

# Características de la caña de azúcar asociadas con toneladas de caña por hectárea y sacarosa (% caña)

## Traits of the sugar cane associated with tons of cane per hectare and sucrose (% cane)

Carlos Arturo Viveros Valens<sup>1\*</sup>, Diosdado Baena Garcia<sup>2</sup>, Fredy Salazar Villareal<sup>1</sup>, Luis Orlando López<sup>1</sup> y Jorge I. Victoria K.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia, CENICAÑA. <sup>2</sup>Universidad Nacional de Colombia, Sede Palmira. Facultad de Ciencias Agropecuarias, Palmira, Colombia. \*Autor para correspondencia: [caviveros@cenicana.org](mailto:caviveros@cenicana.org)

Rec.: 19.07.2014 Acep.: 06.10.2014

### Resumen

En las etapas iniciales del proceso de selección clonal en caña de azúcar (*Saccharum* spp.) se realiza la selección indirecta para las variables toneladas de caña por hectárea (TCH) y porcentaje de sacarosa. Esta selección indirecta puede aumentar su eficiencia en la medida que se precise mejor el conocimiento acerca de la naturaleza y la magnitud de las asociaciones existentes entre las características de interés y entre éstas y los indicadores de productividad. El objetivo del presente trabajo fue estimar las correlaciones genéticas entre las variables de tipo agronómico (factores causales) y las de rendimiento (variables de respuesta), además descomponer su magnitud mediante análisis de sendero. Se evaluaron cinco caracteres de interés en caña de azúcar (altura, diámetro de tallos, población de tallos por metro, TCH y sacarosa (%caña)) en cinco localidades de la zona semiseca del valle del río Cauca para 17 variedades y dos testigos (CC 85-92 y MZC 74-275) en plantilla utilizando un diseño experimental Lattice. Para estimar los coeficientes de correlación genética y de sendero ('path coefficient') se utilizó el software *GENES*. El análisis mostró que para obtener variedades con alto TCH y alta sacarosa (%caña), primero se deben seleccionar clones con altura superior que la variedad testigo CC 85-92 (334 cm) para asegurar un contenido alto de sacarosa y posteriormente hacer un segundo tamizado por tallos gruesos de diámetro mayor que el testigo (32 mm) y alta población de tallos igual o superiores que el testigo (14 tallos/m).

**Palabras clave:** Análisis de sendero, fitomejoramiento, *Saccharum* spp.

### Abstract

In the initial stages of clonal selection, indirect selection for variables tons of sugar cane per hectare (TCH) and sucrose (%cane) is used, based on some agronomic traits associated with TCH and sucrose (%cane). This indirect selection can increase efficiency to the extent that better knowledge about the nature and magnitude of the associations among the characteristics of interest required and, between the latter and productivity indicators. The aim was to estimate genetic correlations between agronomic traits (causal factors) and performance variables (response variables), also decompose its magnitude by path analysis. Five characters of interest, cane length, diameter, stalk population per meter, TCH and sucrose (%cane) were evaluated in five locations in the geographic area of the semi-dry valley of the Cauca River to 17 varieties and two witnesses (CC 85-92 and MZC 74-275) on plant-cane using Lattice experimental design. To estimate the genetic correlation coefficients and path coefficients (path coefficient) the *GENES* software was used. The analysis showed that for high TCH varieties and sucrose (%cane) must first be selected clones carried high above the control range 85-92 CC (334 cm) to ensure a high sucrose content, and then you can make a second screening by thick stems of larger diameter than the control (32 mm) and high stalk population equal to or higher than the control (14 stems/m).

**Key-word:** path analysis, breeding, *Saccharum* spp.

## Introducción

La obtención de variedades de caña de azúcar (*Saccharum* spp.) con alto tonelaje y alta concentración de sacarosa (%caña) ha sido un objetivo desde sus inicios del Programa de Variedades del Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia (Cenicaña), proceso de selección clonal que involucra toda la variabilidad producida en la etapa inicial de cruzamientos conocida como Estado I (Victoria *et al.*, 2013). Sin embargo, la escogencia de los mejores individuos por alta producción de caña y alta sacarosa es difícil debido a que es prácticamente imposible la medición de estas características en la totalidad de los individuos.

Para una acertada selección de los mejores individuos es importante que el fitomejorador conozca las asociaciones que existen, por ejemplo, entre la producción de caña vs. características agronómicas como altura de planta y la población de tallos. Por tanto, la correcta comprensión de este tipo de asociaciones facilita la selección en forma indirecta para TCH mediante la observación en campo de características llamadas 'causas'. En este caso es relevante el análisis de sendero, el cual permite evaluar si una relación entre dos variables es de la forma causa-efecto, o es determinada por la influencia de otra u otras variables (Singh y Chaudhary, 1977; Vencovsky y Barriga, 1992; Cruz y Regazzi, 1997). Dentro de este tipo de análisis el estimador utiliza el coeficiente de sendero ('path coefficient') para medir la influencia directa de una variable sobre otra, independientemente de las demás, y de esta manera desdobra los coeficientes de correlación (genético, fenotípico o ambiental) en sus efectos directos e indirectos (Li., 1977). Como resultado, si las relaciones causa-efecto están bien definidas es posible representar todo el sistema de variables mediante un diagrama de sendero (Prakash y Lal., 2007).

Las correlaciones y el análisis de sendero son utilizados como herramienta de gran ayuda en el proceso de selección de plantas y animales (Ntawuruhunga *et al.*, 2001; Yadav y Ram., 2002; Espitia *et al.*, 2006; Gorgulu., 2011; Santos *et al.*, 2014). No obstante la bibliografía sobre trabajos de este tipo en caña de azúcar es escasa; aunque a nivel internacional existen algunas investigaciones reportadas en Brasil (Pagano *et al.*, 2012), Pakistán (Khan *et al.*, 2013) e isla de Fiji (Prakash y Lal., 2007). En Colombia no se conocen estudios de este tipo para el cultivo de la caña de azúcar, por tanto, y debido a la importancia del uso del análisis de sendero para el conocimiento de la naturaleza y magnitud de las correlaciones entre caracteres de interés agronómico y su descomposición, es necesario

implementar estos estudios en los programas de mejoramiento genético de esta especie.

Este trabajo tuvo como objetivos específicos: (1) estimar las correlaciones genéticas entre los caracteres: diámetro de tallo (DIA), altura de tallo (ALT), población (POB), toneladas de caña por hectárea (TCH) y sacarosa (% caña) (SAC); y (2) descomponer mediante análisis de sendero la magnitud de las correlaciones anteriores en sus efectos directos e indirectos sobre la producción de caña y sacarosa (%caña) en función de los restantes tres caracteres en estudio.

## Materiales y métodos

Para alcanzar un área representativa de la zona azucarera de Colombia, la investigación comprendió los ingenios con mayor área dentro de la zona semiseca y las zonas agroecológicas 6H1, 11H1 y 15H1 que representan 58% del total (209,493 ha) cultivada con caña.

El material vegetal utilizado incluyó dos variedades testigo (CC 85-92 y MZC 74-275) y 17 variedades: dos variedades de la serie 97, una de la serie 98, una de la serie 99, cinco de la serie 00 y ocho de la serie 01 (Tabla 1).

**Tabla 1.** Progenitores de las variedades de caña de azúcar evaluadas en la prueba regional 97-01.

Variedad	Progenitores	
	Madre	Padre
CC 00-2639	CC 93-7513	CC 93-7436
CC 00-2924	CC 87-504	?
CC 00-3068	CP 78-2086	ICA 69-11
CC 00-3079	PR 61-632	CP 57-603
CC 00-3191	CP 78-2086	?
CC 01-1228	CCSP 89-1997	?
CC 01-1305	CC 87-117	CC 82-04
CC 01-1484	MZC 74-275	?
CC 01-1508	CCSP 89-1997	?
CC 01-1567	CC 93-7449	?
CC 01-1789	RD 75-11	CP 82-1995
CC 01-678	CC 93-4076	M 336* PR 980
CC 01-746	MZC 74-275	?
CC 97-7170	MZC 74-275	Ä1
CC 97-7565	V 71-51	MZC 74-275
CC 98-426	MZC 74-275	Ä
CC 99-1405	CC 94-5787	CC 91-1599
MZC 74-275	POJ 2878	CP 57-603
CC 85-92	Co 775	?

1: Ä Autofecundación.

En campo se sembraron cinco experimentos en un diseño de Láctice 4 x 5 con tres repeticiones en franjas, en parcelas de seis surcos distanciadas 1.65 a 1.75 m a lo largo del tablón con longitudes de surco entre 70 m y 122 m, en suelos: (1) Palmira (Pachic Haplustolls) de familia textural

francosa fina, zona agroecológica 11H1, en suerte 20A de la hacienda Cabaña de Ingenio Manue-lita; (2) Palmira (Pachic Haplustolls) de familia textural francosa fina, zona agroecológica 11H1, en suerte 41B de la hacienda San Rafael de In-genio Mayagüez; (3) Galpón (Typic Calciusterts) y Corintians (Typic Haplusterts) de familia textural fina, zona agroecológica 6H1, en suerte 506 de la hacienda Marsella de Ingenio Providencia; (4) La selva (Vertic Haplustolls) de familia textural limosa fina sobre arcillosa, zona agroecológica 15H1, en suerte 50 de la hacienda La Luisa de Ingenio Riopaila; (5) Corintians (Typic Haplus-terts) de familia textural fina, zona agroecológica 6H1, en suerte 87A de la hacienda Esmeralda del Ingenio Sancarlos.

Los características de interés agronómico evaluadas fueron: (1) altura de planta en cm (ALT) medida en 10 tallos maduros de diferentes plantas desde la base hasta el punto natural de quiebre; (2) diámetro de tallo en mm (DIA) a la altura del tercio medio en 10 tallos maduros; (3) población de tallos por metro (POB) contando la cantidad de tallos molederos en 10 m expresado como tallos/m; (4) toneladas de caña por hectárea (TCH) mediante el peso de la totalidad de los tallos molederos/área de cada parcela, expresado en equivalente por ha; y (5) sacarosa (%caña) (SAC) para lo cual en el Laboratorio de Caña de Cenica-ña se analizaron 10 tallos molederos siguiendo la metodología de análisis directo. Las tres primeras evaluaciones fueron realizadas a los 12 meses, mientras que las TCH y la sacarosa (%caña) se midieron en cosecha manual de plantilla en verde limpio a edades entre 14 y 16.3 meses.

La estimación de los coeficientes de correlación genéticos ( $r_G$ ), para pares de caracteres y los análisis de sendero se realizaron mediante el uso del programa GENES (Cruz., 2013), con el cual se estiman los diferentes tipos de coeficientes de correlación, utilizando las matrices de varianzas y covarianzas para cada par de variables de interés (ej., X y Y) y aplicando las fórmulas clásicas de correlación, que se relacionan a continuación: (1) correlación genética ( $r_{G(XY)}$ ),  $r_{G(XY)} = COV_{G(XY)} / S_{G(X)} \cdot S_{G(Y)}$ , en donde:  $r_{G(XY)}$  y  $COV_{G(XY)}$  son la correlación y covarianza genética entre los caracteres X e Y, respectivamente;  $S_{G(X)}$  y  $S_{G(Y)}$  son la desviación estándar genética de X y Y, respectivamente (Cruz., 2006). Para la determinación de estas correlaciones, las estimaciones fueron realizadas con los valores de las medias de cada una de las características evaluadas.

Una vez fueron estimados los diferentes coeficientes de correlación (r), se probó su significancia estadística, planteando la hipótesis nula:  $H_0: r = 0$  vs. la hipótesis alterna:  $H_a: r \neq 0$ , mediante una prueba 't'. El valor de 't' calculado fue comparado con una 't' de la Tabla (T<sub>c</sub>) en los

niveles de significancia ( $P < 0.05, 0.01$ ) con  $n = 2$  grados de libertad. La regla de decisión fue, si  $t_c \geq T_t$ , entonces el valor de r (correlación) es estadísticamente diferente de cero.

Se realizaron análisis de sendero para TCH y sacarosa (%caña) (variables efecto) en función del diámetro, población y altura (variables causas) de caña; estos análisis se originaron con base en el uso de la matriz de correlaciones genéticas.

Para estimar los efectos directos en cada uno de los análisis, el programa GENES utiliza una matriz de correlaciones genéticas, las descompo-ne y organiza en el sistema de matrices siguiente:  $P = A^{-1} \cdot R$ , donde  $A^{-1}$  es la inversa de la matriz de correlaciones entre las variables causas, R es el vector de coeficientes de correlaciones entre las variables causas con la variable efecto, y P es el vector de coeficientes de sendero. El programa GENES, además de los efectos directos, permite estimar los efectos indirectos, el coeficiente de sendero debido a los efectos residuales o a otras variables no consideradas en el estudio (h) y el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) (Cruz, 2006).

## Resultados y discusión

Las correlaciones de Pearson fenotípicas tienen poco valor práctico, son riesgosas y pueden conllevar a errores, ya que en ellas se incluye la asociación entre caracteres tanto de naturaleza genética como ambiental; en consecuencia los resultados y la discusión se basan en las correlaciones genéticas. Estas correlaciones (Tabla 2)

**Tabla 2.** Correlaciones genéticas entre características de variedades de caña de azúcar. Zona azucarera de Colombia.

Característica	Altura	Diámetro	Población	Sacarosa (%caña)
Diámetro	0.63 **			
Población	-0.30 **	-0.33 **		
Sacarosa (%caña)	0.90 **	0.01	-0.40 **	
TCH	0.42 **	0.82 **	0.89 **	0.56 **

\*  $P < 0.001$ , según la prueba de 't'.

muestran una alta asociación de la sacarosa con la altura de planta y entre TCH con el diámetro de tallo y la población de plantas. A su vez, la población de plantas presenta correlación negativa con sacarosa (%caña), lo que genera una limitante entre incremento de TCH y sacarosa y también limita el eficiente desempeño del Programa de Variedades de Cenicaña en la zona semiseca del valle del río Cauca.

Hasta el presente no se conoce si las correlaciones significativas detectadas para la variable de mayor interés se deben a los efectos directos de ellas o a efectos indirectos a través de otras variables. El análisis de sendero (Tabla 3) permitió aclarar esta situación y mostró que el TCH

**Tabla 3.** Resultados del análisis de sendero para efectos directos (en la diagonal) e indirectos (fuera de la diagonal) de tres características de producción de caña de azúcar a 12 meses de edad. TCH y sacarosa (% caña) en plantilla con base en el uso de las correlaciones genéticas en ambientes en zona semiseca del valle del río Cauca (Colombia).

Característica	Altura	Diámetro	Población	Sacarosa	Altura	Diámetro	Población	TCH
Altura	1.43	-0.62	0.09	0.90**	0.05	0.77	-0.40	0.42**
Diámetro	0.90	-0.98	0.10	0.01	0.03	1.22	-0.44	0.82**
Población	-0.44	0.33	-0.28	-0.40**	-0.02	-0.41	1.31	0.89**

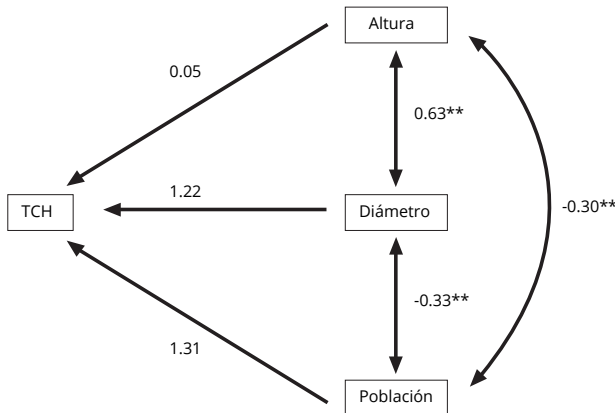
\*\* P < 0.001, según la prueba de 't'.

presenta una alta correlación con la población y el diámetro de tallo, lo que indica que el efecto directo es alto y confirma que para lograr una alta producción de caña se requieren altas poblaciones de plantas y diámetro de tallo grueso, lo que coincide con los hallazgos de Pagano *et al.* (2012) quienes realizaron estudios en Brasil utilizando familias de medios hermanos y encontraron que la selección familiar para la variable TCH está altamente asociada con el número de tallos, tanto en plantilla como en la soca. Portela *et al.* (2013) en Brasil encontraron una alta asociación entre TCH y la población de tallos, mientras que el diámetro de tallo tenía un efecto indirecto a través del número de tallos.

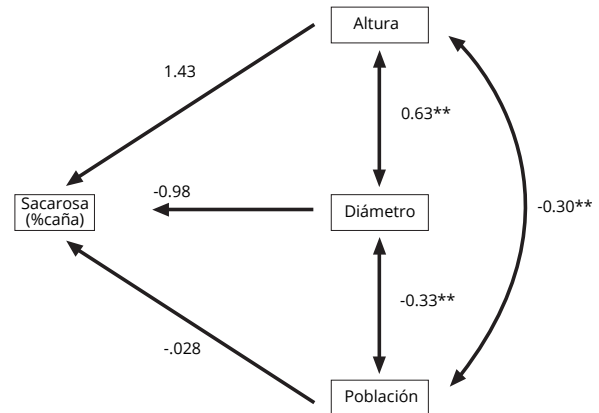
La altura de planta como determinante de TCH y sacarosa (%caña) es importante, pero su efecto ocurre a través del diámetro de tallo, esto significa que cuando se seleccionan plantas altas éstas deben tener diámetros gruesos, ya entre ambas características existe asociación (Figura 1). Lo

en el mundo, ya que para seguir aumentando esta productividad se requiere la introgresión de materiales de mayores poblaciones de tallos y una mayor altura de planta asociada con tallos intermedios a gruesos

La sacarosa (%caña) en las condiciones del valle del río Cauca es variable a través del tiempo debido a que la cosecha se realiza durante todo el año y la precipitación y la temperatura son variables y afectan la concentración de sacarosa en planta. En la mayoría de los países productores de caña la cosecha se hace en época seca lo que contribuye a la concentración de la sacarosa (%caña), por lo que estos resultados no permiten comparaciones válidas como bases de confirmación o contraste. Los resultados del presente estudio muestran que la sacarosa (%caña) se encuentra fuertemente asociada con la altura de planta (Figura 2) lo que favorece la captura de luz para una mayor tasa de fotosíntesis (Thippeswamy *et al.*, 2003).



**Figura 1.** Diagrama de sendero para TCH en caña de azúcar, con base en el uso de las correlaciones genéticas. Zona azucarera de Colombia.



**Figura 2.** Diagrama de sendero para sacarosa (% caña) en caña de azúcar, con base en el uso de las correlaciones genéticas. Zona azucarera de Colombia.

anterior significa que tallos altos pero delgados no favorecen el incremento de TCH. Estos resultados coinciden con los protocolos aplicados por el Programa de Variedades de Caña de Azúcar de Luisiana (EE.UU.) que utiliza los componentes diámetro de tallo y número de tallos por cepa en las etapas iniciales de pruebas de progenie (Sousa y Milligan, 2005). Los resultados en este estudio son importantes en Colombia, donde se obtienen las mayores productividades de caña de azúcar

No obstante las altas poblaciones de plantas reducen el contenido de sacarosa en forma indirecta vía diámetro, ya que en tallos muy gruesos no es posible concentrar altos porcentajes de sacarosa debido al efecto de dilución, lo que coincide con los hallazgos de Khan *et al.* (2013) quienes consideran que la producción de azúcar tiene correlación negativamente con el diámetro de tallo. Una estrategia posible para seleccionar plantas con diámetro intermedio es utilizar



variedades con entrenudos cortos o medios. En las condiciones locales del estudio los diámetros delgados están asociados con altos contenidos de sacarosa, pero tienen baja producción de caña. La selección por familia permite manejar al mismo tiempo ambos caracteres ya que tanto el diámetro y la sacarosa presentan una alta heredabilidad en sentido amplio lo que permite seleccionar familias de diámetro intermedio con alta sacarosa (Shanthi *et al.*, 2011)

## Conclusión

El análisis de los datos en este estudio mostró que para obtener variedades de alto TCH y sacarosa (%caña) se debe, primero seleccionar clones de porte alto, mayor que la variedad testigo CC 85-92 (334 cm), con el objeto de garantizar un contenido alto de sacarosa y, posteriormente hacer un segundo tamizado por tallos gruesos de diámetro mayor que el testigo (32 mm) y alta población de tallos igual o superiores al testigo (14 tallos/m).

## Referencias

- Brasileiro, B. P.; Peternelli, L. A.; y Pereira Barbosa, M. H. 2013. Consistency of the results of path analysis among sugarcane experiments. *Crop Breed. Appl. Biotechnol.* 13:113 - 119.
- Cruz, C. D. 2006. Programa GENES: versão Windows: Aplicativo Computacional em genética e estatística. Primeira edição. Editora UFV. Universidade Federal de Vicosa. 648 p.
- Cruz, C. D. 2013. GENES. *Acta Scientiarum. Agronomy Maringá* 35(3):271-276.
- Cruz, C. D. y Regazzi, A. J. 1997. Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético. 2ª ed. Ediciones Universidade Federal de Vicosa. Brasil. 390 p.
- De Sousa-Vieira, O y Milligan, S. B. 2005. Interrelationships of cane yield components and their utility in sugarcane Family selection: path coefficient analysis. *Interciencia* 30(2):93 - 96.
- Espitia, M.; Vallejo, F. y Baena, D. 2005. Correlaciones fenotípicas, genéticas y ambientales en *Cucurbita moschata* Duch. *Acta Agronómica* 54(1):1 - 9.
- orgulu, O. 2011. Path analysis for milk yield characteristics in jersey dairy cow. Turquia. *Assian J. Veter. Adv.* 6(2):182 - 188.
- Khan, I. A.; Seema, N.; Raza, S.; Yasmine, S.; y Bibi, S. 2013. Environmental interactions of sugarcane genotypes and yield stability analysis of sugarcane. Pakistan. *Pak. J. Bot.* 45(5):1617 - 1622.
- Li, C. C. 1977. *Path Analysis*. Pacific Grove, CA, USA. 346 p.
- Ntawuruhunga, P.; Rubaihayo, P. R.; Whyte, J. B.; Dixon, A. G.; y Osiru, D. S. 2001. Inter-relationships among traits and path analysis for yield components of cassava: a search for storage root yield indicators. *African Crop Sci. J.* 9(4):599 - 606.
- Pagano, E. D.; Peternelli, L. A.; Mendes de Paula, T. O.; y Pereira B. M. 2012. Análise de trilha usando valores fenotípicos e genotípicos para componentes do rendimento na seleção de famílias de cana-de-açúcar. *Ciência Rural* 42(1):38 - 44.
- Prakash, A. T. y Lal, P. 2007. Correlation and path coefficient analysis in sugarcane. *South Pacific J. Natural Sci.* 1:1 - 10.
- Singh, R. K. y Chaudhary, B. D. 1977. *Biometrical methods in quantitative genetic analysis*. Kaliani Publishers, Nueva Delhi, Ludhiana, India. 304 p.
- Shanthi, R. M.; Hemaprabha, G.; y Alarmelu, S. 2011. An overview on the selection strategies in sugarcane breeding programmes. *J. Sugarcane Res.* 1:27 - 37.
- Thippeswamy, S.; Kajjidoni, S. T.; Salimath, P. M.; y Goud, J. V. 2003. Correlation and path analysis for cane yield, juice quality and their component traits in sugarcane. *Sugar Tech.* 5(1 - 2):65 - 72.
- Vencovsky, R. y Barriga, P. 1992. *Genética biométrica no fitomelhoramento*. Soc. Brasil. Genética. 496 p.
- Yadav, R. K. y Ram, H. H. 2002. Correlation and path-coefficient analysis in muskmelon. *Haryana J. Hortil. Sci.* 31:74 - 76.