

Caña con ciencia: Mejoramiento genético de la caña en la industria azucarera^φ

Ileany Noemi Avila-Chay, Miguel Ángel Herrera-Alamillo,
Luis Carlos Rodríguez-Zapata

Introducción

La caña de azúcar no siempre fue lo que es hoy en día, ¿Qué secretos genéticos podría tener? Su dulce historia ha sido tejida y moldeada por siglos de selección natural y por la domesticación ancestral hasta convertirse en un producto agrícola global por excelencia, y es pieza clave en la estructura económica mundial.

La caña de azúcar puede usarse de varias maneras, pero destacan dos usos: 1) azúcar granulado, donde el 78% de la producción mundial de la caña está destinada a ser refinada para alimentos y bebidas (Organization for Economic Cooperation and Development [OECD] y Food and Agriculture Organization [FAO] 2022) y 2) etanol, por fermentación; se ha convertido en una importante materia prima para biocombustibles. La versatilidad de la caña ha permitido extraerle jugos para la producción de alcohol (ron y cachaza); los residuos de la fibra del tallo en la fabricación de papel, cemento, alimento animal y en abono (Mayavan *et al.* 2015) y también en la generación de electricidad por quema del bagazo (Fig.1).

^φ Laboratorio de Fisiología Molecular y Transformación Genética en Plantas. Unidad de Biotecnología, Centro de Investigación Científica de Yucatán, Mérida, Yucatán, México. CP 97205.
Autor para correspondencia: ileanyavila05@gmail.com
DOI: <http://doi.org/10.56369/BAC.5619>



Copyright © The authors. [Work licensed under a CC-BY 4.0 License.](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

ISSN: 2007-431X

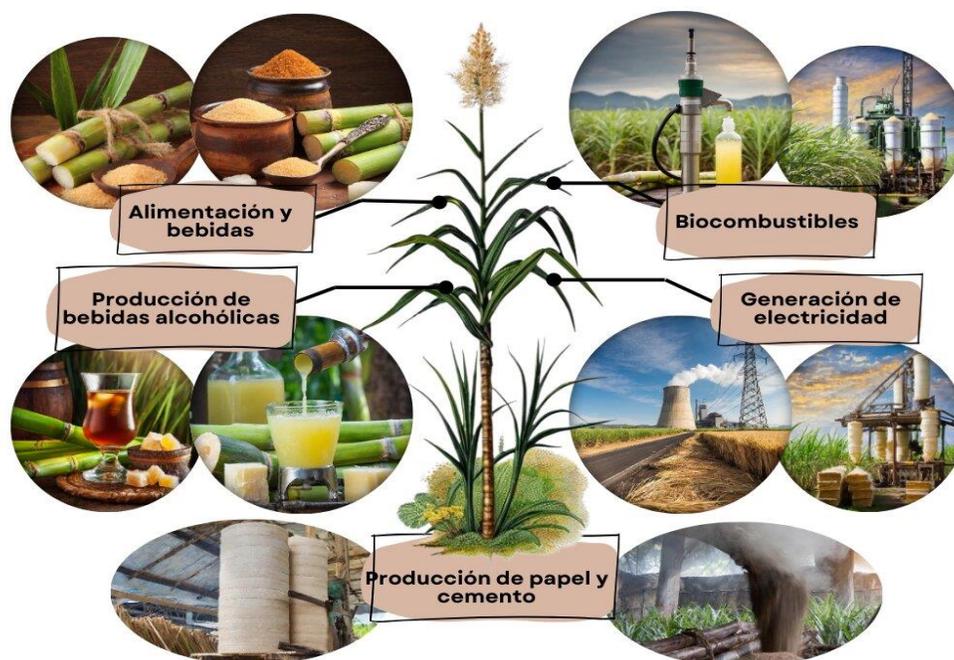


Figura 1. Usos diversificados de la caña de azúcar.

El cultivo de la caña de azúcar no solo es esencial para la producción de azúcares y biocombustibles sino también para la generación de empleo y el comercio internacional donde proporciona sustento a más de 100 millones de personas en 120 países (Voora *et al.* 2023). La producción mundial de caña de azúcar alcanza cifras descomunales, superando los 1.8 mil millones de toneladas por año desde el 2012 hasta la actualidad (FAO 2023). Sin embargo, detrás de estas cifras impresionantes se encuentra una historia de evolución. El mejoramiento genético ha sido una herramienta fundamental en la mejora de los cultivos, y la caña de azúcar no es una excepción. El objetivo de este trabajo es analizar la evolución histórica de la caña de azúcar examinando las técnicas y metodologías usadas en su mejoramiento genético a lo largo del tiempo.

Un poco de historia

La caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.), antes de ser cultivada en la industria azucarera, era alimento para cerdos. Pero antes de eso, esta gramínea pasó por un proceso evolutivo hasta llegar a ser un cultivo importante. Es necesario involucrar dos términos que se entrelazan: el centro de origen y el centro de diversidad biológica.

En el centro de origen, la caña de azúcar no tiene un lugar geográfico específico ya que el género *Saccharum* pudo originarse antes de que los continentes adoptaran sus ubicaciones actuales. Sin embargo, hay dos centros de diversificación biológica: el Viejo Mundo (Asia y África) y el Nuevo Mundo (América) (Cheavegatti-Gianotto *et al.* 2011). Éstos tienen en común su clima tropical y subtropical que permitió el ambiente ideal para su desarrollo.

Es posible que por migración natural de *S. spontaneum*, y otros géneros relacionados, haya llegado hasta Nueva Guinea en la era del Cretácico (hace aproximadamente 120 millones de años atrás) (Daniels y Daniels 1993). Siguiendo la línea cronológica, varios historiadores concuerdan que el inicio de la domesticación ocurrió en el Viejo Mundo hace 5,000 – 6,000 años, en el sudoeste del continente asiático y una pequeña parte del norte de Oceanía. En esa época la caña de azúcar se convirtió en uno de los principales cultivos para alimentar a los cerdos porque proporcionaba una dieta alta en calorías.

El inicio de la domesticación de la caña fue un momento crítico en el proceso de la transformación de especies silvestres en formas domesticadas porque ocasionó cambios en su morfología, fisiología, reproducción y genética (Yang *et al.* 2019). A esta domesticación se le ha reconocido como parte del mejoramiento genético convencional, del cual se encuentran involucradas la selección natural, la selección artificial y la hibridación (Fig. 2). Hay una relación estrecha entre los tipos de selección y la hibridación, porque dentro de la selección puede ocurrir un cruzamiento entre variedades de la misma especie (hibridación intraespecífica) o entre diferentes especies (interespecífica); es decir, también ocurrieron tanto hibridaciones naturales como artificiales.



Figura 2. Técnicas para el mejoramiento genético convencional de la caña. Selección artificial: selección y crianza de individuos con características específicas deseadas. Los híbridos interespecíficos, producto del cruzamiento entre *S. officinarum* y *S. spontaneum*, son un ejemplo de la primera selección artificial. Selección natural: impulsada por factores biológicos y ambientales en el entorno natural. *S. spontaneum* es un ejemplo de la evolución del género *Saccharum*. Hibridación: cruce no solo de variedades de una especie sino también entre especies. La primera hibridación interespecífica natural ocurrió entre *S. spontaneum*, *T. arundinaceum* y *M. sinensis*.

“El inicio de la domesticación de la caña fue un momento crítico en el proceso de la transformación de especies silvestres en formas domesticadas porque ocasionó cambios en su morfología, fisiología, reproducción y genética.”

En este entorno primitivo, las primeras variedades silvestres de *Saccharum officinarum* comenzaron a evolucionar de manera natural desarrollando una resistencia y adaptabilidad que las transformarían en una preciada fuente de dulzura para las culturas indígenas. Sin embargo, se tiene la hipótesis de que *S. officinarum* proviene originalmente de *Saccharum robustum* Brandes & Jeswiet *ex* Grassl, que ha sido el producto de la hibridación compleja de tres taxones: *Saccharum spontaneum* L., *Tripidium arundinaceum* (Retz.) Welker, Voronts. & E.A.Kellogg y *Miscanthus sinensis* Andersson, ocurrida en Nueva Guinea y el sudeste asiático hace unos 9,000 años (Daniels y Daniels 1993). Luego ocurrió la transferencia de *S. officinarum* hacia China e India en donde se produjo el híbrido *Saccharum sinense* Roxb. (en India conocido con el sinónimo de *Saccharum barberi* Jeswiet) (Dinesh *et al.* 2022). A partir de esto, los antiguos agricultores comenzaron a cultivarla y a perfeccionar técnicas de cultivo ocasionando el punto de inflexión crucial que marcó el comienzo de su expansión global.

La caña de azúcar no solo ha realizado todo un viaje por el tiempo, sino que también tuvo que cruzar el mundo. Justo así fue su llegada a las Américas en el siglo XV durante la era del Renacimiento y colonización por medio de los conquistadores europeos (Voora *et al.* 2023). Se convirtió en un cultivo central en 1492 cuando Cristóbal Colón llegó a las islas del Caribe y revolucionó no solo a la economía de la región, sino que también la expansión del sistema de plantación (Mintz 1985). Con el crecimiento de la demanda por la caña de azúcar a finales del siglo XIX, los cultivadores realizaron ciertos cruzamientos selectivos entre *S. spontaneum* (escogida por ser ampliamente adaptada aportando genes de resistencia a las enfermedades y al estrés) y *S. officinarum* (por tener la capacidad de acumular grandes cantidades de sacarosa en sus tallos) para obtener los cultivares modernos de caña de azúcar (Cheavegatti-Gianotto *et al.* 2011). De cualquier forma, a grandes rasgos estos dos desplazamientos, tanto en el Viejo Mundo como en el Nuevo Mundo, impulsaron que los agricultores ancestrales se preocuparan por mejorar la calidad y productividad de la caña de azúcar a través de técnicas convencionales de mejoramiento genético. Sin embargo, en los últimos años estos productores agrícolas se han enfrentado a retos que han limitado considerablemente el rendimiento del cultivo.

Existen algunos desafíos, tanto propios como ajenos, al cultivo de caña de azúcar. En este sentido, un complejo genoma, un bajo índice de fertilidad, el largo ciclo de reproducción y la susceptibilidad a estreses bióticos y abióticos son algunos desafíos intrínsecos en esta planta. El cambio en las condiciones meteorológicas es el principal factor abiótico que perjudica a la caña de azúcar porque los cambios en las precipitaciones ocasionan

vulnerabilidad a la sequía puesto que depende de un suministro constante de agua. Por otra parte, los hongos, bacterias y virus son los principales factores bióticos que afectan negativamente la producción por las enfermedades. Además, el desarrollo de nuevas variedades de cañas adaptadas según las condiciones específicas de cada región cañera se ha vuelto una labor más ardua por el ciclo largo de reproducción, siendo un punto importante ya que lo que se desea es obtener variedades con alta producción de biomasa, pero con bajo costo en su explotación (Fig. 3).



Figura 3. Desafíos de las técnicas de mejoramiento genético convencional. Existen factores intrínsecos (que afectan directamente a la caña de azúcar) y factores extrínsecos (ajenos a la caña, pero que afecta la productividad del cultivo).

Esto ocasiona otros problemas extrínsecos, como la falta de infraestructuras y conocimiento, elevados costos de la mano de obra e insumos (fertilizantes y agroquímicos), precios inestables de la caña de azúcar y la situación del envejecimiento (degradación) del campo cañero (OECD y FAO 2022, Surya *et al.* 2023, Voora *et al.* 2023). El cultivo convencional de caña de azúcar enfrenta diversos desafíos que han propiciado la necesidad del uso de tecnologías innovadoras para potencializar la producción de este plantío por medio de técnicas no convencionales.

Sorteando los desafíos azucarados y cosechando innovación

En comparación con otros cultivos importantes, el avance en el incremento del rendimiento de la caña de azúcar por mejoramiento genético es más lento e inferior. A partir de la primera mitad del siglo XX surgieron técnicas de vanguardia para el mejoramiento genético de la caña

de azúcar. Esto incluye la selección asistida por marcadores moleculares, mutación inducida, cultivo de tejidos *in vitro* y la que últimamente ha estado en auge es la ingeniería genética (Dinesh *et al.* 2022) (Fig. 4). Estas técnicas ofrecen nuevas perspectivas para un mejoramiento eficiente y específico, lo que a su vez contribuye en la sustentabilidad y rendimiento en la agroindustria azucarera al hacerle cara a los diversos desafíos.

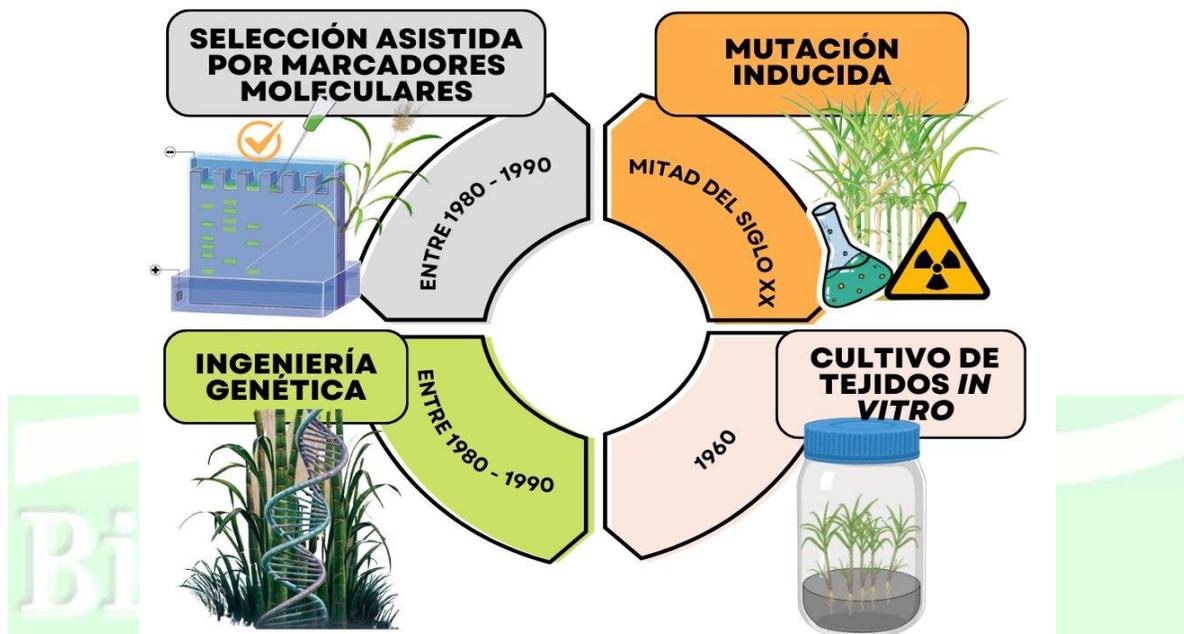


Figura 4. Técnicas para el mejoramiento genético no convencional de la caña. Selección asistida por marcadores moleculares (segmentos de ADN que pueden ser detectados y analizados en laboratorio). Mutación inducida es la mutación al azar por uso de sustancias químicas o radiaciones. Cultivo de tejidos *in vitro* involucra el crecimiento y desarrollo de células, tejidos u órganos de plantas en un medio de cultivo estéril controlado. Ingeniería genética involucra la manipulación del ADN de los organismos para introducir, modificar o eliminar genes.

Entre las variedades que sustentan la industria azucarera está la mutante Co997, mejorada al ser irradiada con rayos gamma que ocasionó resistencia a la enfermedad “Red rot” y se ha seleccionado además por su rendimiento agronómico y su calidad de caña. Además, está la variedad Co 85035 desarrollada en la India y seleccionada por sus características agronómicas favorables (alto rendimiento de caña y alto porcentaje de sacarosa) y su resistencia a *Sporisorium scitamineum* (Syd.) (International Atomic Energy Agency [IAEA] 2022).

Entre las estrategias biotecnológicas sobresale la transformación genética, la cual es una técnica que brinda la ingeniería genética. Se han desarrollado métodos directos (Biobalística, electroporación, sonicación y transferencia mediada por compuestos químicos) e indirectos (sistema *Agrobacterium* y vectores virales) para la transformación genética. De estos últimos, hay dos métodos que sobresalen por su tasa de éxito en la mejora del cultivo: transformación

mediada por *Agrobacterium* y la técnica de bombardeo biolístico de partículas. Estas técnicas han introducido genes que brindan resistencia a herbicidas (como a la kanamicina), al desarrollo de la resistencia a los insectos (como *Diatraea saccharalis*, *Chilo infuscatellus*, *Scirpophaga excerptalis*, *Helicoverpa armígera* y *Proceras venosatus*) y la resistencia a enfermedades por bacterias (*Xanthomonas albilineans*), virus (Virus del mosaico de la caña de azúcar) y hongos (*Colletotrichum falcatum*).

Se han realizado varias investigaciones para introducir genes resistentes al estrés abiótico, como a la sequía y salinidad (Carrillo-Bermejo *et al.* 2020, Dinesh *et al.* 2022). A su vez, existen herramientas que han ayudado a revolucionar la capacidad de modificar los genomas de las plantas con mayor precisión, entre ellas se pueden mencionar a las TALENs (Nucleasas de Efectores Activadores de la Transcripción), ZFNs (Nucleasas de Dedos de Zinc) y la tecnología más reciente es la CRISPR-CAS (Repetición Palindrómica Corta Agrupada y Regularmente Interespaciada) (Surya *et al.* 2023).

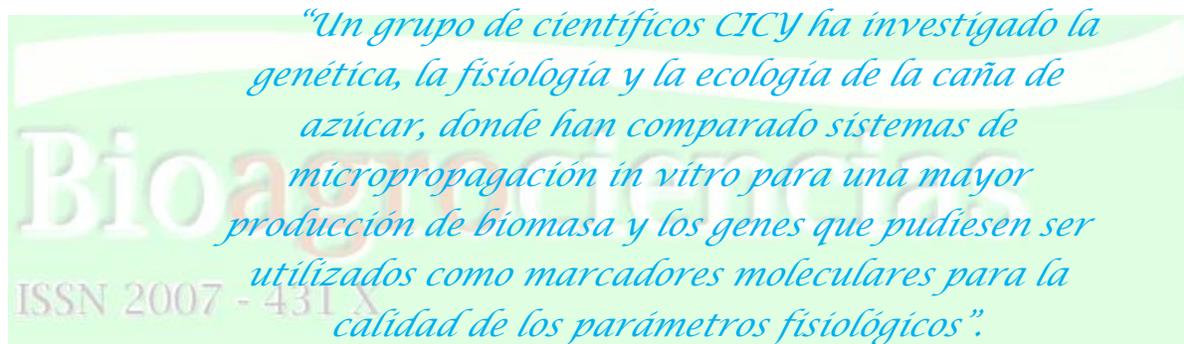
“En comparación con otros cultivos importantes, el avance en el incremento del rendimiento de la caña de azúcar por mejoramiento genético es más lento e inferior”.

Estudios de vanguardia en Yucatán

Un grupo de científicos del Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY) ha investigado la genética, la fisiología y la ecología de la caña de azúcar, donde han comparado sistemas de micropropagación *in vitro* para una mayor producción de biomasa y los genes que pudiesen ser utilizados como marcadores moleculares para la calidad de los parámetros fisiológicos. También, han estudiado el perfil transcripcional de la caña sometida a estrés osmótico e identificado genes para mejorar su tolerancia a la sequía. Este último estudio logró una línea específica de investigación sobre ciertas familias de Factores de Transcripción (FT's) en la regulación de la expresión génica. Esto permite comprender de qué forma coordinan las respuestas adaptativas a señales internas y externas. Otros estudios incluyen análisis proteómicos donde el estrés por sequía puede desencadenar la inducción de proteínas resistentes a la agregación (Pereira-Santana *et al.* 2017, Carrillo-Bermejo *et al.* 2020, Zamora-Briseño *et al.* 2023).

Conclusión

La biotecnología ha tenido un impacto positivo en el cultivo de la caña de azúcar. Se han desarrollado variedades con características deseables, como a) la tolerancia a estrés ambiental, b) aumentar su contenido de sacarosa para un mayor rendimiento de azúcar y producción de biocombustibles y c) la resistencia a plagas y enfermedades, reduciendo de esta manera la necesidad de aplicar pesticidas químicos que a la larga perjudican a la salud. No obstante, no solo en CICY se están buscando soluciones a los problemas de la caña de azúcar por ingeniería genética sino también se tienen reportes de estudios enfocados en prácticas agronómicas sostenibles (como las técnicas de gestión de agua, control de malezas y manejo de suelo) y tecnologías de cultivo (sistemas de riego inteligente, automatización y robótica agrícola) (Sulaiman *et al.* 2023). A pesar de los desafíos persistentes, los avances en la tecnología genómica están permitiendo abrirse hacia nuevas perspectivas para el mejoramiento genético de la caña de azúcar y ofrecer la promesa de impulsar la industria hacia un futuro más sostenible y productivo.



Agradecimientos

Este trabajo fue financiado por el Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnología (CONAHCYT) de México, con el proyecto CF-2023-G-636.

Referencias

- Carrillo-Bermejo EA, Gamboa-Tuz SD, Pereira-Santana A, Keb-Llanes MA, Castaño E, Figueroa-Yañez LJ, Rodriguez-Zapata LC. 2020. The SoNAP gene from sugarcane (*Saccharum officinarum*) encodes a senescence-associated NAC transcription factor involved in response to osmotic and salt stress. *Journal of Plant Research* 133(6): 897–909.
- Cheavegatti-Gianotto A, de Abreu HMC, Arruda P, Besspalhok Filho JC, Burnquist WL, Creste S, di Ciero L, Ferro JA, de Oliveira Figueira AV, de Sousa Filgueiras T, Grossi-

- de-Sá MF, Guzzo EC, Hoffmann HP, de Andrade Landell MG, Macedo N, Matsuoka S, de Castro Reinach F, Romano E, da Silva WJ, César Ulian E. 2011. Sugarcane (*Saccharum X officinarum*): A Reference Study for the Regulation of Genetically Modified Cultivars in Brazil. *Tropical Plant Biology* 4(1): 62–89.
- Daniels J, y Daniels C. 1993. Sugarcane in Prehistory. *Oceania* 28(1).
- Dinesh Babu KS, Janakiraman V, Palaniswamy H, Kasirajan L, Gomathi R, Ramkumar TR. 2022. A short review on sugarcane: its domestication, molecular manipulations and future perspectives. *Genetic Resources and Crop Evolution* 69 (8): 2623–2643. Institute for Ionics.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2023. Sugar cane production, 1961 to 2021. Fecha de consulta 04/04/2024 en <https://ourworldindata.org/grapher/sugar-cane-production?tab=table>
- International Atomic Energy Agency (IAEA). 2022. *Mutant Variety Search: Co 997 mutant*. Mutant Variety Database. Fecha de consulta 04/04/2024 en <https://nucleus.iaea.org/sites/mvd/SitePages/Search.aspx?MVID=370>
- Mayavan S, Subramanyam K, Jaganath B, Sathish D, Manickavasagam M, Ganapathi A. 2015. *Agrobacterium*-mediated in planta genetic transformation of sugarcane setts. *Plant Cell Reports* 34(10): 1835–1848.
- Mintz SW. 1985. Sweetness and power: The place of sugar in modern history. Penguin.
- Organization for Economic Cooperation and Development (OECD) y Food and Agriculture Organization (FAO). 2022. Sugar. OECD & FAO (Eds.), *OECD-FAO Agricultural Outlook 2022-2031* pp. 175–188.
- Pereira-Santana A, Alvarado-Robledo EJ, Zamora-Briseño JA, Ayala-Sumuano JT, Gonzalez-Mendoza VM, Espadas-Gil F, Alcaraz LD, Castaño E, Keb-Llanes MA, Sanchez-Teyer F, Rodriguez-Zapata LC. 2017. Transcriptional profiling of sugarcane leaves and roots under progressive osmotic stress reveals a regulated coordination of gene expression in a spatiotemporal manner. *PLoS ONE* 12(12).
- Sulaiman AA, Arsyad M, Amiruddin A, Teshome TT, Nishanta B. 2023. New Trends of Sugarcane Cultivation Systems Toward Sugar Production on the Free Market: A Review. *AGRIVITA Journal of Agricultural Science* 45(2): 395–406.
- Surya Krishna S, Harish Chandar SR, Ravi M, Valarmathi R, Lakshmi K, Prathima PT, Manimekalai R, Viswanathan R, Hemaprabha G, Appunu C. 2023. Transgene-Free Genome Editing for Biotic and Abiotic Stress Resistance in Sugarcane: Prospects and Challenges. *Agronomy* 13 (4). MDPI.
- Voora V, Bermúdez S, Le H, Larrea C, Luna E. 2023. Sugar cane prices and sustainability. Fecha de consulta 13/03/2024 en <https://www.iisd.org/system/files/2023-09/2023-global-market-report-sugar-cane.pdf>
- Yang X, Song J, Todd J, Peng Z, Paudel D, Luo Z, Ma X, You Q, Hanson E, Zhao Z, Zhao Y, Zhang J, Ming R, Wang J. 2019. Target enrichment sequencing of 307 germplasm accessions identified ancestry of ancient and modern hybrids and signatures of adaptation and selection in sugarcane (*Saccharum* spp.), a ‘sweet’ crop with ‘bitter’ genomes. *Plant Biotechnology Journal* 17(2): 488–498.

Zamora-Briseño JA, Ruíz-May E, Elizalde-Contreras JM, Reyes-Hernández SJ, Reyes-Soria FA, Bojórquez-Velázquez E, Castaño E, Rodríguez-Zapata LC. 2023. Aggregation-resistant proteins are adjusted during drought in sugarcane plants. *Acta Physiologiae Plantarum* 45(3).

Avila-Chay IN, Herrera-Alamillo MA, Rodríguez-Zapata LC. 2024. Caña con ciencia: Mejoramiento genético de la caña en la industria azucarera. *Bioagrocencias* 17 (2): 1-10.
DOI: <http://doi.org/10.56369/BAC.5619>

