

Mejoramiento Genético

Clímaco Cassalet Dávila y [Hernando Ranjel Jiménez*](#)

Introducción

La explotación comercial de la caña de azúcar a nivel mundial se inició con clones nobles de *Saccharum officinarum* y de *S. sinense*. En Colombia, este proceso se inició con la plantación de los clones Badila, Cristalina, Othaheiti, Castilla o Blanca, Cayanna, Rayada y Uba, entre otros. Duvick (1986) considera que más del 50% del aumento en la producción actual de la caña de azúcar se debe a la introducción de cultivares mejorados. Los clones de *S. officinarum* se reemplazaron en forma exitosa en Colombia por variedades de mayor producción como POJ 2878 la cual, a su vez, fue reemplazada por la variedad CP 57-603, altamente productora de caña y de azúcar. En muchos casos, la sustitución de una variedad se hace para resolver problemas fitosanitarios; por ejemplo, en el Valle del Cauca, la variedad MZC 74-275, resistente al carbón y al mosaico aunque susceptible a la roya, reemplazó a la variedad CP 57-603.

Las variedades extranjeras PR 61-632, V 71-51, y las variedades CENICAÑA Colombia (CC) han empezado a surgir en el sector azucarero colombiano, ya que combinan la resistencia al carbón, a la roya y al mosaico, con una alta producción de caña y de azúcar. Además, por la buena adaptación de algunas de estas variedades a suelos salinos, se están utilizando para reemplazar la variedad Co 421.

En Colombia, el mejoramiento de la caña de azúcar es reciente. En la década de los 30, la investigación se concentró en ensayos agronómicos con variedades importadas. En 1938 se inició el programa de cruzamientos y selección de variedades en la estación experimental Palmira, con énfasis en hibridación de clones nobles de *S. officinarum* y de caña silvestre (*S. spontaneum*). Las variedades obtenidas se identificaron con la sigla EPC (Estación Experimental Palmira Colombia). De éstas existen 143 en el banco de germoplasma en CENICAÑA, entre las que se deben mencionar las variedades EPC 38-122, 54-839, 72172 y 72174 por su contribución a la resistencia al mosaico en los cruzamientos realizados recientemente.

Entre 1962 y 1973, el gobierno colombiano, por intermedio del Instituto Colombiano Agropecuario (ICA), continuó los esfuerzos de investigación y se obtuvieron algunas variedades, entre las cuales sobresale la ICA 69-11. En la

* Clímaco Cassalet es Ingeniero Agrónomo, Ph.D., Director del Programa de Variedades de CENICAÑA. Hernando Ranjel es Ingeniero Agrónomo, Ph.D., Fitomejorador del Programa de Variedades de CENICAÑA, Apartado Aéreo 9138, Cali, Colombia.

actualidad existen 103 de estas variedades en el Banco de Germoplasma en CENICAÑA.

El potencial de producción de un cultivo está determinado por la relación entre la producción máxima obtenida y el promedio de producción de dicho cultivo en una zona. En Hawaii y Australia, por ejemplo, el potencial de la caña de azúcar fue, respectivamente, 1.5 y 2.0, mientras que en E.U. el potencial del maíz, el trigo, la soya y el arroz fue, respectivamente, 3.3, 5.6, 3.5 y 2.6. Esto indica que en las dos primeras regiones existe mayor dificultad para elevar la producción de la caña de azúcar que la existente en E.U. para el maíz o el trigo. Para el valle geográfico del río Cauca, las posibilidades no son mayores, ya que el récord conocido de producción de caña es de 240 t/ha por año y el promedio es de 125 t/ha por año, lo que resulta en una relación de 2:1. Sin embargo, lo anterior también indica que hay una distancia que es necesario reducir mediante el refinamiento de la producción comercial, a través de labores de campo o de reubicación de las áreas comerciales.

Tipo Varietal

La variedad ideal de caña de azúcar es aquella que responde favorablemente a las condiciones ambientales y a las necesidades de los agricultores, los trabajadores de campo y la industria. El fitomejorador busca, primero que todo, que las nuevas variedades se adapten a las condiciones edafológicas y de clima de la zona, para que puedan sobrevivir. Además de su adaptación, las variedades deben satisfacer una serie de requerimientos de parte de los agricultores, para hacer económica su explotación en el campo y en la fábrica. Son muchos los ejemplos que se pueden mencionar en este sentido; así, la variedad Co 421, que se adapta bien en suelos salinos, tiene desventajas para el agricultor y para las fábricas, ya que no satisface los requerimientos en cuanto a rendimiento.

Un alto porcentaje de las plantaciones de caña de azúcar se queman en el momento previo a la cosecha manual. En el futuro, la quema será menos frecuente o desaparecerá, el corte será mecánico, el suministro de agua será menor y el pago al agricultor se hará por la calidad de la caña, especialmente por su alto rendimiento. Teniendo en cuenta estos aspectos, se desarrollarán variedades para satisfacer las necesidades actuales y las inherentes a dichas variedades.

En el Cuadro 1 se resumen las características principales de las variedades de caña de azúcar que se usan actualmente y de las que se utilizarán en el futuro.

Formación y Liberación de Variedades

En caña de azúcar, los cultivares son clones de híbridos interespecíficos o de híbridos varietales, o clones de variedades originados por síntesis o por selección directa. Todos los cultivares, independientemente de la descripción técnica de su origen, se reconocen mundialmente como variedades.

Cuadro 1. Principales características de las variedades de caña de azúcar en uso y de las que se utilizarán en el futuro.

Variedades en uso	Variedades que se utilizarán en el futuro
Alta producción de biomasa (más de 10 t/ha por mes). Alto contenido de sacarosa (más de 0.9 t/ha por mes). Resistentes al carbón, a la roya y al mosaico. Erectas de tallo grueso, no quebradizas, sin yemas protuberantes ni hendiduras en el tallo. Con un contenido de fibra entre 13% y 15%, y menos de 20% de floración. En promedio, rinden una cosecha cada 13 meses.	Alta producción de biomasa y de azúcar. Porte bajo y altura uniforme de tallos con menos de 30 mm de diámetro, con hojas caducas. Plantas con buen macollamiento, menos exigentes en agua y fertilizantes. Algunas adaptadas a suelos marginales (húmedos, secos, salinos...). Deben rendir una cosecha por año y ser resistentes a enfermedades.

La obtención de una variedad requiere del trabajo integrado de genetistas, fitopatólogos, entomólogos y fisiólogos. De otra parte, para explotar mejor el potencial de los diferentes tipos de acción génica, es necesario saber combinar el recurso genético. No obstante lo anterior, un buen cultivar es el resultado de la configuración de las actividades metabólicas o morfológicas de estos genes y su interacción fisiológica positiva con ambientes específicos, que se manifiestan en la producción de caña y de azúcar y en la resistencia a plagas y enfermedades.

Las bondades del material genético se pueden calificar de maneras diferentes: (1) Tiene buen comportamiento en explotaciones comerciales, pero no produce buena progenie. (2) Puede ser bueno en la explotación y, al mismo tiempo, cumplir su ciclo, integrándose en forma exitosa al proceso de producción de nuevos cultivares. (3) Aunque no sea una variedad comercial, puede ser buen progenitor para la obtención de nuevos cultivares. Dentro de los dos últimos casos se distinguen materiales de dos categorías: con habilidad combinatoria general, y con habilidad combinatoria específica.

Las diferentes etapas que se siguen en CENICAÑA para formar una variedad, se basan en la fijación de caracteres desde el primer estado de selección, y en que los caracteres sobre los cuales descansa dicha selección sean heredables y repetibles.

La representación esquemática del sistema normal de selección muestra una fase genética y una fase de mantenimiento sanitario. En la primera, se espera que la manifestación de los genes permita la selección por productividad, adaptación ambiental y resistencia fitosanitaria lo cual, como se mencionó anteriormente, se debe mantener desde los cruzamientos hasta las pruebas regionales. El mantenimiento sanitario se inicia con la multiplicación de variedades y llega hasta la explotación comercial, que se considera como la fase final de la formación varietal (Figura 1).

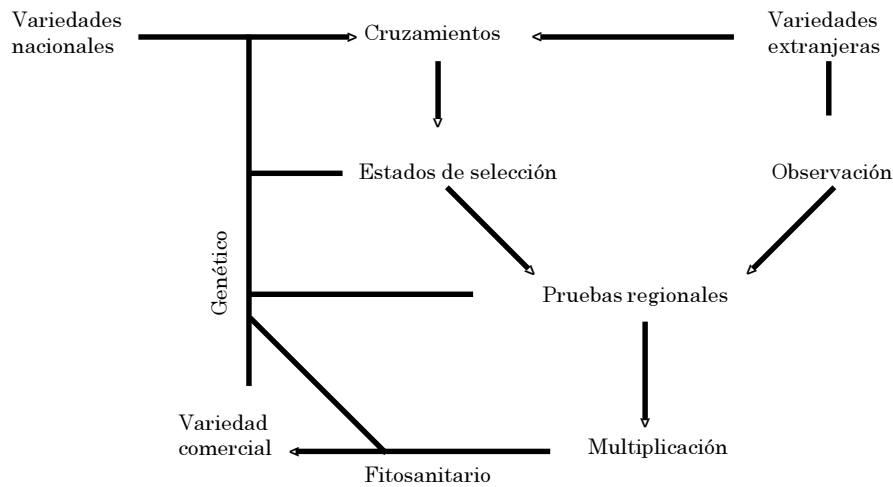


Figura 1. Esquema integral de formación de variedades en caña de azúcar.

Bases Genéticas del Mejoramiento

Heredabilidad de caracteres

La heredabilidad de un carácter puede variar desde baja hasta alta y su valor permite al fitomejorador desarrollar un esquema de mejoramiento para obtener la variedad deseada con mayor o menor prontitud. Este concepto de heredabilidad, ligado al de repetibilidad y a la asociación que puede existir entre caracteres, dan la confianza necesaria para continuar con los diferentes estados de selección.

Un estudio sobre la herencia de caracteres realizado en 10 poblaciones de caña (Cuadro 2) mostró que: (1) El número bajo de tallos por cepa, el diámetro delgado, la escasa altura de los tallos y la longitud corta de los entrenudos fueron dominantes. (2) Los caracteres: resistencia a volcamiento y ausencia de floración, mostraron dominancia completa. (3) El carácter pilosidad de la yagua presentó dominancia intermedia. (4) La concentración baja de sacarosa, expresada como porcentaje de jugo y de caña, fue dominante, lo mismo que el bajo peso y el alto contenido de fibra.

En el Cuadro 2 se observa también que la pilosidad de la vaina y la floración son monogénicas, mientras que la longitud del tallo y el volcamiento son digénicas. Desde el punto genético, estas características son fáciles de manejar en el proceso de mejoramiento varietal. Los caracteres restantes son poligénicos, lo cual significa un mayor grado de dificultad para su manejo, ya que en su comportamiento el ambiente juega un papel importante.

Cuadro 2. **Grado de dominancia y número de genes involucrados en el control de diferentes caracteres en 10 poblaciones de caña de azúcar. CENICANA, 1992.**

Carácter y tipo	Gd	Acción	No. de genes	Vf	Va	Vg
Tallos/cepa (escasos)	1.603	D	3	0.44	0.13	0.31
Diámetro del tallo (delgado)	1.558	D	5	0.15	0.04	0.11
Longitud del entrenudo (corto)	1.800	D	5	0.03	0.01	0.02
Longitud del tallo (corto)	2.195	D	2	0.18	0.05	0.13
Volcamiento (bajo)	1.265	C	2	2.07	0.71	0.36
Floración (auscule)	1.000	C	1	0.00	0.00	0.00
Pilosidad de la vaina (ausente)	1.497	I	1	0.15	0.00	0.15
Porcentaje de sacarosa en el jugo (bajo)	1.979	D	5	6.54	0.90	5.64
Porcentaje de sacarosa en la caña (bajo)	1.905	D	5	5.99	0.80	5.19
Porcentaje de fibra en la caña (alto)	1.765	D	4	1.38	0.50	0.88
Peso del tallo (poco)	1.817	D	4	0.38	0.20	0.18

Gd = Grado de dominancia. Acción de la dominancia: D = dominante; C = completa; I = intermedia.

Vf = Varianza fenotípica. Va = Varianza ambiental. Vg = Varianza genética.

La mayor varianza fenotípica (Vf) la presentaron el porcentaje de sacarosa, bien sea en jugo o en caña, seguido por el porcentaje de fibra y el volcamiento. Para los otros caracteres, la variación fue baja, lo que permite hacer la selección con mayor seguridad.

Las varianzas ambiental (Va) y genética (Vg) mostraron la gran influencia del ambiente en el volcamiento, el porcentaje de fibra y peso del tallo, pero no en el porcentaje de sacarosa, cuya variación está determinada principalmente por factores genéticos.

La heredabilidad de un carácter indica el tipo de mejoramiento que se debe seguir. La heredabilidad alta supone la contribución significativa de la variación genética aditiva. En CENICANA se ha observado que algunos clones tienen alta heredabilidad para floración, pilosidad de la vaina y volcamiento (Cuadro 3). Los valores de los otros caracteres indican, posiblemente, que la acción génica principal no es aditiva sino dominante.

Repetibilidad de caracteres

Falconer (1983) considera que en la caña de azúcar la repetibilidad puede ser clonal e individual. La primera es la correlación que presenta un carácter cuando un clon pasa de un estado de selección a otro. Este tipo de repetibilidad es importante en el proceso de selección. La repetibilidad individual es la correlación que presenta un determinado carácter de un clon a través de varias cosechas en el mismo sitio (ejemplo: plantilla vs. soca). Esta repetibilidad es de interés en términos de producción comercial.

En CENICANA se encontró una repetibilidad clonal altamente significativa ($r = 0.4$ a 0.7 ; $P < 0.01$) para el peso de la caña de azúcar en cuatro series de

Cuadro 3. Intervalos de heredabilidad de varios caracteres en 10 progenies híbridas de caña de azúcar. CENICANA, 1992.

Carácter	Intervalo de heredabilidad		Promedio
Número de tallos/cepa	17	35	27
Diámetro del tallo	13	35	27
Longitud del entrenudo	17	39	27
Longitud del tallo	12	57	28
Volcamiento	7	100	42
Floración		100	100
Pilosidad de la vaina	33	100	67
Porcentaje de sacarosa en el jugo	18	34	29
Porcentaje de sacarosa en la caña	20	35	29
Porcentaje de fibra en la caña	16	39	27
Peso del tallo	12	25	19

formación varietal, cuando se midió el número de tallos o el peso de la caña. Tanto el brix en el primer caso como la producción de azúcar en el segundo, presentaron una repetibilidad altamente significativa ($r = 0.2$ a 0.9 ; $P < 0.01$) (Cuadro 4). La repetibilidad (r) clonal del diámetro del tallo y del porcentaje de fibra fue alta y varió desde $r = 0.5$ hasta $r = 0.8$ para el primero; y desde $r = 0.4$ hasta $r = 0.8$ para el segundo (Cuadro 5).

Las repetibilidades clonales encontradas dan una alta confiabilidad al proceso de selección para la formación de variedades CENICANA. Las altas repetibilidades individuales encontradas son una gran ayuda en el proceso de selección, ya que lo que se mide en la plantilla es extrapolable a las socas, como lo confirman las correlaciones que aparecen en el Cuadro 6.

Lo anterior también se confirmó en un estudio para determinar el modelo de selección (Figura 2). La repetibilidad del peso de la caña en plantilla del estado I (1.1) hasta la tercera soca del mismo estado (1.4), varió desde $r = 0.35^{**}$ hasta $r = 0.78^{**}$; en el estado II (21) varió desde $r = 0.72^{**}$ hasta $r = 0.75^{**}$; y en el estado

Cuadro 4. Repetibilidad clonal del peso de la caña y del rendimiento de azúcar en cuatro series de selección de variedades CC de caña de azúcar. CENICANA, 1990.

Series de selección	Estados de selección ^a		
	I vs. II	II vs. III	III vs. IV
1982	0.4** 0.4**	0.4** 0.4**	0.5** 0.2**
1983	0.5** 0.4**	0.4** 0.4**	0.7** 0.9**
1984	0.3** 0.2**	0.4** 0.3**	—
1985	0.2** 0.4**	0.5** 0.4**	—

a. La primera columna corresponde al peso de caña, que en el estado I está dado por el número de tallos. La segunda columna corresponde a producción de azúcar, que en el estado I está dada por el brix.

** = $P < 0.01$.

Mejoramiento Genético

Cuadro 5. Repetibilidad clonal del diámetro del tallo y del porcentaje de fibra en cuatro series de selección de variedades CC de caña de azúcar. CENICAÑA, 1990.

Series de selección	Estados de selección ^a		
	I vs. II	II vs. III	III vs. IV
1982	—	0.7 0.4	0.8 0.8
1983	—	0.6 0.5	0.8 0.8
1984	0.5 0.6	0.5	—
1985	0.6 0.5	0.6	—

a. La primera columna corresponde al diámetro del tallo. La segunda columna corresponde al porcentaje de fibra.

Cuadro 6. Correlaciones entre cuatro caracteres de la plantilla y la primera soca de variedades CC de caña de azúcar. CENICAÑA, 1990.

Carácter	Correlación
Peso de la caña	0.72**
Azúcar recuperable estimado	0.79**
Porcentaje de fibra	0.87**
Volcamiento	0.97**

** = P < 0.01.

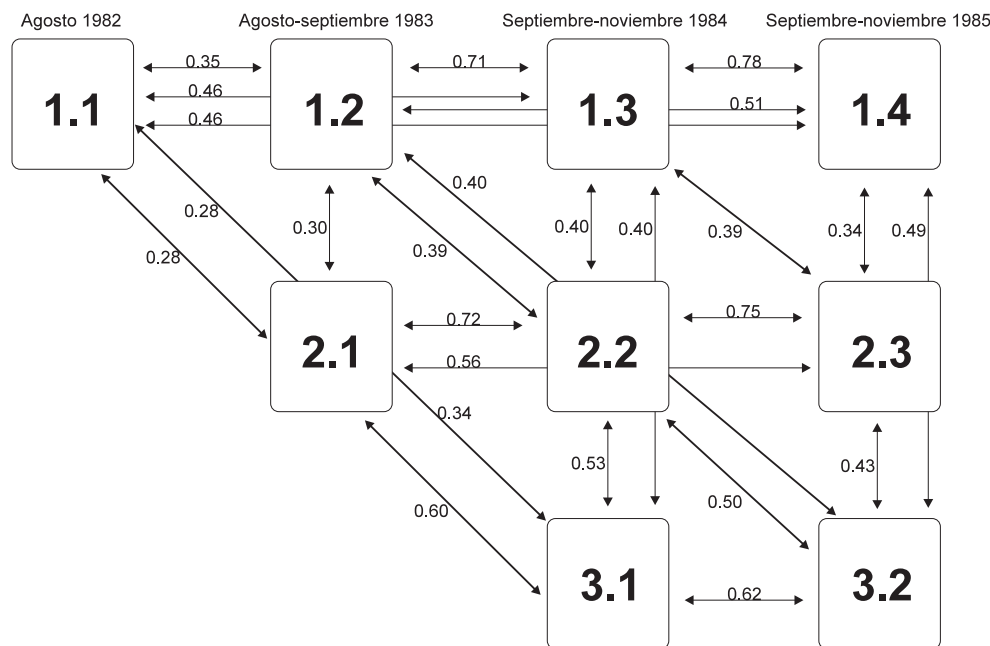


Figura 2. Correlaciones entre estados de selección y fechas de cortes para la determinación del peso en caña de azúcar, en el modelo de selección CENICAÑA. El primer número del dígito dentro de cada cuadro corresponde a un estado y el segmento al número del corte. Todas las correlaciones son significativas ($P < 0.05$).

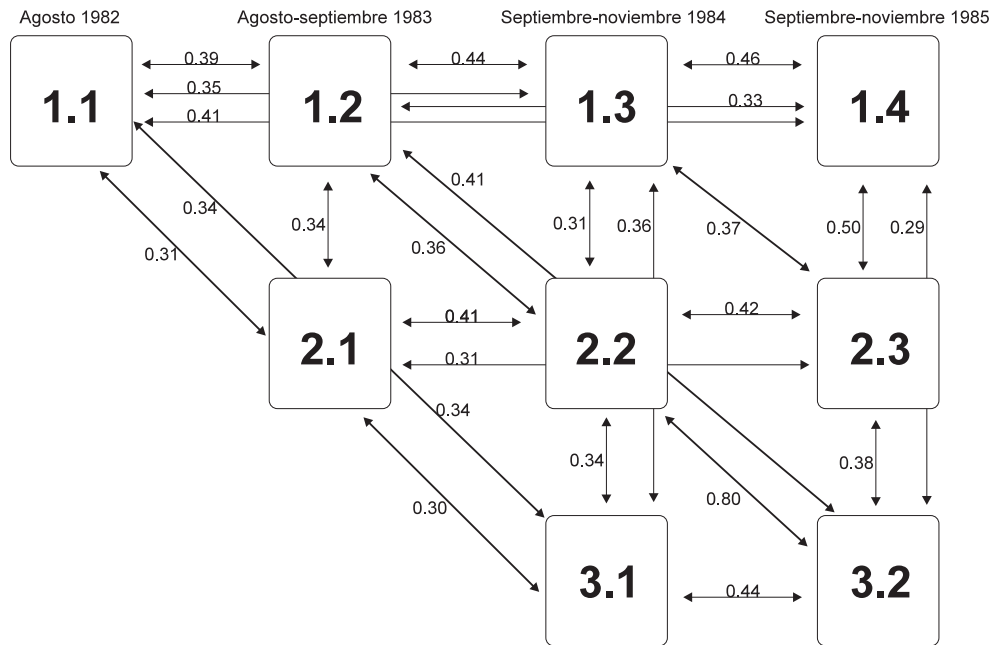


Figura 3. Correlaciones entre estados de selección y fechas de corte para la determinación del azúcar recuperable estimado (ARE), en el modelo de selección CENICAÑA. El primer número del dígito dentro de cada cuadro corresponde a un estado y el segundo al número del corte. Todas las correlaciones son significativas ($P < 0.05$).

III (31) fue $r = 0.62^{**}$. En la Figura 3 se observa que aun cuando los valores de repetibilidad para el azúcar recuperable estimado (ARE) son más bajos que los encontrados para el peso de la caña, también son altamente significativos.

Proceso de Selección en Caña de Azúcar

Líneas endocriadas

La producción de líneas endocriadas es un recurso que se ha explorado para obtener vigor híbrido en los cruzamientos. El cultivo de anteras inmaduras es una forma rápida de obtener líneas homocigóticas. En Hawaii se han obtenido plantas haploides y dihaploides con la técnica de cultivo de anteras; no obstante, la pérdida de vigor y de fertilidad son altas. Para evitar esta última situación, en CENICAÑA se ha iniciado la producción de líneas de caña por autopolinización. Posteriormente, estas líneas endocriadas se entrecruzan.

Cruzamientos

La producción de fruto por la vía sexual —tipo cariósida— es la base del proceso de obtención de variedades en caña de azúcar.

En CENICAÑA, después de varios años de efectuar cruzamientos, se estableció un programa sistematizado para la selección de los progenitores. Los caracteres que se involucran en esta selección aparecen en el Cuadro 7. La calificación 1 corresponde a una buena característica, mientras que 9 corresponde a un comportamiento pobre. La sumatoria de los valores de calificación de cada carácter en ambos progenitores no debe ser mayor de un valor determinado previamente; de lo contrario, el programa lo rechaza.

Las variedades escogidas como progenitores para cruzamientos pertenecen a cualesquiera de los seis grupos conformados para tal efecto. Los seis grupos se denominan élite por su alta concentración de sacarosa, porte erecto, alto grado de deshoje, buena adaptación a suelos húmedos y a suelos salinos.

Este sistema de formación de grupos por características específicas es una metodología importante en la selección de progenitores, ya que permite al fitomejorador observar la característica básica del grupo, además de otras cualidades o defectos que presente. Por lo tanto, el número de variedades que conforma cada grupo puede cambiar, ya sea por la inclusión de nuevas variedades o la eliminación de algunas por presentar defectos que demeritan su calidad como progenitor.

Metodología de cruzamiento. Los cruzamientos se realizan en la estación experimental San Antonio (de CENICAÑA), localizada en el Valle del Cauca, a 3° 30' de latitud norte y 76° 19' de longitud oeste; y en el Centro Regional de Investigaciones (CI.) ICA-Caribia, localizado a 11° 30' de latitud norte. Ambos sitios tienen foteríodos diferentes, como se aprecia en la Figura 4.

Los cruzamientos en la estación experimental se hacen en la casa de foteríodo, mientras que en el CI. ICA-Caribia se realizan en el campo. En la primera existen 109 variedades con las cuales se pueden hacer infinidad de cruzamientos dialélicos usando cada grupo en forma independiente y sin necesidad de emplear el programa del computador, y 168 variedades que no florecen. En

Cuadro 7. **Calificación de los caracteres usados para cruzamientos en variedades de caña de azúcar. CENICAÑA.**

Carácter	Calificación ^a	Nivel crítico de calificación ^b
Toneladas de caña/ha	1 - 5	6
Rendimiento	1 - 5	5
Diámetro del tallo	1 - 5	7
Volcamiento	1 - 5	5
Floración	1 - 5	6
Mosaico	1 - 9	10
Carbón	1 - 9	10
Roya	1 - 9	10

a. 1 = sobresaliente; 5 = pobre; 9 = muy pobre.

b. Sumatoria máxima de la calificación de los progenitores seleccionados.

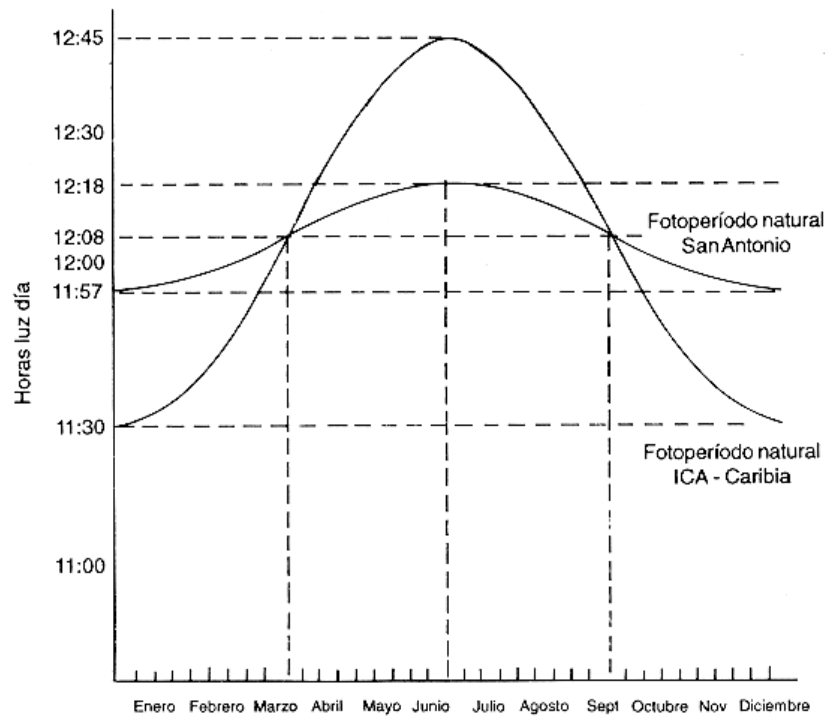


Figura 4. Fotoperíodos en la estación experimental San Antonio y en el Centro Regional de Investigaciones ICA-Caribia, Colombia.

el CI. ICA-Caribia hay 67 variedades en los grupos: alta sacarosa, sacarosa temprana y élite.

Los estudios sobre la cantidad de plántulas necesarias para representar un cruzamiento son escasos. Algunos investigadores sugieren 40 plántulas y otros 200. En realidad, la mayoría de los investigadores acumula, por cruzamiento, a través de los años, un número de plántulas que varía entre 2000 y 2500. En maíz, por ejemplo, el análisis de progenie se hace en función de familia y no de genotipos individuales; en este caso, se considera que 80 plantas cultivadas en parcelas de 2 m x 10 m, son suficientes para representar un cruzamiento. En CENICAÑA se considera que 2500 plántulas acumuladas en diferentes períodos, son suficientes para el análisis genético completo de un cruzamiento, debido a la condición poliploide de la caña de azúcar y a que sus cromosomas varían, en promedio, entre 80 y 120.

La semilla de cada cruzamiento se siembra en bandejas de germinación que contienen suelo esterilizado. El número de cruzamientos que se siembra cada año depende de la cantidad de semilla disponible, sin sobrepasar de 1000 plántulas por

cruzamiento. Después de la germinación, las plántulas permanecen en las bandejas durante 45 días y se inoculan con una suspensión del mosaico de la caña; posteriormente, se trasplantan a la terraza para plántulas en donde permanecen 2 meses, tiempo durante el cual se inoculan en forma natural con el hongo que produce la roya. Antes del trasplante en el campo, se eliminan las plántulas susceptibles a esta enfermedad y al mosaico. Las siembras de las plantas resultantes de los cruzamientos se hacen en proporciones iguales en la estación San Antonio y en el Ingenio Sancarlos (Valle del Cauca).

Selección clonal

La selección gamética en maíz fue propuesta por Stadler en 1944, como un sistema para aislar gametos superiores y, de esta manera, producir mejores líneas endocriadas. El método consiste en cruzar una línea endocriada sobresaliente con una variedad. En caña de azúcar, cualquiera que sea el método que se siga después de un cruzamiento, este cae, casi siempre, en un esquema de selección gamética al hacer la separación de clones sobresalientes. En esta separación, cada clon representa una combinación de gametos que en algunos casos puede ser única. Normalmente no hay evaluación de familia, aunque el programa de mejoramiento de caña del Bureau of Sugar Experiment Stations (BSES, sigla en inglés), de Australia, sí hace esta evaluación en el estado I de selección para eliminar los cruzamientos más pobres, y posteriormente sobre la soca continuar con el aislamiento clonal en las familias superiores.

La obtención de una buena variedad de caña de azúcar requiere 10 años como mínimo, que van desde el momento del trasplante de las plántulas en el campo hasta la finalización de las pruebas regionales y la distribución de la semilla. En el sistema utilizado en CENICAÑA no hay selección en las socas debido a que: (1) la selección no se hace en función de familia, sino de clones que representan la combinación específica de un par de gametos; (2) la parte genética de los caracteres se fija desde el estado I de selección; y (3) existe un control eficiente del ambiente, lo cual permite eliminar en forma rápida el mayor número de clones indeseables o con poca probabilidad de llegar a ser variedades comerciales. Los pasos que se siguen en este sistema aparecen en la Figura 5.

Estado I o de plántulas. La densidad de siembra que se utiliza en este estado se determinó después de un estudio sobre el efecto que ésta tiene en los caracteres que se desean seleccionar. Una alta densidad entre plántulas favorece la selección por contenido de azúcar, pero no para el número y el diámetro del tallo, ni para la floración (Cuadro 8). Lo anterior crea una dualidad entre seleccionar por azúcar o por peso. Se decidió por azúcar; así, las plántulas se siembran distanciadas entre 30 y 40 cm. Cuando las plántulas se siembran sin competencia, se seleccionan dos veces más plantas que en la siembra con alta competencia. La producción en toneladas de caña por hectárea (TCH), azúcar recuperable estimado (ARE) y azúcar por hectárea (TAH) de los clones seleccionados que llegaron al estado III, fue mayor en las plantas establecidas entre 25 y 50 cm de distancia.

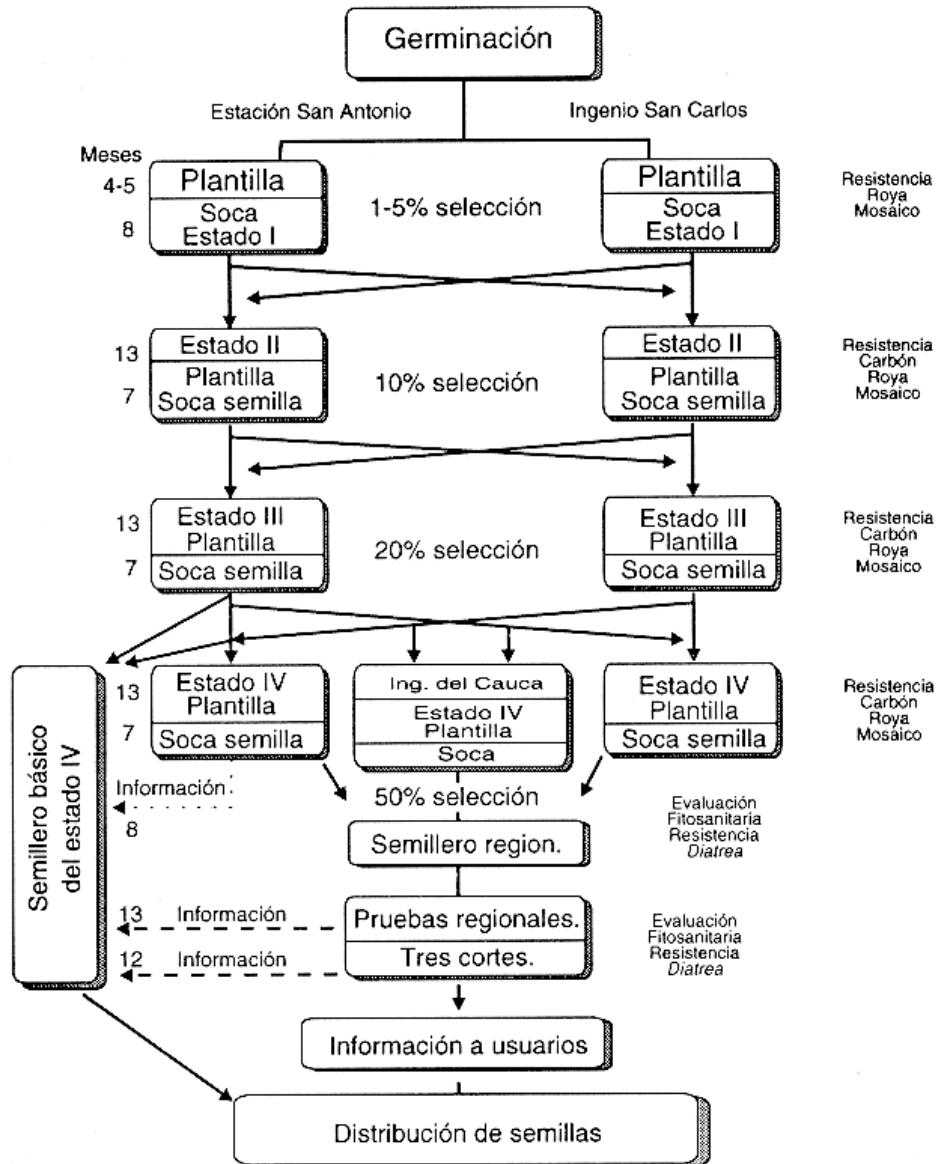


Figura 5. Esquema convencional de selección CENICAÑA para variedades de caña de azúcar.

Cuadro 8. Efecto de la densidad de siembra en la calidad y en el número de clones seleccionados de caña de azúcar. CENICANA, 1987.

Distancia entre plántulas (m)	Floración (%)	Brix (%)	Diámetro del tallo (m)	Tallos/m (no.)	Clones seleccionados (No.)
1.40	20.1	18.6	31	15	117
0.75	18.7	19.5	30	11	89
0.50	14.6	19.5	30	10	64
0.25	9.5	20.5	28	7	52

El estado I comprende la siembra de más de 100,000 plántulas en la estación San Antonio y en el CI. ICA-Caribia. La distancia entre plántulas es de 40 a 50 cm y entre surcos de 1.50 m. Cada nueve surcos se planta por medio de yemas una variedad testigo, la cual sirve para comparar el contenido de azúcar, el tipo de tallo y la susceptibilidad a volcamiento. Las plántulas se cortan a los 4 ó 5 meses. Posteriormente —a los 8 meses después del rebrote— se seleccionan en la soca las plántulas que son resistentes a carbón, roya y mosaico; tienen buena producción de tallos; alto valor de brix; no florecen; no son susceptibles a volcamiento y tienen un buen deshoje. De las plántulas seleccionadas se obtiene suficiente material vegetativo para hacer un ensayo con cada genotipo seleccionado e iniciar, de esta manera, el estado II de la selección.

Estado II. En él se tienen dos repeticiones, una de ellas conformada por el material seleccionado en el sitio, y la otra por el material proveniente de otro sitio de selección. Estos materiales se plantan en parcelas de un surco de 4 m de largo. En la estación San Antonio, una de estas repeticiones se inocula con carbón. La cosecha de la plantilla se hace a los 13 meses de edad y en ella se evalúan el peso, el rendimiento de azúcar, el volcamiento, el deshoje, el porcentaje de floración y la resistencia a roya, mosaico y carbón. La soca de los clones seleccionados se cosecha a los 7 meses de edad, para obtener el material vegetativo de siembra y continuar con el estado III de la selección.

Estado III. Los materiales que se seleccionan en el estado II se plantan en la estación San Antonio y en el Ingenio Sancarlos, en parcelas de cuatro surcos y 10 m de largo, repetidas dos veces. De nuevo, una de las repeticiones en la estación San Antonio se inocula con carbón.

La cosecha de estos materiales se hace a los 13 meses de edad y, adicionalmente a las mediciones que se hacen en el estado II, se determina el porcentaje de fibra (Cuadro 9). La soca de los clones seleccionados se cosecha a los 7 meses de edad para obtener el material vegetativo de siembra y continuar con el estado IV de selección.

Estado IV. Los materiales en este estado se plantan en los dos sitios anteriores y en un suelo húmedo en el Ingenio del Cauca. En este estado, en la estación San Antonio se dispone de cuatro repeticiones, y en los Ingenios Sancarlos y del Cauca de tres repeticiones. En los tres sitios, las parcelas son de

Cuadro 9. **Promedio de producción de caña y de azúcar de los clones en el estado III de selección y que corresponden a los clones seleccionados en el estado I. CENICAÑA, 1990.**

Distancia entre plántulas (m)	Caña (t/ha)	Azúcar recuperable (t/ha)	Azúcar (t/ha)
1.40	207	10.3	21.3
0.75	209	9.7	20.3
0.50	218	10.5	22.9
0.25	210	11.5	24.2

seis surcos de 10 m de largo. Para la selección se hacen las mismas evaluaciones que en el estado III. De igual manera, se deja la soca hasta los 7 meses de edad para obtener el material vegetativo que se utiliza en el establecimiento de los semilleros regionales.

Semilleros regionales

En este momento se entregan a los ingenios entre 200 y 300 yemas de cada una de las variedades seleccionadas en el estado IV. El objetivo es observar el comportamiento sanitario y agronómico de las variedades a nivel de los ingenios y producir suficiente material para el establecimiento de pruebas regionales en cada uno de ellos. La información obtenida se evalúa en forma conjunta con los investigadores del ingenio, para seleccionar las variedades que conformarán las pruebas regionales.

Pruebas regionales de variedades

Estas pruebas se establecen en los diferentes ambientes que existen en las áreas de producción azucarera del valle geográfico del río Cauca. Cada prueba tiene cinco repeticiones, una de las cuales se utiliza para medir la maduración de las variedades. La plantilla se cosecha a los 13 meses y las socas a los 12 meses. En cada cosecha se determinan la incidencia de enfermedades y plagas, la producción de caña por hectárea, el rendimiento de azúcar, la "resistencia" a volcamiento, la floración y el porcentaje de fibra. Los datos anteriores sirven para informar a los ingenios y productores sobre las características de las variedades probadas en forma regional. Por último, CENICAÑA pone a disposición de cada ingenio alrededor de 80 toneladas de material vegetativo de las mejores variedades.

Semillero básico

En el estado IV se seleccionan las variedades para establecer el semillero básico. Al inicio se hace un tratamiento térmico con agua caliente a 50 °C. A medida que avanza el proceso de selección en el estado IV, en la plantilla y en la primera soca de las pruebas regionales, se eliminan en el semillero básico las

variedades menos promisorias en cada etapa de multiplicación y tratamiento térmico. Con base en los resultados obtenidos en la plantilla de las pruebas regionales, el área de cada variedad seleccionada se aumenta de 0.5 a 4 ha, de tal forma que coincida su edad al corte con la cosecha de la primera soca de las pruebas regionales. En los semilleros básicos sólo se cortan la plantilla y la primera soca, después de lo cual se destruye la plantación.

Selección recurrente

Este método de selección se emplea en forma intensiva en muchos cultivos, especialmente en las gramíneas. Según Hallauer (1991), el método ha variado desde la selección masal fenotípica hasta el uso de poblaciones de hermanos medios, hermanos completos y líneas endocriadas, como unidades de selección. En una planta de polinización cruzada como la caña de azúcar, las varianzas genética aditiva y no aditiva son de importancia para alcanzar un mejoramiento genético efectivo. Vogel et al. (1989) consideran que los efectos genéticos no aditivos aún no han sido explotados, a pesar de que en muchas gramíneas existe suficiente heterosis para producción.

La selección recurrente consiste en entrecruzar varias poblaciones, seleccionar las progenies sobresalientes y entrecruzarlas para generar nuevas progenies, y así sucesivamente por varias generaciones. Este método de selección se ha utilizado en caña de azúcar para aumentar la frecuencia de genes favorables para determinado carácter sin disminuir su variabilidad, haciendo uso de la acción genética aditiva y no aditiva que tiene este cultivo (Figura 6).

Recientemente se inició la formación de dos poblaciones con alta producción de azúcar, una por el sistema de entrecruzamiento de clones destacados, selección y nuevos entrecruzamientos, y la otra por el sistema de integración de subpoblaciones con variedades próximas genéticamente, las cuales posteriormente se entrecruzan por pares hasta obtener una sola población.

La dificultad que existe en caña de azúcar para el manejo de las progenies no permite la selección recurrente por habilidad combinatoria general o específica, en donde se utiliza como probador una variedad o una línea endocriada relativamente estable. En consecuencia, se usa un método de recurrencia cerrada, como se observa en la Figura 6.

Retrocruzamiento o cruce recurrente

Este sistema, que es ampliamente utilizado en muchos cultivos, se emplea poco en caña de azúcar. No obstante, en CENICAÑA se está usando con bastante intensidad. Básicamente, el proceso incorpora genes de una población a otra con la recuperación del genotipo del padre recurrente, manteniendo los genes del padre donante. En cada una de las etapas de cruzamiento del sistema, se pueden separar algunos clones sobresalientes con méritos suficientes para su liberación como variedades. El proceso se puede continuar hasta llegar a recuperar 100% del genotipo del padre recurrente, pero en caña de azúcar, debido a su modalidad clonal, sólo es posible recuperar hasta 87.5% de su genotipo.

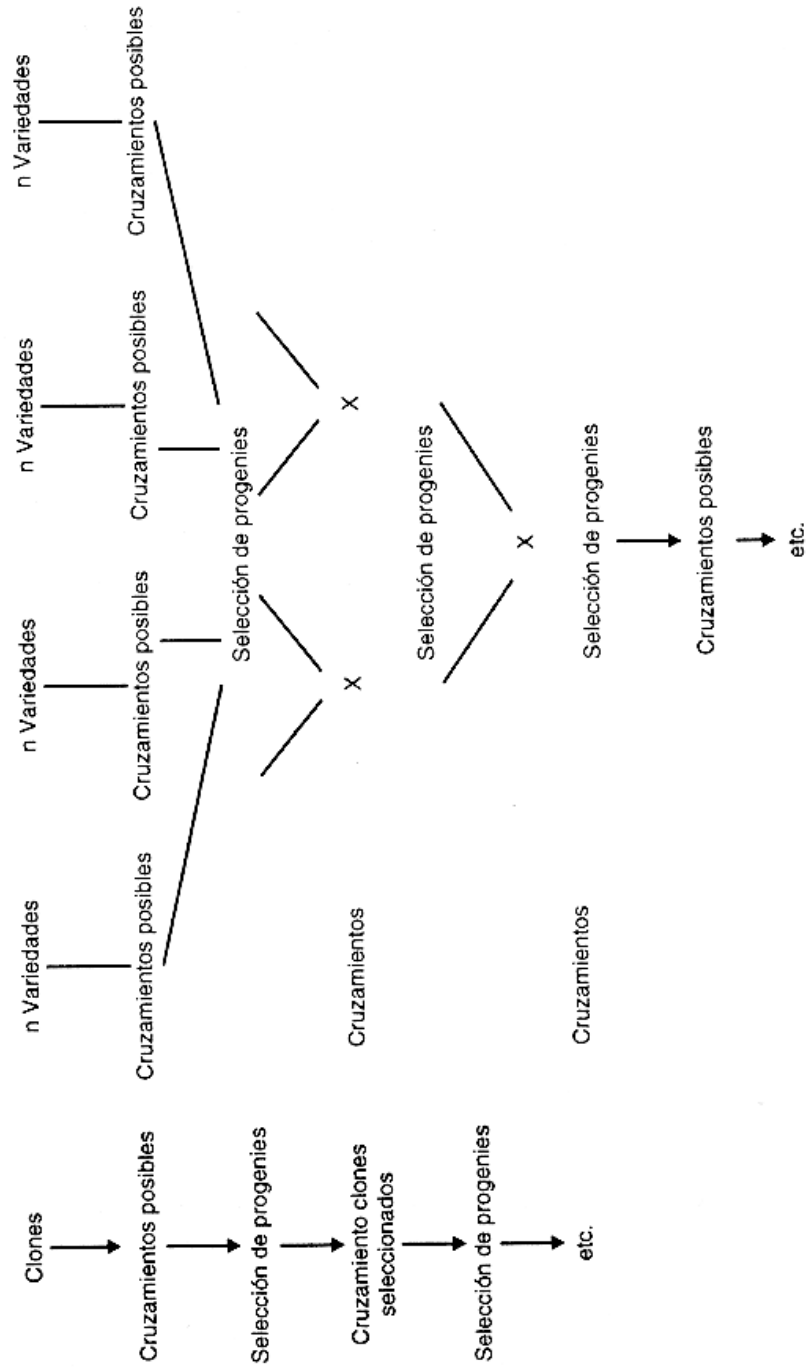


Figura 6. Esquema de selección recurrente utilizado en CENICAÑA para el mejoramiento de variedades de caña.

Mejoramiento Genético

El sistema también sirve para la formación de poblaciones de interés específico. Su efectividad se está evaluando en CENICAÑA mediante la formación de una población con alto contenido de sacarosa. Los clones que se usan como recombinantes en cada ciclo se escogen con base en el promedio más una desviación estándar. Con este sistema se ha logrado, en el primer ciclo, elevar el brix en 7%.

Un ejemplo de mejoramiento por el método de cruzamiento recurrente, realizado en CENICAÑA, es el caso de la variedad Mex 64-1487 de buena producción de azúcar y de caña, pero que presenta alto volcamiento, lo que ha limitado su expansión como variedad comercial. Para corregir este problema, se iniciaron cruzamientos con las variedades erectas CP 57-603, PR 61-632 y CC 83-29. Después de analizar 9080 progenies F_1 , se seleccionaron 38 que se cruzaron con el padre recurrente (Mex 64-1487). En el Cuadro 10 se observa que en esta generación ya se tienen algunos clones con poco o ningún volcamiento y buen contenido de azúcar, tal como ocurre con el padre recurrente.

Cuadro 10. **Mejoramiento de la variedad de caña Mex 64-1487 por medio de retrocruzamientos con las variedades CP 57-603 y PR 61-632. CENICAÑA.**

Genealogía	Clon (no.)	Brix (%)	Plantilla: en surco de 4 m		
			Volcamiento ^a	Caña (t/ha)	Fibra (%)
Mex 64-1487 x CP 57-603	MCP 25	20.6	1	13.9	13.4
Mex 64-1487 x CP 57-603	MCP 32	21.6	2	14.3	13.1
Mex 64-1487 x CP 57-603	MCP 16	20.6	1	12.7	14.0
Mex 64-1487 x CP 57-603	MCP 28	20.4	2	13.2	13.3
Mex 64-1487 x PR 61-632	MPR 3	19.0	2	12.5	12.6
	MPR 6	20.6	2	13.8	13.9
	MPR 15	20.6	2	11.6	11.6
Padres:					
Mex 64-1487	—	21.0	4	13.6	12.3
CP 57-603	—	19.4	2	13.2	14.0
PR 61-632	—	18.0	1	12.8	13.6

a. Susceptibilidad a volcamiento: 1 = poco o ningún volcamiento, 5 = 50% o más de volcamiento.

Perspectivas para el Mejoramiento en Caña de Azúcar

La biotecnología ofrece grandes posibilidades para acelerar los procesos de mejoramiento con la incorporación, a voluntad, de genes derivados de *Saccharum* o de otra entidad biológica. Las variaciones somaclonales producidas por el cultivo in vitro, o las que se pueden inducir en él, así como la detección inmediata del gene que se transfiere en los retrocruzamientos, son herramientas útiles que el

mejorador deberá usar en el futuro. El mapa genético con marcadores moleculares será la piedra angular en el desarrollo biotecnológico de la caña de azúcar.

En el análisis molecular, los alelos se identifican con fragmentos de diferentes longitudes que tienen secuencias homólogas en las bases. El análisis de polimorfismo con longitudes de fragmentos de restricción (RFLP), es uno de los sistemas conocidos en el mapeo molecular de los genes.

Una vez que se conoce la secuencia de bases de un gene, se puede determinar con un marcador molecular su presencia en cualesquiera de los pasos del sistema de mejoramiento, sin tener en cuenta la presencia o ausencia de una manifestación fenotípica. Teóricamente, algunos investigadores consideran que con la ayuda del RFLP en un tercer retrocruzamiento, se podría recuperar el 100% del genoma del padre recurrente. También consideran que, si un gene deseable está estrechamente ligado con uno indeseable en 1 centiMorgan, por el sistema convencional de retrocruzamientos se necesitarían hasta 100 generaciones para producir la segregación, mientras que con la ayuda del RFLP sólo se necesitarían dos generaciones. Otro método usado de mapeo de genes es el RAPD's.

Herramientas adicionales para el mejoramiento en caña de azúcar son: la regeneración de plantas a partir de protoplastos, y el cultivo de meristemos. La primera ha sido difícil de realizar en las gramíneas, pero recientemente se han logrado grandes avances en algunas especies con este sistema. El cultivo de protoplastos permitirá la hibridación somática y facilitará la transferencia de genes.

En el cultivo de meristemos se pueden presentar variaciones genéticas estables, conocidas como variaciones somaclonales que, si son favorables, se pueden aprovechar por medio de la propagación vegetativa.

Referencias

- Artschwager, E. y Brandes, E. W. 1958. Sugarcane (*Saccharum officinarum* L.). Origin, classification, characteristics and descriptions of representative clones. Agriculture handbook no. 122. Washington, D.C. 307 p.
- Beltrán, E. H. 1984. Ayer, hoy y mañana de la caña de azúcar en Colombia. Cali, Colombia. 153 p.
- Cassalett, C. y Pizza, L. F. 1990. Repetibilidad clonal en cuatro series de selección. En: Memorias del Tercer Congreso de la Sociedad Colombiana de Técnicos de la Caña de Azúcar (TECNICAÑA). Cali, Colombia. p. 21-28.
- _____ y Amaya, A. 1984. Obtención de variedades colombianas de caña de azúcar. En: Memorias del Primer Congreso de la Sociedad Colombiana de Técnicos de la Caña de Azúcar (TECNICAÑA). Cali, Colombia. p. 1-9.

Mejoramiento Genético

- _____; Ranjel, H.; y León, E. 1984. Selección masal. Un mecanismo fácil de mejoramiento y su utilización en la caña de azúcar. En: Memorias del Primer Congreso de la Sociedad Colombiana de Técnicos de la Caña de Azúcar (TECNICAÑA). Cali, Colombia. p. 11-22.
- Cock, J.; Cassalet, C.; Ranjel, H.; y Luna, C. A. Variedad Caña 2.010. Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia (CENICAÑA), Cali, Colombia. Serie informativa no. 17. 12 p.
- Duvick, D. N. 1986. Plant breeding, past achievements, and expectations for the future. *Econ. Bot.* 40: 289-297.
- Falconer, D. S. 1983. Introducción a la genética cuantitativa. Continental, México. 430 p.
- Hallauer, A. R. 1991. Use of genetic variation for breeding populations in cross-pollinated species. En: *Plant breeding in the 1990s*. p. 37-67.
- Heinz, D. J. 1987. Sugarcane improvement: Current productivity and future opportunities. En: *International Sugarcane Breeding Workshop*. Cooperativa Central dos Produtores de Açúcar e Alcool do Estado de São Paulo (COPERSUCAR), Piracicaba, SP, Brasil. p. 55-70.
- Moore, P. H. e Irvine, J. E. 1991. Genomic mapping of sugarcane and its potential contribution to improvement and to selection of new varieties. *Proceedings. South African Sugar Technologist Association (SASTA)*. p. 96-102.
- Salazar, F. 1992. Estimación de parámetros genéticos de varianza y acción génica en algunas poblaciones híbridadas de caña de azúcar. Tesis. Facultad de Ciencias Agropecuarias, Cali, Colombia.
- Stadler, L. J. 1944. Gamete selection in corn breeding. *J. Am. Soc. Agron.* 36:988-989.
- Vogel, K. P.; Gors, H. J.; y Haskins, F. A. 1989. Breeding grasses for the future. En: *Contributions from breeding forage and turf grasses*. CSSA Spec. Publ. no. 15. Crop Science Society, Madison. p. 105-122.
- Viveros, C. y Cassalet, C. 1991. Metodología de programación de cruzamientos para caña de azúcar en CENICAÑA. En: *Memorias del Segundo Congreso de ATALAC*. Ciudad de México, México. p. 57-67.



Referencia bibliográfica

CASSALETT DAVIA, C.; RANJEL JIMÉNEZ, H. Mejoramiento genético. En: CENICAÑA. El cultivo de la caña en la zona azucarera de Colombia, Cali, CENICAÑA, 1995. p.63-81.

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN DE LA CAÑA
DE AZÚCAR DE COLOMBIA - CENICAÑA**

Estación Experimental: vía Cali-Florida, km 26

Tel: (57) (2) 6648025 - Fax: (57) (2) 6641936

Dirección postal: Calle 58 norte no. 3BN-110

Cali, Valle del Cauca-Colombia

www.cenicana.org

buzon@cenicana.org