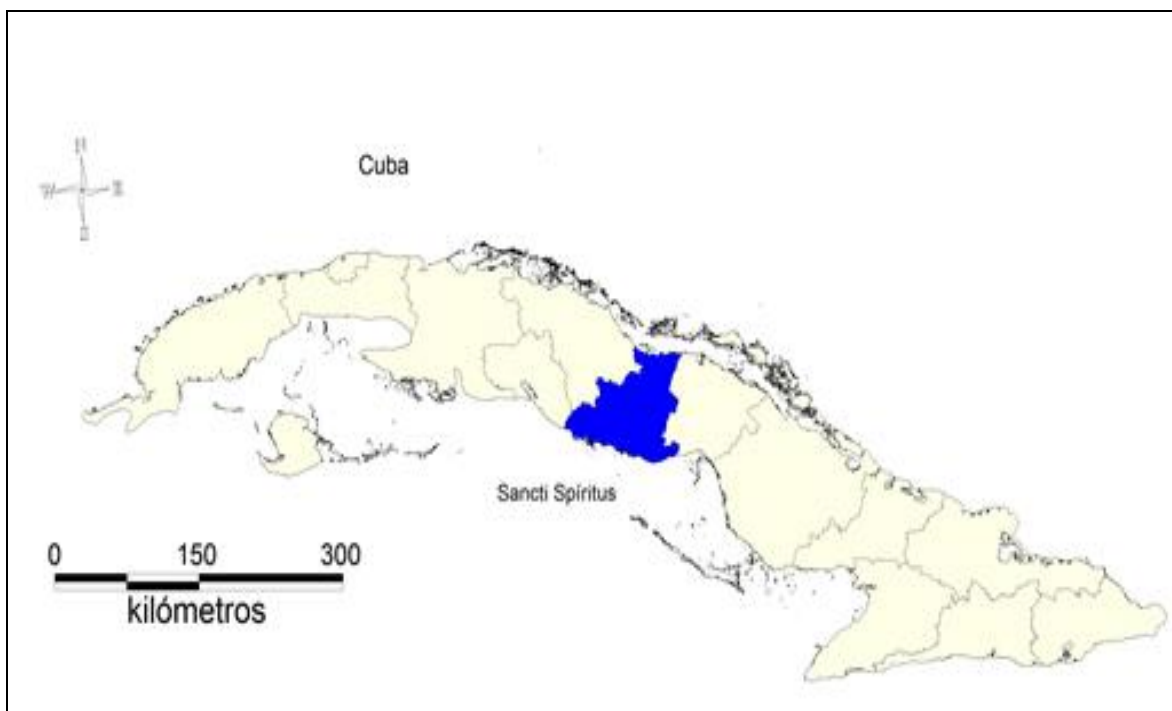


Figura 3. Ubicación geoespacial de la provincia Sancti Spíritus en el territorio nacional de Cuba. Fuente: Sistema de Información Geográfica (SIG) de la EPICA Sancti Spíritus. MapInfo Profesional Versión 8.0.

En la actualidad, producto de la reestructuración en el sector azucarero, la provincia de Sancti Spíritus cuenta con una Empresa Azucarera conformada por dos Unidades Empresariales de Base (UEB), Melanio Hernández y Uruguay, cuyas demarcaciones aparecen en las figura 4 y anexos 1 y 2.

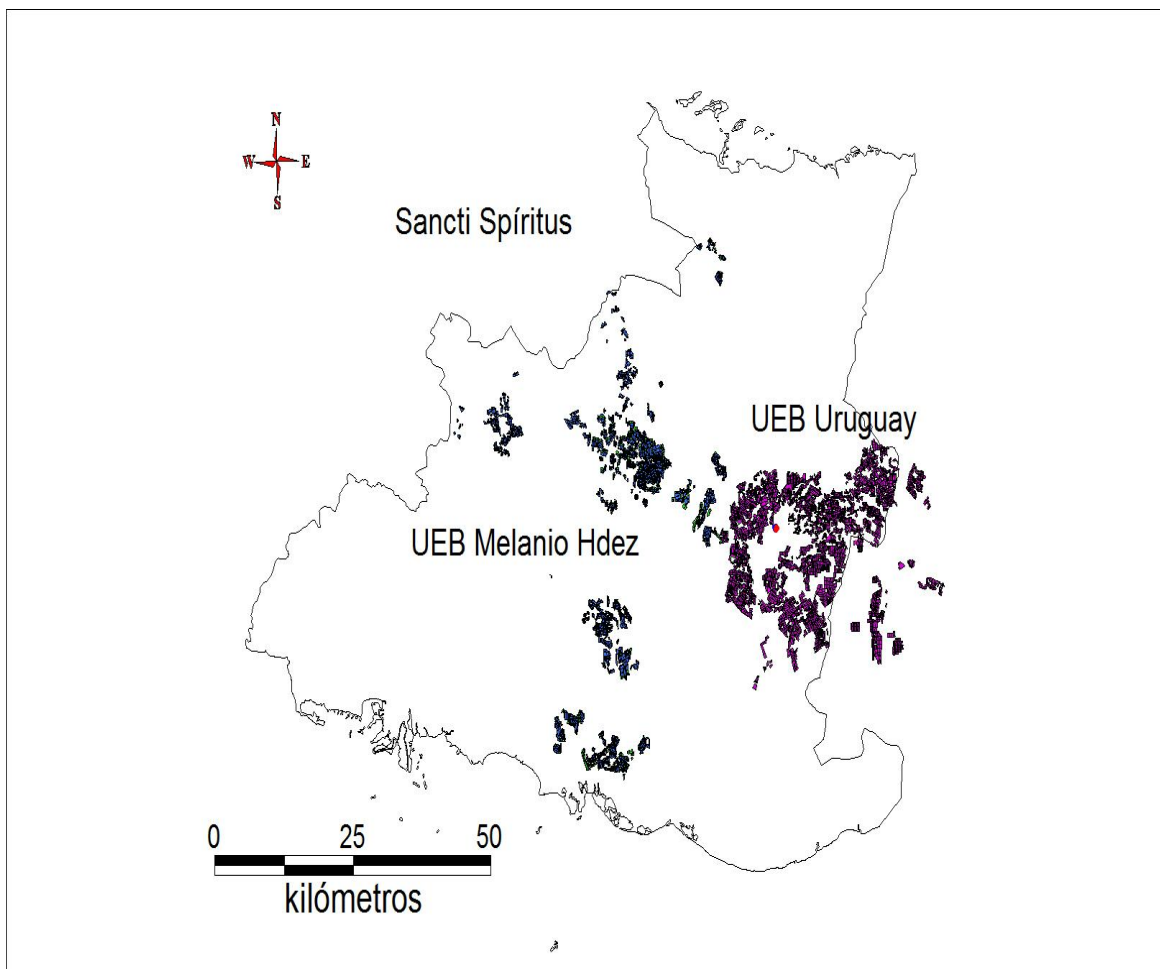


Figura 4. Distribución geoespacial de las áreas dedicadas al cultivo de la caña de azúcar en las UEB Melanio Hernández y Uruguay. Fuente: SIG de las UEB Melanio Hernández y Uruguay.

Los experimentos fueron conducidos en la Unidad Básica de Producción Cooperativa (UBPC) Paredes perteneciente a la UEB Melanio Hernández y la UBPC Cristales perteneciente a la UEB Uruguay. La UBPC Paredes se encuentra ubicada al sur de la provincia, en el poblado que lleva su nombre, perteneciente al municipio de Sancti Spíritus y la UBPC Cristales, ubicada al centro este, de la provincia, en el batey que lleva su nombre, perteneciente al municipio de Jatibonico, ambas se dedican a producir caña de azúcar desde antes del triunfo de la revolución, lo cual ha propiciado una sobre explotación de sus suelos. En la

actualidad se encuentran diversificadas, dedicándose a caña de azúcar, 1550.65 ha y 1506.25 ha respectivamente.

En la UBPC Paredes el experimento fue plantado en el bloque 260, campo 2, sobre un suelo Pardo Sialítico (Figura 5).

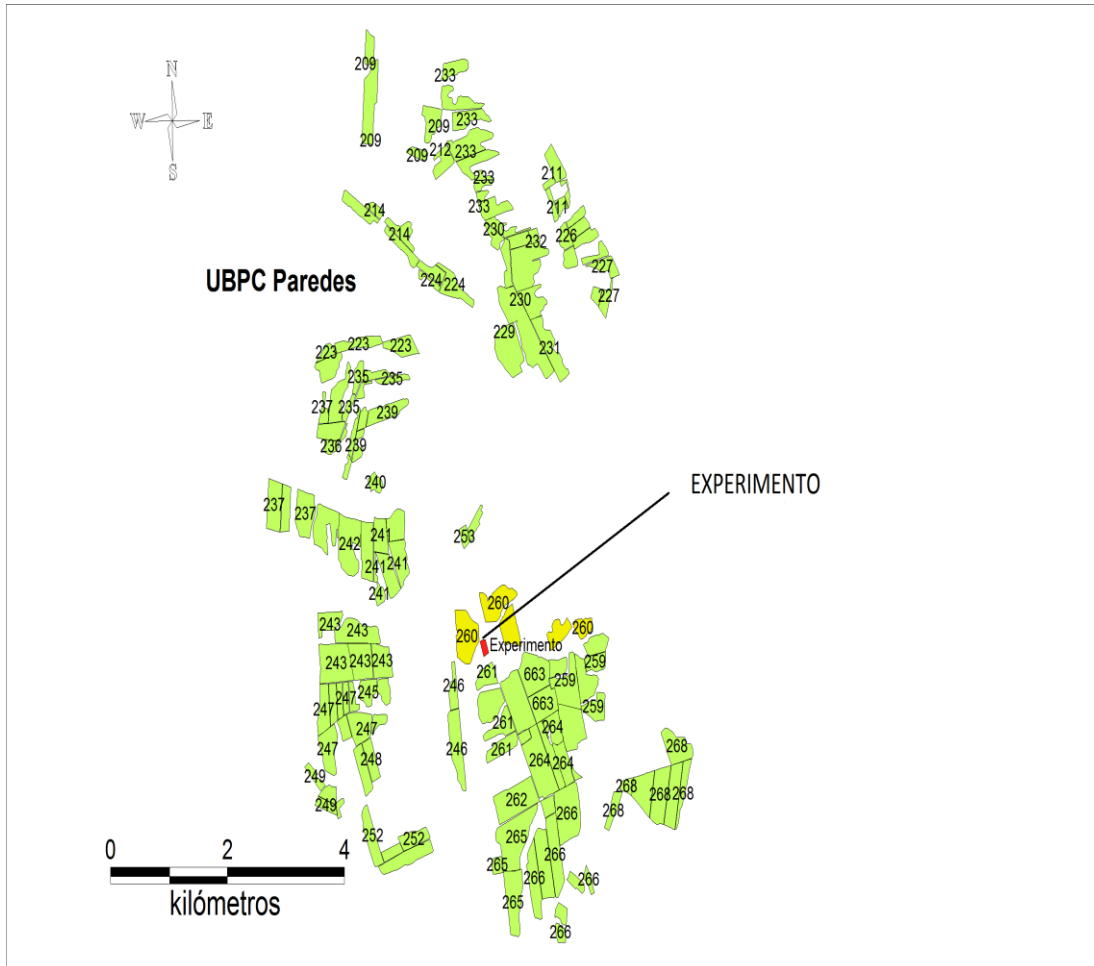


Figura 5. Distribución geoespacial del área dedicada al cultivo de la caña de azúcar en la UBPC Paredes y ubicación del experimento. Fuente: SIG de la UEB Melanio Hernández.

La plantación del experimento en Cristales se realizó en el bloque 222, campo 5, sobre un suelo Fersialítico (Figura 6).

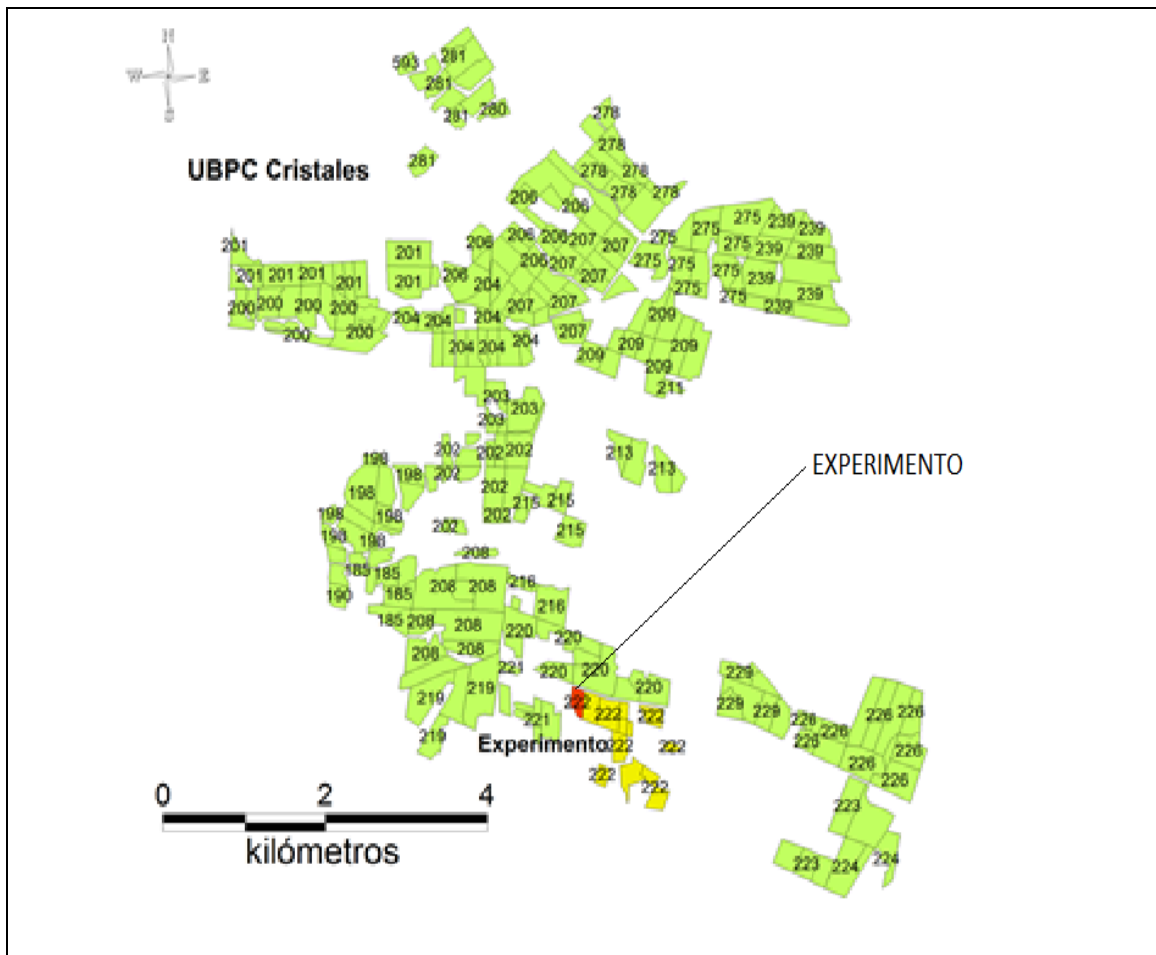


Figura 6. Distribución geoespacial del área dedicada al cultivo de la caña de azúcar en la UBPC Cristales y ubicación del experimento. Fuente: SIG de la UEB Uruguay.

Ambas localidades, como se aprecia en la tabla 2, estuvieron afectadas por elementos contrastantes de suelo y clima, donde la combinación de lluvias por debajo de los 1 500 mm, óptimo para el desarrollo del cultivo según King (1968), con suelos de muy poca profundidad efectiva y alto drenaje interno, hacen que la retención de humedad sea muy pobre, convirtiendo los suelos en secantes, clasificados en las categorías de marginalmente y medianamente aptos por Villegas y Benítez (2003) para el cultivo de la caña de azúcar.

Tabla 2. Valores promedio anuales de lluvias en los ciclos, profundidad efectiva, pendiente, erosión, drenaje y categoría de los suelos de las localidades utilizadas.

Localidad	Lluvia media (mm)	PE (cm)	P (%)	Erosión (categoría)	Drenaje (categoría)	Categoría
Paredes	1432	16	2-4	Alta	Alto	A-3
Cristales	1129	20	2-4	Alta	Alto	A-2

PE=Profundidad efectiva. P=Pendiente.

Relacionado con lo anterior, Pineda (2002), en un estudio sobre los efectos de los factores limitantes del suelo en el rendimiento cañero, señaló que el conocimiento de la profundidad efectiva no es solamente importante para evaluar la fertilidad del suelo, sino también para interpretar el papel individual de numerosos factores de la fertilidad. En su investigación, la autora, en la relación de esos factores, hace mención de la capacidad del suelo para almacenar agua, la estructura, la capacidad de absorción, el lavado de nutrientes, el contenido de nitrógeno y humus, entre otros. Asimismo, concluyó que la lluvia en el gran período de crecimiento (mayo-octubre), muy relacionada también con la profundidad efectiva, tiene un notable impacto sobre la producción y el efecto de los fertilizantes.

Los datos generales de los experimentos, plantados en ambas UBPC aparecen en la tabla 3.

Tabla 3. Fechas de plantación y cosechas de cada cepa en cada localidad.

Localidad	Cepa	Plantación o corte	Cosecha	Edad
Paredes	Planta	31/8/2006	25/2/2008	18
	Primer retoño	25/2/2008	25/3/2009	13
	Segundo retoño	25/3/2009	20/3/2010	12
Cristales	Planta	31/7/2008	10/2/2010	18
	Primer retoño	10/2/2010	15/3/2011	13
	Segundo retoño	15/3/2011	18/3/2012	12

En ambos lugares se le realizaron las labores programadas, según paquete tecnológico correspondiente a cada bloque y campo en cuestión, el que se realizó según instructivo técnico del cultivo de la caña de azúcar (Santana *et al.*, 2007).

3.1.2. Diseño experimental

Para lograr los objetivos propuestos, en los experimentos se emplearon 22 variedades, (Tabla 4) con posibilidades de adaptación a las condiciones del estudio.

Tabla 4. Variedades del experimento.

1. C89-148	2. C132-81	3. C89-176	4. C137-81	5. C86-165
6. C86-251	7. C90-501	8. C86-503	9. C87-252	10. CP52-43
11. B80250	12. SP71-1406	13. C86-12	14. C89-161	15. C128-83
16. Co997	17. C86-56	18. C323-68	19. C90-530	20. C266-70
21. C86-456	22. C88-380			

Las variedades fueron ubicadas en un diseño de bloque al azar con tres repeticiones, para totalizar 66 parcelas, en cada localidad (Tabla 5). Cada parcela se conformó con cuatro surcos de 7,5 m de largo y 1,6 m de ancho (48 m² de área total); con 2 m de borde a cada extremo del experimento y 3 m entre parcelas y dos surcos de borde, según metodología descrita por Jorge *et al.* (2002). La variedad empleada en los bordes fue la C132-81.

Tabla 5. Diseño del experimento.

RI	6	5	4	3	2	1	11	10	9	8	7
RI	12	13	14	15	16	17	22	21	20	19	18
RII	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
RII	22	21	20	19	18	12	13	14	15	16	17
RIII	3	2	1	6	5	4	8	7	11	10	9
RIII	15	16	17	12	13	14	19	18	22	21	20

En ambas localidades se evaluaron las cepas de planta y dos retoños. La conducción del experimento se realizó según metodología del Instituto de Investigaciones de la Caña de Azúcar (Jorge *et al.*, 2011).

3.2. Definición del efecto interacción genotipo-ambiente en dos localidades con suelos secantes de la empresa azucarera de Sancti Spíritus

A las 22 variedades, en las tres cepas (plantas y dos retoños) y las dos localidades (Paredes y Cristales) se evaluaron las siguientes variables agro-azucareras:

- Contenido azucarero (% de pol en caña).
- Rendimiento Agrícola cañero (t de caña ha⁻¹).
- Rendimiento azucarero (t de pol ha⁻¹).

Para definir el contenido azucarero, se tomó una muestra de un metro lineal en cada uno de los surcos centrales de cada variedad, en el mes de la cosecha; a esta muestra se le realizó un análisis para determinar el pol de sus jugos.

Para el rendimiento agrícola, se empleó el peso de la muestra anterior y se calcularon las t caña ha⁻¹.

Para obtener las t pol ha⁻¹ se multiplicaron los rendimientos agrícolas cañeros por el pol (% en jugo) y se dividió entre 100. Todos estos análisis fueron realizados, según metodología que aparece en Jorge *et al.* (2011).

Los datos de las variables analizadas, estadísticamente fueron comprobados respecto a su normalidad y homogeneidad de varianza mediante pruebas de Chi cuadrado y Bartlett-Box.

Con los datos obtenidos se realizó un análisis de varianza factorial que considera como fuentes de variación, las localidades, las variedades, las cepas y sus interacciones, según modelo aleatorio propuesto por Cochran y Cox (1965).

$$Y_{ijkl} = \mu + G_i + L_j + C_k + (GL)_{ij} + (GC)_{ik} + (LC)_{jk} + (GLC)_{ijk} + e_{ijkl}$$

Dónde:

Y_{ijk} . = Es la observación l, en la cepa k, en la localidad j, del genotipo i

μ = Media general

G_i . = Efecto del i-ésimo genotipo

L_j . = Efecto de la j-ésima localidad

C_k = Efecto de la k-ésima cepa

$(GL)_{ij}$. = Efecto del i-ésimo genotipo en la j-ésima localidad

$(GC)_{ik}$. = Efecto del i-ésimo genotipo en la k-ésima cepa

$(LC)_{jk}$. = Efecto de la j-ésima localidad en la k-ésima cepa

$(GLC)_{ijk}$. = Efecto del i-ésimo genotipo en la j-ésima localidad de la k-ésima cepa

e_{ijkl} . = Error asociado a la l-ésima observación de la j-ésima localidad del i-ésimo genotipo de la k-ésima cepa.

Se trabajó con una precisión que consideraba diferencias estadísticas cuando $p \leq 0.05$ y el empleo del programa Statistica v 6.0 (Stat Soft, 2003).

En los casos de existencia de interacción genotipo-ambiente se empleó un modelo AMMI, que incluyó el análisis de los valores medios de la variable (Eje x) y de la estabilidad (Eje y).

Este modelo está constituido por parámetros aditivos y multiplicativos, y realiza un análisis combinado de la varianza (ANOVA) para los efectos principales de genotipo (G) y ambiente (A), y de componentes principales (ACPI) para los efectos no aditivos de la interacción GxA (Mandel, 1969, 1971; Aucilino *et al.*, 2000; Varela y Castillo, 2002).

El modelo es: $Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \sum_n \lambda_n \gamma_{in} \delta_{jn} + \rho_{ij} + \epsilon_{ijk}$

Y_{ijk} : Rendimiento observado del genotipo i en el ambiente j para la repetición k.

Los parámetros aditivos son:

μ : Media general.

α_i : Desviación con respecto a la media general del genotipo i.

β_j : Desviación con respecto a la media general del ambiente j.

Los parámetros multiplicativos son:

λ_n : El valor singular para el eje n del ACPI.

γ_{in} : El vector propio unitario del genotipo para el eje n.

δ_{jn} : El vector propio unitario del ambiente para el eje n.

El número máximo de ejes posibles ACPI que el modelo puede retener es el mínimo $(I-1; J-1)$ (Mandel, 1971). Se estimaron las coordenadas genotípicas $(\lambda_n^{0.5} \gamma_{in})$ y ambientales $(\lambda_n^{0.5} \delta_{jn})$ sobre los ACPI, y se construyó un gráfico bidimensional (Biplot) con el primer eje del ACPI contra el segundo eje (ACPI1 vs. ACPI2).

3.3. Estimación de la influencia que producen las lluvias sobre los rendimientos agrícolas en las localidades analizadas

Los experimentos se desarrollaron en condiciones de secano y los datos de las lluvias se tomaron teniendo en cuenta el período de los ciclos de desarrollo del cultivo en cada una de las localidades.

Los datos mensuales de las lluvias (cantidad y frecuencia) de los periodos (secos y húmedos) y los rendimientos agrícolas fueron condensados en una base de datos por localidades y cepas, la cual sirvió para realizar un análisis de correlación y una regresión con las relaciones más significativas. Para conocer la variación de los datos se utilizó el coeficiente de variación.

3.4. Determinación del cambio que se produce en algunas variables fisiológicas dentro de las variedades tolerantes al estrés por déficit hídrico

En este acápite se analizan los cambios que se producen en algunas variables fisiológicas para lo cual se compararon las variedades que se destacaron por su mejor comportamiento en los ambientes analizados (Tolerantes) contra las que no se destacaron (No tolerantes). Para un mejor análisis, las variables evaluadas se dividieron en dos grupos, las correspondientes al sistema de raíces y las evaluadas en el área foliar; estas variables se emplearon por su relación con el estrés por déficit hídrico (Rodríguez, 2012) (Tabla 6).

Tabla 6. Variables fisiológicas empleadas en los análisis.

Grupo	Variable	Unidad de medidas	Símbolo
Sistema de raíces	Raíces Gruesas (0-80 cm.)	u	RG 0-80
	Raíces Gruesas (0-20 cm.)	u	RG 0-20
	Raíces Finas (0-80 cm.)	u	RG 0-80
	Raíces Finas (0-20 cm.)	u	RG 0-20
Área foliar	Área Foliar Hoja+5	cm ²	AF
	Área Foliar del Tallo	cm ²	AFT
	Índice de Área Foliar	m ² . m ⁻²	IAF
	Contenido Relativo de Agua	%	CRA
	Déficit Saturación Hídrica	%	DSH

Todas las variables fueron evaluadas en el retoño 1, con 13 meses de edad, por ser una cepa ya establecida con todo su sistema fisiológico.

3.4.1 Análisis del sistema radical

Para realizar el estudio del sistema radical se excavó una calicata de 100 cm de ancho por 80 cm de profundidad a una distancia de 20 cm del centro de la cepa, en cada réplica de los ensayos realizados en cada localidad. Posteriormente se procedió a dividir el perfil del suelo en cuatro cuadrículas (100 x 20 cm), las que a su vez se dividieron en secciones de cinco cuadrículas cada una (20 x 20 cm) para facilitar las determinaciones de raíces (Figura 7).

Con el uso de una espátula de madera se separó el suelo de las raíces a una profundidad de 2 cm perpendicular al perfil del suelo y se cuantificó el número de raíces activas, independientemente de su longitud y se determinó el número de raíces (por cuadrante) clasificándolas en raíces finas (0,5 a 1 mm de diámetro), gruesas (>1 mm de diámetro), según metodología desarrollada por Vasconcelos *et al.* (2003) y Chopart *et al.* (2008) en cuatro profundidades (0-20, 20-40, 40-60 y 60-

80 cm). Para los cálculos se utilizó el número de raíces en las profundidades de 0-20 y 0-80 y 0-80.

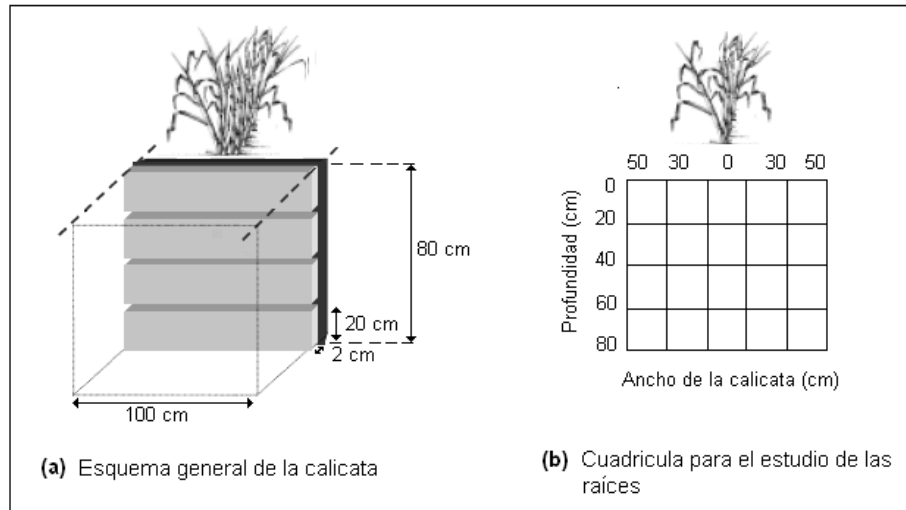


Figura 7. Procedimiento utilizado para el estudio del sistema radical

3.4.2 Análisis del área foliar

Se evaluó el área foliar en diez tallos: ancho y largo del limbo de la hoja +5, con el fin de calcular área foliar del tallo e índice de área foliar, conforme con Ortega *et al.*, (1989). Para el análisis de la retención de agua en las hojas, se tomó una muestra de 10 hojas (hoja +1 según la nomenclatura de Kuijper) para evaluar los indicadores fisiológicos: contenido relativo de agua y déficit de saturación hídrica, de acuerdo con las metodologías de Slávik (1974) y Kozhushko (1982) respectivamente.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Definición del efecto interacción genotipo-ambiente en dos localidades con suelos secantes de la empresa azucarera de Sancti Spíritus.

Para los objetivos de este trabajo, lo más beneficioso sería encontrar variedades de alto rendimiento agrícola y azucarero; esto es muy difícil, pues se conoce que el rendimiento agrícola es contrario al rendimiento azucarero (García, 2004), o que al menos tengan alta estabilidad en ambos caracteres, también es difícil, debido a la interacción genotipo-ambiente (Rodríguez, 2012).

Para conocer mejor la respuesta de cada genotipo a los ambientes, se realizó el análisis de cada variable agroazucarera por separado.

4.1.1. Pol en caña

Se encontraron diferencias significativas para esta variable en todas las fuentes de variación (Tabla 7).

Tabla 7. Análisis de varianza del Pol en caña (%)

Fuentes de Variación	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado medio	F	p	VFT (%)
Localidad (L)	107.6	1	107.6	1017.62	0.0001	12.9
Variedad (V)	55.6	21	2.65	25.05	0.0001	6.7
Cepa (C)	7.9	2	3.98	37.64	0.0001	0.9
L x V	51.7	21	2.46	23.27	0.0001	6.2
L x C	394.2	2	197.1	1864,54	0.0001	47.2
V x C	119.6	42	2.84	26.93	0.0001	14,3
L x V x C	70.7	42	1.68	15.93	0.0001	8.5
Error	27.9	264	0.11			3.3

GL. Grados de libertad; % VFT. Variación fenotípica total (%); F. Valor de prueba F, donde se consideró significativa para $p \leq 0.05$, señalada en negrita.

En la tabla anterior destaca la mayor variación (47.2%VFT) de la interacción localidad por cepa, lo cual presupone valores extremos del ambiente, que se muestra en la figura 8 y algunos autores lo asocian a las lluvias.

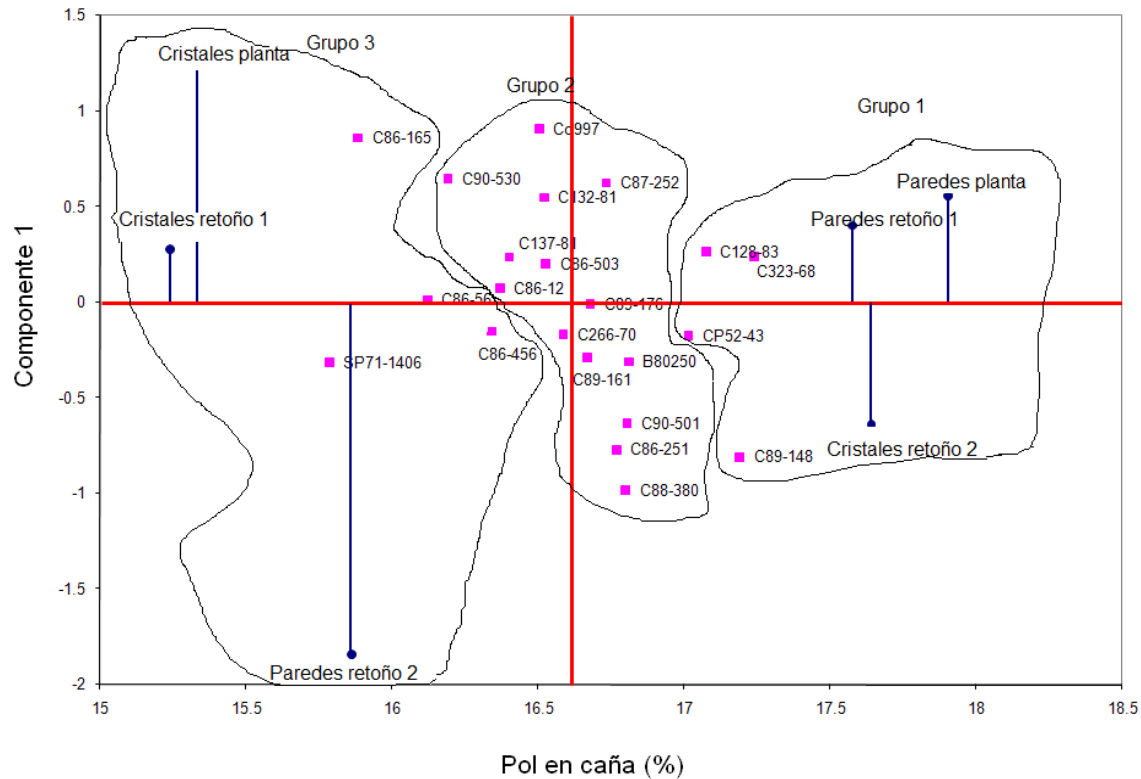


Figura 8. Manifestación del Pol en caña (%) de variedades por localidades y cepas (Eje x) y su estabilidad (Eje y).

Como se aprecia (Tabla 8), las lluvias en los dos meses anteriores (enero y febrero) a la cosecha en el grupo 1 fueron muy inferiores en las tres cepas a las del grupo 3, motivando una mayor acumulación del % de pol en caña en el tallo, favoreciendo la maduración, debido a que la planta de caña de azúcar según (Archila *et al.*, 1986) necesita de una reducción drástica de la humedad del suelo con un descenso de la temperatura ambiental que haga más amplio el rango entre la temperatura máxima diurna y la mínima nocturna con el fin de reducir su ritmo de crecimiento e inducir a transformar en sacarosa los azúcares reductores (glucosa y fructuosa) que utiliza para proveerse de energía necesaria para su crecimiento y desarrollo.

Tabla 8. Lluvias (mm) de los dos meses anteriores a la cosecha por grupos, localidad y cepa.

Grupo	Localidad	Cepa	Enero (mm)	Febrero (mm)	Total (mm)	TMD-MN (°C)
1	Paredes	Planta	29	49	78	11.45
	Cristales	Retoño 2	0	0	0	11.2
	Paredes	Retoño 1	0	25	25	10.55
3	Paredes	Retoño 2	0	225	225	10.8
	Cristales	Planta	27	66	93	11.1
	Cristales	Retoño 1	0	210.7	210.7	11.3

TMD- TMN. Rango entre la temperatura máxima diurna y la temperatura mínima nocturna.

En la figura anterior, para su mejor interpretación la dividimos en tres grupos donde el 1, era el de mayor contenido de pol y donde se ubican las variedades C323-68, C89-148, C128-83, y CP52-43; además de las mejores interacciones de las localidades por cepas, destacándose la caña planta de Paredes, retoño 2 de Cristales y retoño 1 de Paredes; manifestando la última, la mayor estabilidad dentro de este grupo, así como los genotipos C323-68 y CP52-43.

En el extremo del eje x se ubicó el grupo 3, al que le correspondieron los valores más bajos del pol, donde se ubicaron el resto de los ambientes, donde se destaca valores estables y bajos en el retoño 1 de Cristales y las variedades SP71-1406, C86-456 y C86-56; esta última con alta estabilidad.

El grupo 2, conformado por genotipos con valores intermedios y alta estabilidad corresponde a los genotipos B80250, C87-252, C89-176 y C89-81, destacándose el tercero por ser el más estable.

Por tanto se puede definir que para esta variable, se puede manejar en los proyectos de ambas localidades por su buena estabilidad, las variedades C323-68, C89-148, C128-83, CP52-43, B80250, C87-252, C89-176 y C89-81; y no se debe explotar la SP71-1406 y la C86-56 por sus valores establemente bajos.

4.1.2. Rendimiento agrícola

Al igual que la variable anterior se encontraron diferencias significativas para todas las fuentes de variación (Tabla 9).

Tabla 9. Análisis de varianza para el rendimiento agrícola en caña (t de caña ha⁻¹).

Fuentes de Variación	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado medio	F	p	VFT (%)
Localidad (L)	928.7	1	928.7	21.97	0.0001	0,2
Variedad (V)	38913.4	21	1853.0	43.84	0.0001	8,3
Cepa (C)	299874.9	2	149937.5	3547.42	0.0001	64,0
L x V	30452.2	21	1450.1	34.31	0.0001	6,5
L x C	16219.0	2	8109.5	191.87	0.0001	3,5
V x C	28426.0	42	676.8	16.01	0.0001	6,1
L x V x C	42320.3	42	1007.6	23.84	0.0001	9,0
Error	11158.4	264	42.3			2,4

GL. Grados de libertad; %VFT. Variación fenotípica total (%); F. Valor de prueba F, donde se consideró significativa para $p \leq 0.05$, señalada en negrita.

Destaca la mayor contribución a la variación fenotípica total de la cepa, en lo fundamental por la edad, lo que se observa claramente en la figura 9, donde la cepa de planta presenta el ciclo más largo de crecimiento (18 meses), por tanto hay mayor producción de biomasa total, que para los retoños 1 y 2 cosechados entre 12 y 13 meses de edad, respectivamente, lo que se conoce y ha sido enunciado por varios autores como López (1986) y Castro (1991), en estudios similares a este, pero en la región centro oriental.

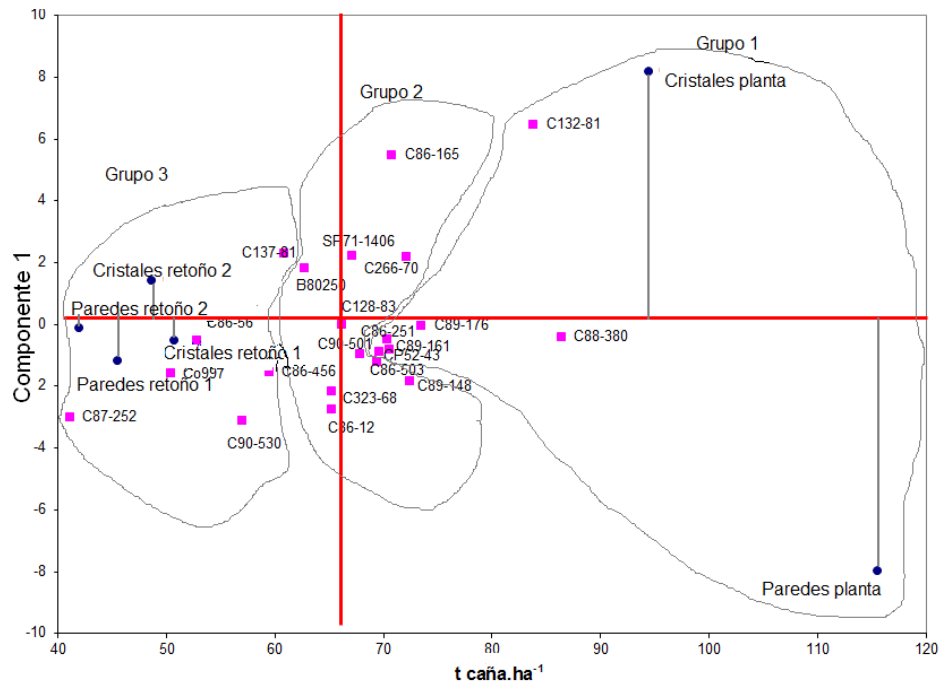


Figura 9. Manifestación del rendimiento agrícola ($t\ caña\ ha^{-1}$) de variedades por localidades y cepas (Eje x) y su estabilidad (Eje y).

En las cepas de retoños 1 y 2, aunque el rendimiento agrícola disminuyó con respecto a la cosecha de caña planta, sus valores fueron más estables, resultados que coincide con lo informado en otros estudios por Abrantes (1986); González (1995); Ojeda (1995); Jorge (1996), García (2004) y Rodríguez (2012). Estos autores atribuyeron dicho comportamiento a una mejor adaptación de la caña al medio, después de la primera cosecha, con una mayor uniformidad de los tallos al momento de la cosecha.

En el grupo 1 se ubicaron las cepas de caña planta, tanto de Paredes como de Cristales y las variedades C88-380, C132-81, C89-176, C89-161, C86-251, y CP52-43, destacando la buena estabilidad de estos genotipos, excepto la C132-81, la que se asocia a la caña planta de Cristales.

El grupo 2, conformado por genotipos con valores intermedios para la variable, donde destaca la alta estabilidad de la C89-148, C266-70 y C86-503 y la inestabilidad de C86-165, producto a un comportamiento similar que la C132-81 en el grupo 1.

Los valores más bajos (Grupo 3), lo conforman el resto de los ambientes, se destacan por su estabilidad el retoño 2 de Paredes y el retoño 1 de Cristales, a los que se asocian los cultivares C87-252, Co997 y C86-56.

El resto de las interacciones aparecen en el anexo 3.

Se puede definir que para esta variable, pueden ser manejadas en ambas localidades por su buena estabilidad, las variedades C88-380, C89-176, C89-161, C86-251, CP52-43, C89-148, C266-70, C86-503 e incluir la C132-81; la cual aunque fue inestable, manifestó niveles de producción altos en ambos lugares y no se debe cultivar las variedades C87-252, C86-56 y Co997 por sus valores establemente bajos. Por su parte se pueden manejar, aprovechando su adaptabilidad específica, las variedades C90-501, C86-12 y C323-68 en Paredes y C86-165, B80250 y C128-83 en Cristales.

4.1.3. Rendimiento en azúcar

Esta variable resume el potencial de producir azúcar de una variedad, en el análisis de varianza se encontraron diferencias significativas para todas las fuentes (Tabla 10), lo cual indica la existencia de interacción genotipo-ambiente.

Tabla 10. Análisis de varianza para el rendimiento azucarero por área (t de pol ha⁻¹).

Fuentes de Variación	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado medio	F	p	VFT (%)
Localidad (L)	238.9	1	2349.0	179.31	0.0001	1.7
Variedad (V)	1073.9	21	51.1	38.38	0.0001	7.5
Cepa (C)	8578.3	2	4289.1	3218.65	0.0001	60.1
L x V	867.3	21	41.3	30.99	0.0001	6.1
L x C	1149.5	2	574.7	431.29	0.0001	8.1
V x C	789.1	42	18.8	14.10	0.0001	5.5
L x V x C	1213.9	42	28.9	21.69	0.0001	8.5
Error	351.8	264	1.33			2.5

GL. Grados de libertad; %VFT. Variación fenotípica total (%); F. Valor de prueba F, donde se consideró significativa para $p \leq 0.05$, señalada en negrita.

Al igual que en la variable anterior destaca la alta variación entre las cepas, asociada a la edad, lo que se observa claramente en la figura 10.

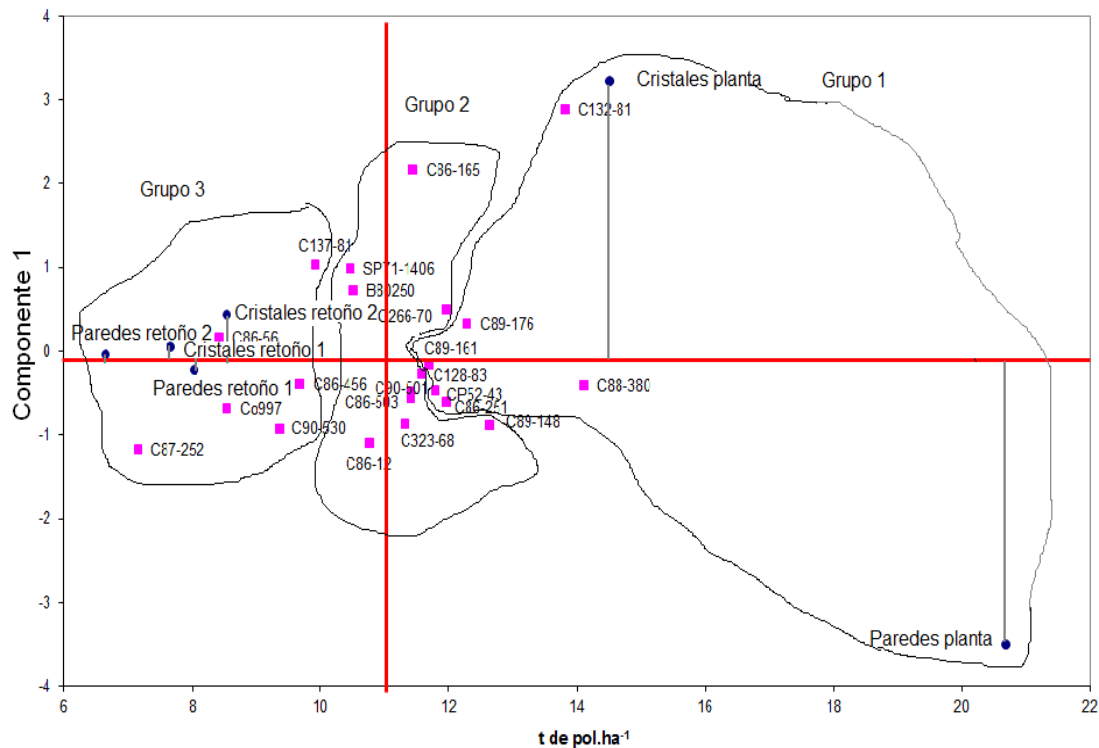


Figura 10. Manifestación del rendimiento azucarero por área (t pol ha⁻¹) de variedades por localidades y cepas (Eje x) y su estabilidad (Eje y).

Los mejores valores del rendimiento en azúcar (Grupo 1) se manifestaron en los ambientes de planta, tanto de Paredes como de Cristales, pero con poca estabilidad, coincidiendo con lo que sucedió para el rendimiento agrícola, asociándose la variedad C132-81 a la planta de Cristales. En este grupo resultaron estables los cultivares; C88-380, C89-176, C86-251 CP52-43 y C89-161, destacándose la primera por ser la de mayor media.

Existe un grupo de genotipos con valores intermedios (Grupo 2), dentro de los que se destacan C89-148, C266-70, C128-83, C86-503 y C90-501; a la planta de Cristales se asocia la C86-165.

Los valores más bajos de la variable lo conforman el resto de los ambientes y genotipos (Grupo 3); destacándose por su alta estabilidad, todos los retoños de las dos localidades, a las que se asocian las variedades C87-252, C86-56 y Co997.

Sobre la base de que esta variable resume las dos anteriores se pudo demostrar las buenas potencialidades de las variedades C88-380, C89-176, CP52-43, C86-251, C89-161, C89 -148, C266-70, C128-83, C86-503, por su alta estabilidad e incluir la C132-81; que aunque fue inestable, demostró valores altos de la variable, en lo fundamental por lo explicado en el rendimiento agrícola. A partir de aquí este grupo de variedades se nombrarán tolerantes al estrés por déficit hídrico.

Con fines de seleccionar los genotipos para las condiciones de estos ambientes, no se debe trabajar con las variedades C87-252, C86-56, Co997, por sus valores establemente bajos.

Por su parte se pueden manejar, aprovechando su adaptabilidad específica, las variedades C90-501, C86-12 y C323-68 en Paredes y los cultivares C86-165 y B80250 en Cristales (Anexo 4).

Según Anónimo (2012), de los cultivares analizados, se manejan actualmente en el proyecto de variedades de la empresa la C89-176 (0.8%), CP52-43 (2.3%), C86-503 (3.5%), C323-68 (6.4%), B80250 (11.7%), C132-81(13%) y C86-12 (19.2%); y coinciden con los resultados obtenidos por Rodríguez (2012), la C128-83, C86-12, C90-501, C88-380 y CP52-43. Por tanto se pueden emplear los resultados obtenidos en este trabajo para una correcta ubicación y manejo de los cultivares tolerantes al estrés por déficit hídrico.

4.2. Estimación de la influencia que produce las lluvias sobre los rendimientos agrícolas en las localidades analizadas

Sobre la base de que las localidades estudiadas fueron clasificadas como “secantes,” se procedió a realizar un análisis de las lluvias, teniendo en cuenta su influencia sobre el rendimiento agrícola y que ha sido citada como uno de los

elementos más importantes en las fluctuaciones de producción anuales (Bernal, 1986; Castro, 1992; González, 1994).

En el análisis realizado de la variabilidad de las lluvias se comprobó que en el periodo húmedo (mayo-octubre) existe menos variación que en el seco, según valores del coeficiente de variación (30.692 contra 60.491) que aparece en la tabla 11. Esto se comprueba con el desglose de los meses, pues los valores más bajos coinciden con los meses de julio, agosto y septiembre; y junio aunque es tan variable como mayo se comporta con mejores acumulados; el resto de los meses tiene valores más bajos de media y altos de coeficiente de variación.

Tabla 11. Valores medios y desviación de las lluvias en los meses y períodos del trabajo en las localidades empleadas.

Meses y períodos	Media	Desviación de la media	Coeficiente de variación (%)
Enero	9.333	14.4730	155.07
Febrero	95.950	97.1217	101.22
Marzo	47.467	83.2857	175.46
Abril	46.950	61.8745	131.79
Mayo	79.167	51.4762	65.022
Junio	242.117	158.1950	65.338
Julio	169.883	71.4468	42.056
Agosto	260.583	126.4228	48.515
Septiembre	350.783	148.3811	42.3
Octubre	167.883	140.0981	83.45
Noviembre	47.117	42.3046	89.786
Diciembre	24.850	31.9045	128.39
Periodo seco	271.667	164.3331	60.491
Periodo húmedo	1270.417	389.9111	30.692

Estos resultados sugieren, que el período húmedo decide en el rendimiento agrícola, al coincidir el gran período de crecimiento del cultivo con las altas temperaturas y la mayor probabilidad de que llueva, pero los valores de correlación más altos se ubican en los meses del período seco (Tabla 12), lo que sugiere su influencia sobre las diferencias que se produzcan en el rendimiento entre los años.

Tabla 12. Correlación (r) del rendimiento agrícola con la lluvia de los meses del año.

Meses	Valor de r
Enero	0.980202
Febrero	-0.326347
Marzo	0.650473
Abril	-0.198217
Mayo	0.065335
Junio	0.864733
Julio	-0.154796
Agosto	0.331799
Septiembre	0.280087
Octubre	0.465569
Noviembre	0.740579
Diciembre	0.940412

Como se planteó anteriormente, el mes de junio al tener altos acumulados y ser variables, decide en la diferencia de los rendimientos en los años, pero en la tabla los meses del periodo seco aparece con mayor incidencia en las diferencias, destacándose los meses de enero, marzo, noviembre y diciembre.

Estos resultados se asocian, a que en el periodo seco, el cultivo necesita de un nivel de humedad estable, con una media de 350 a 450 mm de lluvias bien distribuidas, para garantizar que los nutrientes aplicados con la fertilización se

incorporen a la solución del suelo para ser adquiridos y así las plantaciones puedan desarrollar el 80% de sus funciones vitales en los primeros 120 días después de la siembra o el corte, para lograr los rendimientos esperados.

La ecuación que mejor predijo el comportamiento agrícola a partir de las lluvias fue la siguiente:

$$y = 41.76 + 0.87x_1 + 0.80x_2; R^2=0.89$$

Dónde:

y = Rendimiento agrícola (t caña ha⁻¹)

x_1 = Días con lluvias octubre (número de días)

x_2 = Total de lluvias diciembre (mm)

Según la ecuación, indica que el rendimiento agrícola en las localidades evaluadas, depende mucho de la frecuencia de lluvias de octubre y la cantidad de lluvia de diciembre.

Como se aprecia en la ecuación los días de lluvias de octubre tienen mayor incidencia que la cantidad, lo que puede deberse a que es precedido del mes de septiembre, que es el más lluvioso del año (Ver tabla 11), contrario a diciembre que tuvo más influencia la cantidad que los días de lluvias, por ser un mes que exige de humedad para dar continuidad al desarrollo del cultivo en los meses secos siguientes, contrarrestando los efectos de las temperaturas bajas que predominan en esta época.

Al comparar las localidades, se destacan en Paredes valores más altos de lluvias con rendimientos similares (Tabla 13).

Tabla 13. Valores de rendimiento y lluvias del ciclo en las localidades utilizadas.

Localidad	Rendimiento (t caña ha⁻¹)	Lluvias del ciclo (mm)
Paredes	68	1432
Cristales	64	1129

A pesar de que en algunos casos las lluvias han estado cerca de 1 500 mm (óptimo anual para el desarrollo del cultivo según King (1968), el efecto del estrés por déficit hídrico ha afectado el buen desarrollo de los cultivares, motivando mermas en los rendimientos esperados, lo que puede estar asociado a la combinación de muy poca profundidad efectiva con alto drenaje interno de los suelos en cuestión, motivando poca retención de humedad.

Roldós (1986) señaló que la existencia de factores edáficos limitativos es uno de los aspectos que tiene mayor incidencia negativa en la producción de caña de azúcar.

Memon *et al.* (2004) señalaron que los bajos rendimientos normalmente están asociados a prácticas inadecuadas de manejo del cultivo, falta de nutrientes a la planta, sobre explotación de los suelos y condiciones climáticas inadecuadas, principalmente ausencia de agua en los momentos críticos del cultivo.

La cantidad y distribución de las lluvias y la forma en que el agua se retenga en el suelo, resulta muchas veces vital para la obtención de altos o al menos rendimientos rentables en la caña de azúcar cuando no se aplica riego (Ruiz *et al.*, 2001). Estas relaciones han sido modeladas tanto para definir los rendimientos (Kunhel, 1996; Gálvez *et al.*, 2004; Yasen *et al.*, 2005; Bezuidenhout *et al.*, 2007) como para definir el uso del agua (Moult, 2005).

Carbonell *et al.* (2001) indicaron que la precipitación y evaporación son las condiciones meteorológicas que mayor variabilidad espacial y temporal ocasionan en el rendimiento de la caña en el Valle del Cauca en Colombia.

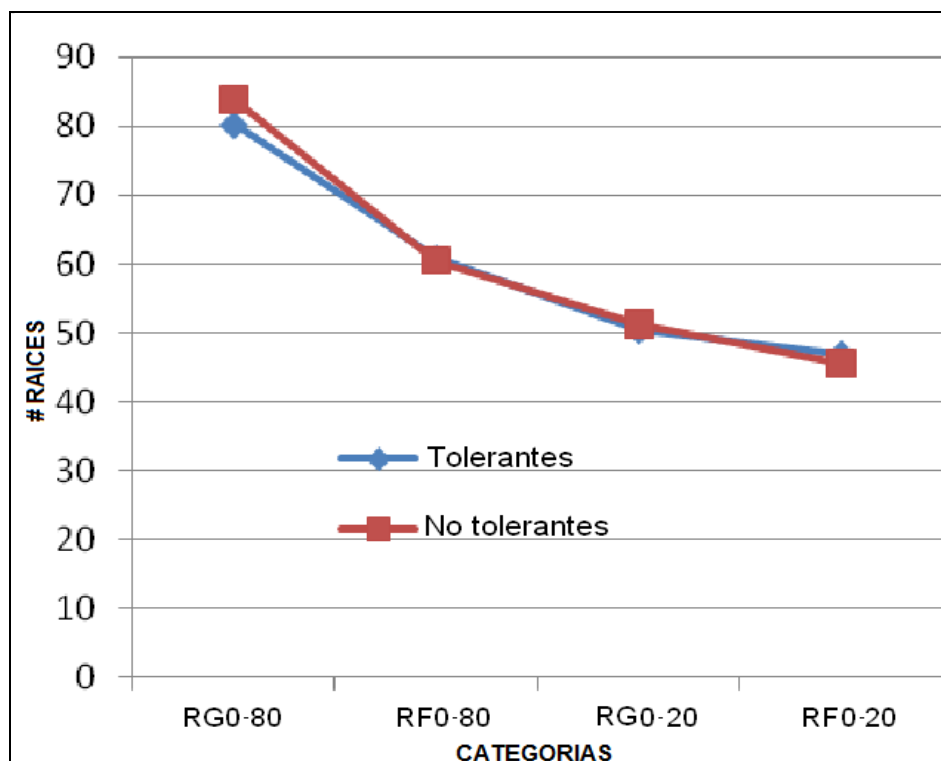
En la mayoría de los estudios los autores coinciden sobre la acción contribuyente de las lluvias en la satisfacción de las necesidades del N por las plantas, fundamentada por remoción a partir de la atmósfera y el retorno al suelo de parte de los compuestos volátiles que como el amoníaco y óxidos de nitrógeno se habían perdido, así como otros compuestos formados por la acción fotoquímica, descargas eléctricas y combustión de carburantes, pudiendo estar la magnitud de este aporte entre 16 y 28 kg/ha al año (Infante, 1988; León, 1997; Rodríguez; Osorio, 2001). Además, conociendo que las plantas toman el N en mayor cuantía por las raíces, en forma de iones NH_4^+ y NO_3^- provenientes de la solución del suelo, numerosos reportes coinciden al plantear que de existir deficiencias de este nutrimento, las raíces necesitarían mayor cantidad de agua para tomarlo.

4.3. Determinación del cambio que se produce en algunas variables fisiológicas dentro de las variedades tolerantes al estrés por déficit hídrico

Con el objetivo de precisar si se produjeron cambios fisiológicos en las variedades que más se destacaron en los ambientes evaluados, se procedió a realizar un análisis por separados del sistema radical y la parte aérea.

4.3.1 Análisis del sistema radical

Como se muestra en la figura 11, no se encontraron diferencias entre los dos grupos de variedades (tolerantes y no tolerantes).



RG= Raíces gruesas. RF= Raíces finas; 0-20, 0-80 (profundidad en cm).

Figura 11. Comparación de las variedades recomendada y no recomendadas para el conteo de raíces.

Estos resultados indican que las raíces no pudieron discriminar las diferencias existentes entre ambos grupos, por lo que no deben utilizarse para recomendar variedades tolerantes al estrés por déficit hídrico; contrario al estudio realizado por Rodríguez (2012), quien empleando la variable densidad de raíces finas de 0 a 40 cm de profundidad de suelo, le permitió predecir la tolerancia de los genotipos al estrés por sequía agrícola.

4.3.2. Análisis del área foliar

Los resultados obtenidos nos indicaron que existieron valores superiores en el área foliar de la hoja + 5, área foliar del tallo, índice de área foliar y contenido relativo de agua en las hojas de las variedades tolerantes al estrés hídrico contra las no tolerantes (Tabla 14).

Tabla 14. Diferencias entre las variedades tolerantes y no tolerantes, según sus valores medios.

Variable	Unidad de medida	Variedades	
		Tolerantes	No tolerantes
Área foliar hoja +5	cm ²	325.3	295.5
Área Foliar del tallo	cm ²	2788	2633
Índice del Área foliar	m ² . m ⁻²	2.052	1.777
Contenido Relativo de Agua	%	79.02	77.56
Déficit de Saturación Hídrico	%	12.82	13.93

Las diferencias pueden estar asociadas a que a mayor área de limbo, existe mayor volumen de área foliar por tallo y superficie, así como de retención de agua en las hojas, manifestada en la variable CRA. Esto determina, que a mayor retención de agua en las hojas, va existir menor déficit de saturación hídrica, lo que se muestra en la (tabla 15), influyendo en la tolerancia al estrés por déficit hídrico, y por tanto en mayor rendimiento agrícola.

Tabla 15. Relación entre las variables fisiológicas empleadas a través del coeficiente de correlación (r).

Variable fisiológica	CRA	IAF	AFT	AF hoja +5
Déficit de Saturación Hídrica (DSH)	-0.95**	-0.49*	-0.63*	-0.72*
Contenido Relativo de Agua (CRA)		0.50*	0.67*	0.76*
Índice de Área Foliar (IAF)			0.68*	0.75*
Área Foliar del Tallo (AFT)				0.93**

Estas diferencias indican que estas variables pueden servir para la predicción de los genotipos con más tolerancia al estrés por sequía agrícola, como encontró García (2004), en un estudio de 16 cultivares en la provincia Cienfuegos, donde utilizó con éxito el ancho del limbo e índice de área foliar en un modelo de predicción de la tolerancia de nuevos genotipos a la sequía agrícola.

Gómez *et al.*, (1989), al estudiar dos cultivares comerciales de respuesta extrema a la sequía agrícola, concluyeron que el contenido relativo de agua y el déficit de saturación hídrica eran indicadores eficientes en la evaluación de la resistencia a la sequía agrícola.

5. CONCLUSIONES

1. Se encontró interacción genotipo-ambiente para las variables agroazucareras evaluadas, destacando las variedades tolerantes por su manifestación favorable para las dos localidades y específicamente para Paredes la C90-501, C323-68, C86-12 y para Cristales la C86-165 y B80250.
2. Las lluvias en el período seco en combinación con la poca profundidad efectiva y el excesivo drenaje del suelo permitieron explicar las diferencias de rendimiento agroindustrial del cultivo en los años evaluados.
3. De las variables fisiológicas evaluadas, el área foliar presentó cambios en las variedades tolerantes ante el estrés por déficit hídrico, lo que no se encontró con las variables del sistema radical.

6. RECOMENDACIONES

1. Manejar por el SERVAS en los proyectos de variedades para localidades con afectación de estrés por déficit hídrico de la Empresa Azucarera Sancti Spiritus, los cultivares tolerantes y ver la especificidad de la C90-501, C323-68, C86-12, C86-165 y B80250 para su ubicación en otros ambientes.
2. Uso de riego en los períodos secos para incrementar los rendimientos cañeros.

6. BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA.

1. Abrantes, R.I. (1986). Caracterización de poblaciones de caña de azúcar en las primeras etapas de selección. Tesis en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Agrícolas. Matanzas, Cuba, Ministerio de Educación Superior, Universidad Agraria de la Habana. 95 p.2.
2. Archila, A., J. (1986). Maduración química de la caña de azúcar. (1986 Cali, Colombia). Memorias. Cali Colombia, Tecnicaza, P323-347.
3. Arrandean M. A. (1989). Breeding strategic for drought resistance. In Drought Resistance in Cereals. Edited by F. W. G. Baker. Published for ICSU.
4. Aucilino Mónica, F. Laos, M.J. Arturi, A. Suárez Orozco y C. Greco. (2000). Análisis de la interacción genotipo-ambiente para rendimiento forrajero en cebadilla criolla. Invest. Agr: Prod. Prot. Veg. Vol. 15 (3). Press by C. A. B. International. p. 107-116.
5. Annicchiarico, P. (2002). Genotype x environment interactions. Challenges and opportunities for plant breeding and cultivar recommendations. Italy, FAO Plant production and protection paper. 174. p.2-4.
6. 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. ICRISAT, Patancher, India, and the Rockefeller Foundation. 208 p.
7. Asfaw, A.; Alemayehu, F.; Gurum, F. and 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.
8. Anónimo. (2012). Liquidación de zafra, empresa azucarera Sancti Spiritus, (archivos empresa).
9. Barah, B.C., Binswanger, H.P., Rana, B.S & Rao, G.P. (1981). The use of Risk aversion in plant breeding: concept and application. Euphytica, 30:451- 458.

10. Barquié, O.; Lorenzo, R.; Cervera, G.; Hernández, I. y Gámez, H. (1997). Comportamiento del enrollado de la hoja, recuperación hídrica contenido relativo de agua en un grupo de variedades de caña de azúcar. *Innovación Tecnológica* 3(4). [Consultado 20 de mayo de 2009 Disponible en: <http://www.bibliociencias.cu/gsd/collect/revistas/index/assoc/HASH01fe/7bbd-fee5.dir/doc.pdf>.
11. Bernal, N. A. (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 en opción al grado de Doctor en Ciencias Agrícolas. Holguín, Cuba, Ministerio de Educación Superior, Universidad Agraria de la Habana. 106 p.
12. Bernal, N.; F. Morales; G. Gálvez y Ibis Jorge. (1997). Variedades de caña de azúcar, Uso y manejo. Ed. IMAGO. 95 pp.
13. Bernal N., Ibis Jorge, N. Milanés, S. Castro, G. Pérez, J. Vallina, R. Cruz y Ángela Tomeu. (1999). Situación actual y perspectivas del Mejoramiento Genético de variedades de caña de azúcar en Cuba. Procedimiento Tecnológico para la implementación del Servicio de Variedades y Semilla. Dpto. Mejoramiento Genético. INICA, pp. 1-1
14. Bezuidenhout, C. N., P. J. Hull, R. E. Schulze, M. Maharaj and P. W. L. Lyne. (2007). Agroclimatic and hydrological response surfaces for sugarcane production in South Africa. *Proc. ISSCT* 26: 526-530.
15. Bilbro, J.D. y Ray L.L. (1976). Environment stability and adaptation of several cotton cultivars. *Crop Sci.* 16: 821-829.
16. Borrero, J.; C.P. Martínez; M.C. Duque; J. Silva. (2004). Análisis de la adaptación regional de líneas inter-específicas de arroz en Colombia. *Fitotecnia Colombiana.* 4:36-43.
17. Castro, F. (1975): Informe Central al Primer Congreso del PCC. DOR del C.C. del PCC.
18. Castro, F. (1980): Informe Central al Segundo Congreso del PCC. DOR del C.C. del PCC.

19. Castro, F. (1986): Informe Central al Tercer Congreso del PCC. DOR del C.C. del PCC.
20. Castro, F. (1991): Apertura del Cuarto Congreso del PCC. DOR del C.C.
21. Castro, S. (1991). Evaluación de ambientes y genotipos de caña de azúcar en la provincia Holguín. Tesis en opción al grado de Doctor en Ciencias Agrícolas. Holguín, Cuba. Ministerio de Educación Superior. Universidad Agraria de la Habana. 94 p. del PCC.
22. Castro, P. S. (1992). Evaluación de ambientes y genotipos de caña de azúcar en la provincia Holguín. (Tesis para optar por el grado de Dr. Ciencias Agrícolas). Universidad de la Habana 114 p.
23. Campo, R.; Mayra Guerra; F. Cuadra; Norma Hervis y J. Freeman. (1998). Variedades energéticas de caña de azúcar; una solución a la biomasa del presente y del futuro, Cuba & Caña 1: 10-13.
24. Castro, F. (2002). Un ambicioso y grandioso programa de superación de los trabajadores azucareros. Tabloide especial No 24. 8 p.
25. Campbell B.T. and Jones M.A. (2005). Assessment of genotype x environment interactions for yield and fiber quality in cotton performance trials. Euphytica 144: 69–78.
26. Castro, F. (2008). Un tema para meditar. Reflexiones del compañero Fidel. Granma, CU, octubre 3: 2.
27. Castro, R. (2011). Continuaremos haciendo realidad todo lo acordado. Granma (CU), diciembre 2:2.
28. Carvalho, M.; Chopart, J. L. and Conti Medina, C. (2011). Sugarcane root length density and distribution from root intersection counting on a trench-profile. Sci. Agric. (Piracicaba, Brazil.), 68(1):94-101.
29. Carbonell, J.; Amaya, A.; Ortiz, B.V.; Torres, J.S.; Quintero, R. e Isaac, C.H. (2001). Zonificación agroecológica para el cultivo de caña de azúcar en el valle del río Cauca. Tercera aproximación. Cali, Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia. 10 p.
30. Clarker, J. M. (1996). Efecto del enrollamiento de la hoja sobre la pérdida de agua en Triticum sp. Can J. Plant Science 66: 885-890.

31. Centella, A. (2002). Diccionario Meteorológico Internacional. Disponible en: <http://www.infomet.fcr.es/assaig/S.htm>
32. Centella, A.; Lapinel, B.; Solano, O.; Vázquez R.; Fonseca, C.; Cutié, V.; Báez, R.; González, S.; Sille, J.; Rosario, P. y Duarte, L. (2006). La Sequía meteorológica y agrícola en Cuba y la República Dominicana. La Habana, 174p.
33. Chen, H.H.; Shen, Z.Y. and Li, P.H. (1982). Adaptability of crop plants to high temperature stress. *Crop Science* 22: 719-725.
34. Cochran, W.G. y Cox, G.M. (1965). Diseños experimentales. 4ta reimpresión. México, D.F. Edit. F. Trillas. 661 p.
35. Chopart, J.L.; Rosa, S.R.; Carvalho de Azevedo, M. and Medina, C. (2008). Estimating sugarcane root length density through root mapping and orientation modelling. *Plant Soil*. 313: 101-112.
36. Crossa, J. (1990). Statistical analyses of multilocation trials. *Adv. Agron.* 44: 55–85.
37. Cuéllar, I.; M. de León, A. Gómez, Dolores Piñón, R. Villegas e Ignacio Santana. (2003). Caña de azúcar paradigma de sostenibilidad. Ed. PUBLINICA. 175 pp.
38. Cruz, R. (2000). Obtención de variedades de caña de azúcar tolerantes a diferentes condiciones de estrés ambiental. Proyecto de investigación CITMA–INICA.
39. De Armas R.; Ortega, E. y Rosa R. (1988). Régimen Hídrico en Fisiología.
40. Del Rosario, J. y Lilliam Viqueira. (1992). El incremento de los rendimientos agrícolas de variedades de caña de azúcar como respuesta al riego. Resúmenes 46 Congreso ATAC p37. Vegetal. La Habana, Ed. Pueblo y Educación. 325 p.
41. Díez, L.; Ferrer M. y Gómez L. (1987). Estudio preliminar de la densidad estomática en diferentes secciones de la lámina foliar en relación con la resistencia a la sequía. Resúmenes I Encuentro Investigación–Producción en la agricultura cañera. La Habana. INICA, 258 p.

42. Eberhart, S.A. and Russell, W.A. (1966) Stability parameters for comparing varieties. *Crop Science* 6(1): 36-40.
43. Edmé, S.J., Miller, J.D., Graz, B., Tai, P.Y.P. and Comstock, J.C. (2005). Genetic contribution to yield gains in the Florida sugarcane industry across 33 years. *Crop Sci.* 45: 92-97.
44. Errabii, T.; Bernard, C.; Essalmani, H.; Abrini, J; Idaomar, M.; and Skali, N.: (2006). Growth, proline and ion accumulation in sugarcane callus cultures under drought-induced osmotic stress and its subsequent relief. *African Journal of Biotechnology* 5(16): 1488-1493.
45. FAOSTAT. (2008). [Consultado 20, mayo, 2009]. Disponible en: <http://faostat.fao.org/default.aspx>.
46. Ferrer, M.; Gómez, L. y Blinzniuk, V.P. (1987). Posibilidades de la resistencia eléctrica como método de diagnóstico de resistencia al estrés en caña de azúcar. Resúmenes I Encuentro Investigación–Producción INICA. La Habana, 255 p.
47. Ferrer, M.; Sánchez, E.; Viqueira, L.; Gómez, L. y San Juan, Z. (2000). Diez años de estudios fisiológicos de régimen hídrico en caña de azúcar. Resúmenes XII Seminario Científico INCA. La Habana.
48. Frisvold, G., Sullivan, J. and Raneses, A. (1999). Who gains from genetic improvements in U.S. crops. *AgBioForum* 2: 237-246.
49. Fonseca, J. y García, S. (1987). Necesidades de agua de la caña de azúcar para diferentes épocas de plantación y corte en el occidente de Cuba. Resúmenes I Encuentro Investigación–Producción en la agricultura cañera. INICA. La Habana 221p.
50. Gálvez, G. (1978). Estudio de la interacción $g \times e$ y métodos de estabilidad en experimentos de variedades de caña de azúcar (*Saccharum* spp híbrido). Tesis en opción al grado de Doctor en Ciencias Agrícolas. La Habana, Cuba. Ministerio de Educación Superior. Universidad Agraria de la Habana. 76 p.
51. Gauch, H.G. (1988). Model selection and validation for yield trials with interaction. *Biometrics* 44: 705-715.

52. Gallais, A. (1992). Adaptation et adaptabilité en amélioration des plantes. *Sel. Fr.*, 42: 55-57.
53. García; H., y H. Jorge. (1994). Determinación del tamaño de muestra para la caracterización de los cruzamientos en las etapas iniciales de selección. Resúmenes V Jornada Científica del INICA, p. 18.
54. García, A. y González, M. (1997). Marcador morfológico para la selección temprana de variedades de arroz tolerantes a la sequía. *Cultivo Tropicales* 18(2): 47-50.
55. García, M. y Medina, E. (2003). Crecimiento y acumulación de prolina en dos genotipos de caña de azúcar sometidos a salinización con cloruro de sodio. *Rev. Facultad. Agronomía* 20 (2). [Consultado 20].
56. García, P. H. (2004). Optimización del proceso de obtención de variedades de caña de azúcar tolerantes al estrés por sequía y mal drenaje en la región central de Cuba. La Habana. 122h. Tesis en opción al grado científico de Dr. en Ciencias Agrícolas. Ministerio del Azúcar. INICA.
57. García, H; Jorge, H; Jorge, Ibis. (2006). Manejo sostenible de los recursos fitogenéticos en función de la producción de caña de azúcar bajo condiciones de estrés por sequía. Resultado INICA presentado a Premio MINAZ, Cuba.
58. 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.
59. Ghannoum, O. (2009). C4 photosynthesis and water stress. *Annals of Botany* 103: 635–644.
60. Gilbert, R. A., Shine J. M., Miller J. D., Rice R. W. and Rainbolt C. R. (2006). The effect of genotype, environment and time of harvest on Sugarcane yields in Florida, USA. *Field Crops Research* 95: 156- 170.
61. Gómez, L.; Viqueira, Lilliam y Rodríguez, C.R. (1981). Estudio de la tolerancia a la sequía de la caña de azúcar. Memoria 43 Conferencia ATAC, La Habana, p.113-131.

62. Gómez, L.; Milanés, N.; Pardo, F.; Ramírez, M. y Gutiérrez, R. (1986). Estimación de la resistencia a la sequía de 19 variedades de caña de azúcar. Rev. INICA 1: 71-79.
63. González, R. y Caridad Cruz. (1987). Requerimientos de riego de la caña de azúcar en suelos Ferralíticos rojos. Resúmenes I Encuentro Investigación-Producción en la agricultura cañera. INICA p234.
64. Gómez, Lourdes; Menéndez, A.; Pardo, F. y Quintana, J. (1989). Estudio de la retención de agua de diferentes hojas de 2 variedades de caña de azúcar. (Manuscrito). INICA La Habana. 12 p.
65. Gómez, L.; Ferrer, M. y San Juan, Z. (1990). La pérdida de agua de las hojas de la caña de azúcar como criterio de su resistencia a la sequía. Resúmenes Tercera Jornada Científica del CNCA. Ministerio del Azúcar. La Habana, p. 43.
66. González M. A. (1994). Caracterización del efecto ambiental en estudios de regionalización de variedades de caña de azúcar en la provincia Las Tunas. (Tesis para optar por el grado de Dr. Ciencias Agrícolas). Cuba. p. 105.
67. González R. y A. Vega. (1999). Procedimiento tecnológico para la implementación del servicio de variedades y semilla. Dep. Mej. Genético, INICA-MINAZ: 122 pp.
68. González, R.M.; Tomeu A; Jorge, H.; Santana, I. y Vega, A. (2001). La producción de variedades de caña de azúcar. Retos para el presente milenio. En: Contribución al conocimiento y manejo de las variedades de caña de azúcar. Curso de capacitación UASTEC. La Habana, INICA. 75 p.
69. González, L. M.; Argente, L.; Estrada, A.; Zaldívar, N. y Ramírez, R. (2005). Evaluación de la tolerancia a la sequía en genotipos de trigo (*Triticum aestivum* L.) obtenido en Cuba por inducción de mutantes. Rev Cultivos Tropicales. 26(3): 65-69.

70. 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.
71. González, R., H. Jorge, R. Almeida, N. Bernal, Susana Tuero, L. Pardo y H. Gámez. (2007). El "SERVAS" y su contribución al mejoramiento de la composición varietal de la caña de azúcar en Cuba. En 60 Aniversario EPICA Jovellanos. CD - ISSN1028-6527
72. Guntin, P. M. y Tejeda V. M. (2007). Un estudio para las condiciones edafoclimáticas en el norte de la provincia cubana de Las Tunas para el cálculo de las necesidades hídricas del cultivo de la caña de azúcar. *Cuba & Cana* 3: 12-19.
73. Handi, H. (2009). Bases para el establecimiento de un programa de mejora genética de la caña de azúcar para las condiciones de estrés ambiental de la provincia de Khuzestan, Irán. Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Agrícolas. Universidad Agraria de La Habana.
74. Henckel, P. A. (1964). Physiology of plants under drought. *Ann. Rev. Plantphysiol* 15: 363-386.
75. Hernández, E. y Amaya L. (2002). Respuesta de cuatro variedades de caña de azúcar (*saccharum* sp) a condiciones de sequía, mediante la determinación de la salida de electrolitos. *Caña de Azúcar* 20(2): 3-16. [Consultado 20, mayo, (2009)]
76. Hogarth, D. M. (1976). News varieties lift sugar production. *Producers Rev.* 66 (10): 21-22.
77. IAPSIT. (2009). International Association of Professional in Sugar and Integrated Technologies. *Newsletter.* 4(2): 2-3.
78. Ibarra, J., J. Rodríguez, G. Hernández, R. Cruz. (2007). Impacto del SERVAS en el manejo de las variedades en el agroecosistema cañero de la provincia Holguín. En 60 Aniversario EPICA Jovellanos. CD - ISSN1028-6527.

79. Infante, C. (1988). Ciclo del Nitrógeno en el cultivo de la caña de azúcar (San Felipe, Edo. Yaracuy. Tesis doctoral para optar al Grado Científico de Doctor en Ciencias Univ. Central de Venezuela, 176 pp.
80. INICA-MINAZ. (2011). Reunión Nacional de Variedades, Semilla y Sanidad Vegetal. Sancti Spíritus, Ministerio del Azúcar. 148 p.
81. Jorge, H. (1996). Estudio genético de los componentes agro-azucareros en las etapas clonales del esquema de selección partiendo de posturas aviveradas de caña de azúcar (*Saccharum* spp). Tesis opción al grado científico de Doctor en Ciencias Agrícolas. Cienfuegos, Cuba, Ministerio de Educación Superior, Universidad Agraria de la Habana. 90 p.
82. Jorge H. Íbis Jorge y H. García. (2001). Variedades de caña de azúcar cultivadas en Cuba. En: Contribución al conocimiento y manejo de las variedades de caña de azúcar" R. M. González ed.:23-34.
83. Jorge, H; Íbis Jorge; H. García (2002). Normas y Procedimientos del Mejoramiento Genético de la Caña de Azúcar en Cuba. BOLETÍN NO. 1. Revista Cuba & Caña. INICA, La Habana, Cuba.
84. Jongdee, B.; Fukai, S.; and Cooper. M. (2002). Leaf water potential and osmotic adjustment as physiological traits to improve drought tolerance in rice. *Field Crop Res.* 76: 153–163.
85. Jorge, H. e Ibis Jorge. (2003). Programa de fitomejoramiento, Impacto en la Producción Azucarera Cubana. Ed. PUBLINICA. 99 pp.
86. Jorge, H.; Ibis Jorge y A. Arencibia. (2004). Catálogo de nuevas variedades de caña de azúcar. PUBLINICA. 101 pp.
87. Jorge, H., I. Jorge, H. García, N. Bernal, G. Pérez, L. Cabrera, R. Díaz, A. Vera, V. Caraballoso, O. Suárez y S. Castro. (2008). Variedades de caña de azúcar en Cuba. Nuevo enfoque para su concepción y manejo. Evento de Diversificación. 763-776.
88. Jorge, H.; Jorge, I. y Bernal, N. (Editores). (2010a). Catálogo. Nuevas Variedades de Caña de Azúcar. La Habana, Cuba. INICA. 100 p.

89. Jorge, H.; Suarez, O; García, H.; Jorge, I. and Benítez, L. (2010b). Diversification of sugarcane varieties for cattle feed and sustainability. Proc. Int. Soc. Sugar Cane Technol. 27:
90. King, N. J. Manual del cultivo de la caña de azúcar. Instituto del libro. La Habana (1968).
91. Kang, M.S. (1998). Using genotype-by-environment interaction for crop cultivar development. Adv. Agron. 62: 199-252.
92. Kozhushko, N.N. (1982). Metodología para la determinación de la resistencia a la sequía de las gramíneas por la variación de los parámetros del régimen hídrico (capacidad hidrorreguladora, capacidad de absorción de agua, déficit hídrico). Leningrado, Instituto Nacional de Investigación Científica sobre cultivo de plantas "I. Vavilov". 20 p.
93. Kuhnel, I. (1996). Relationships of Australian sugarcane yield to various climatic variables. Theor. Appl. Climatol. 54: 217-228.
94. Lauer, J.; Coors, G. and Flannery, P.J. (2001). Forage yield and quality of corn cultivars developed in different eras. Crop Sci. 41: 1449-1455.
95. Lavoranti J. O. (2003). Estabilidade e adaptabilidade fenotípica através da reamostragem "bootstrap" no modelo AMMI. Tese apresentada Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo para obtenção do título de Doctor em Agronomia. Concentração: Estatística e Experimentação Agronômica Piracicaba. 166 p.
96. Landell, M.G.A.; Campana, M.P.; Figueiredo, P.; Vasconcelos, A.C.M.; Xavier, M.A.; Bidoia, M.A.; Prado, H.; Silva, M.A.; Dinardo-Miranda, L.L.; Santos A.S.; Perecin D; Rossetto, R.; Martin, A. L. Gallo, P.B. y Souza, S.C. 2005. Variedades de cana-de-açúcar para o centro-sur do Brasil. 15ª Liberação do programa cana IA (1995-2005). Campinas: Instituto Agronômico. 17p (Boletim Técnico; 197).
97. Lapinel, B.; Cutre, V. y Fonseca, C. (2010a). ¿Se humedecerá la sequía? Granma, Cu, junio 12: 8.

98. Lapinel, B. (2010b). Vigilia en tierra sedienta. Rev. Bohemia, Cu, 26 de febrero Año 102. No. 5.
99. Levitt, J. (1980). Responses of plants to environmental stresses. New York, Academic Press. 10 p.
100. Leyva, O. S.; Figueredo A. A.; Parra L.S. y Arcia T.B. (2000). Labores mínimo y desarrollo del sistema radical en caña de azúcar. Rev. ATAC 1: 44- 47.
101. 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 Ávila. Tesis en opción al grado de doctor en Ciencias Agrícolas. Camagüey, Cuba. Ministerio de Educación Superior. Universidad Agraria de la Habana. 198 p.
102. Mandel, J., (1969). The partitioning of interaction in analysis of variance. Journal Research of the National Bureau of Standards, Series B: Mathematical Science 73, 309-328.
103. Manigbas, N. L. (2002), Morpho-physiological character associated with genotype and environment interactions in sugarcane (*Saccharum officinarum* L.).
104. Martín, J.A. (2004). 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 100.
105. Matta, F. M. (2004). Exploring drought tolerance in coffee: a physiological approach with some insights for plant breeding. Brazilian Journal of Plant Physiology, 16(1): 1-6.
106. Medrano, H.; Chaves, M. M. and Porceddu, C.; Carelda, S. (1998). Improving forage crops for semi-arid areas. Agriculture 27: 87-94.
107. Mesa; J. M. (1995). Algunas Estimaciones de Parámetros Genéticos-Estadísticos y Simulación de la Eficiencia de la Selección de

- Poblaciones de Caña de Azúcar (*Saccharum spp.*). Tesis para optar por el grado de Dr. en Ciencias Agrícolas INICA, MINAZ, 101pp.
108. Memon, Y. M.; H. K. Keerio and R. N. Panhwar. (2004). Yield response of different sugarcane genotypes under agro-climatic conditions of Thatta. *Journal of applied sciences* 4(1): 90-92.
 109. MINAZ, (2009). Estrategia para la producción de caña 2009-2013. Ministerio del Azúcar. La Habana, Cuba. 20 p.
 110. Miller, J. D.; and Gilbert, R. A. (2010). Sugarcane Botany: A Brief View. [consultado 20, mayo, 2010]. Disponible en: http://edis.ifas.ufl.edu/TOPI_C_Sugarcane_Cultural_Practice
 111. Mojena, R.; Vega, D.; Meneses, S.; Robleda, D. y Ramírez J. (1990). Estudio de la resistencia de la sequía en variedades de caña de azúcar mediante indicadores bioquímicos y fisiológicos. *Rev. ATAC* 2: 40-51.
 112. Morales A. (1993). Programación y Economía de la Zafra. Edit. de Ciencias Sociales, La Habana. pp25.
 113. Moul, N.G. (2005). The development of a catchment scale irrigation systems model for sugarcane. MSc Eng Dissertation, School of Bioresources Engineering and Environmental Hydrology, University of KwaZulu-Natal, Pietermaritzburg, 129p.
 114. Ortega, E.; Rodés, R.; E. Soto; Peláez, I; R. De Armas; Cabrera, N.; Hieke, B.; Bejottes, M.; J. Pardo; S. Naranjo; V. García y Diez-Cabezas, M. (1989). Bases fisiológicas de la productividad de la caña de azúcar. La Habana, Editorial Academia. 25 p.
 115. ONS (Observatorio Nacional de Sequía). (2008). Información básica sobre sequía. España. [Consultado 28, mayo, 2008].
 116. Ojeda E.; Palmero, O.; Castro, I.; Torres, G. y Castellano, P. (2009). Comportamiento de cultivares de caña de azúcar en condiciones de sequía en la UPC Comandante Guevara de la Empresa Azucarera Ecuador. Memoria Jornada Científica-Productiva 45 Aniversario del INICA. La Habana, Cuba. CD: ISSN1028-6227, 11 p.

117. Pérez, G.; N. Bernal; A. China; J. P. O'Relly y F. de Prada. (1997). Recursos Genéticos de la caña de azúcar. Edit. IMAGO. 249 pp.
118. Pérez, N. R.; Echevarría, D. L. y García M. A. (2004a). Restructuración de la Industria azucarera: inicios de un debate. Universidad de la Habana. [Consultado 10, noviembre, 2009].
119. Pérez, L. J.; Cuéllar, A.; De león, M.; Santana, S.; Fonseca, A. y Pérez, I. M. (2004b). Caña de azúcar: Captación, conservación y manejo del agua y la humedad del suelo. Cuba & Caña. Boletín especial (1): 43.
120. Pineda, E. (2002). Los factores edáficos y la respuesta de la caña de azúcar a los fertilizantes. Tesis en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Agrícolas. La Habana. 123h, Ministerio de Educación Superior, Universidad Agraria de la Habana. 100 p.
121. Pinheiro, H. A. (2004). Physiological and morphological adaptations associated with drought tolerance in robusta coffee (*Coffea canephora* Pierre var. Kouillou). Tesis pregrado. Universidad Federal de Viscoa.
122. Queme, J.L.; H. Orozco, W. Ovalle and N. Melgar (2005). Analysis of genotype-by-environment interaction for sugarcane based on the AMMI model, proc. ISSCT, vol.25.
123. Queme, J.L.; J. Crossa: H. Orozco and M. Melgar (2007). Analysis of genotype-by-environment interaction for sugarcane using the sites regression model (SREG). Proc. ISSCT. vol. 26. pp 764-769.
124. Rábago R; Vera, A; Caraballos, V; Calderín, R; Cruz, O; Morales, L; Álvarez, A; Barata, M; Delgado, D. (2007). Memorias 60 aniversario la Estación de Investigaciones de la Caña de Azúcar "Antonio Mesa. ISSN 1028'6527. Nacional. Granma Internacional. La Habana. pp 6.
125. Reynoso, A. 1878. Ensayo Sobre el Cultivo de la Caña de Azúcar. Tercera Ed. Paris, 372 p.
126. Roldós, J.E. (1986). Evaluación de algunos factores edáficos limitantes de la producción de la caña de azúcar. La Habana. 123h. Tesis en

opción al grado científico de Doctor en Ciencias Agrícolas. Ministerio del Azúcar. INICA.

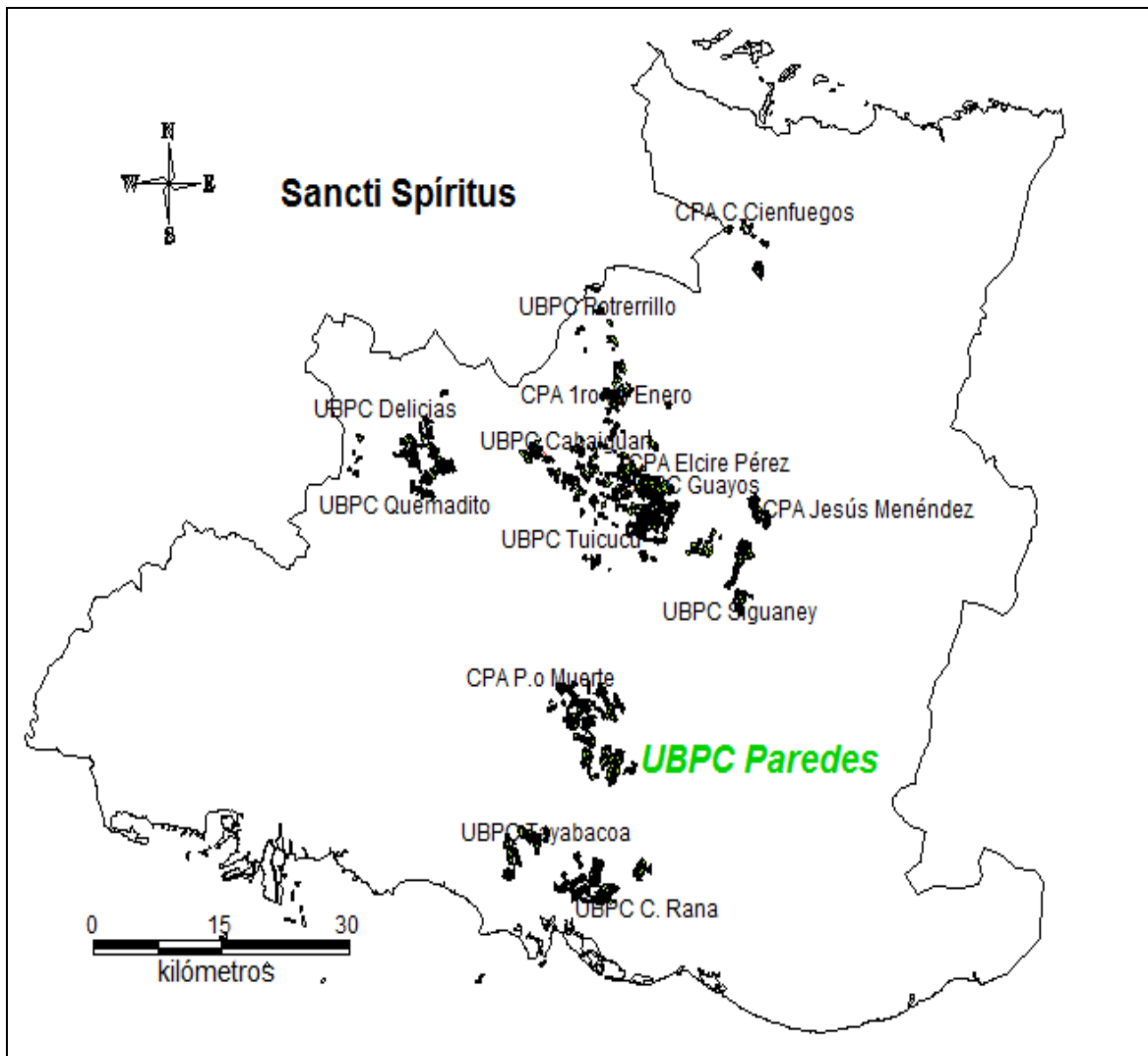
127. Rodríguez, S. R. y Nilva Osorio. (2001). La fertilización con nitrógeno en un experimento de larga duración después de 15 cosechas sucesivas en Las Tunas. XV Congreso Latinoamericano y V Cubano de la Ciencia del Suelo. Boletín Sociedad Cubana de la Ciencia del Suelo. No. 4 Nov. 01. ISSN 1609-1876.
128. Rosales, U. (2002). Carta comunicación objetivo central del proceso de reestructuración del MINAZ, La Habana, 15 pp.
129. 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. Santiago de Cuba 123 p. tesis presentada en opción al grado científico de doctor en ciencias agrícolas. Instituto de Investigaciones de la Caña de Azúcar Universidad Agraria de la Habana.
130. Ruiz, María, A. Uset, J. Ruiz, Alicia del Valle, H. Medina y Maira Ferrer. (2001). Sistema para estimar la afectación en los rendimientos de la caña de azúcar por clima y suelos. XV Congreso Latinoamericano y V Cubano de la Ciencia del Suelo. Boletín Sociedad Cubana de la Ciencia del Suelo. No. 4 Nov. 01. ISSN 1609-1876.
131. Saborit, Ileana. (2003). Rev. Ciencia, Innovación y Desarrollo, Vol. 8 No 1:19-25.
132. Sakaigaichi T.; Terajima, Y.; Sugimoto, A.; Irei, S.; Fukuhara, S.; Matsuoka, M.; Ujihara, K.; Abe, J. and Tarima, R. (2007). Comparison of root distribution and root growth direction in two sugarcane hybrids with contrasting tolerance to water stress. Proc. Int. Soc. Sugar Cane Technology. 26: 754-757.
133. Santana, I; Santos, J. C; Guillén, S.; (2007). Instructivo técnico para la producción y cultivo de la caña de azúcar.
134. Slávik, G. (1974). Water loss by detached leaves. In Methods of studying Plant Water Relations. Academia Praga. p.284-285.

135. Smith, D.M.; Inman-Bamber, N.G. and Thorburn, P. J. (2005). Growth and function of the sugarcane root system. *Field Crops Res.* 92: 169–183.
136. Stat Soft. (2003). *Statistica for Windows*, Release 6.1
137. Tigerstedt, P.M.A. (1994). Adaptation, variation and selection in marginal áreas. *Euphytica*, 77: 171-174.
138. Torres, B.; Barquié, O.; Ruiz, O.; Rodríguez, M.; Díaz, P.; Maribona, P.; Niubó, E.; Coto, O. y Mitchel R. (1994). Análisis bioquímicos y fisiológicos: Su posible relación con los mecanismos de tolerancia a la salinidad. *Resúmenes V Jornada Científica INICA*. 126 p.
139. Torres, S.; Nerey, Y.; Águila, E.; Aguilar, R.; y Rodríguez, M. (2001). (*Sorghun bicolor*, Moench). *Rev. Centro Agrícola* 3: 75-80. Determinación del grado de tolerancia a la sequía en sorgo.
140. Trujillo, L.; Menéndez, C.; Ochogavía, M.; Hernández, I.; Borrás, O.; Rodríguez, R.; Coll, Y.; Arrieta, J.; Banguela, A.; Ramírez, R.; Hernández, L. (2009). Engineering drought and salt tolerance in plants using SodERF3, a novel sugarcane ethylene responsive factor. *Biología Aplicada*. Versión On-line ISSN 1027-2852. [consultado 12, enero, 2012]. Disponible en: <http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=1027-8522009200011&script=sciarttext>
141. Varela, M. (2002). Los métodos Biplot como herramienta de Análisis de Interacción de orden superior en un Modelo Lineal/Bilineal. PhD tesis. España, Universidad de Salamanca. 136 p.
142. 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.
143. Vasconcelos, A.C.M. (2002). Desenvolvimento do sistema radical e da parte aérea de socas de cana-de-açúcar sob dois sistemas de colheita: crua mecanizada e queimada manual. Jaboticabal. Tese Doutorado. São Pablo, Brazil. UNESP/FCAV. 140 p.

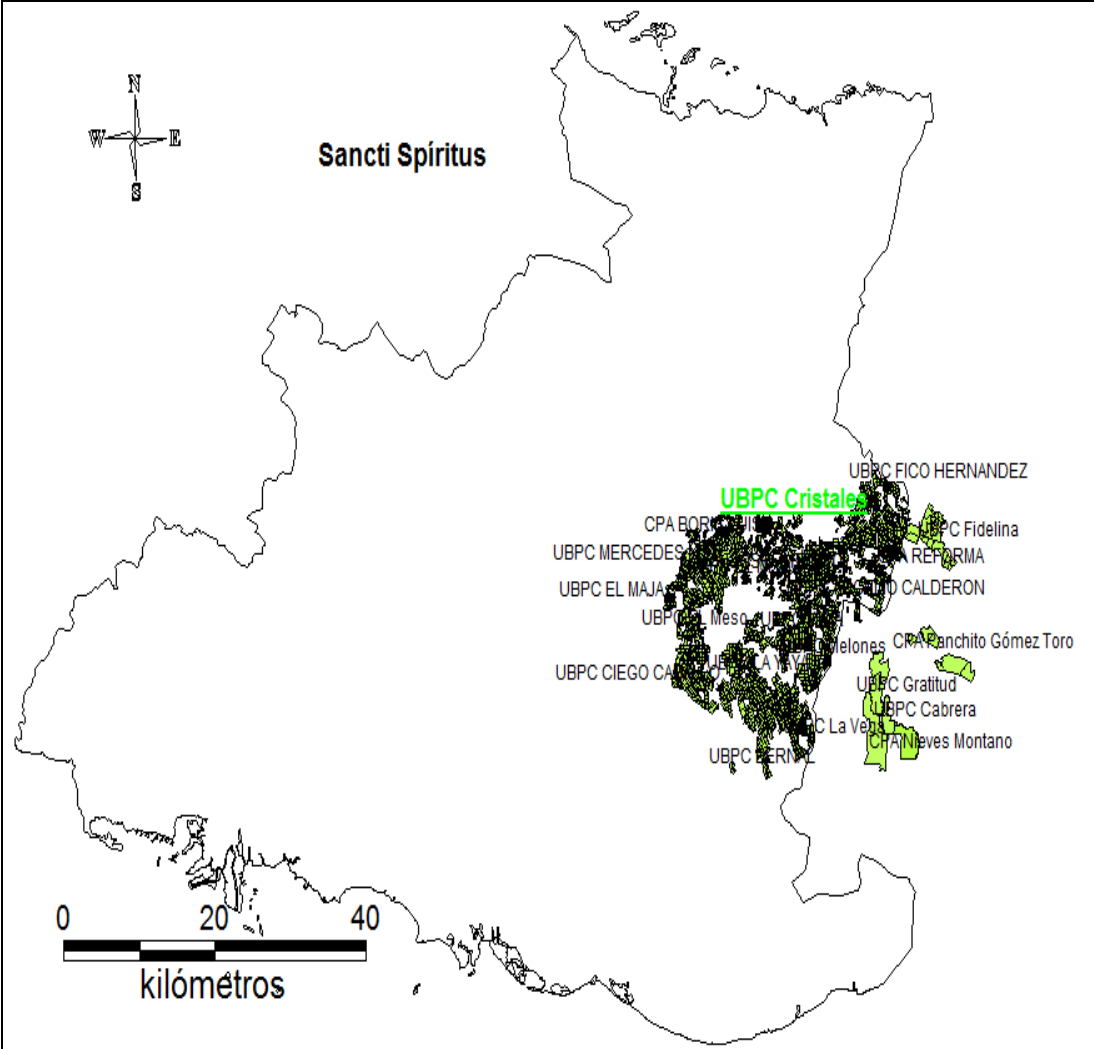
144. Vasconcelos, A.C.M.; Casagrande, A.A.; Perecin, D; Jorge, L.A.C. and Landell M.G.A. (2003). Avaliação do sistema radical de cana-de-açúcar por diferentes métodos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 27: 849-858.
145. Valladares, F. (2004). *Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante*. Madrid, Ministerio de Medio Ambiente, EGRAF, S. A. ISBN: 84-8014-552-8. P164-168.
146. Viqueira, L.; Acosta, I. y Rodríguez, C.R. (1986). La retención de agua en hojas de diferentes variedades de caña de azúcar. *Rev. INICA* 1: 62-70.
147. Villegas, R. y Benítez, L. Editores. (2003). Informe INICA, MINAZ. Evaluación de la aptitud física de las tierras dedicadas al cultivo de la caña de azúcar en Cuba, base para la diversificación de la agroindustria azucarera. La Habana, Cuba.
148. Westcott, B. (1987). A method of assessing the yield stability of crop genotypes. *J. Agric. Sci.* 108: 267-274.
149. Wright, A.J. (1971). The analysis and prediction of some two factors interactions in grass breeding. *J. of Agric. Sci. Cambridge*, 76: 301-306.
150. Wikipedia, (2005). <http://wikimediafoundation>. Enciclopedia libre.
151. Yaseen, M.; M. Zakria, I. U. D. Shahzad; M. Imran and M. Aslam. (2005). Modeling and forecasting the sugarcane yield of Pakistan. *Intern. Journal of Agric. & Biol.* 180-183.

8. ANEXOS

Anexo 1. Distribución geoespacial de las áreas dedicadas al cultivo de la caña de azúcar en las unidades productoras cañeras (UBPC y CPA) de la UEB Melanio Hernández.



Anexo 2. Distribución geoespacial de las áreas dedicadas al cultivo de la caña de azúcar en las unidades productoras cañeras (UBPC y CPA) de la UEB Uruguay.



Anexo 3. Interacción variedad x cepa x localidad para el rendimiento agrícola.

Variedad	Cristales P	Cristales R1	Cristales R2	Paredes P	Paredes R1	Paredes R2	Promedio
B80250	101.25	56.25	62.79	95.62	30.28	29.21	62.5667
C128-83	101.25	38.53	65.93	127.5	36.83	26.56	66.1
C132-81	157.5	70.31	65.93	70.31	60.933	77.34	83.7206
C137-81	101.25	42.18	28.25	78.75	51.75	62.43	60.7683
C266-70	135	45	56.51	123.8	34.123	37.55	71.9894
C323-68	81.56	43.31	34.53	134.7	54.007	42.5	65.0994
C86-12	75.93	38.53	40.81	140.6	52.06	42.86	65.135
C86-165	151.75	37.4	65.423	85	49.93	34.53	70.6722
C86-251	101.25	52.03	47.247	135.4	44.09	42.5	70.4267
C86-456	78.75	41.06	34.53	123.8	38.81	39.37	59.3783
C86-503	92.81	52.31	53.37	135.4	39.663	42.5	69.3439
C86-56	75.93	68.25	21.97	100.9	30.63	18.59	52.7167
C87-252	33.75	29.65	21.98	100.9	35.767	23.9	40.9978
C88-380	126.56	79.03	78.48	157.5	55.123	21.25	86.3239
C89-148	64.68	59.6	69.06	116.9	54.89	69.06	72.36
C89-161	104.06	55.12	53.37	134.1	42.85	31.71	70.195
C89-176	106.87	61.59	43.95	125.9	51.173	51	73.4206
C90-501	90	42.18	37.67	123.9	54.36	58.43	67.7556
C90-530	61.87	42.2	21.97	128.4	52.06	34.53	56.845
Co997	47.81	46.28	43.95	95.62	28.26	39.84	50.2933
CP52-43	90	50.9	53.37	125.9	47.81	49.14	69.5267
SP71-1406	95.62	62.71	65.93	79.68	53.027	45.15	67.0194
Total general	94.339	50.66	48.501	115.5	45.383	41.82	66.0297

P. planta; R1. Retoño 1 y R2. Retoño2

Anexo 4. Interacción variedad x cepa x localidad para el rendimiento en azúcar.

Variedad	Cristales P	Cristales R1	Cristales R2	Paredes P	Paredes R1	Paredes R2	Promedio
B80250	15.54	9.01	10.79	17.31	5.396667	4.986667	10.50556
C128-83	16.27	5.63	11.73	24.53667	7.013333	4.25	11.57167
C132-81	25.54	11.17	12.03	12.25	10.75333	11.08333	13.80444
C137-81	15.44	6.28	5.06	14.12	9.21	9.313333	9.903889
C266-70	19.8	6.64	10.57	22.64333	6.27	5.866667	11.965
C323-68	13.25	7.06	6	24.71333	9.89	6.956667	11.31167
C86-12	11.33	6.11	6.72	24.62667	8.956667	6.756667	10.75
C86-165	24.08	5.52	9.7	15.32	8.973333	4.983333	11.42944
C86-251	15.06	7.7	8.44	24.19	7.793333	7.556667	11.79
C86-456	12.19	6.08	6.29	20.85	6.406667	6.19	9.667778
C86-503	14.94	5.91	9.67	24.35	7.03	6.49	11.39833
C86-56	11.76	10.01	4.09	16.77333	5.033333	2.763333	8.405
C87-252	5.05	4.7	3.99	19.02667	6.716667	3.356667	7.14
C88-380	17.87	12.56	13.81	27.15	9.34	3.853333	14.09722
C89-148	9.17	9.2	13.05	21.93	10.23	12.16333	12.62389
C89-161	16.09	8.73	9.06	23.35	7.44	5.383333	11.67556
C89-176	18.11	8.81	8.18	21.72333	8.613333	8.23	12.27778
C90-501	13.03	6.03	7.06	22.63333	9.743333	9.926667	11.40389
C90-530	10.12	6.54	3.7	21.96333	8.77	4.98	9.345556
Co997	7.42	7.07	7.1	18.51	5.38	5.67	8.525
CP52-43	13.24	8.46	9.64	23.50333	8.843333	8.023333	11.95167
SP71-1406	13.36	9.14	11	13.38667	8.69	7.1	10.44611
Total general	14.48455	7.652727	8.530909	20.67545	8.022424	6.631061	10.99952

P. planta; R1. Retoño 1 y R2. Retoño2

Anexo 5. Variedades que resultaron tolerantes al déficit hídrico.

C86-251



C88-380



C89-148



C89-161



C89-176



C90-501

