

## Atributos productivos para la selección de nuevas variedades de caña de azúcar †



### [Productive attributes for the selection of new sugarcane varieties]

Jazmin Lavin-Castañeda<sup>1</sup>, Arturo Pérez-Vázquez<sup>1</sup>, José López-Collado<sup>1</sup>, Gustavo López-Romero<sup>1</sup>, Libia Iris Trejo-Téllez<sup>2</sup> and Fernando Carlos Gómez-Merino<sup>\*2</sup>

<sup>1</sup>Colegio de Postgraduados Campus Veracruz. Carretera Xalapa-Veracruz km 88.5, Tepetates, Manlio F. Altamirano, Veracruz, México. C. P. 91700. Email: [lavin.jazmin@colpos.mx](mailto:lavin.jazmin@colpos.mx); [parturo@colpos.mx](mailto:parturo@colpos.mx); [jlopez@colpos.mx](mailto:jlopez@colpos.mx); [gustavolr@colpos.mx](mailto:gustavolr@colpos.mx)

<sup>2</sup>Colegio de Postgraduados Campus Montecillo. Carretera México-Texcoco km 36.5, Montecillo, Texcoco, Estado de México, México. C. P. 56264. Email: [tlibia@colpos.mx](mailto:tlibia@colpos.mx); [fernandg@colpos.mx](mailto:fernandg@colpos.mx)\*

\*Corresponding author

### SUMMARY

**Background:** In Mexico, the sugarcane (*Saccharum* spp.) production system relies on a few varieties, increasing its vulnerability to environmental stresses. Genetic variability, the diversity of genes within a population, is essential for adaptation and evolutionary sustainability in the face of environmental changes. Greater diversity translates to greater survival potential. Heritability measures the proportion of this variation that is transmitted, enabling genetic progress through selection. **Objective:** To evaluate genetic variability, estimate heritability and genetic progress, and analyze the performance of productive attributes of 20 new semi-commercial varieties, compared to four commercial varieties widely cultivated in Mexico. **Methodology:** The study was conducted at the Experimental Field of the Postgraduate College, Córdoba Campus, Veracruz, Mexico. Measurements were taken in a randomized complete block design with five replicates. The following were measured: stalk height, leaf length and width, internode length, milling stalk diameter, late water sprouts, aerial lateral shoots, number of internodes, number of leaves, pith and cavity within milling stalks, and total soluble solids (°Brix). Multivariate analyses, genetic estimations, Pearson correlations, principal component analysis (PCA), cluster analysis, stability analysis, and distance index between groups were applied to the data obtained. **Results:** High heritability (> 0.4) was observed for stem height, total soluble solids, late water sprouting, and aerial lateral shoots, indicating strong genetic control and suggesting their inclusion in breeding programs. Total soluble solids were confirmed as a key variable due to their relationship with industrial yield. In contrast, the presence of pith, hollowness, and an excess of lateral shoots were associated with decreased quality and productivity. PCA and cluster analysis allowed the identification of six groups of varieties, some with agronomic potential and others with production limitations. **Implications:** Some of the semi-commercial varieties have the potential to contribute to strengthening the genetic stock in sugarcane to meet the challenges of climate change and crop variability. The results obtained are from a single environment; therefore, they need to be validated under different conditions. **Conclusions:** The varieties Mex 09-66, Mex 09-93, Mex 09-132, Mex 09-208, Mex 09-212, Mex 09-289, Mex 09-290, Mex 09-312, Mex 09-321, Mex 09-333, and Mex 09-341 showed more promising characteristics than the rest; for their use, it will be necessary to evaluate them in different agroclimatic regions.

**Key words:** Poaceae; *Saccharum* spp.; genetic improvement; genetic parameters; variability; selection.

### RESUMEN

**Antecedentes:** En México, el sistema de producción de caña de azúcar (*Saccharum* spp.) se sustenta en pocas variedades, lo que incrementa la vulnerabilidad del sistema productivo frente a embates ambientales. La variabilidad genética es la diversidad de genes en una población, esencial para la adaptación y sostenibilidad evolutiva ante cambios ambientales. A mayor diversidad, mayor potencial de supervivencia. La heredabilidad mide qué parte de esta variación se transmite, permitiendo el avance genético mediante selección. **Objetivo:** Evaluar la variabilidad genética, estimar heredabilidad y avance genético, así como, analizar el comportamiento de atributos productivos de 20 nuevas

† Submitted September 18, 2025 – Accepted April 15, 2026. <http://doi.org/10.56369/tsaes.6628>



Copyright © the authors. Work licensed under a CC-BY 4.0 License. <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

ISSN: 1870-0462. ORCID: J. Lavin Castañeda: <https://orcid.org/0000-0001-7402-1355>; A. Pérez Vázquez: <https://orcid.org/0000-0002-8440-7814>; J. López-Collado: <https://orcid.org/0000-0002-8947-2367>; G. López-Romero: <https://orcid.org/0000-0003-1831-0368>; L.I. Tejo-Téllez: <https://orcid.org/0000-0003-3433-065X>; F.C. Gómez Merino: <https://orcid.org/0000-0001-8496-2095>

variedades en fase Prueba Semicomercial, comparadas con cuatro variedades comerciales ampliamente cultivadas en México. **Metodología:** El estudio se realizó en el Campo Experimental del Colegio de Postgraduados, Campus Córdoba, Veracruz, México. Se evaluaron 20 variedades en fase Prueba Semicomercial y cuatro testigos en un diseño en bloques completamente al azar, con cinco repeticiones. Se registraron las variables altura de tallos, longitud y ancho de hojas, longitud de entrenudos, diámetro de tallos molederos, brotes de agua tardíos, brotes laterales aéreos (lalas), número de entrenudos, número de hojas, médula y oquedad en el interior de tallos molederos, y sólidos solubles totales (°Brix). Con los datos obtenidos se realizaron análisis multivariados, estimaciones genéticas, correlaciones de Pearson, análisis de componentes principales (PCA), clúster, estabilidad e índice de distancia entre grupos. **Resultados:** Se observó alta heredabilidad (> 0.4) en altura de tallos, sólidos solubles totales, brotes de agua tardíos y brotes laterales aéreos, lo que indica fuerte control genético y sugiere su inclusión en programas de mejoramiento. Los sólidos solubles totales se confirmaron como variable clave por su relación con el rendimiento industrial. En contraste, la presencia de médula, oquedad y exceso de brotes laterales se asoció con disminución en calidad y productividad. El PCA y el análisis de clúster permitieron identificar seis grupos de variedades, algunas con potencial agronómico y otras con limitantes productivas. **Implicaciones:** Algunas de las variedades semicomerciales tienen el potencial de contribuir al fortalecimiento del acervo genético en caña de azúcar para hacer frente a los desafíos del cambio climático y a la variabilidad del cultivo. Sin embargo, los resultados obtenidos son de un solo ambiente, por lo que, es necesario validarlos en diferentes condiciones. **Conclusiones:** Las variedades Mex 09-66, Mex 09-93, Mex 09-132, Mex 09-208, Mex 09-212, Mex 09-289, Mex 09-290, Mex 09-312, Mex 09-321, Mex 09-333 y Mex 09-341 mostraron características más promisorias que el resto.

**Palabras clave:** Poaceae; *Saccharum* spp.; mejoramiento genético; parámetros genéticos; variabilidad; selección.

## INTRODUCCIÓN

La caña de azúcar es uno de los cultivos más eficientes en la conversión de energía lumínica a energía química a través de la fotosíntesis tipo C<sub>4</sub>. Esto se debe a su alto punto de saturación de luz solar, baja tasa de respiración en la oscuridad, eficiente uso de la luz y alto rendimiento (Liu *et al.*, 2020). Su valor económico está determinado por tres atributos: alta capacidad productiva por unidad de superficie, eficiencia en el uso de insumos agrícolas (i.e., agua, fertilizantes, agroquímicos), y facilidad para ser procesada localmente y generar valor agregado (Moore *et al.*, 2014). Cerca del 80 % del azúcar que se consume a nivel mundial se obtiene a partir de la caña de azúcar, mientras que, el 20 % restante se obtiene a partir de la remolacha azucarera (*Beta vulgaris* subsp. *vulgaris* var. *altissima*) (Nap *et al.*, 2025). Para los próximos años se espera que la producción de azúcar se expanda, y que la caña de azúcar aporte más del 85 % de la producción total (OECD y FAO, 2025). Adicional al azúcar, la caña también es una fuente importante de fibra, forraje, bioenergía y metabolitos útiles en diversas industrias (Eggleston *et al.*, 2022).

Se estima a partir de la caña de azúcar se produce 40 % de la bioenergía a nivel global (Wang *et al.*, 2024). Debido a sus ventajas competitivas, en el mundo se cultivan aproximadamente 27 millones de hectáreas al año, distribuidas en 130 países (CIRAD, 2023). Entre los países con mayor producción de caña de azúcar destacan Brasil, India, Tailandia, China, Pakistán, México, Colombia y Australia (Statista, 2025a); México se posiciona como el sexto país productor en

el mundo, con más de 65 millones de toneladas de caña producidas en cerca de 800 mil ha, y 5.6 millones de toneladas de azúcar producidas, con un valor aproximado de 4.4 mil millones de dólares estadounidenses (Statista, 2025b). La caña de azúcar representa la segunda cadena de valor agroindustrial más importante de México, solo después del maíz (*Zea mays* L.), la cual genera 500 mil empleos de forma directa y 2.4 millones de empleos de forma indirecta, en 267 municipios distribuidos a lo largo de 15 estados mexicanos (de la Torre-López *et al.*, 2021; UNC, 2023). A pesar de su importancia a nivel nacional, en el país no se ha desarrollado suficiente tecnología para enfrentar los retos del cambio climático global, el deterioro de los recursos naturales, y la creciente demanda de sacarosa como ingrediente en la elaboración de alimentos y como componente de materias primas de uso industrial (Santiago-Zárate *et al.*, 2021). Además, a partir de la desaparición del Instituto Mexicano para la Producción Azucarera (IMPA) en la década de 1990, las actividades de investigación, desarrollo e innovación en caña de azúcar decrecieron considerablemente, por lo cual, también disminuyó la generación de nuevas variedades (Reyes-Hernández *et al.*, 2022). El uso de una base restringida de variedades de caña como monocultivo, hace más vulnerable al sistema de producción frente a embates de estrés biótico y abiótico (Msomba *et al.*, 2024). Una menor agrobiodiversidad incrementa la incidencia de plagas y enfermedades, y hace al sistema más dependiente de productos químicos tóxicos para su control, que a su vez encarece la producción e impacta negativamente el ambiente (Putra *et al.*, 2020).

Los cultivares modernos de caña de azúcar son el resultado de poco más de un siglo de trabajo en hibridación de especies poliploides del género *Saccharum*. Se estima que estos híbridos comerciales de caña contienen 75-85 % del genoma de *S. officinarum* y 15-25 % de *S. spontaneum* (Pompidor *et al.*, 2021; Li *et al.*, 2024), y muestran alta poliploidía y aneuploides ( $2n \approx 12x = \sim 120$ ) derivados de hibridaciones interespecíficas, lo que da como resultado un genoma híbrido de caña de azúcar diverso y complejo (Healey *et al.*, 2024). La compleja ploidía, junto con la hibridación natural interespecífica y posiblemente intraespecífica, y la herencia no mendeliana, causan el trasfondo genético altamente complejo de los híbridos de caña de azúcar, lo que dificulta el desciframiento de sus genomas, desarrollo de marcadores moleculares, construcción de mapas de ligamiento genético e identificación de *loci* de rasgos cuantitativos (QTL) asociados con rasgos agronómicos (Wang *et al.*, 2024). Aunado a lo anterior, en general, la caña de azúcar presenta floración limitada y largo ciclo de crecimiento (14 a 16 meses), lo que también prolonga la investigación genética de la especie respecto a otros cultivos. De ahí que, a la fecha, el mejoramiento se haga con herramientas convencionales, a menudo de manera empírica.

Estas técnicas son laboriosas y consideran muchos caracteres fenotípicos, lo que hace necesario el uso de herramientas matemáticas y estadísticas para aportar mayor eficiencia y robustez al proceso de mejoramiento genético (Xu *et al.*, 2023). Cada año, a través del mejoramiento convencional, se generan por hibridación cientos de miles de candidatos potenciales, pero después de hasta 15 años de selección, sólo unos pocos clones se difunden como variedades comerciales o cultivares (CIRAD, 2023).

Para analizar la diversidad genética de estos materiales, los caracteres fenotípicos son ampliamente utilizados porque, en comparación con los marcadores moleculares, son simples, fáciles de identificar y recolectar, económicos, efectivos y prácticos (Wu *et al.*, 2021). Para el desarrollo de una nueva variedad de caña de azúcar, es necesario contar con suficiente variación genética hereditaria con un avance genético predecible para el rasgo que se desea (Tolera *et al.*, 2023). A fin de hacer más dinámico este proceso, las estimaciones del progreso genético pueden indicar la eficiencia de los programas con mayor exactitud; además avances en marcadores moleculares, herramientas de secuenciación de última generación, y modelos estadísticos robustos, también conducen a un mejoramiento asistido más eficaz en la caña de azúcar (Banerjee *et al.*, 2020; Zatti-Barreto *et al.*, 2021). En

México, entre cuatro y cinco variedades comerciales sustentan cerca de 70 % de la caña que se cultiva, cosecha y transporta a las fábricas para su procesamiento (CEMA, 2024; Aguado-Santacruz *et al.*, 2024). Por lo tanto, es urgente incorporar nuevas variedades para incrementar diversidad, productividad y calidad de la caña cultivada en ambientes más restringidos, debido a los efectos negativos del cambio climático global en la producción agrícola de México (Estrada *et al.*, 2022; Cruz-Sánchez *et al.*, 2024). Aunque existen predicciones de que el cambio climático puede mejorar la producción de caña de azúcar en países como Australia (Yao *et al.*, 2026) y Brasil (Leite *et al.*, 2026), el caso de México es distinto y puede haber serias afectaciones negativas en rendimiento por este fenómeno global (Sandoval-Romero *et al.*, 2025; Sushchuk, 2025). El objetivo de esta investigación fue analizar, en el ciclo productivo de soca, el comportamiento de atributos productivos de 20 nuevas variedades seleccionadas en fase de selección Prueba Semicomercial, en el Colegio de Postgraduados Campus Córdoba, en Amatlán de los Reyes, Veracruz, México, y cuatro variedades comerciales. Se estimó la variabilidad, heredabilidad en sentido amplio, el avance genético para 12 caracteres, correlación de Pearson, análisis de componentes principales (PCA) y de clúster.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Metodología de selección empleada y material genético evaluado

El esquema general de selección que se implementó está basado en la metodología del IMPA (1983) y se presenta esquematizado en la Figura 1. Este proceso inició con la hibridación de variedades élite y de interés agronómico. De tal hibridación se obtuvo el Fuzz o semilla botánica, que se sembró para su germinación, y se inoculó con el virus del mosaico de la caña de azúcar (VMCA) para evaluar la resistencia de las plántulas a la enfermedad. Una vez seleccionadas las plántulas resistentes al VMCA, el proceso de selección comprendió las fases de Plántula, Cepa, Surco, Parcela, Multiplicación I, Prueba de adaptabilidad, Multiplicación II, Evaluación Agroindustrial, Multiplicación III, Prueba Semicomercial y Semillero.

Resultado de este proceso de selección, en este estudio se evaluaron las 20 variedades que se enlistan en la Tabla 1, y que corresponden a la fase Prueba Semicomercial (ciclo soca). Algunos de los rasgos morfológicos de cada una de estas variedades se muestran en la Figura 2.

NOMENCLATURA	PRESIÓN DE SELECCIÓN	PERIODO DE EVALUACIÓN		FASE
		CICLO	MESES	
Híbrido	20 %	Soca	18	Plántula
Variedad	20 %	Soca	24	Cepa
Clón	20 %	Soca	24	Surco
Variedad	20 %	Soca	24	Parcela
Variedad	---	Plantilla	10 a 12	Multiplicación I
Variedad	20 %	Soca	24	Prueba de Adaptabilidad
Variedad	---	Plantilla	10 a 12	Multiplicación II
Variedad	20 %	Resoca	38 a 42	Evaluación Agroindustrial
Variedad Prometedora	---	Plantilla	10 a 12	Multiplicación III
Variedad Prospecto Comercial	---	Plantilla	10 a 12	Prueba Semicomercial
Variedad Liberada	---	Plantilla	10 a 12	Semillero

Figura 1. Esquema general del proceso de generación de variedades de caña de azúcar (*Saccharum* spp.: Híbridos) implementado en el presente trabajo.

Tabla 1. Variedades de caña de azúcar (*Saccharum* spp.) evaluadas durante la fase de Prueba Semicomercial (ciclo soca) del programa de mejoramiento genético del Colegio de Postgraduados Campus Córdoba en Amatlán de los Reyes, Veracruz, México (18°50' LN; 96°51' LO; 650 m de altitud).<sup>†</sup>

Número	Progenitores		Variedad
	Femenino	Masculino	
01	LCP 81-10	×	Gloria 57
02	CP 52-68	×	CP 70-1527
03	CP 92-1401	×	CP 81-1384
04	CP 81-10	×	CP 70-133
05	CP 81-10	×	CP 70-133
06	Tue 72-9	×	CP 80-1827
07	Tue 72-9	×	CP 80-1827
08	CC 93-3826	×	CP 62-378
09	LTMex 92-52	×	¿?
10	LTMex 92-52	×	¿?
11	LTMex 92-52	×	¿?
12	LTMex 92-52	×	¿?
13	PR 62-632	×	CP 80-1743
14	Mex 79-431	×	CP 89-2377
15	Mex 79-431	×	CP 89-2377

Número	Progenitores		Variedad	
	Femenino	Masculino		
16	ITV 92-1424	×	B 45-181	Mex 09-312
17	ITV 92-1424	×	B 45-181	Mex 09-321
18	ITV 92-1424	×	CP 81-1384	Mex 09-333
19	CP 87-1490	×	Mex 79-341	Mex 09-341
20	CP 87-1490	×	Mex 79-341	Mex 09-348
Testigo 21	CP 62-374	×	CP 63-588	CP 72-2086
Testigo 22	Co 421	×	Mex 57-473	Mex 79-431
Testigo 23	Mex 56-476	×	Mex 53-142	Mex 69-290
Testigo 24	CC 92-2198	×	CC 93-4206	Mex 05-204

¿? Cruza multiparental. †Se incluyen cuatro testigos comerciales como referencia: CP 72-2086, Mex 79-431, Mex 69-290 y Mex 05-204.



Figura 2. Características morfológicas de las variedades analizadas en este estudio. Las fotografías incluyen apariencia y hábito de crecimiento, forma y color del tallo, anillo de crecimiento y tipo de yema, banda de raíz,

**forma y color de yema, presencia o ausencia de fisuras o grietas en la corteza de los entrenudos del tallo, forma de aurícula, lígula, forma y color del collar.**

### Área de estudio

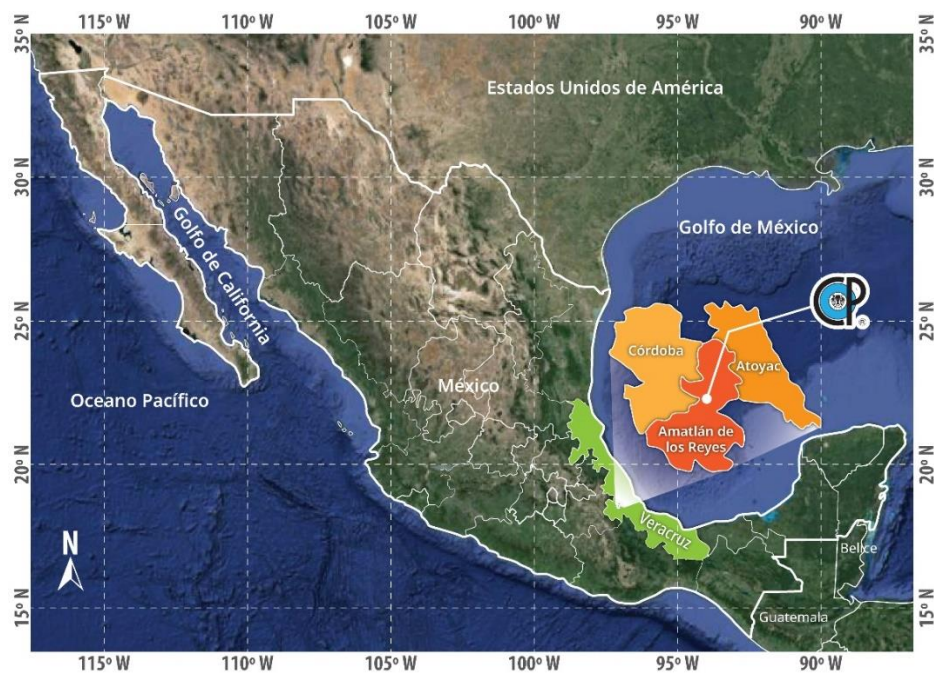
El estudio se llevó a cabo en el Campo Experimental del Colegio de Postgraduados Campus Córdoba, ubicado en la Carretera Federal Córdoba-Veracruz km 348.5, congregación Manuel León, municipio de Amatlán de los Reyes, Veracruz, México, a una altitud de 650 m. El suelo del sitio experimental es de tipo vertisol, con un pH de 4.0. El clima de la zona es húmedo tropical, con lluvias abundantes en verano, precipitación media anual de 1807 mm, temperatura promedio de 20 °C, máxima de 35 °C y mínima de 10 °C. En la Figura 3 se presenta la localización geográfica del sitio de estudio en los campos experimentales del Colegio de Postgraduados Campus Córdoba.

Estas variedades forman parte del programa de mejoramiento genético que impulsa el Colegio de Postgraduados desde 2009 (Lavin-Castañeda *et al.*, 2020). Como referentes comparativos para el estudio, se incluyeron cuatro variedades comerciales: CP 72-2086 y Mex 05-204 de maduración temprana, Mex 79-431 de maduración intermedia y Mex 69-290 de maduración tardía. El diseño experimental fue en bloques completamente al azar, con seis repeticiones. Cada parcela constó de cinco surcos de 6 m de longitud, con una distancia entre surcos de 1.20 m y una separación entre parcelas de 2 m.

### Evaluación de atributos productivos

Se registraron las características agronómicas: altura de tallos, longitud y ancho de hojas, longitud de entrenudos, diámetro de tallos molederos, número de brotes de agua tardíos, número de brotes laterales aéreos (lalas), número de entrenudos, número de hojas, porcentaje de médula y oquedad en el interior de tallos molederos, y sólidos solubles totales (°Brix).

La altura de tallos molederos se midió desde la base hasta el último collar visible; la longitud y ancho de hojas se determinaron en la tercera hoja, contando a partir de la primera hoja con collar visible; la longitud de entrenudos fue medida desde la parte frontal del entrenudo del lado de la yema, tomando como referencia la cicatriz foliar; las variables anteriores se registraron con un flexómetro, en cm (PRETUL PRO-8ME-A; México), con una precisión de 1.8 mm; el diámetro de tallos molederos se determinó en el tercio medio del tallo con un vernier digital de 6 pulgadas (Truper-CALDI-6MP; México); los brotes de agua tardíos se contabilizaron de manera visual y manual (IMPA, 1983; Mendoza *et al.*, 2010); el número de entrenudos se contabilizó desde base hasta el último collar visible; el número de hojas se determinó desde la copa hacia el tercio medio; la médula y oquedad se



**Figura 3. Localización geográfica del área de estudio en las instalaciones del Colegio de Postgraduados Campus Córdoba, en el municipio de Amatlán de los Reyes, Veracruz, México (18°50' LN; 96°51' LO; 650 m de altitud).**

identificaron y midieron al cortar los tallos, registrando presencia, abundancia y longitud del daño interno. Para su identificación se siguió la metodología del IMPA (1983) y la UPOV (2005). Los sólidos solubles totales se analizaron en un refractómetro (Atago 2312; Japón), en el que se colocaron 100  $\mu$ L del jugo extraído del tercio medio de tallos molederos de 12 meses de edad, después del primer corte (ciclo productivo, soca).

### Análisis estadístico

Estimación de parámetros genéticos. Con los métodos de modelos mixtos y de Máxima Verosimilitud Restringida (REML) (Braga *et al.*, 2020) se estimaron los componentes de varianza con el software R 4.0 (Olivoto *et al.*, 2020; Mangiafico, 2024), considerando las seis repeticiones como factor de efectos fijos y las variedades como factor de efectos aleatorios, según el modelo:

$$y_{ij} = \mu + \gamma_i + \tau_j + \varepsilon_{ij}$$

donde  $y_{ij}$  = variable respuesta de la caña de azúcar del  $i$ -ésimo repeticiones y  $j$  -ésimo variedad;  $\mu$  = media general;  $\gamma_i$  = efecto del  $i$ -ésimo repeticiones;  $\tau_j$  = efecto del  $j$ -ésimo variedad [con  $\text{Var}(\tau_j) = \sigma_g^2$  y  $E(\tau_j) = 0$ ];  $\varepsilon_{ij}$  = error aleatorio correspondiente a la observación  $y_{ij}$  [con  $\text{Var}(\varepsilon_{ij}) = \sigma_e^2$  y  $E(\varepsilon_{ij}) = 0$ ]. Con este modelo se obtuvieron los estimadores de la varianza de las variedades y del error por cada característica de interés.

Con las varianzas de las variedades de caña de azúcar, ( $\sigma_g^2$ ), y la varianza residual ( $\sigma_e^2$ ) se obtuvieron los siguientes parámetros genéticos:

Heredabilidad en sentido amplio individual ( $H_i^2$ ) (Ecuación 1) y de la media de las variedades ( $H_g^2$ ) (Ecuación 2):

$$H_i^2 = \sigma_g^2 / (\sigma_g^2 + \sigma_e^2) \quad (1)$$

$$H_v^2 = \sigma_g^2 / (\sigma_g^2 + \frac{\sigma_e^2}{r}) \quad (2)$$

donde  $r$  es el número de repeticiones.

Coefficiente de variación genotípica (GCV) (Ecuación 3), coeficiente de variación residual (ECV) (Ecuación 4) y coeficiente de variación fenotípica (PCV) (Ecuación 5), de los atributos productivos se estimaron con las ecuaciones de Duanmeesuk *et al.* (2021):

$$GCV = \frac{\sqrt{\sigma_g^2}}{\bar{y}} \quad (3)$$

$$ECV = \frac{\sqrt{\sigma_e^2}}{\bar{y}} \quad (4)$$

$$PCV = \frac{\sqrt{\sigma_p^2}}{\bar{y}} \quad (5)$$

donde  $\bar{y}$  es el promedio de la característica evaluada.

Los valores de heredabilidad superiores al 0.8 se consideran muy altos, valores de 0.6 al 0.79 son moderadamente altos, valores del 0.40 al 0.59 son medios y valores inferiores al 0.40 son considerados bajos de acuerdo con la descripción de Singh *et al.* (2005).

El avance genético (GA) y el avance genético como porcentaje de la media (GAM) se determinaron con la ecuación, descrita por Johnson *et al.* (1955):

$$GA = K(\sigma_p)H_b^2 \quad (6)$$

$$GAM = \left(\frac{GA}{\bar{y}}\right) \times 100$$

Donde  $\bar{y}$  es la media general de la característica evaluada.

Correlación: se realizó un análisis de correlación de Pearson entre atributos productivos, para determinar las similitudes y diferencias entre las características de 24 variedades de caña de azúcar (Zeng *et al.*, 2013a).

Análisis de Componentes Principales (PCA): los datos fueron estandarizados restando el valor promedio y dividido por la desviación estándar (Zeng *et al.*, 2013b).

Análisis de clúster, estabilidad e índice de disimilitud entre clústeres: se construyó un dendrograma con distancias euclidianas y el método de agrupamiento Ward, con el objetivo de agrupar las variedades en función de sus características similares. La estabilidad de los clústeres se evaluó mediante el coeficiente de Jaccard; los clústeres con coeficientes  $>0.85$  se

consideraron altamente estables, los comprendidos entre 0.6 y 0.75 moderadamente estables y los <0.6 inestables (Mount y Zumel, 2019). También se determinaron las distancias entre clústeres utilizando el algoritmo de Gower (Gower, 1971), adecuado para datos mixtos (categóricos y numéricos). En este caso, al tratarse de datos numéricos, la media corresponde a diferencias absolutas estandarizadas entre valores, generando una matriz de distancias. Valores cercanos a 0 indican alta similitud, valores intermedios similitud moderada, y aquellos próximos a 1, máxima disimilitud entre clústeres (Moura *et al.*, 2010; Demey *et al.*, 2011, Liu *et al.*, 2024). Todos los análisis se realizaron con el software R versión 4.3.2 (R Core Team 2024).

Análisis de varianza y comparación de medias. Para determinar diferencias estadísticas entre los atributos productivos entre los clusters formados con el análisis anterior, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) con un nivel de significancia de  $P \leq 0.05$ . Cuando se detectaron diferencias significativas, las medias se compararon mediante la prueba de Tukey ( $\alpha = 0.05$ ). Todos los análisis se efectuaron con el software R versión 4.3.2 (R Core Team, 2024).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Parámetros genéticos de atributos productivos

El análisis de parámetros genéticos mostró que la altura de tallos molederos, brotes de agua tardíos, sólidos solubles totales y brotes laterales aéreos presentaron heredabilidades altas, con valores de 0.67, 0.77, 0.75 y 0.91, respectivamente (Tabla 2). En particular, los brotes laterales aéreos destacaron con un coeficiente de variación genotípica de 94.72 % y una ganancia genética relativa a la media de 185.96 %, lo que indica un fuerte control genético y la necesidad de destacar este rasgo de manera temprana en el proceso de selección. Por otro lado, los sólidos solubles totales en caña de azúcar se consideran una característica prioritaria en los programas de selección dado que están directamente asociados al rendimiento industrial; mientras que, las variedades con características no deseables como presencia de brotes laterales aéreos y brotes de agua tardíos en exceso por cepa deben descartarse (Tolera *et al.*, 2023). Diversos estudios han reportado heredabilidades consistentemente altas para sólidos solubles totales en distintos ciclos productivos (Abu-Ellail *et al.*, 2020; Zatti-Barreto *et al.*, 2021). No obstante, Tolera *et al.* (2024) reportaron en sólidos solubles totales, altura de tallos molederos, número de entrenudos y longitud de entrenudos, bajos valores de heredabilidad (0.30 a 0.38) en 196 genotipos de 15 países. Además, estas variables mostraron un

coeficiente reducido de variación genotípica (5.31 a 14.31 %) y un avance genético relativo como porcentaje de la media (GAM) igualmente bajo (6.73 % para sólidos solubles totales y 16.36 % para número de entrenudos). Estos resultados indican que, en dichos genotipos, la expresión de estas características está fuertemente influenciada por el ambiente, lo que limita su aprovechamiento en programas de selección directa. La alta heredabilidad en caracteres cuantitativos, a pesar de la influencia ambiental, ocurre cuando la variación genética entre individuos supera significativamente la variación ambiental en una población específica. La heredabilidad mide qué proporción de la varianza total se debe a los genes, no la magnitud total del rasgo (Charmantier y Garant, 2005).

En contraste, variables como diámetro de tallos molederos, longitud y ancho de hojas, longitud y número de entrenudos y número de hojas mostraron heredabilidades bajas con valores de 0.34 a 0.41, y coeficientes de variación fenotípica entre 14.31 y 52.41 %, lo que evidencia mayor influencia ambiental en su expresión. Esto coincide con lo reportado en diámetro de tallos, longitud de entrenudos y número de entrenudos que muestran heredabilidades bajas, lo que indica que la expresión fenotípica de dichas características está altamente influenciada por factores mayormente ambientales y relacionados al manejo agronómico (Tolera *et al.*, 2023; Amador-Sacoto *et al.*, 2025).

La selección en caña de azúcar para reducir médula y oquedad busca mejorar la calidad industrial, aumentar la densidad y evitar pérdidas de sacarosa. Se basa en seleccionar genotipos con menor varianza ambiental y mayor varianza genética aditiva, maximizando la ganancia genética mediante índices de selección que combinan alto rendimiento (Senties-Herrera *et al.*, 2017). En este estudio, las variables médula y oquedad en los tallos molederos presentaron heredabilidades moderadas (0.57 y 0.51) y coeficientes de variación genotípica de 39.95 y 30.94 %, respectivamente. En ambos caracteres, la varianza genotípica fue similar a la ambiental ( $\sigma^2_g = 0.30$  y  $0.22$ ;  $\sigma^2_e = 0.23$  y  $0.21$ ), y el coeficiente de variación fenotípica superó al genotípico, lo que indica influencia conjunta de factores genéticos y ambientales. Sin embargo, el avance genético relativo fue alto para médula (62.17 %) y oquedad (45.51 %), lo que sugiere que estos caracteres pueden responder a la selección, aunque con posible efecto de la interacción genotipo  $\times$  ambiente. Deren (1992), al evaluar 24 clones en tres localidades, reportó para médula heredabilidades de 0.63 en parcela y 0.88 en medias de genotipo, y valores de hasta 0.92 para caracteres como diámetro, °Brix y

peso de tallo, lo que confirma fuerte control genético, pero con interacción genotipo × ambiente en algunos clones. De manera complementaria, Mendoza *et al.* (2010) indicaron que el corcho y el ahuecamiento del

tallo dependen de la variedad y del ambiente, y se asocian con menor peso y contenido de jugo, afectando la calidad de la caña.

**Tabla 2. Variabilidad, heredabilidad y avance genético en 12 atributos productivos de 20 nuevas variedades de caña de azúcar en fase Prueba Semicomercial (ciclo soca) y cuatro variedades comerciales, en Amatlán de los Reyes, Veracruz, México.**

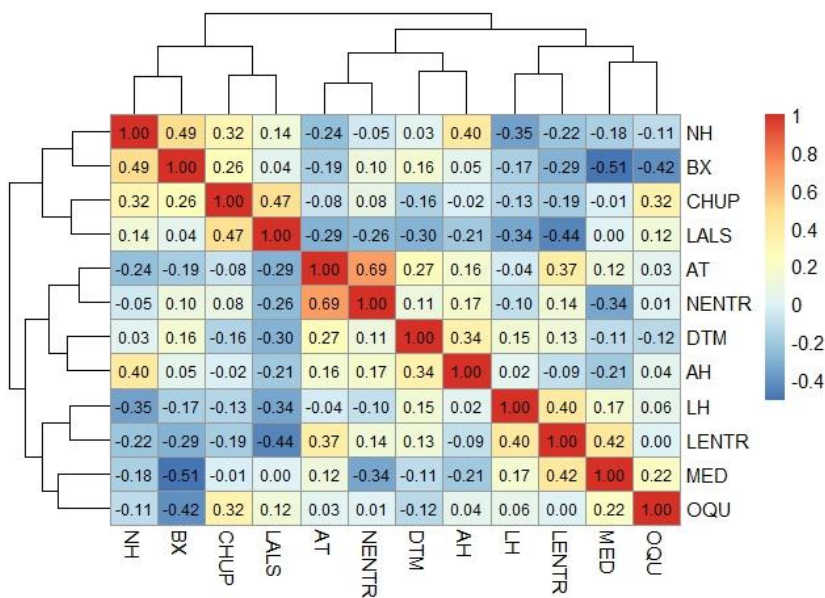
Atributos productivos	Parámetros genéticos								
	$\sigma^2_e$	$\sigma^2_g$	$\sigma^2_p$	ECV (%)	GCV (%)	PCV (%)	H <sup>2</sup>	GA	GAM (%)
Altura de tallos molederos (cm)	309.15	623.47	932.63	6.87	9.75	11.93	0.67	42.05	16.43
Diámetro de tallos molederos (mm)	16.24	9.2	25.45	13.78	10.38	17.25	0.36	3.76	12.85
Longitud de hojas (cm)	197.43	233.22	430.65	9.69	10.53	14.31	0.54	23.15	15.96
Ancho de hojas (cm)	8.8	0.21	9.01	51.79	8.01	52.41	0.02	0.14	2.52
Longitud de entrenudos (cm)	4.95	5.43	10.39	15.78	16.52	22.84	0.52	3.47	24.62
Número de entrenudos	7.51	3.84	11.35	14.24	10.19	17.51	0.34	2.35	12.21
Número de hojas	2.25	1.59	3.84	14.3	12.02	18.68	0.41	1.67	15.94
Número de brotes de agua tardíos	1.58	5.43	7.02	24.56	45.48	51.69	0.77	4.23	82.44
Sólidos solubles totales (°Brix)	0.96	2.86	3.81	4.7	8.14	9.4	0.75	3.01	14.51
Número de brotes laterales aéreos	1.41	13.98	15.4	30.11	94.72	99.39	0.91	7.34	185.96
Médula de tallos (%)	0.23	0.3	0.53	34.67	39.95	52.9	0.57	0.85	62.17
Oquedad de tallos (%)	0.21	0.22	0.43	30.34	30.94	43.34	0.51	0.69	45.51

Nota:  $\sigma^2_e$ : Varianza ambiental;  $\sigma^2_g$ : Varianza genotípica;  $\sigma^2_p$ : Varianza fenotípica; ECV: Coeficiente de variación ambiental; GCV: Coeficiente de variación genotípica; PCV: Coeficiente de variación fenotípica, H<sup>2</sup>: Heredabilidad en sentido amplio; GA: Avance genético en las unidades originales del atributo; GAM: Avance genético relativo como porcentaje de la media.

**Correlaciones de Pearson de atributos productivos**

El análisis de correlación de Pearson mostró correlaciones bajas, moderadas y fuertes entre los atributos productivos (Figura 4). Se registró una correlación positiva fuerte entre altura de tallo y

número de entrenudos (r = 0.69); en concordancia con lo reportado por Chaudhary y Joshi (2005), Alemu *et al.* (2018) y Khonghintaisong *et al.* (2023), quienes describieron fuertes correlaciones positivas entre descriptores del rendimiento de caña de azúcar, entre ellos altura de planta y número de entrenudos.



**Figura 4. Correlaciones de Pearson entre 12 atributos productivos de 20 nuevas variedades de caña de azúcar en fase Prueba Semicomercial (ciclo soca) y de cuatro variedades comerciales, en Amatlán de los Reyes, Veracruz, México. AT: altura de tallos molederos, DTM: diámetro de tallos molederos, LH: longitud de hojas, AH: ancho de hojas, LENTR: longitud de entrenudos, NENTR: número de entrenudos por tallo moldeador, NH: número de hojas, CHUP: número de brotes de agua tardíos, BX: sólidos solubles totales (°Brix) en los jugos de tallos molederos, LALS: número de brotes laterales aéreos, MED: médula de tallos y OQU: oquedad de tallos.**

Asimismo, se registraron correlaciones positivas moderadas entre sólidos solubles totales y número de hojas ( $r = 0.49$ ), entre brotes laterales aéreos y brotes de agua tardíos ( $r = 0.47$ ), y entre médula y oquedad ( $r = 0.42$ ) (Figura 4). Si bien en la investigación aquí presentada, la relación entre médula y oquedad fue moderada, otros autores refieren valores de correlación más altos (0.86 - 0.87), considerados características discriminatorias en los programas de selección después de los sólidos solubles totales, lo que destaca la variabilidad entre genotipos y ambientes (Chaudhary y Joshi, 2005; Alemu *et al.*, 2018; Khonghintaosong *et al.*, 2023; Tamilchelvan *et al.*, 2025). Además, la longitud de entrenudos mostró una correlación positiva débil con la altura de tallos ( $r = 0.37$ ), lo cual refleja que el alargamiento de los entrenudos contribuye ligeramente al incremento en la altura del tallo.

También, en este estudio se registraron correlaciones negativas entre °Brix y médula ( $r = -0.51$ ), así como entre °Brix y oquedad de tallo ( $r = -0.42$ ), evidenciando que la presencia de tejido acorchado está asociada con una baja producción de azúcares (Mendoza *et al.*, 2010). La mayoría de las correlaciones entre las variables fueron bajas ( $r < |0.3|$ ), lo que sugiere que estas variables son en su mayoría independientes entre sí (Figura 4).

#### **Análisis de componentes principales (PCA)**

El análisis de componentes principales permitió visualizar la distribución de las 24 variedades de caña de azúcar en función de 11 características agronómicas y un atributo de calidad agroindustrial, explicando los dos primeros componentes el 42.5 % de la varianza total (Figura 5). El CP1 (23.4 %) presentó contribuciones positivas del número de hojas (0.37), los sólidos solubles totales (0.36), los brotes laterales aéreos (0.36) y los brotes de agua tardíos (0.29), en tanto que la longitud de entrenudos (-0.44), la altura de tallos (-0.32), la longitud de hojas (-0.32) y la médula de tallos (-0.28) mostraron contribuciones negativas, indicando un contraste entre genotipos asociados con mayor acumulación de azúcares y formación de brotes y aquellos con mayor desarrollo estructural del tallo. El CP2 (19.1 %) mostró contribuciones positivas del número de entrenudos

(0.41), el diámetro de tallos (0.37), el ancho de hojas (0.37), los sólidos solubles totales (0.33) y la altura de tallos (0.30), mientras contribuciones negativas se encontraron en la médula de tallos (-0.37), los brotes laterales aéreos (-0.31) y la oquedad de tallos (-0.26), diferenciando genotipos con mayor vigor estructural de aquellos con mayor deterioro interno del tallo (Figura 5).

En la región del biplot asociada con valores positivos de CP1 y CP2, donde los sólidos solubles totales mostraron contribuciones positivas (0.36 y 0.33, respectivamente) se ubicaron las variedades Mex 09-95, Mex 09-132, Mex 09-208, Mex 09-289, Mex 09-290, Mex 09-333, Mex 79-431 y CP 72-2086, indicando asociación con mayor contenido de azúcares. En contraste, hacia valores negativos de CP1, donde la longitud de entrenudos (-0.44) y la altura de tallos (-0.32) presentaron contribuciones negativas, se localizaron genotipos como Mex 09-29, Mex 09-348, Mex 05-204 y Mex 09-312, relacionados con menores valores de sólidos solubles totales.

La variedad Mex 09-29 se situó en el cuadrante correspondiente a tejido corchoso interno en el tallo moledeador (médula); en cambio, Mex 09-95, Mex 09-132, Mex 09-208, Mex 09-289, Mex 09-290, Mex 09-333, Mex 79-431 y CP 72-2086 quedaron agrupadas con tallo sólido y alto contenido de azúcar. En la región del gráfico correspondiente a oquedad en el tallo moledeador, la variedad Mex 09-212 mostró un bajo porcentaje de ahuecamiento, mientras que, Mex 79-431 y Mex 09-289 fueron las únicas que no presentaron deterioro interno en el tallo (Figura 5). Tanto médula como oquedad son rasgos no deseables, ya que reducen el contenido de azúcar y disminuyen el rendimiento en la medida que estas avanzan en el interior del tallo. Por tanto, las variedades que presenten porcentajes altos en ambos parámetros deben descartarse, ya que el rendimiento puede reducir significativamente tanto en azúcar como en peso y calidad de jugo (Gravois *et al.*, 1990).

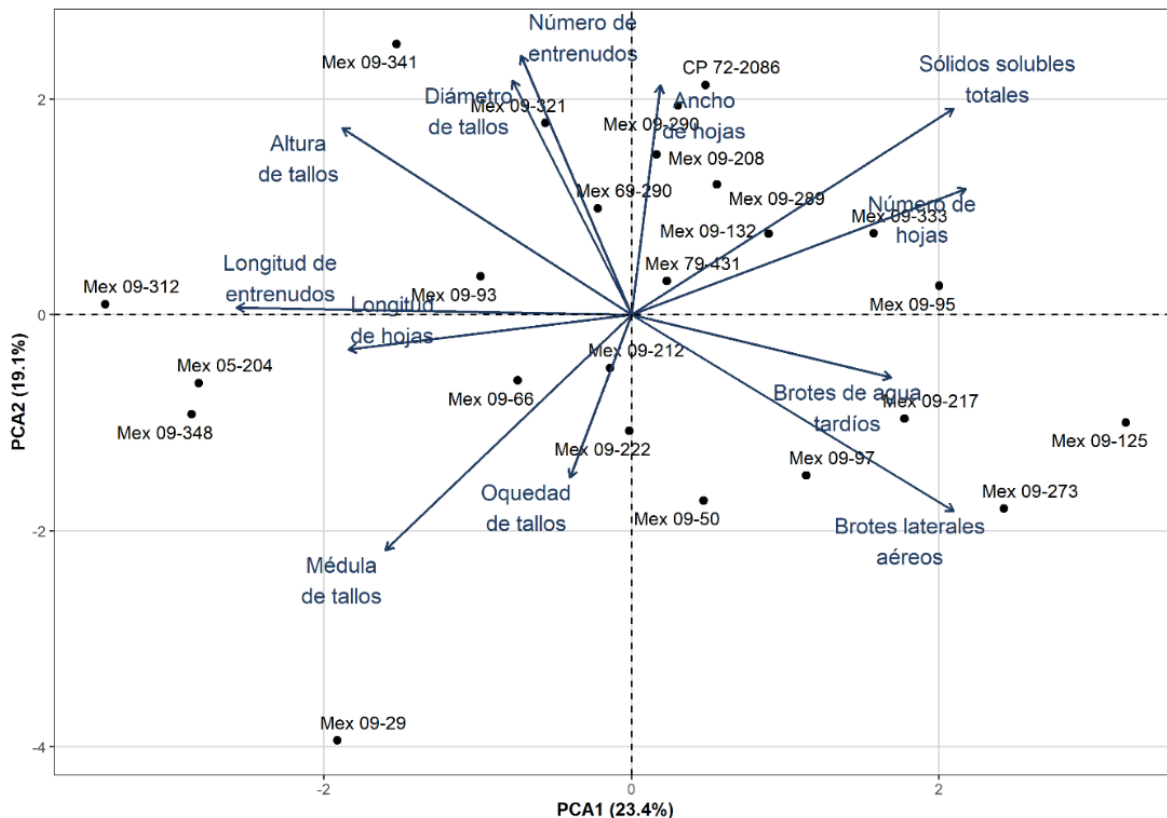
Por otra parte, las variedades Mex 09-50, Mex 09-97, Mex 09-222, Mex 09-273, Mex 09-217 y Mex 09-125 presentaron altos índices de brotes laterales aéreos y brotes de agua tardíos o chupones (Figura 5). Este hallazgo coincide con lo reportado por Ramírez-

Madero *et al.* (2023), quienes informaron que la variedad Mex 09-222 presenta mayor número de brotes laterales. La presencia de brotes laterales aéreos en exceso con heredabilidad alta (0.91) y coeficiente de variación genotípica de 94.72 %, se considera bajo fuerte control genético, por lo que se recomienda descartar estas variedades del proceso de selección, ya que es una característica no deseable para la producción.

En valores negativos de CP2, donde la médula ( $-0.37$ ) y la oquedad ( $-0.26$ ) mostraron contribuciones negativas, se ubicaron genotipos como Mex 09-29 y Mex 09-212, asociados con mayor deterioro interno del tallo. En contraste, hacia valores positivos de CP1 y CP2 se localizaron variedades como Mex 09-289, Mex 09-290, Mex 09-208, Mex 79-431 y CP 72-2086, relacionadas con tallos más sólidos y mayor contenido de azúcares. La presencia de médula y oquedad se considera un rasgo no deseable, ya que puede reducir el contenido de azúcar y afectar el rendimiento agroindustrial, debido a que la estructura interna del tallo influye en la eficiencia de extracción y en la calidad del jugo (Khanna *et al.*, 1955; Aitken *et al.*,

2019). Por otra parte, las variedades Mex 09-50, Mex 09-97, Mex 09-222, Mex 09-273, Mex 09-217 y Mex 09-125 se ubicaron en la región asociada con valores altos de brotes laterales aéreos y brotes de agua tardíos, características consideradas indeseables por su relación con menor eficiencia productiva y mayor gasto de reservas. Resultados similares fueron reportados por Ramírez-Madero *et al.* (2023), quienes indicaron que la presencia de brotes laterales constituye un carácter desfavorable en la selección de variedades debido a su efecto negativo sobre el rendimiento y la uniformidad del cultivo.

En el eje relacionado con longitud de hojas, las variedades Mex 05-204 y Mex 09-348 destacaron por presentar hojas más largas, y Mex 09-95 se ubicó en la zona con hojas más cortas. Las variedades Mex 09-321, Mex 79-431 y Mex 69-290 se posicionaron en la zona con medias más altas en abundancia de entrenudos. En cambio, Mex 09-97 ocupó la región con menor cantidad. Finalmente, Mex 09-341 y Mex 69-290 se situaron en el cuadrante con mayor diámetro de tallos molederos, en contraste con Mex 09-97 y Mex 09-50, que tuvieron los valores más bajos (Figura 5).



**Figura 5. Análisis de componentes principales (PCA) de 20 variedades nuevas de caña de azúcar en fase Prueba Semicomercial (ciclo soca) y cuatro variedades comerciales, con 12 atributos productivos evaluados,**

**establecidas en Amatlán de los Reyes, Veracruz, México. Los puntos representan las variedades y las flechas los atributos productivos evaluados. El porcentaje de varianza explicada por cada componente principal se indica en los ejes.**

En relación con los atributos de crecimiento, las variedades Mex 05-204 y Mex 09-348 se asociaron con mayor longitud de hojas. En tanto, Mex 09-95 se ubicó hacia valores menores de esta variable. Por su parte, Mex 09-321, Mex 79-431 y Mex 69-290 se relacionaron con mayor número de entrenudos, en contraste con Mex 09-97, que se ubicó hacia valores bajos. Finalmente, Mex 09-341 y Mex 69-290 se asociaron con mayor diámetro de tallos molederos, reflejando diferencias en el vigor estructural entre genotipos (Figura 5). Al evaluar 22 genotipos de caña de azúcar, Alemu *et al.* (2022) observaron que el primer componente principal explicó 43.12 % de la variación total y el segundo 18.8 %, acumulando más del 60 % de la variabilidad. En dicho estudio, los caracteres de calidad del jugo presentaron las mayores cargas en el primer componente principal, destacando porcentaje de recuperación de azúcar (0.413), porcentaje de sacarosa (0.402), pureza (0.351) y sólidos solubles totales (0.351), valores superiores a los observados en otros caracteres y determinantes en la diferenciación de los genotipos. De manera similar, en el presente estudio los sólidos solubles totales (0.36), el número de hojas (0.37) y los brotes laterales aéreos (0.36) mostraron altas contribuciones en CP1, confirmando que los caracteres relacionados con calidad y rendimiento son los principales responsables de la variación entre variedades. Estos resultados concuerdan con lo señalado por Ramírez-Madero *et al.* (2023), quienes destacaron la utilidad del análisis multivariado para identificar materiales promisorios y descartar genotipos con características indeseables en programas de mejoramiento, mientras que Khanna *et al.* (1955) demostraron que la estructura interna del tallo, particularmente la presencia de médula y oquedad, influye directamente en la eficiencia de extracción y en la calidad del jugo, lo cual coincide con la asociación observada en valores negativos de CP2 en el presente estudio.

### Análisis de clúster

#### Estabilidad de los agrupamientos

Se generaron seis clústeres con coeficientes de estabilidad de Jaccard entre 0.6145 y 0.7881, lo que indica categorías de estabilidad de moderada a moderada-alta (Tabla 3). El clúster rojo incluyó únicamente a la variedad Mex 09-29; el clúster azul

agrupó a las variedades Mex 09-348, Mex 09-312 y la variedad comercial Mex 05-204; el clúster verde agrupó a las variedades Mex 09-208, Mex 09-321, Mex 09-341 y Mex 09-93; el clúster morado se conformó por las variedades CP 72-2086, Mex 69-290, Mex 79-431, Mex 09-290, Mex 09-289 y Mex 09-333; el clúster naranja se integró con las variedades Mex 09-125 y Mex 09-273; y el clúster café agrupó a las variedades Mex 09-132, Mex 09-95, Mex 09-217, Mex 09-97, Mex 09-212, Mex 09-66, Mex 09-222 y Mex 09-50. Las agrupaciones identificadas son consistentes y representan estructuras confiables para la diferenciación de las variedades de caña evaluadas.

**Tabla 3. Estabilidad de clústeres para 12 atributos productivos en 20 variedades de caña de azúcar en fase Prueba Semicomercial (ciclo soca) y cuatro variedades comerciales, en Amatlán de los Reyes, Veracruz, México.**

Clúster	Coefficiente de Jaccard	Categoría de estabilidad
1 (rojo)	0.7881	Moderada a alta
2 (azul)	0.6827	Moderada
3 (verde)	0.6243	Moderada
4 (morado)	0.6635	Moderada
5 (naranja)	0.6145	Moderada
6 (café)	0.7055	Moderada

#### Índice de distancias entre clústeres

El agrupamiento, basado en distancia de Gower, reveló mayor eficiencia en la separación de seis clústeres, cuando se utilizaron variables cuantitativas de diferentes unidades por cada variable. La matriz de distancias entre clústeres mostró que el clúster rojo presentó una distancia moderada respecto a los clústeres verde (0.6125), morado (0.6284) y naranja (0.6702) (Tabla 4). El clúster morado, presentó distancias más bajas frente a los clústeres café (0.2681) y verde (0.2842), lo que indica mayor similitud. Por otra parte, solo los genotipos dentro del clúster azul con naranja quedan en un punto intermedio de distancia con 0.5592. Un estudio similar en caña de azúcar utilizó los índices de Silhouette, Dunn y de conectividad para validar la agrupación de 39

variedades de caña de azúcar con base en curvas de madurez, encontrando valores de 0.55, 0.12 y 0.55, respectivamente, considerados como indicadores de separación moderada (Carretillo-Moctezuma *et al.*, 2025). Por lo anterior, los resultados del presente

estudio demuestran que las distancias entre clústeres son suficientes para discriminar grupos diferenciados de variedades, aunque con grados variables de proximidad entre ellos.

**Tabla 4. Matriz de distancias entre clústeres de 20 nuevas variedades de caña de azúcar en fase Prueba Semicomercial (ciclo soca) y cuatro variedades comerciales, con base en 12 atributos productivos, estimadas mediante distancia de Gower para variables mixtas.**

Clúster	Rojo	Café	Azul	Verde	Naranja	Morado
<b>Rojo</b>	0.0000	0.4822	0.4029	0.6125	0.6702	0.6284
<b>Café</b>	0.4822	0.0000	0.4202	0.2861	0.3241	0.2681
<b>Azul</b>	0.4029	0.4202	0.0000	0.3134	0.5592	0.4515
<b>Verde</b>	0.6125	0.2861	0.3134	0.0000	0.4649	0.2842
<b>Naranja</b>	0.6702	0.3241	0.5592	0.4649	0.0000	0.4138
<b>Morado</b>	0.6284	0.2681	0.4515	0.2842	0.4138	0.0000

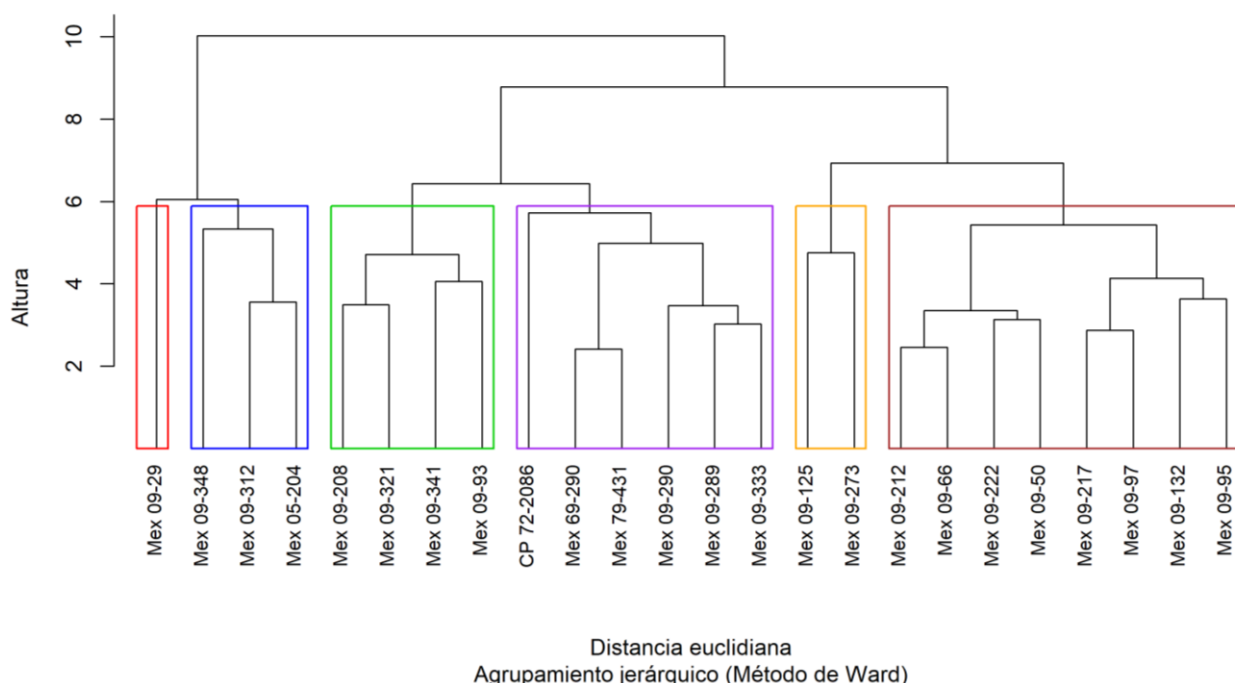
Los clústeres verdes, café y morado presentan la mayor similitud entre sí, en tanto que los clústeres rojo y naranja se encuentran más alejados del resto. Por su parte, el clúster azul ocupó una posición intermedia respecto a todos los grupos (Figura 6).

El dendrograma permitió clasificar 24 variedades de caña de azúcar en función de 12 atributos productivos, en seis clústeres diferenciados, lo cual muestra la heterogeneidad genética y agronómica de los genotipos.

En la comparación de los atributos productivos entre los clústeres, el ANOVA permitió determinar diferencias significativas en cada variable, y la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ) indicó qué clústeres difirieron entre sí (Tabla 5). Este análisis refuerza el potencial de

por lo menos una decena de nuevas variedades para las condiciones de producción de la zona de influencia del Campus Córdoba del Colegio de Postgraduados.

El clúster rojo incluyó únicamente a la variedad Mex 09-29, la cual se caracteriza por tener longitud de hojas de 167.37 cm, longitud de entrenudos de 16.18 cm, ancho de hojas de 4.02 cm y 19.25 °Brix. No obstante, presentó un elevado porcentaje de médula en los tallos, es decir, tejido corchoso en el interior y oquedad en el tercio inferior, en comparación con el resto de las variedades. Debido a la presencia de los rasgos no deseables, asociados a una disminución en la calidad y producción de sacarosa (IMPA, 1983; Brasileiro *et al.*, 2016), se recomienda descartar esta variedad en la selección.



**Figura 6.** Dendrograma de clasificación de 20 variedades de caña de azúcar en fase Prueba Semicomercial (ciclo soca) y cuatro variedades comerciales, construido a partir de 12 atributos productivos mediante distancia euclidiana y el método de Ward, evaluadas en Amatlán de los Reyes, Veracruz, México.

**Tabla 5.** Comparación de medias para 12 atributos productivos de seis clústers generado a partir de 20 variedades de caña de azúcar en fase Prueba Semicomercial (ciclo soca) y cuatro variedades comerciales, en Amatlán de los Reyes, Veracruz, México.

Atributos productivos	Clúster					
	Rojo	Azul	Verde	Morado	Naranja	Café
Altura de tallos moledero s(cm)	220.62 c	291.04 a	272.16 a	253.33 b	244.37 bc	246.12 bc
Diámetro de tallos molederos (mm)	25.45 b	29.62 ab	31.59 a	31.57 a	28.47 ab	26.83 b
Longitud de hoja (cm)	167.37 a	158.75 a	132.33 cd	150.67 ab	125.06 d	141.88 bc
Ancho de hoja (cm)	4.02 a	5.81 a	5.97 a	6.33 a	6.02 a	5.21 a
Número de hojas	9.00 cd	8.91 d	10.75 bc	11.30 ab	12.43 a	9.98 cd
Longitud de entrenudos (cm)	16.18 ab	16.97 a	16.43 a	13.74 bc	11.68 c	12.82 c
Número de entrenudos	14.25 c	20.25 ab	21.08 a	19.50 ab	17.75 bc	18.95 b
Número de brotes de agua tardíos	2.37 c	3.62 c	5.62 b	4.46 bc	9.18 a	5.40 b
Sólidos solubles totales (°Brix)	19.25 cd	18.00 d	21.33 ab	21.94 a	20.75 bc	20.76 bc
Número de brotes laterales aéreos	3.12 c	2.04 c	1.91 c	1.21 c	13.43 a	5.54 b
Médula de tallos (%)	2.87 a	2.04 b	1.20 c	1.10 c	1.75 b	1.14 c
Oquedad de tallos (%)	2.00 a	1.79 a	1.75 a	1.16 b	1.75 a	1.51 a

Letras diferentes por fila indica diferencia estadística significativa entre variables respuesta por clúster (Tukey,  $P \leq 0.05$ ).

El clúster azul agrupa a las variedades Mex 09-348, Mex 09-312 y la variedad comercial Mex 05-204, las cuales se distinguen por presentar, en general, altura promedio de 291.04 cm, superando a las variedades comerciales Mex 69-290, Mex 79-431 y CP 72-2086, que alcanzaron en promedio 253.33 cm. Además, el grupo mostro diámetro de tallos molederos de 29.62

mm, considerado como mediano, longitud de hojas de 158.75 cm, ancho de hojas de 5.81 cm, longitud de entrenudos de 16.97 cm, y un promedio de 20 entrenudos por tallo moledero. Asimismo, se caracterizó por tener poca presencia de médula y oquedad en el interior de los tallos.

El clúster verde agrupó a las variedades Mex 09-208, Mex 09-321, Mex 09-341 y Mex 09-93, que alcanzaron una altura promedio de 272.16 cm, diámetro del tallo promedio de 31.59 mm, clasificado como grueso, un ancho foliar de 5.97 cm, longitud de entrenudos de 16.43 cm y un promedio de 21 entrenudos por tallo. Asimismo, registraron valores de 21.33 °Brix y baja presencia de brotes laterales aéreos. Los resultados obtenidos coinciden con lo reportado por Ramírez-Madero *et al.* (2023), en ciclo productivo plantilla, donde las variedades Mex 09-93 y Mex 09-341 alcanzaron 311.85 cm y 318.09 cm, respectivamente. Los cuatro cultivares superaron los 300 cm de altura, y presentaron elevado número de entrenudos y buena densidad poblacional, atributos que pueden emplearse como criterios de identificación varietal (Windiyani *et al.*, 2022).

El clúster morado está conformado por las variedades CP 72-2086, Mex 69-290, Mex 79-431, Mex 09-290, Mex 09-289 y Mex 09-333. Se caracteriza por presentar un ancho foliar promedio de 6.33 cm, aproximadamente 11 hojas por tallo moletero, un promedio de 19 entrenudos por tallo, concentración en los jugos de 21.94 °Brix, diámetros de tallos clasificados como gruesos de 31.57 mm y longitud foliar de hasta 150.67 cm. Además, se distingue por la presencia de tallos completamente sólidos. Estos resultados coinciden con lo señalado por Windiyani *et al.* (2022), quienes al evaluar 15 cultivares y 37 rasgos morfológicos, reportaron tallos de diámetros medianos y gruesos de 25 a 30 mm, sin evidencia de tejido corchoso en su interior.

El clúster naranja se integró con las variedades Mex 09-125 y Mex 09-273, caracterizadas por mostrar ancho foliar promedio de 6.02 cm y presencia de aproximadamente 12 hojas por tallo moletero. Se agruparon variedades con desarrollo excesivo de brotes de agua tardíos por cepa, los cuales se distinguen por formar tallos gruesos, suculentos y con bajo contenido de sacarosa. Asimismo, se observó deterioro interno en los tallos, manifestado como un orificio longitudinal en el tercio inferior del tallo moletero, semejante a un ahuecamiento, acompañado de una alta incidencia de brotes laterales aéreos. Debido a dichos rasgos no deseables, se recomienda descartar estas variedades en el programa de selección, ya que la presencia de oquedad, abundantes brotes aéreos y brotes de agua tardíos puede reducir la producción hasta en un 40 % (IMPA, 1983; UPOV, 2005).

Finalmente, el clúster café agrupó a las variedades Mex 09-132, Mex 09-95, Mex 09-217, Mex 09-97, Mex 09-212, Mex 09-66, Mex 09-222 y Mex 09-50,

caracterizadas por un ancho foliar promedio de 5.21 cm. Se observó la presencia de oquedad, manifestada como un orificio longitudinal ligero en el tercio inferior del tallo moletero, semejante a un ahuecamiento. No obstante, de manera general presentaron cañas sólidas y ricas en azúcar, con valores de hasta 20.76 °Brix. Sin embargo, la presencia de brotes laterales abundantes aéreos por tallo moletero representa un rasgo desfavorable, ya que ocasiona pérdidas tanto en campo como en fábrica.

La selección de variedades de caña de azúcar es un proceso que toma aproximadamente 15 años, desde la siembra de la semilla hasta la liberación de unas pocas variedades que pueden incluirse en catálogos comerciales (Sentíes-Herrera *et al.*, 2016; 2017). Para la selección de nuevas variedades, algunos de los criterios más sobresalientes son peso y diámetro de tallos, número de tallos y sólidos solubles totales (Yang *et al.*, 2021), lo cual fue corroborado en esta investigación. Además, el rendimiento de caña y de azúcar, población, altura de tallos, número de entrenudos, porcentajes de sacarosa, de pureza y de recuperación de azúcar constituyen parámetros determinantes en la selección de variedades de caña de azúcar (Abu-Ellail *et al.*, 2020), mismos que fueron considerados en este trabajo.

Para lograr mayores rendimientos, en la mayoría de los casos es necesario aumentar los valores de atributos determinantes como número y grosor de tallos moleteros, aunque otros atributos deben reducirse, pues su aumento puede menguar la productividad. Por ejemplo, los brotes de agua tardíos son tallos gruesos, suculentos y pobres en sacarosa, razón por la cual no son deseables en la producción; en particular cuando la cosecha es mecanizada, estos brotes pueden llegar a medir más de un metro y complicar la cosecha. Además, los brotes laterales aéreos son yemas que emergen en la parte lateral del tallo y cuya abundancia ocasionan deterioro interno en los tallos, pues aparecen después de que la caña florece o se acama, ya que en esos momentos se pierde la dominancia apical, que normalmente está controlada por las auxinas o influenciada por su genética. Otro atributo no deseable es la presencia de médula, un indicativo de deterioro interno de los tallos moleteros, manifestado como acorchamiento o tejido sin azúcares. La oquedad se refiere a la presencia de un orificio longitudinal en el tallo, similar a un ahuecamiento, atributo que tampoco es deseable. Tanto médula como oquedad están influenciadas por factores ambientales, genéticos y de manejo agronómico, especialmente la fertilización. Cuando estos caracteres ocurren en niveles elevados se consideran discriminatorios en los procesos de selección de nuevas variedades de caña de azúcar

(IMPA, 1983; Senties-Herrera *et al.*, 2017). Todos estos criterios fueron considerados en esta investigación.

La caña de azúcar requiere avanzar hacia prácticas de agricultura más sostenibles. Este cultivo destaca por su alta capacidad y eficiencia fotosintética, lo que genera altos rendimientos en producción de biomasa. Sin embargo, los actuales sistemas de producción también han sido muy criticados por la contaminación que generan en agua, aire, suelo y biota, debido a la aplicación desmedida de agroquímicos y la quema, así como la perpetuación de la pobreza entre los pequeños agricultores en algunas regiones, a consecuencia de estructuras de precios desfavorables. Para lograr transitar hacia una cadena de valor más competitiva, generadora de valor local, resiliente, innovadora y sostenible, es necesario impulsar diversas estrategias tanto a nivel tecnológico en campo y fábrica, como a nivel financiero y organizacional. La base para este avance es contar con un acervo de nuevas variedades capaces de producir mayores rendimientos en condiciones restrictivas de cultivo; este trabajo está aportando a tal avance. Es así que la generación de nuevas variedades de caña de azúcar puede contribuir a la sostenibilidad agrícola, al aportar materiales novedosos con mejores capacidades para resistir embates tanto de tipo biótico como abiótico. Además, las nuevas variedades ofrecen posibilidades de diversificación de la cadena de valor, al aportar insumos para la producción de bioetanol, biogás comprimido, bioplásticos, y compuestos químicos de alto valor en diversas industrias, lo que representa una ventana de oportunidades para el presente y futuro del cultivo y de la agroindustria en su conjunto.

## CONCLUSIÓN

La altura de los tallos molederos, contenido de sólidos solubles totales, y presencia de brotes de agua tardíos y brotes laterales aéreos, mostraron un alto control genético en las 24 variedades evaluadas, lo que indica que estos rasgos deben considerarse prioritarios en los programas de mejoramiento genético. Con base en su desempeño productivo, se recomienda avanzar a la fase final de selección con las variedades Mex 09-66, Mex 09-93, Mex 09-132, Mex 09-208, Mex 09-212, Mex 09-289, Mex 09-290, Mex 09-312, Mex 09-321, Mex 09-333 y Mex 09-341, que destacaron por presentar tallos de mayor diámetro, altos contenidos de sólidos solubles totales y alturas superiores a las de las variedades mayormente sembradas a nivel nacional en México.

Es fundamental descartar desde etapas tempranas aquellos rasgos no deseables con altas heredabilidades

que incrementan costos y reducen el rendimiento, como son la presencia excesiva de brotes laterales aéreos, médula, oquedad y brotes de agua tardíos. En este sentido, los clústeres rojo, naranja y café agrupan variedades con rasgos desfavorables para la producción de sacarosa; por tanto, se recomienda descartar del programa de mejoramiento a las variedades Mex 09-29 y Mex 09-348, que presentan deterioro interno del tallo, como médula y oquedad. Asimismo, las variedades Mex 09-50, Mex 09-95, Mex 09-97, Mex 09-125, Mex 09-222, Mex 09-273 y Mex 09-217, caracterizadas por un exceso de brotes laterales por tallo moledero con predominancia genética, también deben ser excluidas del proceso de selección. Si bien las variedades comerciales CP 72-2086, Mex 69-290 y Mex 79-431, que actualmente ocupan el 68 % de la superficie nacional sembrada, conservan sus características productivas, como alto contenido de sólidos solubles totales y tallos sólidos, su selección data de hace más de 50 años, lo que puede estar generando procesos de degradación quizás aún no visibles. Por esta razón, la generación de nuevas variedades, como las aquí reportadas aportan un nuevo acervo genético para hacer frente a los actuales retos de la agricultura para producir más alimentos e insumos bioenergéticos, frente a escenarios amenazados por el cambio climático. Estos nuevos materiales genéticos pueden aportar tanto a la diversificación productiva como a la sostenibilidad agrícola.

## Agradecimientos

Agradecemos al Colegio de Postgraduados Campus Veracruz, por la oportunidad de realizar los estudios de posgrado, y al Colegio de Postgraduados Campus Córdoba por dar las facilidades para realizar el estudio experimental.

**Funding:** J. Lavin-Castañeda thanks the Secretariat of Science, Humanities, Technology and Innovation (SECIHTI) of Mexico for the scholarship awarded to pursue doctoral studies in science (CVU 932230).

**Conflict of interest:** The authors declare no conflict of interest.

**Compliance with ethical standards:** The authors have no declaration in this regard as they do not apply.

**Data availability:** Data is available upon request to the corresponding author.

**Author contribution statement (CRediT).** **J. Lavin-Castañeda** – Investigation, data analysis, writing original draft, writing review and editing. **A. Pérez-Vázquez** – Supervision, methodology, funding

acquisition, writing – original draft, review and editing. **J. López-Collado** – Visualization., data analysis and editing. **G. López-Romero** – Methodology, visualization, review and editing. **L.I. Trejo-Téllez** – Methodology, data curation, visualization, funding acquisition, writing – original draft, review and editing. **F.C. Gómez-Merino** – Conceptualization, visualization, validation, supervision, formal analysis, funding acquisition, project management, writing – original draft, review and editing.

## REFERENCES

- Abu-Ellail, F.F.B., Gadallah, A.F.I. and El-Gamal, I.S.H., 2020. Genetic variance and performance of five sugarcane varieties for physiological, yield and quality traits influenced by various harvest age. *Journal of Plant Production*, 11(5), pp. 429-438. <https://doi.org/10.21608/jpp.2020.102763>
- Aguado-Santacruz, G.A., Arreola-Tostado, J.M., Aguirre-Mancilla, C. and García-Moya, E., 2024. Use of systemic biofertilizers in sugarcane results in highly reproducible increments in yield and quality of harvests. *Heliyon*, 10(7), pp. e28750. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e28750>
- Alemu, S., Fetene, T. and Tadesse, F., 2022. Morphological diversity and principal component analysis of sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) genotypes at Finchaa Sugar Estate, Ethiopia. *Ratarstvo i Povrtarstvo*, 59(1), pp. 9-15. <https://doi.org/10.5937/ratpov59-35862>
- Alemu, S., Mohammed, H. and Tadesse, F., 2018. Correlation of traits on sugarcane (*Saccharum* spp.) genotypes at Metahara Sugar Estate. *International Journal of Advanced Research in Biological Sciences*, 5(3), pp. 1-5. <http://dx.doi.org/10.22192/ijarbs.2018.05.03.001>
- Amador-Sacoto, C., Peralta-Gamboa, D., Alvarez-Muñoz, P. and Pacheco-Olea, F., 2025. Influence of harvest timing on sugarcane quality parameters in Ecuador: a multivariate analysis using PCA and MANOVA biplot. *Scientific Reports*, 15(1), pp. 17737. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-93393-8>
- Aitken, K.S., Giassop, D., Atkin, F.C., Parfitt, R.C., Drenth, J., Perroux, J.M. and Rae, A.L., 2019. How does stalk anatomy of sugarcane relate to fibre content and strength? Annual Conference of the Australian-Society-of-Sugar-Cane-Technologists (ASSCT). Congress of the International-Society-of-Sugar-Cane-Technologists - Plenary, Agricultural Engineering, Agronomy, Toowoomba, QLD Australia, 30 April-3 May 2019, pp. 832-837. <https://espace.library.uq.edu.au/view/UQ:cd28f2e> [Consultado el 16 de febrero de 2026].
- Banerjee, N., Khan, M.S., Swapna, M., Singh, R.K. and Kumar, S., 2020. Progress and prospects of association mapping in sugarcane (*Saccharum* species hybrid), a complex polyploid crop. *Sugar Tech*, 22(6), pp. 939-953. <https://doi.org/10.1007/s12355-020-00852-9>
- Braga, C.R., Zanon-Paludeto, J.G., Marchetti-Souza, B., Aguiar, A.V., Pollnow, M.F.M., Monnerat-Carvalho, A.G. and Vagner-Tambarussi, E., 2020. Genetic parameters and genotype × environment interaction in *Pinus taeda* clonal tests. *Forest Ecology and Management*, 474, pp. 118342. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118342>
- Brasileiro, B.P., Peternelli, L.A., da Silveira, L.C.I. and Barbosa, M.H.P., 2016. Importance of agronomic traits in the individual selection process of sugarcane as determined using logistic regression. *Acta Scientiarum Agronomy* 38(3), pp. 289-297. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v38i3.28424>
- Carrettillo-Moctezuma, C.D., Guzmán-Martínez, M., Godínez-Jaimes, F., García-Preciado, J.C., Reyes Carreto, R., Terrones Salgado, J. and Pérez Arriaga, E., 2025. Growth curve models and clustering techniques for studying new sugarcane hybrids. *AgriEngineering*, 7(4), pp. 114. <https://doi.org/10.3390/agriengineering7040114>
- Charmantier, A. and Garant, D., 2005. Environmental quality and evolutionary potential: Lessons from wild populations. *Proceedings of the Royal Society, Biological Sciences*, 272, pp. 1415-1425. <https://doi.org/10.1098/rspb.2005.3117>

- Chaudhary, R.R. and Joshi, B.K., 2005. Correlation and path coefficient analyses in sugarcane. *Nepal Agriculture Research Journal*, 6, pp. 28-34. <https://doi.org/10.3126/narj.v6i0.3340>
- CEMA (Compañía Editora del Manual Azucarero), 2024. Manual Azucarero Mexicano 2024. 58ª ed. Compañía Editora del Manual Azucarero, S.A. de C.V.: Ciudad de México. 417 p. <https://www.manualazucarero.com/> [Consultado el 20 de enero de 2026].
- CIRAD (Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement), 2023. Sugarcane roadmap summary. The road to sustainable sugarcane growing [2023-2033]. pp. 1-8. <https://www.cirad.fr/en/Media/espace-docutheque/docutheque/fichiers/the-road-to-sustainable-sugarcane-growing-2023-2033> [Consultado el 3 de marzo de 2025].
- Cruz-Sánchez, Y., Aguilar-Estrada, A., Baca-del Moral, J. and Monterroso-Rivas, A.I., 2024. The availability of food in Mexico: an approach to measuring food security. *Agriculture and Food Security*, 13, pp. 35. <https://doi.org/10.1186/s40066-024-00484-2>
- De la Torre-López, L., Cortés, M.E.T. and Espino, X.M., 2021. Desarrollo sustentable y aprovechamiento del residuo de la caña de azúcar. *Revista Multidisciplinaria de Avances de Investigación*, 7(1), pp. 12-26. <https://www.remai.ipn.mx/index.php/REMAI/article/view/79/75>
- Demey, J.R., Pla, L., Vicente-Villardón, J.L., Di Rienzo, J., and Casanoves, F., 2011. Medidas de distancia y similitud. Valoración y análisis de la diversidad funcional y su relación con los servicios ecosistémico. Serie Técnica. Informe Técnico (CATIE), 384, pp. 47-59. <https://nucleodiversus.org/wp-content/uploads/2021/03/Casanoves-et-al-2011-Serie-Tecnica-CATIE.pdf> [Consultado el 28 de febrero de 2025].
- Deren, C.W., 1992. Stability and heritability of pith in sugarcane and its influence on yield. *Plant Breeding*, 109(3), pp. 242-247. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0523.1992.tb00179.x>
- Duanmeesuk, U., Chutteang, C., Somta, P. and Chatwachirawong, P., 2021. Estimation of genetic parameters, heritability, genetic advance and heterosis in sugarcane families. *Thai Agricultural Research Journal*, 39(3), pp. 306-318. <https://doi.org/10.14456/thaidoa-agres.2021.25>
- Eggleston, G., Leal, M.R.L.V., Aita, G.M. and Sriroth, K., 2022. Diversification of sugar crops for value addition. *Sugar Tech*, 24(4), pp. 967-969. <https://doi.org/10.1007/s12355-022-01179-3>
- Estrada, F., Mendoza-Ponce, A., Calderón-Bustamante, O. and Botzen, W., 2022. Impacts and economic costs of climate change on Mexican agriculture. *Regional Environmental Change*, 22, pp. 126. <https://doi.org/10.1007/s10113-022-01986-0>
- Gower, J.C., 1971. A general coefficient of similarity and some of its properties. *Biometrics*, 27, pp. 857-874. <https://doi.org/10.2307/2528823>
- Gravois, K.A., Milligan, S.B. and Martin, F.A., 1990. The role of pith, tube, and stalk density in determining sugarcane sucrose content and stalk weight. *Theoretical and Applied Genetics*, 79(2), pp. 273-277. <https://doi.org/10.1007/BF00225963>
- Healey, A.L., Garsmeur, O., Lovell, J.T., Shengquiang, S., Sreedasyam, A., Jenkins, J., Plott, C.B., Piperidis, N., Pompidor, N., Llaca, V., Metcalfe, C.J., Doležel, J., Cápál, P., Carlson, J.W., Hoarau, J.Y., Hervouet, C., Zini, C., Dievart, A., Lipzen, A., Williams, M., Boston, L.B., Webber, J., Keymanesh, K., Tejomurthula, S., Rajasekar, S., Suchecki, R., Furtado, A., May, G., Parakkal, P., Simmons, B.A., Barry, K., Henry, R.J., Grimwood, J., Aitken, K.S., Schmutz, J. and D'Hont, A., 2024. The complex polyploid genome architecture of sugarcane. *Nature*, 628, pp. 804-810. <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07231-4>
- IMPA (Instituto para el Mejoramiento de la Producción Azucarera), 1983. Programa de variedades. Objetivos, Importancia y Metodología Experimental. Centro Nacional de Investigaciones Azucareras: México, D. F. 63 p.

- Johnson, H.W., Robinson, H.F. and Comstock, R.E., 1955. Estimates of genetic and environmental variability in soybeans. *Agronomy Journal*, 47(7), pp. 314-318. <https://doi.org/10.2134/agronj1955.00021962004700070009x>
- Khanna, K.L., Sharma, S.L. and Ramanathan, K.R., 1955. Studies in the anatomy of sugarcane stalk. *Proceedings: Plant Sciences*, 42 (5), pp. 195-208. <https://www.ias.ac.in/article/fulltext/secb/042/05/0195-0208>
- Khonghintaisong, J., Songsri, P. and Jongrunklang, N., 2023. Comparison of physiological, anatomical, and morphological traits between sugarcane hybrids and their parents with different stalk dry weights in the early growth stage under hydroponic conditions. *Agriculture*, 13, pp. 2234. <https://doi.org/10.3390/agriculture13122234>
- Lavin-Castañeda, J., Sentfies-Herrera, H.E., Trejo-Téllez, L.I., Bello-Bello, J.J., Hidalgo-Contreras, J.V. and Gómez-Merino, F.C., 2020. Advances in the selection program of sugarcane (*Saccharum* spp.) varieties in the Colegio de Postgraduados. *Agro Productividad*, 13(11), pp. 123-129. <https://doi.org/10.32854/agrop.v13i11.1776>
- Leite, E.A., da Silva, E.H.F.M., Fattori Jr., I.M. and Marin, F.R., 2026. Assessing climate change impacts on sugarcane yield, crop water productivity, and nitrous oxide emissions across Brazil's bioenergy using the CSM-SAMUCA-sugarcane model. *Agricultural Systems*, 231, pp. 104494. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2025.104494>
- Li, X., Chen, X., Fang, J., Feng, X., Zhang, X., Lin, H., Chen, W., Zhang, N., He, H., Huang, Z., Xue, X., Li, Y., Fan, L., Lai, R., Huo, Z., Cui, M., Deng, G., Zaid, C., Su, Y., Zhang, J., Cai, W. and Qi, Y., 2024. Whole-genome sequencing of a worldwide collection of sugarcane cultivars (*Saccharum* spp.) reveals the genetic basis of cultivar improvement. *The Plant Journal*, 119 (5), pp. 2151-2167. <https://doi.org/10.1111/tpj.16861>
- Liu, P., Yuan, H., Ning, Y., Chakraborty, B., Liu, N. and Peres, M.A., 2024. A modified and weighted Gower distance-based clustering analysis for mixed type data: a simulation and empirical analyses. *BMC Medical Research Methodology*, 24, pp. 305. <https://doi.org/10.1186/s12874-024-02427-8>
- Liu, Y.Y., Li, J., Liu, S.C., Yu, Q., Tong, X.J., Zhu, T.T., Gao, X.X. and Yu, L.X., 2020. Sugarcane leaf photosynthetic light responses and their difference between varieties under high temperature stress. *Photosynthetica*, 58(4), pp. 1009-1018. <https://doi.org/10.32615/ps.2020.038>
- Mangiafico, S.S., 2024. Summary and analysis of extension program evaluation in R. [https://rcompanion.org/handbook/F\\_16.html](https://rcompanion.org/handbook/F_16.html) [Consultado el 8 de febrero de 2025].
- Mendoza, J., Silva, E. and Ayora, A., 2010. Presencia de corcho en algunas variedades de caña de azúcar y su influencia en el peso y contenido de sacarosa. *CINCAE (Centro de Investigación de la Caña de Azúcar del Ecuador)*. ISSN 13902962. <https://cincae.org/wp-content/uploads/2013/04/A%C3%B1o-12-No.-2.pdf> [Consultado el 12 de mayo de 2025].
- Moore, P.H., Paterson, A.H. and Tew, T., 2014. Sugarcane: the crop, the plant, and domestication. In: P.H Moore and F.C Botha, eds. *Sugarcane: Physiology, Biochemistry and Functional Biology*. Ames, IA, USA: John Wiley & Sons., pp. 1-17. <https://doi.org/10.1002/9781118771280.ch1>
- Mount, J. and Zumel, N., 2019. Practical data science with R. Second edition. Manning: Shelter Island, NY, USA. [https://mathematics.foi.hr/Rprojekti/knjige/Practical\\_dAta\\_Science\\_with\\_R.pdf](https://mathematics.foi.hr/Rprojekti/knjige/Practical_dAta_Science_with_R.pdf) [Consultado el 28 de febrero de 2025].
- Moura, M.D.C.C.L., Gonçalves, L.S., Sudré, C.P., Rodrigues, R., do Amaral Júnior, A.T. and Pereira, T.N.S., 2010. Algoritmo de Gower na estimativa da divergência genética em germoplasma de pimenta. *Horticultura Brasileira*, 28, pp. 155-161. <https://doi.org/10.1590/S0102-05362010000200003>
- Msomba, B.H., Ndaki, P.M. and Joseph, C.O., 2024. Sugarcane sustainability in a changing climate: a systematic review on pests, diseases, and adaptive strategies. *Frontiers in*

- Agronomy*, 6, pp. 1423233. <https://doi.org/10.3389/fagro.2024.1423233>
- Nap, J.P., de Ruijter, F.J., van Es, D.S. and van der Meer, I.M., 2025. The case of sugar beet in Europe: A review of the challenges for a traditional food crop on the verge of climate change and circular agriculture. *Journal of Agriculture and Food Research*, 24, pp. 102343. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2025.102343>
- OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development) and FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations), 2025. OECD-FAO Agricultural Outlook 2025-2034, Paris and Rome, <https://doi.org/10.1787/601276cd-en>
- Olivoto, T. and Lúcio, A.D.C., 2020. metan: An R package for multi-environment trial analysis. *Methods in Ecology and Evolution*, 11(6), pp. 783-789. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13384>
- Pompidor, N., Charron, C., Hervouet, C., Bocs, S., Droc, G., Rivallan, R., Manez, A., Mitros, T., Swaminathan, K., Glaszmann, J.C., Garsmeur, O. and D'Hont, A., 2021. Three founding ancestral genomes involved in the origin of sugarcane. *Annals of Botany*, 127(6), pp. 827-840. <https://doi.org/10.1093/aob/mcab008>
- Putra, R.P., Ranomahera, M.R.R., Rizaludin, M.S., Supriyanto, R. and Dewi, V.A.K., 2020. Short communication: Investigating environmental impacts of long-term monoculture of sugarcane farming in Indonesia through DPSIR framework. *Biodiversitas Journal of Biological Diversity*, 21(10), pp. 4945-4958. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d211061>
- R Core Team, 2024. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>
- Ramírez-Madero, G., Gómez-Merino, F.C., Bello-Bello, J.J., Trejo-Téllez, L.I. and Hidalgo-Contreras, J.V., 2023. Assessment of the genetic diversity of new sugarcane hybrids using principal component and cluster analyses. *Agrociencia*, 57(8), pp. 1682-1695. <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v57i8.2847>
- Reyes-Hernández, J., Torres-de los Santos, R., Hernández-Torres, H., Hernández-Robledo, V., Alvarado-Ramírez, E. and Joaquín-Cancino, S., 2022. Rendimiento y calidad de sete variedades de caña de azúcar en El Mante, Tamaulipas. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 13(5), pp. 883-892. <https://doi.org/10.29312/remexca.v13i5.3232>
- Sandoval-Romero, F., Martínez-Damián, M.A., Valdivia-Alcalá, R. and Altamirano-Cárdenas, R., 2025. Efecto del cambio climático en el rendimiento de caña de azúcar en el Ingenio Tres Valles, Veracruz, México. *Revista Fitotecnica Mexicana* 48(4), pp. 423-432. <https://doi.org/10.35196/rfm.2025.4.423>
- Santiago-Zárate, I.M., Martínez-Damián, M.A., Cuevas-Alvarado, C.M., Valdivia-Alcalá, R., García-Hernández, M.I. and Hernández-Toscano, J., 2021. Productivity and technological change in the sugarcane agroindustry in Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 12(6), pp. 1005-1017. <https://doi.org/10.29312/remexca.v12i6.2692>
- Sentíes-Herrera, H.E., Gómez-Merino, F.C. and Loyo-Joachin, R., 2016. El mejoramiento genético de la caña de azúcar (*Saccharum* spp.) en México: una historia de éxito con nuevos desafíos. *Agro Productividad*, 9(7), pp. 8-13.
- Sentíes-Herrera, H.E., Valdez-Balero, A., Loyo-Joachin, R. and Gómez-Merino, F.C. 2017. Fases experimentales en el mejoramiento genético de la caña de azúcar (*Saccharum* spp.) en México. *Agro Productividad*, 10(11), pp: 93-98.
- Singh, R.K., Singh, S.P. and Singh, S.B., 2005. Correlation and path analysis in sugarcane ratoon. *Sugar Tech*, 7(4), pp. 176-178. <https://doi.org/10.1007/BF02950610>
- Statista, 2025a. Production volume of sugarcane in Mexico from 2012 to 2023. <https://www.statista.com/statistics/910167/mexico-sugar-cane-production-volume/> [Consultado el 28 de febrero de 2025].
- Statista, 2025b. Industry revenue of cane sugar manufacturing in Mexico from 2012 to 2024. <https://www.statista.com/forecasts/409877/cane-sugar-manufacturing-revenue-in-mexico> [Consultado el 3 de marzo de 2025].

- Sushchuk, M., 2025. EOSDA models climate change impact on sugarcane yields. Case of Study: Veracruz, Mexico. EOS Data Analytics: Mountain View, CA, USA. <https://eos.com/blog/eosda-models-climate-change-impact-on-sugarcane-yields/> [Consultado el 22 de enero de 2026].
- Tamilchelvan, A., Thirumurugan, T., Sassikumar, D., Jeyaprakash, P., Arul, L., Thangeswari, S., Nithila, S. and Porkodi, G., 2025. Evaluation of key undesirable morphological traits in sugarcane (*Saccharum* spp.) hybrid progenies. *Plant Science Today* 2025, pp. 6060. <https://doi.org/10.14719/pst.6060>
- Tolera, B., Gedebo, A. and Tena, E., 2023. Variability, heritability and genetic advance in sugarcane (*Saccharum* spp. hybrid) genotypes. *Cogent Food and Agriculture*, 9(1), pp. 2194482. <https://doi.org/10.1080/23311932.2023.2194482>
- Tolera, B., Gedebo, A. and Tena, E., 2024. Genetic variability, character association and path analysis in sugarcane genotypes. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 70(1), pp. 1-15. <https://doi.org/10.1080/03650340.2024.2331036>
- UNC (Unión Nacional de Cañeros), 2023. Decreta Gobierno de México el 22 de agosto como Día del Cañero. <https://caneros.org.mx/decreta-gobierno-de-mexico-el-22-de-agosto-como-dia-del-canero/> [Consultado el 28 de febrero de 2025].
- UPOV (International Union for the Protection of New Varieties of Plants), 2005. Caña de azúcar. Código UPOV: *Saccharum* L. Directrices para la ejecución del examen de la distinción, lo homogeneidad y la estabilidad. Unión Internacional para la Protección de las Obtenciones Vegetales. Ginebra, Suiza. <https://www.upov.int/edocs/tgdocs/es/tg186.pdf>
- Wang, H., Pan, Y.B., Wu, M., Liu, J., Yang, S., Wu, Q. and Que, Y., 2024. Sugarcane genetics: Underlying theory and practical application. *The Crop Journal*, 13(2), pp. 328-338. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2024.11.005>
- Windiyani, I.P., Mahfut, M., Purnomo, P. and Daryono, B.S., 2022. Morphological variations of superior sugarcane cultivars (*Saccharum officinarum*) from Lampung, Indonesia. *Biodiversitas Journal of Biological Diversity*, 23(8), pp. 4109-4116. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d230831>
- Wu, J., Wang, Q., Pan, Y.B., Xie, J., Zhou, F., Xu, H., Qiu, Y., Zhang, C. and Liu, Z., 2021. Multivariate analysis of 31 phenotypic traits among major parental lines of sugarcane breeding programs in China. *Journal of Animal and Plant Sciences*, 31(3), pp. 719-732. <https://doi.org/10.36899/JAPS.2021.3.0262>
- Xu, Z., Kong, R., An, D., Zhang, X., Li, Q., Nie, H., Liu, Y. and Su, J., 2023. Evaluation of a sugarcane (*Saccharum* spp.) hybrid F1 population phenotypic diversity and construction of a rapid sucrose yield estimation model for breeding. *Plants*, 12(3), pp. 647. <https://doi.org/10.3390/plants12030647>
- Yang, K., Jackson, P.A., Wei, X., Wu, C.W., Qing, W., Zhao, J., Yao, L., Zhao, L., Zhao, Y., Zhao, P., Chen X., Liu, J. and Li, F.Q., 2021. Optimizing selection indices in sugarcane seedlings. *Crop Science*, 61(6), pp. 3972-3985. <https://doi.org/10.1002/csc2.20602>
- Yao, S., Liu, D.L., Wang, B., Webb, J.K., Li, S., Huete, Xiang, K. and Yu, Q., 2026. Climate warming enhances sugarcane yield and increases annual harvest frequency in northern coastal New South Wales, Australia. *Agricultural Systems*, 231, 104502. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2025.104502>
- Zatti-Barreto, F., Almeida-Balsalobre, T.W., Giacomini-Chapola, R., Franco-Garcia, A.A., Pereira-Souza, A., Paulo-Hoffmann, H., Gazzaffi, R. and Sampaio-Carneiro, M., 2021. Genetic variability, correlation among agronomic traits, and genetic progress in a sugarcane diversity panel. *Agriculture*, 11(6), pp. 533. <https://doi.org/10.3390/agriculture11060533>
- Zeng, J., Gao, H., Li, G. and Sun, J., 2013a. Physicochemical properties of different corn varieties by principal components analysis and cluster analysis. *Journal of the Chemical Society of Pakistan*, 35(5), pp. 1275-1278.

<https://link.gale.com/apps/doc/A355629597/AONE?u=anon~44bc0769&sid=googleScholar&xid=5671c0a6> [Consultado el 3 de marzo de 2025].

Zeng, X., Wang, Q., Zhang, C. and Cai, H., 2013b. Feature selection based on ReliefF and PCA

for underwater sound classification. Proceedings of 2013 3rd International Conference on Computer Science and Network Technology, Dalian, China, 12-13 October 2013. IEEE. pp. 442-445. <http://doi.org/10.1109/ICCSNT.2013.6967149>