

Nuevas directrices en mejoramiento genético de CAÑA DE AZÚCAR (*Saccharum* spp.)

Senties-Herrera, H.E¹; Gómez-Merino, F.C.^{1*}

¹Colegio de Postgraduados Campus Córdoba, Carretera Córdoba-Veracruz km 348. Congregación Manuel León, Amatlán de los Reyes, Veracruz, México. C.P. 94961.

*Autor responsable: fernandg@colpos.mx

RESUMEN

La caña de azúcar es un cultivo de gran importancia para México y actualmente enfrenta serios desafíos que hacen necesaria la búsqueda de alternativas que hagan más eficiente el sistema de producción. Dentro de las propuestas aquí planteadas resaltan la necesidad de ampliar la base genética, aplicar el cultivo *in vitro* en los procesos de selección, generar modelos estadísticos multivariados que permitan evaluar la interacción genotipo por ambiente y desarrollar biotecnologías tendientes a aplicar los avances más recientes sobre el genoma de este cultivo.

Palabras clave: Innovación, genómica, biotecnología, cruzamientos, análisis multivariado

INTRODUCCIÓN

La caña de azúcar (*Saccharum* spp.) es un cultivo que se produce en más de 130 países y territorios, sobresaliendo Brasil (30% de la producción), La India (21%), China (7%), Tailandia (4%), Pakistán (4%), México (3.5%), Colombia (3%), Australia (3%), Estados Unidos de América (2%) e Indonesia (2%) (FAOSTAT, 2013). A nivel global la capacidad productiva de este cultivo oscila de 40 a 150 t ha⁻¹ de caña en fresco y de 3.5 a 15 t ha⁻¹ de azúcar en fábrica. Con 55 ingenios en operación en 2013, la producción de caña de azúcar en México se desarrolla en 15 entidades federativas, 227 municipios y la superficie cultivada es de alrededor de 800 mil hectáreas (CNPR, 2014). Según proyecciones oficiales, la actual superficie cultivada podría crecer a cerca de 5 millones

de hectáreas (SIAZUCAR, 2009). Dada esta potencial capacidad de expandir la superficie cañera, es necesario desarrollar una planeación del destino de la materia prima. La mayor potencialidad para expandir esta superficie se encuentra en los estados de Chiapas, Jalisco, Morelos y Puebla, en tanto que habría que replantear la operación de los ingenios que se ubican en las entidades de Campeche, San Luis Potosí y Tabasco, debido a su menor productividad, asociada a limitantes de índole técnico-agronómico, ambiental y socioeconómico (Senties-Herrera, 2013). Es de destacar que las ganancias relativas observadas en los últimos años han sido debidas a factores relacionados con subsidios gubernamentales (8% del total de subsidios a la agricultura nacional), y a algunos esfuerzos recientes por incrementar su productividad a través de apoyos en capacitación, digitalización y sistematización de procesos, y modernización del sistema productivo tanto en campo como en fábrica. Sin embargo, no ha habido una estrategia integral nacional para afrontar estos desafíos y aprovechar las oportunidades que ofrece el sector. Uno de los cimientos más sólidos para esta encomienda es la reactivación del programa de mejoramiento genético a escala nacional, por lo que en esta contribución se abordan algunas directrices importantes como propuesta para innovar el sistema de producción de caña de azúcar de manera más eficiente.

El programa de mejoramiento genético de caña de azúcar en México

En México el mejoramiento genético de caña de azúcar se realiza en la estación de Hibridación en Rosario Izaapa, Chiapas, a través del uso de semilla sexual. Los trabajos de hibridación en los últimos 60 años han permitido la liberación de más de 150 variedades mexicanas, que ocupan un 55% de la

superficie sembrada del país; el 45% restante se encuentra sembrado con variedades extranjeras, gracias al Programa de Intercambio e Importación de Variedades que mantiene la Cámara Nacional de las Industrias Alcohólica y Azucarera (CIDCA, 2013) (Figura 1).



Figura 1. Banco de germoplasma del Centro de Investigación y Desarrollo de la Caña de Azúcar (CIDCA).

En la Figura 2 se muestra la distribución porcentual de las principales variedades de caña de azúcar de México en 2012, a partir del Manual Azucarero Mexicano 2013. Se observa que las variedades predominantes son CP 72-2086, Mex 69-290 y Mex 79-431, las cuales conjuntan el 74% de la superficie sembrada.

Recientemente, Senties-Herrera (2013) determinó que en 1980 alrededor del 70% de la producción de azúcar se sustentaba en nueve variedades, y para 2012 este número se redujo a tan solo tres genotipos. Durante el periodo de análisis (1980-2012), las variedades B 4362, L 60-14, Mex 55-32, Mex 57-473, NCo 310, Co 997 y Mex 68-P-23 presentaron reducción en la superficie de cultivo, mientras que CP 72-2086, Mex 69-290 y Mex 79-431 la incrementaron.

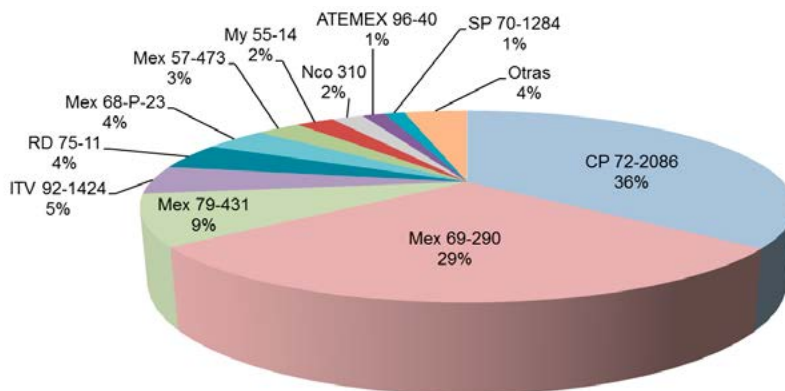


Figura 2. Distribución porcentual de las principales variedades cultivadas en las regiones cañeras de México (zafra 2011-2012) (Manual Azucarero Mexicano, 2013).

Si bien los rendimientos que se han obtenido con el esquema tradicional de mejoramiento genético han aumentado, el crecimiento anual ha sido de tan solo 0.4%. Comparativamente con Brasil, los incrementos anuales han sido de 1.5% (Waclawovsky *et al.*, 2010), lo que indica que las ganancias observadas en México aún son precarias. Para lograr avances sustanciales en la generación de nuevas variedades de caña de azúcar (Figura 3) que impacten de manera significativa el sistema de producción, es necesario implementar diferentes estrategias de innovación (cambio basado en el conocimiento que genera valor) a través del uso de nuevas tecnologías adaptadas a las condiciones propias en cada ambiente productivo de caña, teniendo en cuenta la sustentabilidad del sistema. Aplicaciones biotecnológicas como el cultivo *in vitro* de plantas para la propagación de materiales libres de enfermedades, y de alta calidad, uso de modelos estadísticos multivariados para la evaluación y selección de híbridos de nuevas generaciones, y avances en el conocimiento del genoma del género *Saccharum*, son algunos de los enfoques que se abordan.



Figura 3. Variedades con alto potencial productivo desarrolladas en el Colegio de Postgraduados (COLPOSCTMEX 05-204). (Foto: M. C. Héctor Emmanuel Senties Herrera).

Modelos de interacción genotipo ambiente en las fases avanzadas de selección en caña de azúcar

La Interacción Genotipo Ambiente (IGA) tiene un efecto diferencial directo sobre los genotipos en su estabilidad y adaptabilidad a diferentes condiciones ambientales y en la expresión final del fenotipo. El fenotipo de un cultivo está determinado por su genotipo (G), el ambiente (A), y la interacción entre éstos (IGA), lo que define la variación existente y permite identificar materiales estables o mejor adaptados. El programa de selección de variedades de caña de azúcar de México, aún no cuenta con un modelo para evaluar la IGA en los cultivares actuales y nuevos. Dentro de la metodología vigente desarrollada por el Instituto para el Mejoramiento de la Producción de Azúcar (IMPA, 1983), existe una fase definida como Prueba de Adaptabilidad, en la cual un mismo material es evaluado empíricamente en diferentes ambientes, sin un control estadístico experimental riguroso, y aquel material seleccionado en esta fase, se establecerá en Evaluación Agroindustrial bajo un diseño experimental que no considera la IGA.

Recientemente, Rodríguez-Gross *et al.* (2012), probaron diferentes métodos estadísticos multivariados como el análisis de coordenadas principales (PCO); modelo de efectos principales aditivos e interacción multiplicativa (AMMI); y análisis de regresión de sitios (GGE) en caña de azúcar, y reportaron que los métodos AMMI y GGE son los más adecuados para la evaluación de la IGA. Rea y De Sousa-Vieira (2002) determinaron la magnitud de la IGA y la estabilidad fenotípica de caña de azúcar mediante el uso del coeficiente de regresión, la desviación de la regresión y el coeficiente de variabilidad, tomando en cuenta diferentes localidades, fechas de cosecha y su influencia en las variables de rendimiento, mostrando que el análisis de la estabilidad fenotípica puede contribuir con información importante sobre el comportamiento de nuevas selecciones de caña de azúcar antes de la liberación como cultivares prometedores e incrementar la eficiencia en los programas de mejoramiento genético del cultivo.

El desarrollo de variedades mejoradas de caña de azúcar estará condicionado al ambiente de selección elegido, y para los propósitos específicos determinados por la magnitud o influencia de la IGA, lo que requiere dividir grandes áreas geográficas en pequeñas superficies delimitadas por el ambiente, permitiendo que la selección y caracteres de discriminación entre lo deseado y lo no deseado sea de acuerdo a los objetivos específicos planteados, siempre en relación a la capacidad de adaptación y comportamiento de los materiales (genotipos) en diferentes ambientes

(GxA), a través de años (GxY) y la combinación de ambientes y años (GxAxY), para su mejor distribución en las áreas de producción cañera en México. Esta estrategia será esencial cuando se planea incrementar la superficie de caña para aprovechar las cerca de 5 millones de hectáreas con potencial para este cultivo.

Evaluación de caracteres morfológicos estables en diferentes años

Entre los caracteres que describen a una nueva variedad destacan los industriales, agronómicos y en especial los morfológicos, ya que estos últimos son los que ayudan a identificar fenotípicamente a las nuevas variedades de caña de azúcar una vez liberadas a nivel comercial. Dentro del programa de selección de variedades, es en la fase Evaluación Agroindustrial cuando se realiza dicha descripción, la cual se lleva a cabo

en el último año del proceso, próximo a la liberación comercial (Flores, 2001). Debido a la IGA, muchos de los caracteres morfológicos presenta modificaciones de un año a otro (no son estables), los cuales no son evaluados posteriormente en dicho programa. Para dicho proceso se deben

tomar en cuenta todos aquellos caracteres que sean útiles para la descripción varietal de acuerdo a lo especificado por la Unión Internacional para la Protección de Nuevas Variedades de Plantas (UPOV, 2010). Por tal motivo, dichos caracteres deberán ser evaluados en diferentes años (por lo menos dos años) en las mismas condiciones, para determinar su estabilidad y poder así describir la mayor parte de la variabilidad total existente en un número reducido de dimensiones (caracteres), utilizando métodos de análisis multivariante (González-Andrés y Pita-Villamil, 2001). Entre los principales caracteres que se utilizan actualmente para la distinción, homogeneidad y la estabilidad de variedades destaca el entrenudo, la yema y hojas (Figuras 4, 5 y 6) (Fotos M. C. Héctor Emmanuel Senties-Herrera).

Cultivo *in vitro* para las fases de selección

El cultivo *in vitro* permite reducir los tiempos de obtención

de semilla y usar eficientemente la superficie destinada al establecimiento de las fases dentro del programa de evaluación y selección de variedades de caña de azúcar, además de garantizar la sanidad, identidad genética y vigor de las plántulas. Se ha demostrado que el efecto combinado del saneamiento y el rejuvenecimiento *in vitro* puede incrementar los rendimientos en contenido de azúcar por área en el orden de 10% a 15% (Pérez-Ponce *et al.*, 2000). Alternativamente, la técnica permite tener duplicados seguros de los diferentes genotipos y servir entonces para la conservación de germoplasmas en el corto plazo (menos de un año); adicionalmente se pueden optar por el crecimiento mínimo y la crioconservación para periodos más prolongados. A través del cultivo *in vitro* es posible obtener de grandes poblaciones en poco tiempo y espacio. En las fases del programa de evaluación y selección de

caña de azúcar actual, existen tres multiplicaciones anidadas a tres fases: Parcela, Prueba de Adaptabilidad y Evaluación Agroindustrial, denominadas multiplicación I, II y III, respectivamente (IMPA, 1983). Durante el proceso de evaluación en estas tres fases es posible inferir el comportamiento

de los híbridos desde etapas tempranas, y colocarlos como sobresalientes, momento en que se pueden realizar las multiplicaciones *in vitro* de estos materiales. Sin embargo, debido a la falta de un análisis estadístico riguroso en estas fases, dichos materiales no puedan pasar a las fases subsecuentes, lo que implica mayores gastos y periodos más largos de selección. El cultivo *in vitro* también permite compartir materiales entre centros de investigación que contribuyen a la selección de los híbridos en otros ambientes, lo que garantiza la pureza genética y sanidad, además de abaratar los costos de envío del material en comparación con la forma convencional (dos estacas con tres yemas viables), con lo cual en muchos de los casos no se logra establecer la variedad o se cuenta con apenas una sola planta para su establecimiento. Este método de multiplicación, permite hacer evaluación a factores bióticos y abióticos, pudiendo acortar los tiempos de selección



Figura 4. Diferencias de entrenudos entre distintas variedades de caña de azúcar.



Figura 5. Diferencias en tipos de yemas entre distintas variedades de caña de azúcar.

y liberar más variedades para cubrir la demanda del sector (Snyman *et al.*, 2011).

A través del cultivo *in vitro* es posible generar variación somaclonal en caña de azúcar, proceso ventajoso dado que permite generar variabilidad en un cultivo con una estrecha base genética, pero a la vez es desventajoso, debido a que una variedad ya liberada puede cambiar como consecuencia de esta variación. La experiencia indi-

ca que en caña de azúcar se recomienda no más de diez ciclos de cultivo *in vitro* a fin de reducir o evitar la variación somaclonal (Caamal-Velázquez y Bello-Bello, 2014).

Biotecnología en la producción de caña de azúcar en México

El desarrollo de tecnologías para la producción de caña de azúcar transgénica podría ser una alternativa para incrementar la productividad de la caña de azúcar en México (Figura 7).

La manipulación de genes en caña ha tenido importantes progresos, y a nivel experimental se ha avanzado en el desarrollo de resistencia al ataque de insectos, inmunidad a enfermedades, tolerancia a factores adversos como sequía, heladas, anoxia e hipoxia (Stepanova *et al.*, 2002; Filippone *et al.*, 2010; Srivastava *et al.*, 2012; Thiebaut *et al.*, 2012; Dedemo *et al.*, 2013). Además de los proyectos tendientes a elevar la síntesis de sacarosa, bioetanol y la producción



Figura 6. Diferencias en tipos de hojas entre distintas variedades de caña de azúcar.



Figura 7. Extracción de DNA genómico de caña de azúcar para diversos estudios en biotecnología. (Foto: M. C. Héctor Emmanuel Senties Herrera).

de biomasa *per se*, los nuevos enfoques visualizan a este cultivo como una de las biofábricas innovadoras del futuro, principalmente para la producción de bioplásticos, proteínas de uso farmacológico y azúcares (Waclawovsky *et al.*, 2010; Aguilar-Rivera *et al.*, 2012; Gómez-Merino *et al.*, 2014).

La posibilidad de producir cultivares de caña de azúcar transgénica es una decisión estratégica para México, y es determinante implementar tecnologías seguras e iniciativas de información a la sociedad sobre los desafíos y las oportunidades que ofrecen los cultivos biotecnológicos. Debido a su destacada capacidad para convertir la energía lumínica en carbohidratos y su habilidad para acumular sacarosa en sus tallos, además de su fácil cultivo, la caña de azúcar representa una de las plantas más interesantes para la producción agroalimentaria. Se estima que el rendimiento potencial de este cultivo puede alcanzar las 800 t ha^{-1} y si se considera que el rendimiento promedio mundial es cercano a las 80 t ha^{-1} , es de esperar que hay posibilidad de incrementar tales rendimientos promedios, y una de las herramientas para ello es la biotecnología (Yadav *et al.*, 2010). En años recientes, los esfuerzos por mejorar los rendimientos en caña de azúcar se han basado precisamente en desarrollos biotecnológicos. Sin

embargo, aún se carece de esquemas eficientes para su aplicación en campo, y las iniciativas para caracterizar etiquetas de secuencias expresadas (EST) han tenido poco impacto en los programas de mejoramiento (Dal-Bianco *et al.*, 2012). Además, los modelos que actualmente se usan por los mejoradores han sido desarrollados a partir de organismos diploides, mismos que no son adecuados para organismos poliploides como la caña de azúcar. Debido al deterioro del ambiente y los recursos genéticos y naturales, además de los efectos del cambio climático global, los rendimientos de este cultivo han ido a la baja. La contribución de alelos múltiples a caracteres complejos como el rendimiento es un aspecto clave que yace en la base de los esfuerzos de mejoramiento y que requiere de herramientas específicas para este cultivo (Birch, 2013). Los progresos en genómica funcional han permitido avances en el estudio de expresión génica asociada a funciones biológicas. Además, el proyecto de secuenciación del genoma completo de este cultivo que se está conduciendo actualmente a través de un consorcio internacional, puede contribuir a la resolución de muchas preguntas respecto a los proyectos de mejoramiento genético de esta especie. Tanto los enfoques de ingeniería genética como el mejoramiento genético asistido por marcadores moleculares permitirá incrementar rendimientos, además de mejorar la tolerancia a factores tanto bióticos como abióticos, y ofrecer también nuevos productos que contribuyan a diversificar esta cadena de valor (Dal-Bianco *et al.*, 2012).

Una ventana que ofrece grandes posibilidades es la interface Integrated Breeding Platform (<https://www.integratedbreeding.net/es>), la cual proporciona herramientas y servicios en las diferentes etapas del mejoramiento genético, sirviendo de apoyo en la planeación, establecimiento de ensayos y manejo, toma de datos genotípicos y análisis de éstos, además de la toma de decisiones en un programa de mejoramiento genético integrado. Si bien esta plataforma está diseñada para otros cultivos, se puede comenzar a desarrollar lo aplicable a caña de azúcar y aprovechar los avances logrados a la fecha. Por ejemplo, parte esencial de la interface está desarrollada con base en trigo, especie que posee un genoma complejo al igual que la caña de azúcar, razón por la que se podrían extrapolar resultados de una especie hacia la otra.

CONCLUSIONES

Derivado de problemas técnicos, agronómicos, ambientales y socioeconómicos, el sistema de producción de caña de azúcar en México está frente a serios desafíos que obligan

a buscar alternativas ingeniosas para convertir al sector en una palanca del desarrollo, basado en la eficiencia en el uso de los recursos. Las alternativas aquí planteadas tienen que ver principalmente con la producción de la materia prima, que dan un soporte científico a algunas acciones que se llevan a cabo de manera empírica o que no se encuentran en etapas primarias de desarrollo o aplicación, como serían los modelos estadísticos multivariados, el cultivo *in vitro* a escala comercial y la transformación genética. Sería muy recomendable analizar también lo referente a los procesos de transformación en fábrica y hacer los planteamientos de mejoras correspondientes.

LITERATURA CITADA

- Aguilar-Rivera N., Rodríguez D.A., Castillo-Morán, A., y Herrera-Solano, A. 2012. Sucroquímica, alternativa de diversificación de la agroindustria de la caña de azúcar. *Multiciencias* 12: 7-15.
- Caamal-Velázquez H. y Bello-Bello J. J. 2014. Micropropagación de caña de azúcar (*Saccharum spp.*). Colegio de Posgraduados. Champotón, Campeche, México. 23 p
- Birch R.G. 2013. Sugarcane Biotechnology: Axenic Culture, Gene Transfer, and Transgene Expression. *In: Moore P.H. and Botha F.C. (Eds.), Sugarcane: Physiology, Biochemistry & Functional Biology.* WILEY Blackwell. pp. 645-673
- CIDCA. 2013. Centro de Investigación y Desarrollo de la Caña de Azúcar (CIDCA): <http://www.camaraazucarera.org.mx/cidca.asp>
- CNPR. 2014. Estadísticas de la Agroindustria de la Caña de Azúcar 2004/2013. Confederación Nacional de Productores Rurales. Unión Nacional de Cañeros: http://www.caneros.org.mx/site_caneros/estadisticas/nacional.pdf
- Dal-Bianco M., Sampaio-Carneiro M., Takeshi-Hotta C., Giacomini-Chapola L., Hoffmann, H.P., Franco-García A.A., Mendes-Souza G. 2012. Sugarcane improvement: how far can we go? *Curr. Opin. Biotechnol.* 23: 265-270
- Dedemo G.C., Rodrigues F.A., Roberto P.G., Neto C.B., Franca S.C., Zingaretti S.M. 2013. Osmoprotection in sugarcane under water deficit conditions. *Plant Stress* 7: [http://www.globalsciencebooks.info/JournalsSup/images/Sample/PS_7\(1\)1-70.pdf](http://www.globalsciencebooks.info/JournalsSup/images/Sample/PS_7(1)1-70.pdf)
- FAOSTAT. 2013. Sugarcane production. Food and Agriculture Organization. Rome, Italy: <http://faostat.fao.org/site/339/default.aspx>
- Filippone M.P., Perera M.F., Salgado M., García M.G., Vellicce G.R., Castagnaro A.P. 2010. Diagnóstico molecular de enfermedades sistémicas de la caña de azúcar en la Argentina: ajuste metodológico y aplicaciones. *Rev. Ind. Agric. Tucumán* 87: 01-11
- Flores-Cáceres S. 2001. Las variedades de caña de azúcar en México. *ATAM, México, D. F.* 308 p
- Gómez-Merino F.C., Trejo-Téllez L.I., Senties-Herrera H.E. 2014. Sugarcane as a novel biofactory: potentialities and challenges. *In: Torres-Pacheco I. and Guevara R. (Eds.), Biosystems Engineering: Biofactories for Food Production in Century XXI.* Springer, Heidelberg, Germany. pp. 129-149
- González-Andrés F. and Pita-Villamil J.M. 2001. Conservación y Caracterización de Recursos Fitogenéticos. *MundiPrensa, Madrid, España.* 279 p
- IMPA. 1983. Programa de variedades. Objetivos, Importancia y Metodología Experimental. Instituto para el Mejoramiento de la Producción Azucarera-Cámara Nacional de la Industria Azucarera y Alcohólica, México, D. F. 63 p
- Manual Azucarero Mexicano. 2013. 56ª Edición. Compañía Editora del Manual Azucarero. México, D.F.
- Pérez-Ponce J.N., Suárez-Castellá M., Orellana-Pérez P. 2000. Posibilidades y potencial de la propagación masiva de plantas en Cuba. *Biología Vegetal* 1: 3-12
- Rea R., De Sousa-Vieira O. 2001. Interacción genotipo x ambiente y análisis de estabilidad en ensayos regionales de caña de azúcar en Venezuela. *Caña de Azúcar* 19: 3-15
- Rodríguez-Gross R., Pachades-Isaguirre Y., Bernal-Lizranza N., Jorge-Suárez H., García-Pérez H. 2012. Métodos estadísticos multivariados en el estudio de la interacción genotipo ambiente en la caña de azúcar. *Ciencia en su PC.* 1: 47-60
- Senties-Herrera H.E. 2013. Variabilidad genética y caracterización de variedades de caña de azúcar (*Saccharum spp.*). Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados, México. 142 p
- SIAZUCAR. 2009. Sistema Nacional de Información de la Industria Azucarera. Convención Nacional de Geografía 2009. <http://mapserver.inegi.org.mx/geografia/espanol/eventos/cng2009/memoria/cng2009/20091019%20siazucar%20para%20cng%20julio%20c-rivera.pps>
- Snyman S.J., Meyer G.M., Koch A.C., Banasiak M., Watt M.P. 2011. Applications of *in vitro* culture systems for commercial sugarcane production and improvement. *In Vitro Cell. Dev. Biol. Plant* 47: 234-249
- Srivastava M.K., Li C.N., Li Y.R. 2012. Development of sequence characterized amplified region (SCAR) marker for identifying drought tolerant sugarcane genotypes. *Austr. J. Crop Sci.* 6: 762-767
- Stepanova A.Y., Polyakova L.I., Dolgikh Y.I., Vartapetian B.B. 2002. The response of Sugarcane (*Saccharum officinarum*) cultured cells to anoxia and the selection of a tolerant cell line. *Rus. J. Plant Physiol.* 49: 406-412
- Thiebaut F., Rojas C.A., Almeida K.L., Grativol C., Domiciano G.C., Lamb C.R., Engler J.de A., Hermerly A.S., Ferreira P.C. 2012. Regulation of miR319 during cold stress in sugarcane. *Plant Cell Environ.* 35: 502-512
- UPOV. 2010. Notas explicativas sobre la definición de variedad con arreglo al acta de 1991 del convenio de la UPOV: http://www.upov.int/edocs/expndocs/es/upov_exn_var_1.pdf
- Waclawovsky A.J., Sato P.M., Lembke C.G., Moore P.H., Souza G.M. 2010. Sugarcane for bioenergy production: an assessment of yield and regulation of sucrose content. *Plant Biotechnol. J.* 8: 263-276
- Yadav D.V., Jain R., Rai R.K., 2010. Impact of Heavy Metals on Sugarcane. *In: I. Sherameti and A. Varma (Eds.), Soil Heavy Metals-Soil Biology.* pp. 339-367