



# **COLEGIO DE POSTGRADUADOS**

**INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS**

**CAMPUS MONTECILLO**

**POSTGRADO EN RECURSOS GENÉTICOS Y PRODUCTIVIDAD**

**GENÉTICA**

**VARIABILIDAD GENÉTICA Y CARACTERIZACIÓN  
DE VARIETADES DE CAÑA DE AZÚCAR  
(*Saccharum* spp.)**

**HÉCTOR EMMANUEL SENTÍES HERRERA**

**T E S I S**  
PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL  
PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRO EN CIENCIAS**

**MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO**

2013

La presente tesis titulada **Variabilidad genética y caracterización de variedades de caña de azúcar (*Saccharum spp.*)**, realizado por el alumno **Héctor Emmanuel Senties Herrera**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS  
RECURSOS GENÉTICOS Y PRODUCTIVIDAD  
GENÉTICA

CONSEJO PARTICULAR

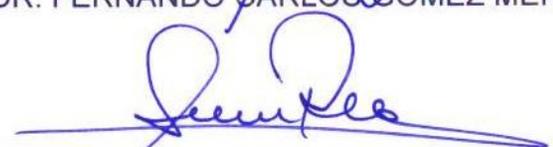
CONSEJERO

  
DR. APOLONIO VALDEZ BALERO

DIRECTOR DE TESIS

  
DR. FERNANDO CARLOS GÓMEZ MERINO

ASESORA

  
DRA. HILDA VICTORIA SILVA ROJAS

ASESORA

  
DRA. LIBIA IRIS TREJO-TÉLLEZ

Montecillo, Texcoco, Estado de México. Diciembre de 2013

## RESUMEN

### VARIABILIDAD GENÉTICA Y CARACTERIZACIÓN DE VARIEDADES DE CAÑA DE AZÚCAR (*Saccharum* spp.)

Héctor Emmanuel Sentíes Herrera, M. C.

Colegio de Postgraduados, 2013

El presente trabajo tuvo como objetivos describir el estado del arte del sistema de producción de la caña de azúcar en México y llevar a cabo un análisis de la variabilidad genética con que se cuenta en variedades comerciales que se producen en el país. Se encontró que el sistema de producción de caña de azúcar presenta un alto contraste en cuanto a las condiciones socioeconómicas, agronómicas y ambientales. Predomina el minifundismo, la baja escolaridad de los productores y la escasa y obsoleta tecnología utilizada tanto en campo como en fábrica. Las condiciones agronómicas pueden considerarse adecuadas, con cerca de 500 mil ha con alto potencial y otras 4.5 millones de ha con potencial medio para el desarrollo de este cultivo. El cambio climático y la apertura del mercado a edulcorantes alternativos representan serios retos para esta agroindustria. Además de la necesidad de elevar la productividad tanto en campo como en fábrica, el crédito y la tecnología de riego son factores determinantes para la lograr la competitividad de esta actividad. El sistema organizacional es muy completo pero a la vez complejo y complicado, con una reglamentación que dificulta el progreso hacia niveles de alta eficiencia. El sistema de producción ha tenido un desarrollo irregular en los últimos treinta años, con incrementos poco significativos en rendimientos de campo y fábrica, y una notable reducción en el número de ingenios. De igual manera, la base genética y el número de variedades comerciales se ha reducido significativamente, lo que hace necesaria la búsqueda de nuevas variedades con potencial para su uso como progenitores en los programas de mejoramiento genético. Del análisis filogenético realizado en este estudio se encontró un grupo polifilético, lo que indica que los híbridos tienen como ancestros a especies del género *Saccharum* y al género *Miscanthus*. Se identificó un grupo central perfectamente definido, el cual contiene tres híbridos comerciales: CP 72-2086, ITV 92-1424 y CP 44-10, todos los cuales tienen su origen en Canal Point, Florida, junto con una especie emparentada con el género *Miscanthus*, lo cual aporta mayor variabilidad genética.

**Palabras clave:** *Saccharum*, Agroindustria Mexicana, Rendimiento en azúcar, Enfoques agronómicos, Andropogoneae, Filogenia

## ABSTRACT

### GENETIC VARIABILITY AND CHARACTERIZATION OF SUGARCANE (*Saccharum* spp.) VARIETIES

Héctor Emmanuel Sentías Herrera, M. Sc.

Colegio de Postgraduados, 2013

This study aimed to describe the state of the art of the sugarcane production system in Mexico and to carry out an analysis of the genetic variability found in sugarcane varieties grown in the country. It was found that the sugarcane production system in Mexico shows high contrasts regarding socioeconomic, agronomic and environmental conditions. Smallholders, low education levels of growers as well as inefficient and obsolete technology that characterize both field and mill systems. Agronomic conditions are considered as adequate, with nearly 500 thousand hectares with high potential and more than 4.5 million hectares with an average potential to grow and produce sugarcane in Mexico. Climate change and the introduction of alternative sugars represent serious challenges for the sugarcane industry. In addition to the need of increasing productivity both in field and mills, credits and irrigation technology are the key factors to reach competitiveness at a global level. The organizational structure is complete but complex and complicated too, with public policies that impede a real growth of the activity. This production system has had an irregular development during the last 30 years, with poor advances in field and mills yields, and an evident reduction in the number of mills. Similarly, the genetic basis of sugarcane varieties has decreased notably. From the phylogenetic analysis performed herein, a polyphyletic group was identified, which indicates that the commercial varieties grown in Mexico have common ancestors both within the genus *Saccharum* and *Miscanthus*. A central group well defined in the phylogenetic tree was identified, and encompasses the commercial hybrids CP 72-2086, ITV 92-1424 and CP 44-10, together with a species close related to *Miscanthus*, which gives rise to a higher genetic variability.

**Key words:** *Saccharum*, Mexican Agroindustry, Sugar yield, agronomic approaches, Andropogoneae, Phylogeny

## *DEDICATORIA*

### *A Dios, de quien viene la sabiduría*

*Toda sabiduría viene del Señor, y con él permanece eternamente. La arena de los mares, las gotas de las lluvias, los días de la eternidad, ¿quién los podrá contar? La altura del cielo, la anchura de la tierra, la profundidad del abismo, ¿quién lo podrá medir? Antes que todo fue creada la sabiduría, la prudencia inteligente existe desde la eternidad. La fuente de sabiduría, ¿a quién fue revelada? Y sus recursos, ¿quién los conoce? Solo hay un sabio, temible en extremo, que se sienta en su trono, y es el Señor (Eclesiástico 1, 1-8).*

### *A mi madre Betty, que Dios la tenga en su Gloria*

*¿No estoy aquí yo, que soy tu madre? Siempre y en cada lugar estás conmigo. Muchas mujeres han obrado maravillas, pero tú las superas a todas (Proverbios 31, 29).*

### *A mi Mamá Ina y papá Hector*

*Jesús, al ver a la Madre y junto a ella al discípulo que más quería, dijo a la Madre: "Mujer, ahí tienes a tu hijo". Después dijo al discípulo: "Ahí tienes a tu madre" (Juan 19, 26-27). Tu palabra es antorcha de mis pasos y luz en mi camino (Salmo 119, 105).*

*A mi hermanita Betty*

*El que dice: "Yo amo a Dios", y odia a su hermano, es un mentiroso. ¿Cómo puede amar a Dios, a quien no ve, si no ama a su hermano, a quien ve? El mismo nos ordenó: el que ame a Dios, ame también a su hermano (1 Juan 4, 20-21).*

*A mis tíos Tito, Jessica, Yadira, Pedro, Carlos, Nuvia, Juan y Eneida*

*No temas, pues yo estoy contigo; no mires con desconfianza, pues yo soy tu Dios; yo te doy fuerzas, yo soy tu auxilio, y con mi diestra victoriosa te sostendré (Isaías 41, 10).*

*A mis primos que son mis hermanos: Carla, Carlos, Regina, Cesar, Yesica, Hector, Pedro, Marcos, Isabela e Ian*

*Jesús le respondió: "Amarás al Señor tu Dios con todo tu corazón, con toda tu alma y con toda tu mente (Mateo 22, 37).*

*A mi novia Ana Patricia*

*Una mujer fuerte. ¿quién la encontrará? Es de más valor que cualquier joya (Proverbios 31, 1).*

*Sabiendo que jamás existirá una forma de agradecerles una vida de lucha, sacrificio y esfuerzos constantes; mi esfuerzo es inspirado en ustedes, que son mi único ideal.*

*Héctor Emmanuel Senties Herrera*

## AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología CONACY, por brindar el apoyo económico y la oportunidad de seguir superándome.

Al Colegio de Postgraduados, campus Montecillo y Córdoba, al laboratorio de Biotecnología de Semillas y a las líneas prioritarias de Investigación LPI 5 *Biotecnología Microbiana, Vegetal y Animal*, por la infraestructura y facilidades brindadas para la realización de este trabajo.

Al Dr. Apolonio Valdez Balero, agradezco su apoyo, amistad y las valiosas aportaciones que me dio durante mi trabajo de investigación.

Al Dr. Fernando Carlos Gómez Merino, quien me ha enseñado que en esta vida no existen límites, solo los que uno mismo se quiere poner. Gracias por ser mi profesor, darme su confianza y sobre todo ser un gran amigo. Es un gran ejemplo de superación profesional y vida.

A la Dra. Hilda Victoria Silva Rojas, por ser un ejemplo de fuerza y trabajo, gracias por su amistad, compartir sus experiencias y dedicar el tiempo necesario durante mi formación profesional.

A la Dra. Libia Iris Trejo Téllez, gracias por su amistad y confianza, y por mostrarme que de algo muy pequeño se pueden hacer grandes cosas. Es una excelente persona, nunca cambie.

A mi pariente Roberto Loyo Joachin, gracias por tu apoyo, tu amistad, más que mi tío-primo, te considero un gran amigo.

Al CIDCA, por facilitarme los materiales vegetales de caña de azúcar para poder realizar el presente proyecto de investigación.

Al Dr. Carlos Flores Revilla, por sus distinguidas atenciones y disponibilidad para llevar a cabo este proyecto de investigación.

Al Ing. Carlos Rangel, por su buena amistad y apoyo en la realización de este proyecto de investigación.

A los doctores Abel Muñoz Orozco, Porfirio Ramírez Vallejo, Fernando Castillo González, J. Jesús García Zavala, Carlos Miguel Becerril Pérez, Florentino Víctor Conde Martínez, Tarsicio Corona Torres, Aleida Selene Hernández Cázares, Adriana Contreras Oliva, Joel Velasco Velasco, Juan Salazar Ortiz, Victorino Morales Ramos, gracias por su amistad y sus buenos consejos, que ayudaron en mi trabajo de investigación.

Al Dr. Carlos Narciso Gaytán, gracias por ser mi cuatacho, y sus buenos consejos para realizar mi estudio de postgrado.

A la maestra Natalia Real Luna, por ser una excelente amiga y consejera, gracias por su invaluable amistad.

A la Dra. Soledad García Morales, por compartir su conocimiento en el laboratorio y su buena disposición para apoyarme.

A la Sra. Martha y Silvia del Laboratorio de Biotecnología de Semillas, por brindarme su amistad y apoyo incondicional.

A la Sra. Dalila de genética y la Sra. Alicia de semillas, gracias por su amistad y apoyo a lo largo de mi formación profesional.

A mis amigos: Berza, Amado, Sandra, Lorena, Ana, Yolanda, Mario, Braulio, Rocio, Mayra García, Nery, Yuridia, Luis Castruita, Danilo, Edith, Perlita, Jorge, Claudia, José de Jesús, Alejandra Contreras, Bere, Kenia, César, Bruno, Rosario, Toño, Manuel, Inocente, Pedrito, Juan, Regina, Berenice, Viridiana, Enrique, Jesús, y Israel, gracias por su amistad y los buenos momentos vividos en esta etapa.

## CONTENIDO

RESUMEN	I
ABSTRACT	II
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTOS	V
ÍNDICE DE CUADROS	XI
ÍNDICE DE FIGURAS	XIII
<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN GENERAL</b>	<b>1</b>
LITERATURA CITADA	5
<b>CAPÍTULO 2. EL SISTEMA AGROINDUSTRIAL DE LA CAÑA DE AZÚCAR EN MÉXICO: ESTADO ACTUAL, DESAFÍOS Y OPORTUNIDADES</b>	<b>7</b>
RESUMEN	7
ABSTRACT	9
1. INTRODUCCIÓN	11
2. HISTORIA E IMPORTANCIA ECONÓMICA ACTUAL DE LA CAÑA DE AZÚCAR EN MÉXICO	12
3. EL SISTEMA DE PRODUCCIÓN DE CAÑA DE AZÚCAR EN MÉXICO	16
3.1. FACTORES SOCIOECONÓMICOS	17
3.2. FACTORES AMBIENTALES	25
3.3. FACTORES AGRONÓMICOS	44
3.3.1. PLAGAS Y SU MANEJO	45
3.3.2. ENFERMEDADES Y SU MANEJO	53
3.3.3. MALEZAS Y SU MANEJO	56

4. ESTRUCTURA DEL SISTEMA AGROINDUSTRIAL AZUCARERO MEXICANO	65
5. LEGISLACIÓN Y ORGANIZACIONES DE LA INDUSTRIA AZUCARERA MEXICANA	72
6. SEGUROS AGRÍCOLAS Y PARA CAÑA DE AZÚCAR EN MÉXICO	73
7. PRODUCTIVIDAD HISTÓRICA DE CAÑA DE AZÚCAR Y AZÚCAR EN MÉXICO	76
8. APOYOS GUBERNAMENTALES PARA INVESTIGACIÓN EN CAÑA DE AZÚCAR	78
9. MEJORAMIENTO GENÉTICO DE LA CAÑA DE AZÚCAR EN MÉXICO	81
9.1. HIBRIDACIÓN	82
9.2. SELECCIÓN	83
9.3. AVANCES EN EL MEJORAMIENTO GENÉTICO DE CAÑA DE AZÚCAR EN MÉXICO	87
10. NUEVAS DIRECTRICES EN LA CADENA DE VALOR DE LA CAÑA DE AZÚCAR	90
11. CONCLUSIONES	94
LITERATURA CITADA	97
<b>CAPITULO 3. ANÁLISIS FILOGENÉTICO DE VARIEDADES DE CAÑA DE AZÚCAR (<i>SACCHARUM</i> SPP.) EN MÉXICO</b>	113
RESUMEN	113
ABSTRACT	114
1. INTRODUCCIÓN	115
2. MATERIALES Y MÉTODOS	120
2.1 MATERIAL VEGETAL	120

2.2. EXTRACCIÓN DE ADN	121
2.3. AMPLIFICACIÓN MEDIANTE PCR	123
2.4. LIMPIEZA DE PRODUCTOS DE PCR	124
2.5. SECUENCIACIÓN DIRECTA DE PRODUCTOS DE PCR	124
2.6. ANÁLISIS FILOGENÉTICO	125
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	128
3.1. EXTRACCIÓN DE ADN GENÓMICO	128
3.2. AMPLIFICACIÓN MEDIANTE PCR	128
3.3. SECUENCIACIÓN	129
3.4. ANÁLISIS FILOGENÉTICO	130
4. CONCLUSIONES	133
LITERATURA CITADA	135

## ÍNDICE DE CUADROS

### CAPÍTULO 2

<b>Cuadro 1.</b> Indicadores productivos y económicos por estados productores de caña de azúcar en México.	18
<b>Cuadro 2.</b> Valor agregado de estados productores y no productores de caña de azúcar en México.	19
<b>Cuadro 3.</b> Principales características climáticas y edáficas de las seis regiones productoras de caña de azúcar en México.	27
<b>Cuadro 4.</b> Indicadores físicos y químicos de los suelos y sus porcentajes de cobertura en las zonas de abasto de los ingenios azucareros de México.	38
<b>Cuadro 5.</b> Distribución de la frecuencia de la concentración de N, P, K, Ca y Mg en suelos de áreas de abasto de ingenios azucareros en México.	40
<b>Cuadro 6.</b> Distribución de la frecuencia de la concentración de Fe, Cu, Zn y Mn en suelos de áreas de abasto de ingenios azucareros en México.	42
<b>Cuadro 7.</b> Plagas, parasitoides y predadores más importantes en el cultivo de la caña de azúcar en México.	48
<b>Cuadro 8.</b> Enfermedades más comunes en el cultivo de la caña de azúcar en México.	54
<b>Cuadro 9.</b> Principales especies de malezas en el cultivo de caña de azúcar en México.	57

<b>Cuadro 10.</b> Productos registrados por el Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria (SENASICA) para el manejo integrado de malezas y plagas de la caña de azúcar en México.	61
<b>Cuadro 11.</b> Grupos Industriales e Ingenios Independientes involucrados en la transformación de la materia prima de la caña de azúcar en México.	67
<b>Cuadro 12.</b> Síntesis del proceso de selección de variedades de caña de azúcar en México.	86
<b>CAPÍTULO 3</b>	
<b>Cuadro 1.</b> Variedades de caña de azúcar utilizadas para la identificación filogenética.	120
<b>Cuadro 2.</b> Especies y especímenes voucher utilizados en la reconstrucción filogenética.	126

## ÍNDICE DE FIGURAS

### CAPÍTULO 2

<b>Figura 1.</b> Entidades federativas de México en donde se cultiva la caña de azúcar.	15
<b>Figura 2.</b> Índice de marginación de los estados productores de caña de azúcar en México.	20
<b>Figura 3.</b> Índices de marginación de municipios productores y no productores de caña de azúcar hacia el interior de los 15 estados productores de este cultivo en México.	22
<b>Figura 4.</b> Regiones productoras de caña de azúcar en México.	26
<b>Figura 5.</b> Zonas con potencial para el cultivo de caña de azúcar en México.	43
<b>Figura 6.</b> Incremento de la superficie agrícola asegurada de 2008 a 2012.	74
<b>Figura 7.</b> Porcentaje de superficie asegurada por cultivo en México.	75
<b>Figura 8.</b> Incremento en la producción total de caña de azúcar y la superficie sembrada en las últimas tres décadas en México.	77
<b>Figura 9.</b> Rendimientos caña de azúcar en campo y fábrica en las últimas tres décadas en México.	77
<b>Figura 10.</b> Montos económicos gubernamentales destinados a la investigación en caña de azúcar en México en el periodo de 2003 a 2013.	79
<b>Figura 11.</b> Coordinación del programa de mejoramiento genético y selección de variedades de caña de azúcar en México.	84

<b>Figura 12.</b> Distribución porcentual de variedades de cañas de azúcar extranjeras y nacionales en México de 1980 a 2012.	89
---	----

### **CAPÍTULO 3**

<b>Figura 1.</b> Distribución de las variedades de caña de azúcar en las regiones productoras de México.	121
--	-----

<b>Figura 2.</b> Posición y dirección de los iniciadores universales c y f utilizados para la amplificación del intrón <i>trn</i> L y el espacio intergénico <i>trn</i> L-F.	123
--	-----

<b>Figura 3.</b> ADN genómico obtenido de las 12 variedades de caña de azúcar, con el método modificado de extracción de ADN descrito por Doyle y Doyle (1990).	128
---	-----

<b>Figura 4.</b> Productos amplificados PCR con los iniciadores universales c y f.	129
--	-----

<b>Figura 5.</b> Árbol filogenético construido a partir de secuencias del intrón <i>trn</i> L y el espacio intergénico <i>trn</i> L-F y accesiones con el método de Máxima Parsimonia. Se utilizaron secuencias de referencia depositadas en GenBank.	132
---	-----

## **CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN GENERAL**

La caña de azúcar (*Saccharum* spp.) es un cultivo ampliamente distribuido en el mundo. Actualmente se produce en más de 130 países y territorios y la superficie cosechada se distribuye en 7,638 millones de hectáreas en Asia, 3,519 millones en América del Sur, 2,300 millones en Centroamérica, 1,060 millones en África, 0.489 millones en Oceanía y 0.393 millones en América del Norte (Aguilar-Rivera, 2011). Los principales productores son Brasil (30% de la producción), India (21%), China (7%), Tailandia (4%), Pakistán (4%), México (3.5%), Colombia (3%), Australia (3%), Estados Unidos (2%) e Indonesia (2%). La producción mundial de este cultivo al igual que la superficie cultivada no ha tenido cambios relevantes, y ascienden a 1,558 millones de toneladas (Aguilar-Rivera et al., 2012).

En México, la agroindustria azucarera se haya muy arraigada a procesos culturales, sociales y políticos, y se encuentra espacialmente distribuida en seis regiones y 15 estados: Región Noroeste (Sinaloa), Región Pacífico (Nayarit, Jalisco, Michoacán y Colima), Región Centro (Morelos y Puebla), Región Noreste (Tamaulipas y San Luis Potosí), Región Golfo (Veracruz, Tabasco y Oaxaca) y Región Sur (Campeche, Chiapas y Quintana Roo) y 227 municipios que aportan la materia prima a 55 ingenios azucareros. Esta agroindustria tiene un gran impacto socioeconómico en 12 millones de personas al generar 400 mil empleos directos, distribuidos en 165 mil productores de caña, 176 mil trabajadores de campo, 28 mil transportistas, 23 mil obreros sindicalizados, 16 mil en labores administrativas, entre otros. El valor de la producción promedio de esta agroindustria en las últimas zafas es de 33 mil millones de pesos que representa el 0.5% del PIB nacional,

2.5% del PIB manufacturero, 11.6% sector primario y 12% sector alimentario. El principal derivado, el azúcar o sacarosa (tipos mascabado, estándar, blanco popular y refinado) tiene un consumo nacional promedio de 5.6 millones de toneladas (aproximadamente 47 kg consumo per cápita por año), distribuido en 36.4% industrias de refrescos, jugos y bebidas, 9.6% industrias de confitería, repostería, conservas, enlatados y productos lácteos; 37.1% como consumo directo y el resto en otros usos. Asimismo, la sacarosa aporta 17% de las calorías diarias de la población mexicana (CNIAA, 2011). Sin embargo, la agroindustria mexicana del azúcar ha afrontado varias crisis económicas, originadas por un desajuste entre la producción de caña de azúcar y sacarosa; el consumo nacional, las limitadas exportaciones y la importación. El diferencial entre ambas variables ha tenido fuertes efectos desestabilizadores, debido a que toda la rama azucarera del país se desarrolló orientada hacia el mercado interno, sin embargo, la creación de empresas a partir de los subproductos del proceso del azúcar (ingenios sucroalcoholeros o biorefinerías) y los biocombustibles como el etanol, que ofrece la posibilidad de sustituir o disminuir el consumo de gasolina y componentes oxigenantes, ha sido discutido ampliamente por los actores de la industria, académicos e investigadores como una alternativa y una estrategia lógica y económicamente ventajosa de desarrollo para incrementar la competitividad y la sostenibilidad del sector, y hacia él deben dirigirse los objetivos de reorganización, reestructuración y diversificación de la producción en los ingenios azucareros. Sin embargo, a pesar de sus múltiples ventajas, su competitividad es muy limitada en comparación con su potencial y las regiones cañeras continúan en la inercia productiva de caña y azúcar (Aguilar-Rivera, 2013).

La caña de azúcar es una planta que presenta una amplia variabilidad y una reconocida capacidad de adaptación cuando es sometida a condiciones desfavorables de clima, suelo y manejo. El rendimiento promedio a escala global es de 80 t ha<sup>-1</sup> (FAOSTAT, 2013), aunque se ha calculado que potencialmente se podrían obtener más de 800 t ha<sup>-1</sup> en biomasa fresca y 470 t ha<sup>-1</sup> en biomasa seca (Yadav et al., 2010), por lo que aún es factible aumentar rendimientos, especialmente si se hace uso nuevas herramientas biotecnológicas.

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 lograr impactos en campo, y las iniciativas para caracterizar etiquetas de secuencias expresadas (EST) han tenido poco impacto en los programas de mejoramiento. 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 a la degradación 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. 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 contribuirá 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; Gómez-Merino et al., 2014).

En este trabajo de tesis se analiza el estado actual por el que atraviesa la cadena de valor de la caña de azúcar en México, así como sus potencialidades y desafíos que permitan consolidarle como una actividad eficiente y competitiva a nivel global. Además, se reporta el análisis filogenético de variedades que forman parte del banco de germoplasma nacional, cuyos materiales podrían en mucho contribuir a mejorar el indicador de rendimiento tanto en campo como en fábrica a nivel nacional. En cada capítulo se formulan discusiones de resultados y conclusiones correspondientes.

## LITERATURA CITADA

- Aguilar-Rivera, N., 2011.** Competitividad de la agroindustria azucarera de la huasteca México. Tesis de Doctorado. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. 502 p.
- Aguilar-Rivera, N., 2013.** Análisis de productividad de etanol de caña de azúcar en ingenios azucareros de México. *Ciencia Ergo Sum* 20: 17-28.
- Aguilar-Rivera, N., Arturo-Rodríguez, A., Castillo-Morán, A., Herrera-Solano, A., 2012.** Sucroquímica, alternativa de diversificación de la agroindustria de la caña de azúcar. *Multiciencias* 12: 7-15.
- CNIAA, 2011.** Manual Azucarero Mexicano. Cámara Nacional de las Industrias Azucarera y Alcohólica. Edición 2011. México, D. F.
- FAOSTAT, 2013.** Sugarcane production. Food and Agriculture Organization. Rome, Italy. <<http://faostat.fao.org/site/339/default.aspx>> (consultado octubre 2013).
- 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. In press.
- Dal-Bianco, M., Sampaio-Carneiro, M., Takeshi-Hotta, C., Giacomini-Chapola, L., Hoffmann, H.P., Franco- Garcia, A.A., Mendes-Souza, G., 2012.** Sugarcane improvement: how far can we go? *Current Opinion in Biotechnology* 23, 265-270.

**Yadav D.V., R. Jain and R. K. Rai., 2010.** Impact of Heavy Metals on Sugarcane.

In: I. Sherameti and A. Varma (Eds.), Soil Heavy Metals-Soil Biology. pp.

339-367.

## **CAPÍTULO 2. EL SISTEMA AGROINDUSTRIAL DE LA CAÑA DE AZÚCAR EN MÉXICO: ESTADO ACTUAL, DESAFÍOS Y OPORTUNIDADES**

### **RESUMEN**

El cultivo de la caña de azúcar en México se desarrolla en un amplio rango de condiciones socioeconómicas, medioambientales y agronómicas, lo que en las últimas tres zafras (2010/2011, 2011/2012 y 2012/2013) ocasionó rendimientos en campo que fluctuaron de 36 a 125 t ha<sup>-1</sup> (variación superior al 347%), con un rendimiento medio en el periodo de 70.2 t ha<sup>-1</sup>, el cual se sitúa muy por debajo del promedio mundial de 80 t ha<sup>-1</sup>. Para superar los rezagos actuales tanto en campo como en fábrica, se han emprendido esfuerzos importantes a través de innovaciones tecnológicas, organizacionales, comerciales y gerenciales. En este capítulo se reportan el estado del arte en que se encuentra la agroindustria mexicana de la caña de azúcar, así como los retos más apremiantes y las oportunidades que se vislumbran en el mediano y largo plazo. Dentro de los indicadores encontrados destaca el hecho de que el área total que se destina a la producción de caña de azúcar en México es cercana a las 800 mil hectáreas, y a través de esta actividad se generan cerca de 1 millón de empleos directos y más de 2.2 millones de empleos indirectos. La actividad azucarera se realiza en 15 de las 32 entidades federativas del país, en 227 municipios que representan el 9.2% del total de las municipalidades a escala nacional. Este sector constituye una de las actividades más importantes en términos de desarrollo económico y social en las comunidades rurales, ya que genera un valor aproximado a 34 mil millones de pesos, y su producción conforma el 0.4% del PIB nacional, 2.5% del manufacturero y 11.6% del primario. Los rendimientos promedio tanto en campo

como en fábrica están por debajo de niveles competitivos internacionales, en tanto que la rápida penetración del jarabe de maíz de alta fructosa y los efectos del cambio climático representa las mayores amenazas de esta agroindustria. Existe una grave desintegración de los procesos productivos en campo, industria, comercio y consumo directo e indirecto de azúcar de caña, con marcados contrastes respecto a costos de producción y niveles de competitividad. Rezago tecnológico, baja inversión, altos costos de transformación y deficiencias en las escalas de producción, son factores que restan capacidad al sector para aprovechar sus recursos y articular los eslabones de transformación para producir de un modo más eficiente y competitivo. La influencia política ha impuesto un marco normativo poco óptimo para alcanzar el potencial proyectado. El Tratado de Libre Comercio de América del Norte (NAFTA) ocasiona fluctuaciones en transacciones y la factibilidad de exportar hacia Estados Unidos, lo que reduce los inventarios en México y provoca desordenes en los precios. Dentro de las recomendaciones que derivan de esta investigación están el aumentar la oferta nacional de azúcar; mejorar el desempeño de los indicadores en campo y fábrica en el mediano (regiones con competitividad media) y largo plazo (en regiones de competitividad baja); evitar la volatilidad de precios y especulación; generar una base de datos en tiempo real sobre oferta y demanda; y modificar la normatividad que regula el sector con el objeto de hacerlo más competitivo.

**Palabras clave:** *Saccharum*, Agroindustria Mexicana, Rendimiento en Azúcar, Enfoques Agronómicos

## **CHAPTER 2. THE AGRO SUGARCANE SYSTEM IN MEXICO: CURRENT STATUS, CHALLENGES AND OPPORTUNITIES**

### **ABSTRACT**

The cultivation of sugar cane in Mexico takes place in a wide range of socio-economic, environmental and agronomic conditions, which in the past three harvests (2010/2011, 2011/2012 and 2012/2013) resulted in yields that ranged from field 36-125 t ha<sup>-1</sup> (greater than 347% variation), with an average yield in the period of 70.2 t ha<sup>-1</sup>, which is well below the world average of 80 t ha<sup>-1</sup>. To overcome the current lags both field and mill, have undertaken significant efforts through technological, organizational, commercial and managerial innovations. This chapter describes the state of art in the Mexican agribusiness sugarcane is located, as well as the most pressing challenges and opportunities that are emerging in the medium and long term are reported. Among the indicators found out that the total area is used for the production of sugar cane in Mexico is closer to 800 thousand hectares, and through this activity close to 1 million jobs and overhead generated 2.2 million indirect jobs . The sugar industry is performed in 15 of the 32 states of the country in 227 municipalities representing 9.2% of all municipalities nationwide. This sector is one of the most important activities in terms of economic and social development in rural communities, generating more than 3 million dollar worth, and its production makes up 0.4% of Gross National Product (GNP), 2.5% in manufacturing and 11.6% primary. Average yields in both field and mill are at below internationally competitive levels, while the rapid penetration of corn syrup, high fructose is one of the greatest threats to the agricultural industry. There is a severe disintegration of production processes in the

field, industry, commerce and direct and indirect consumption of sugarcane, with marked contrasts regarding production costs and levels of competitiveness. Technological backwardness, low investment, high processing costs and deficiencies in production scales are factors remaining sector capacity to leverage their resources and articulating the links transformation to produce more efficiently and competitively. Political influence has imposed a suboptimal policy framework to achieve the projected potential. The North-American Free Trade Agreement (NAFTA) causes fluctuations in transactions and the feasibility of exporting to the United States, reducing inventories in Mexico and causes disorders in prices. Among the recommendations derived from this research are the to increase domestic sugar supply, improve the performance of indicators in field and mill in the medium (regions with average competitiveness) and long term (in regions of low competitiveness); avoid price volatility and speculation; generate a database in real-time supply and demand, and modify regulations governing the sector in order to make it more competitive.

**Keywords:** *Saccharum*, Mexican Agribusiness, Sugar Yield, Agronomic Approaches

## 1. INTRODUCCIÓN

La caña de azúcar (*Saccharum* spp.) es la planta cultivada más productiva en el mundo dada su mayor eficiencia en su capacidad para convertir energía luminosa en carbohidratos en comparación con cualquier otro cultivo, y su habilidad para almacenar sacarosa en su tallo, contribuyendo al 75% del total de azúcar que se produce en el mundo; el restante 25% es producido por la remolacha azucarera (*Beta vulgaris* L.). Estas características, además de su alta capacidad para producir biomasa y su fácil cultivo, hacen de la caña de azúcar una de las materias primas agrícolas más interesantes a escala global, de utilidad no solo en la alimentación humana y animal, sino también en la generación de insumos para bioenergía y la industria química, entre otros. Su cultivo cubre una superficie superior a los 25.4 millones de hectáreas en más de 130 países y territorios, con una producción de más de 1,800 millones de toneladas, lo que le consolida como la planta con mayor extensión cultivada en el mundo (FAOSTAT, 2013). El rendimiento promedio mundial es de aproximadamente 80 t ha<sup>-1</sup> (Waclawovsky et al., 2010), aunque se estiman rendimientos teóricos potenciales de 470 t ha<sup>-1</sup> en materia seca u 805 t ha<sup>-1</sup> de caña en fresco (Yadav et al., 2010; Dal-Bianco et al., 2012), lo que da soporte a la hipótesis de que aún se pueden elevar los rendimientos en el futuro. Este enorme potencial de rendimiento hace de la caña de azúcar un cultivo multipropósito (alimento, forraje, bioetanol, sucroquímica, etc.) de relevancia mayúscula para su aprovechamiento, incluyendo su potencial uso como biofábrica para la síntesis de azúcares de alto valor, biopolímeros y proteínas farmacológicas (Gómez-Merino et al., 2014).

En México, la agroindustria de la caña de azúcar es una actividad que genera más de 930 empleos directos y 2.2 millones de empleos indirectos, se desarrolla en 15 entidades federativas y 227 municipios (9.2% del total de las municipalidades en México) (SE, 2012) que se agrupan en seis zonas productoras (Noreste, Pacífico, Centro, Noroeste, Golfo y Sur) (Aguilar-Rivera et al., 2012). En esta cadena de valor, existen enormes fortalezas relacionadas con la calidad del suelo y lo propicio del clima donde se desarrolla, así como una organización de productores primarios e industriales bien estructurada, pero a la vez compleja. Sin embargo, también existen grandes retos que tendrán que abordarse a fin de asegurar el éxito presente y futuro de esta cadena de valor. En este capítulo se analiza el estado del arte en que se encuentra el sistema de producción de la caña de azúcar en México, y se describen sus fortalezas y retos presentes y futuros a fin de asegurar su consolidación, a través de estrategias de innovación que permitan elevar su productividad y rentabilidad.

## **2. HISTORIA E IMPORTANCIA ECONÓMICA ACTUAL DE LA CAÑA DE AZÚCAR EN MÉXICO**

El desarrollo de la industria azucarera a nivel mundial ha evolucionado para constituirse en una importante actividad económica, generadora de empleos y divisas para los países productores y exportadores. Desde su introducción en México hace cerca de 500 años, la caña de azúcar es parte integral de la economía nacional. Aunque su desarrollo ha pasado por graves etapas críticas desde sus inicios, actualmente se ha constituido como una de las actividades agroindustriales de mayor tradición y trascendencia en el desarrollo económico del

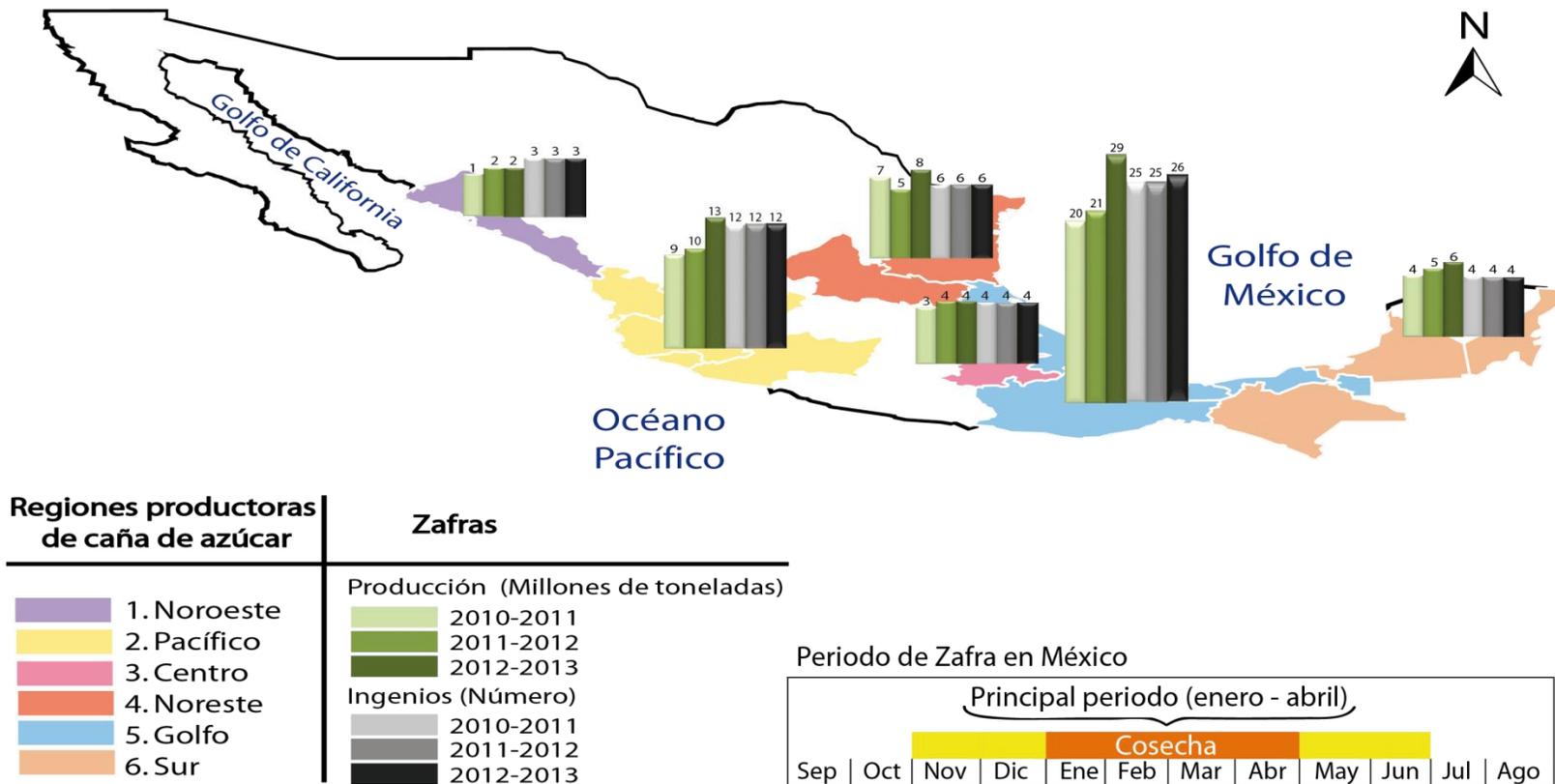
país (Aguilar-Rivera, 2013), que sin embargo, enfrenta retos importantes para consolidarse y mantenerse como una cadena de valor innovadora, eficiente y competitiva a escala global.

México es actualmente el sexto productor mundial azúcar y de caña de azúcar (FAOSTAT, 2013; ZAFRANET, 2013), aunque no es un país netamente exportador de este insumo y la actividad se sustenta en el mercado y consumo interno (Aguilar-Rivera, 2012). La zafra 2012/2013 se realizó en una superficie cercana a las 780 mil ha con 55 ingenios en operación, con una producción de 61.5 millones de toneladas de caña y un total de 6.7 millones de toneladas de azúcar (CNPR, 2013; CONADESUCA, 2013a). El consumo nacional aparente es de más de 5 millones de toneladas de azúcar anuales con un consumo per cápita anual de 47 kg (Aguilar-Rivera, 2012). Hoy día, esta agroindustria tiene una derrama económica de aproximadamente 33.8 millones de pesos, con un impacto económico y social en más de 3 millones de mexicanos (SE, 2012).

En 2011, los principales países productores de caña de azúcar fueron Brasil (42% de la producción mundial), India (19%), China (13%), Tailandia (5%), Pakistán (3%), México (3%), Filipinas (2%), Estados Unidos (2%), Australia (1%) y Argentina (1%) (FAOSTAT, 2013).

En México, el cultivo de la caña de azúcar se concentra en seis regiones (Figura 1): Golfo (Veracruz, Oaxaca y Tabasco), donde se genera el 47.8% de la producción nacional de caña de azúcar; Pacífico (Nayarit, Jalisco Michoacán y Colima), donde se produce el 20.4% de la producción nacional; Noreste (Sinaloa)

representa el 13.5%; las regiones Sureste (Chiapas, Campeche y Quintana Roo), Centro (Puebla y Morelos) y Noroeste (Tamaulipas y San Luis Potosí) son responsables del 18.1% restante (CONADESUCA, 2013b). El rendimiento promedio en estas zonas fue de 66.10 t ha<sup>-1</sup> en la zafra 2010/2011, 65.87 t ha<sup>-1</sup> en la zafra 2011/2012 y 78.74 t ha<sup>-1</sup> en la reciente zafra 2012/2013, lo que arroja un rendimiento promedio nacional de 70.2 t ha<sup>-1</sup> para estas tres últimas estaciones de cosecha. El periodo de cosecha o zafra en México tiene una duración de ocho meses, e inicia en noviembre, acrecienta la cosecha en enero, febrero, marzo y abril, y finaliza entre mayo a junio.



**Figura 1.** Entidades federativas de México en donde se cultiva la caña de azúcar. Las columnas verdes sobre las entidades representan la producción de caña de azúcar por zafra en millones de toneladas, en tanto que el número de ingenios azucareros que operaron se representa en columnas grises, ambos indicadores para los tres últimos ciclos de cosecha: 2010/2011; 2011/2012; 2012/2013. Las seis regiones productoras que agrupan los 15 estados donde se lleva a cabo esta actividad están indicados en diferentes colores (Blackaller-Ayala, 2011; CNIAA, 2013; CONADESUCA, 2012 y 2013b).

La ausencia de un modelo nacional de diversificación así como de información y gestión de conocimiento en la materia constituyen los principales obstáculos para consolidar una agroindustria cañera sustentable, eficiente y competitiva (Aguilar-Rivera et al., 2010). Lo anterior representa un gran desafío, y hace necesario el desarrollo de estrategias pertinentes para aprovechar el máximo potencial de la caña de azúcar, ante fenómenos como el crecimiento de los mercados externos e internos, el incremento en el precio del petróleo, la aparición y demanda de edulcorantes alternos y la demanda de biocombustibles, lo que genera mayores presiones sobre los sistemas de producción de este cultivo y obliga a buscar alternativas innovadoras para esta cadena de valor, bajo enfoques sustentables y con responsabilidad social (Gómez-Merino y Hernández-Anguiano, 2013). Si bien en la última década se ha observado un aumento sustancial en la producción de caña de azúcar, pues por ejemplo, en 2012 la superficie sembrada aumentó un 10% respecto al año anterior y se espera el mismo crecimiento para los próximos años (CNPR, 2013), aún persisten rezagos significativos en toda la cadena de valor, que varían desde la baja escolaridad de los productores y la escasa eficiencia en los programas gubernamentales para apoyarlos, hasta una obsoleta infraestructura industrial, una inadecuada normatividad y un sistema comercial desventajoso, factores que serán abordados con mayor detalle más adelante.

### **3. EL SISTEMA DE PRODUCCIÓN DE CAÑA DE AZÚCAR EN MÉXICO**

El sistema de producción de caña de azúcar en México está definido en función de la interacción de múltiples factores socioeconómicos, ambientales y agronómicos

de cada región cañera, así como de la magnitud e intensidad en la que éstos se presenten.

### **3.1. FACTORES SOCIOECONÓMICOS**

La industria azucarera mexicana posee un modelo histórico-estructural que representa el funcionamiento de un sistema socioeconómico tradicional y arraigado tras el triunfo de la Revolución Mexicana. Este modelo se caracteriza por una oferta de mercancías de bajo valor agregado y bajo contenido tecnológico (azúcar mascabado, estándar, ron blanco y melazas) y una demanda de bienes de alta tecnología y valor comercial, que genera una balanza comercial deficitaria.

A pesar de los problemas que enfrenta esta actividad, su impacto socioeconómico es de gran importancia para el desarrollo de estados y los municipios productores. Según estimaciones de la Secretaría de Economía (SE, 2012), la producción de caña de azúcar genera dividendos cercano a los 34 mil millones de pesos (Cuadro 1) y tiene un efecto positivo en las regiones donde se produce, causando un menor índice de marginación principalmente a nivel municipal, es decir, disminuyendo los rezagos en materia de ingreso, acceso a la educación, vivienda apropiada y otros servicios básicos, principalmente a nivel municipal (SE, 2012).

**Cuadro 1. Indicadores productivos y económicos por estados productores de caña de azúcar en México.**

Estado	Superficie sembrada (ha)	Superficie cosechada (ha)	Producción (t)	Rendimiento (t ha <sup>-1</sup> )	Precio por tonelada (\$MX)	Valor de la producción (MDP)
Campeche	10,801.92	9,048.36	426,811.14	47.17	674	287.75
Colima	14,449.25	14,444.25	1,368,014.92	94.71	702	960.48
Chiapas	30,350.14	30,350.14	2,819,528.01	92.90	701	1,977.47
Jalisco	80,119.72	75,820.72	6,254,451.19	82.49	649	4,056.46
Michoacán	14,522.75	14,515.75	1,188,985.08	81.91	639	759.64
Morelos	16,275.00	16,275.00	1,927,773.75	118.45	798	1,539.12
Nayarit	33,441.34	32,596.44	2,247,524.54	68.95	748	1,680.84
Oaxaca	67,989.14	62,014.19	3,482,716.91	56.16	656	2,285.58
Puebla	12,137.65	12,137.65	1,777,437.47	146.44	723	1,284.64
Quintana Roo	28,421.00	28,421.00	1,682,523.20	59.20	468	787.44
San Luis Potosí	64,158.00	64,001.00	2,529,319.52	39.52	666	1,685.80
Sinaloa	23,586.48	20,418.54	1,777,638.09	87.06	656	1,165.63
Tabasco	29,112.00	28,705.00	1,780,571.15	62.03	619	1,102.73
Tamaulipas	62,038.00	55,841.00	3,571,590.36	63.96	712	2,541.88
Veracruz	289,840.32	270,537.64	18,112,495.00	66.95	646	11,693.06
Nacional	777,242.71	735,126.68	50,964,485.13	69.33	664	33,819.99

Fuente: SIAP, 2012.

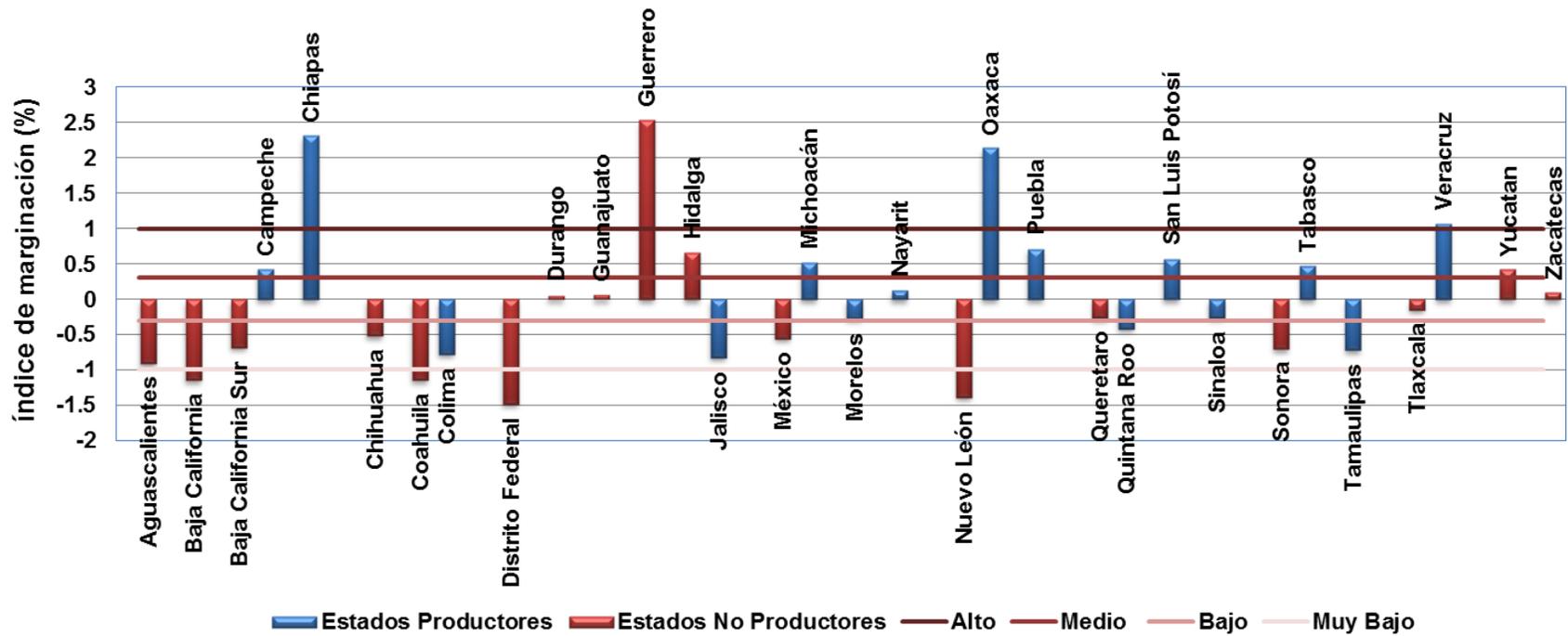
De las 15 entidades federativas que producen caña de azúcar, solo seis concentran el 75% de la producción nacional. Estos seis estados son: Veracruz, Jalisco, San Luis Potosí, Oaxaca, Chiapas y Tamaulipas (CONADESUCA, 2013b), mismos que contribuyeron con más del 40% del valor agregado nacional (Cuadro 2).

**Cuadro 2.** Valor agregado de estados productores y no productores de caña de azúcar en México.

Estados	Número	Valor Agregado (\$MX)	Participación (%)
Productores de caña de azúcar	15	167,881.46	43.4
No productores	17	219,128.66	56.5
Nacional	32	387,010.12	100.0

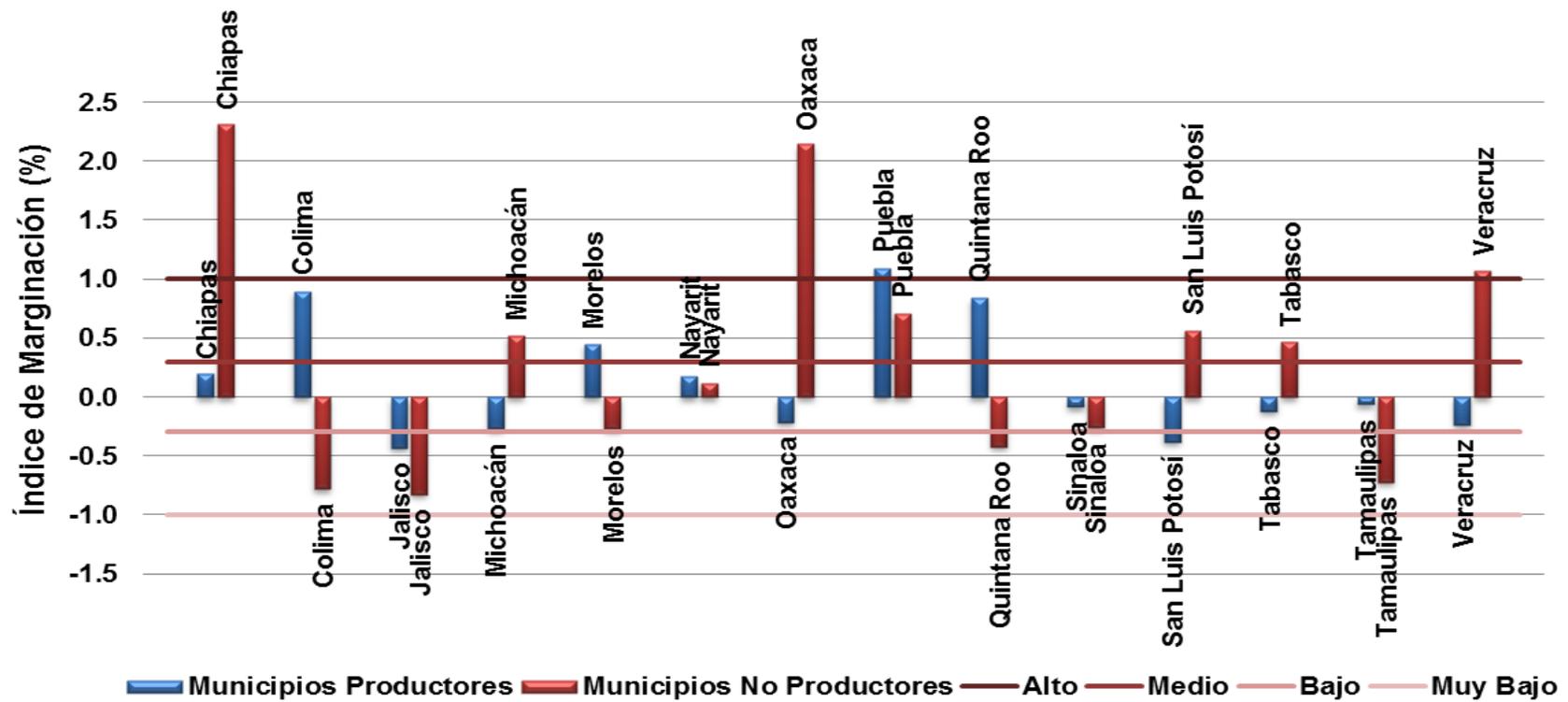
Fuente: INEGI, 2009; CONAPO, 2010b; SE, 2012.

La principal característica de los estados productores de caña de azúcar, es que se encuentran estrechamente ligados a las actividades agrícolas, toda vez que en ellos se encuentra el 62% del total de unidades económicas cuya principal fuente de ingresos es la actividad primaria, además que destinan el 41% de la superficie para uso agrícola, mientras que el resto sólo destina el 18% (INEGI, 2009; SE, 2012). De acuerdo con la CONAPO (2010a), dentro de los 15 estados que registran producción de caña de azúcar, Chiapas, Oaxaca y Veracruz muestran un muy alto índice de marginación, Campeche, Michoacán, Nayarit, Puebla, San Luis Potosí y Tabasco tienen marginación media y Colima, Jalisco, Morelos, Quintana Roo, Sinaloa y Tamaulipas muestran baja marginación (Figura 2).



**Figura 2.** Índice de marginación de los estados productores de caña de azúcar en México (Fuente: CONAPO, 2010a).

Al interior de los 15 estados productores de caña de azúcar existen diferencias, ya que los municipios productores de caña de azúcar presentan índices de marginación menores que aquellos municipios que no la producen (Figura 3). Los municipios donde no se produce este cultivo se caracterizan por ser más pequeños que aquéllos donde si se produce, con 80% de su población viviendo en localidades de menos de 5,000 habitante, 60.7% percibiendo menos de dos salarios mínimos y 23.8% de la misma sin educación básica completa (SE, 2012), lo cual les coloca en desventaja frente a los municipios con actividad azucarera.



**Figura 3.** Índices de marginación de municipios productores (en azul) y no productores (en rojo) de caña de azúcar hacia el interior de los 15 estados productores de este cultivo en México (Fuente: CONAPO, 2010a; CONAPO, 2010b; SE, 2012).

Los más de 200 municipios donde se produce caña de azúcar albergan una población total superior a los 12 millones de habitantes, y su aportación promedio al valor agregado nacional es de 7.1% (INEGI, 2013; CONAPO 2010a). Cabe destacar que la contribución promedio al valor agregado es inferior a la media nacional, tanto a nivel municipal como en términos per cápita. Las entidades federativas que producen caña de azúcar se caracterizan por tener una mayor participación en la producción agrícola. Sin embargo, los municipios productores de caña de azúcar mantienen un menor índice de marginación que indica una mejor calidad de vida, en comparación con los municipios no productores.

La diversificación de la agroindustria de la caña de azúcar se ha sugerido como una estrategia para aumentar la rentabilidad de esta actividad. Sin embargo, de acuerdo a Aguilar-Rivera (2012), tal diversificación podría afectar la oferta de azúcar y su precio en el mercado, debido a la competencia por la materia prima (caña de azúcar). Al destinar esta materia prima tanto a la producción de azúcar como a otros derivados, la rentabilidad e inventario de estos dos productos definirían la repartición de caña y la variación de la superficie sembrada. Si la rentabilidad del derivado en cuestión aumenta, sería menos atractivo producir azúcar, lo que se reflejaría en una disminución de su inventario y en consecuencia disminuirá su oferta en el mercado y aumentará su precio. Esto incrementaría la superficie con caña de azúcar, lo cual aumentaría la cantidad de caña destinada a la producción del derivado; por lo tanto, se incrementa la producción y oferta de éste, lo que a su vez influiría negativamente en su precio y en su rentabilidad. Debido entonces a conflicto de intereses y falta de planeación efectiva y de

diálogo y concertación entre los grupos involucrados, la diversificación de esta agroindustria ha quedado solo en el discurso político, y en su lugar, por ejemplo, la producción de alcohol ha caído en cerca de un 80%, pues de una producción de 67 mil litros de etanol, se pasó a solo 14 mil en la última década, con solo tres ingenios operando destilerías hacia 2010 (SE, 2012).

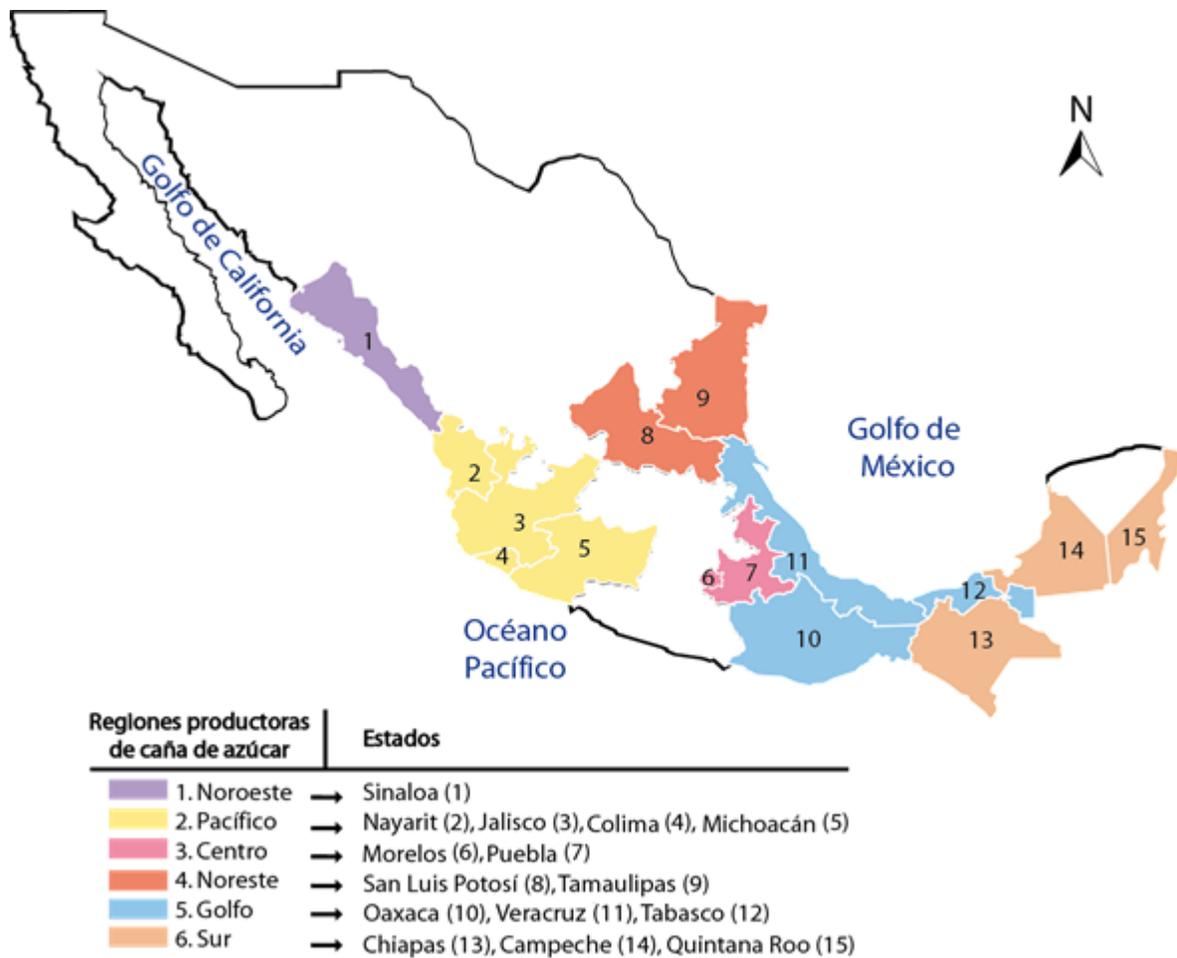
Más que basarse en un uso eficiente y sustentable de los recursos para la producción, el dinamismo del campo cañero está dado por un aumento en la superficie cosechada, con una escasa tendencia a aumentos en rendimientos, muy por debajo a los observados en países competitivos como Australia, Brasil y la India. Este comportamiento es consecuencia de relación desfavorable entre productores primarios e industriales, además de una excesiva regulación gubernamental que desmotiva la competitividad del campo y de la fábrica. Además, la importación de jarabe de maíz de alta fructosa (JMAF) y otros edulcorantes no calóricos de alta tecnología, compiten y desplazan la producción nacional de azúcar (Aguilar-Rivera et al., 2012).

Otro factor socioeconómico determinante del comportamiento del sistema es la tenencia de la tierra. Del total de la superficie dedicada a este cultivo, el 76.3% se concentra en extensiones de 5 ha o menos, en ejidos y comunidades rurales, en tanto que el 18.8% está distribuida en extensiones de entre 5.1 y 10 ha, y solo el 4.9% se encuentra en superficies de más de 10 ha, lo que pone de manifiesto el alto nivel de minifundismo en las zonas cañeras del país. De acuerdo con Pérez-Zamorano (2007) y Singelmann (2003), el minifundio y el ejido cañero, como institución, y otros fenómenos político-sociales del campo actúan como freno de la

agroindustria azucarera, al tener separados la tierra y el capital, los dos factores más importantes de la agricultura en términos de producción y bienestar social, debido a obstáculos estructurales. Estrategias como la digitalización del campo cañero para alcanzar la agricultura de precisión que ha emprendido la SAGARPA en el marco del Programa Nacional de la Agroindustria de la Caña de Azúcar (PRONAC) 2007/2012, han aportado importantes herramientas tecnológicas, aunque aún se requiere un trabajo conjunto a fin de abordar de manera integral la problemática multifacética que enfrenta esta cadena de valor.

### **3.2. FACTORES AMBIENTALES**

Gracias a su amplia capacidad de adaptación, la caña de azúcar puede ser cultivada en una gran diversidad de climas y tipos de suelos, entre las latitudes 37.7° N y 31° S, desde el nivel del mar hasta altitudes de casi 1,600 m (Salgado-García et al., 2013). La caña es, esencialmente, un cultivo tropical, aunque se desarrolla exitosamente en las regiones subtropicales. Es un cultivo de larga duración y se desarrolla durante todas las estaciones climáticas del año, incluyendo lluvias y secas (Aceves-Navarro, 2009). En México, actualmente, los sistemas de producción de caña de azúcar se encuentran ubicados en las costas del Océano Pacífico y del Golfo de México, en valles del Altiplano, hasta el sur de Quintana Roo. Se organizan en seis regiones que abarcan a 15 estados de la República (Blackaller-Ayala, 2011; Aguilar-Rivera et al., 2012) (Figura 4): Noroeste (Sinaloa), Pacífico (Nayarit, Colima, Jalisco y Michoacán), Centro (Morelos y Puebla), Noreste (Tamaulipas y San Luis Potosí), Golfo (Veracruz, Tabasco, Oaxaca) y Sur (Campeche, Chiapas y Quintana Roo).



**Figura 4.** Regiones productoras de caña de azúcar en México (Fuente: Blackaller-Ayala, 2011; Aguilar-Rivera et al., 2012).

En términos de exigencia climática, la caña presenta particularidades importantes, ya que en la fase de brotación, aamacollamiento y crecimiento vegetativo es muy exigente y en la fase de maduración la caña exige periodos de seca y bajas temperaturas, para iniciar un periodo de reposo fisiológico y acumular sacarosa en los tallos. Por lo tanto, los principales componentes climáticos que controlan el crecimiento, el rendimiento y la calidad de la caña de azúcar son: la temperatura, la radicación solar y la humedad disponible (Aceves-Navarro, 2009). En el Cuadro 3 se resumen las principales características de clima y suelo de las seis regiones cañeras de México.

**Cuadro 3.** Principales características climáticas y edáficas de las seis regiones productoras de caña de azúcar en México.

Región	Estado	Climas predominantes	Temperaturas y precipitación media anual	Suelos predominantes
Noroeste	Sinaloa	Cálido subhúmedo: 48%	Media: 25 °C	Cambisoles
		Seco y semiseco: 40%	Máxima: 36 °C	Castañozems cálcicos
		Muy seco: 10%	Mínima: 10.5 °C	Feozems
		Templado subhúmedo: 2%	Precipitación: 790 mm	Regosoles Vertisoles
Pacífico	Nayarit	Cálido subhúmedo: 91.5%	Media: 25 °C	Acrisoles húmicos
		Templado subhúmedo: 6%	Máxima: 35 °C	Acrisoles órticos
		Seco y semiseco: 2%	Mínima: 12 °C	Andosoles húmicos
		Cálido húmedo: 0.5	Precipitación: 1,100 mm	Cambisoles dístricos Cambisoles eútricos Cambisoles húmicos Feozems háplicos Gleysoles vérticos Luvisoles crómicos Luvisoles órticos Regosoles eútricos

**Cuadro 3.** (Continuación)

Región	Estado	Climas predominantes	Temperaturas y precipitación media anual	Suelos predominantes
Pacífico	Colima	Cálido subhúmedo: 86%	Media: 25 °C	Andosoles húmicos
		Seco y semiseco: 12.5%	Máxima: 30 °C	Cambisoles eútricos
		Templado subhúmedo: 1.5%	Mínima: 18 °C	Cambisoles férricos
		Precipitación: 900 mm	Feozem háplicos	
			Litosoles	
			Luvisoles háplicos	
			Regosoles crómicos	
			Regosoles eútricos	
			Vertisoles pélicos	
	Jalisco	Cálido subhúmedo: 68%	Media: 20.5 °C	Andosoles húmicos
		Templado subhúmedo: 18%	Máxima: 23 °C	Cambisoles crómicos
		Seco y semiseco: 14%	Mínima: 7 °C	Cambisoles férricos
			Precipitación: 1,000 mm	Cambisoles eútricos
				Feozems calcáricos
				Feozems háplicos
				Fluvisoles

**Cuadro 3. (Continuación)**

Región	Estado	Climas predominantes	Temperaturas y precipitación media anual	Suelos predominantes
Pacífico	Jalisco			Litoseles
				Luvisoles háplicos
				Luvisoles crómicos
				Planosoles eútricos
				Planosoles lúvicos
				Regosoles crómicos
				Regosoles eútricos
				Regosoles calcáricos
				Regosoles dístricos
				Regosoles eútricos
				Vertisoles crómicos
				Vertisoles pélicos
Centro	Michoacán	Cálido subhúmedo: 54.5 %	Media: 20 °C	Chernozems
		Templado subhúmedo: 29%	Máxima: 31 °C	Chesnuts
		Seco y semiseco: 15%	Mínima: 8 °C	Podzoles
		Templado húmedo: 1%	Precipitación: 850 mm	
		Cálido húmedo: 0.5%		

**Cuadro 3.** (Continuación)

Región	Estado	Climas predominantes	Temperaturas y precipitación media anual	Suelos predominantes
Centro	Morelos	Cálido subhúmedo: 87%	Media: 21.5 °C	Fluvisoles
		Templado húmedo: 11%	Máxima: 32 °C	Castañozem
		Templado subhúmedo: 2%	Mínima: 10 °C	Chernozem
			Precipitación: 900 mm	Feozem háplico
				Litsoles
				Lutita-arenisca
				Vertisoles
	Puebla	Templado subhúmedo: 35%	Media: 17.5 °C	Cambisoles
		Clima cálido: 25%	Máxima: 28.5 °C	Feozems
		Clima seco: 19%	Mínima: 6.5 °C	Fluvisoles
Templado húmedo: 7%		Precipitación: 1,270 mm	Litsoles	
Frío: 0.2%			Luvisoles	
			Regosoles	
			Vertisoles	
			Xerosoles	
Noreste	Tamaulipas	Cálido subhúmedo: 58%	Media: 22 °C	Fluvisoles eútricos
		Seco y semiseco: 38%	Máxima: 23.5 °C	Litsoles

**Cuadro 3.** (Continuación)

Región	Estado	Climas predominantes	Temperaturas y precipitación media anual	Suelos predominantes
Noreste	Tamaulipas	Templado subhúmedo: 2%	Mínima: 10 °C	Redzina
		Cálido húmedo: 2%	Precipitación: 780 mm	Vertisoles pélicos
	San Luis Potosí	Seco y semiseco: 71%	Media: 21 °C	Litsoles
		Cálido subhúmedo: 15%	Máxima: 32 °C	Regosoles calcáreos
		Cálido húmedo: 10%	Mínima: 8.4 °C	Rendzinas
		Muy seco: 2.5%	Precipitación: 950 mm	Vertisoles pélicos
		Templado subhúmedo: 1.5%		
Golfo	Veracruz	Cálido subhúmedo: 53.5%	Media: 23 °C	Acrisoles
		Cálido húmedo: 41%	Máxima: 32 °C	Aluvio-coluviales
		Templado húmedo: 3.5%	Mínima: 13 °C	Andosoles húmicos
		Templado: 1.5%	Precipitación: 1,500 mm	Andosoles órticos
		Seco y semiseco: 0.5%		Cambisoles
		Clima muy frío: 0.05%		Feozem
				Gleysoles mólico
		Lateríticos		
		Litsoles		
		Lixisoles		

**Cuadro 3. (Continuación)**

Región	Estado	Climas predominantes	Temperaturas y precipitación media anual	Suelos predominantes	
Golfo	Veracruz			Luvisoles	
				Regosoles	
				Rendzinas	
				Vertisoles	
				Cambisoles	
	Tabasco	Cálido húmedo: 95.5%	Media: 27 °C		Fluvisoles
		Cálido subhúmedo: 4.5%	Máxima: 36 °C		Gleysoles
			Mínima: 18.5 °C		Litosoles
			Precipitación: 2,550 mm		Regosoles arenosos
					Solonchaks
	Oaxaca	Cálido Subhúmedo: 47%	Media: 22 °C		Vertisoles
		Cálido húmedo: 22%	Máxima: 31 °C		Feozems
		Templado húmedo:16%	Mínima: 12.5 °C		Fluvisoles éutricos
		Seco y semiseco: 11%	Precipitación: 1,550 mm		Luvisol órtico
		Templado subhúmedo:4%			Luvisoles
			Luvisoles vérticos		

**Cuadro 3.** (Continuación)

Región	Estado	Climas predominantes	Temperaturas y precipitación media anual	Suelos predominantes
Sur	Campeche	Cálido subhúmedo: 92%	Media: 26.5 °C	Gleysoles sálicos (Akalches)
		Cálido húmedo: 7.75%	Máxima: 30 °C	Litsoles
		Semiseco: 0.05%	Mínima: 18 °C	Regosoles eútricos
			Precipitación: 1,700 mm	
	Chiapas	Cálido húmedo 54%	Media: 23 °C	Acrisoles
		Cálido subhúmedo 40%	Máxima: 30 °C	Cambisoles
		Templado húmedo 3%	Mínima: 17.5 °C	Luvisoles
		Templado subhúmedo 3%	Precipitación: 2,600 mm	Solonchak
	Quinta Roo	Cálido subhúmedo: 99%	Media: 26 °C	Gleysoles
		Cálido húmedo: 1%	Máxima: 33 °C	Rendzinas
			Mínima: 17 °C	Vertisoles
			Precipitación: 1,300 mm	

Fuente: CONADESUCA, 2009; INEGI, 2010.

De manera general, a temperaturas por debajo de los 20 °C, la brotación, el amacollamiento y el crecimiento vegetativo en caña de azúcar son prácticamente nulos; entre 20 y 25 °C son buenos; entre 25 y 30 °C son óptimos y por encima de 35 °C se vuelven nulos nuevamente. En cambio, para la maduración y concentración de sacarosa en tallos, la temperatura debe ser menor a los 20 °C (Salgado-García et al., 2003).

Las áreas donde se cultiva caña de azúcar en el país tienen climas muy variados, y se ha reportado casos donde la temperatura mínima mensual llega incluso a niveles menores a 5 °C, lo que puede dañar al cultivo. Sin embargo, históricamente, más del 90% de la temperatura mínima mensual en las áreas cañeras fluctúa entre los 10 °C a 20 °C durante los meses más fríos del año (noviembre a marzo), siendo el rango de temperatura más frecuente entre los 15 y 20 °C. En contraste, la temperatura máxima promedio mensual se ubica en el rango de los 20 y 30 °C de diciembre a febrero, lo que aumenta a más de 30 °C sobre todo entre abril y septiembre que es el período más caluroso en todas las regiones (COLPOS, 2008; CONADESUDA, 2012a).

En términos de disponibilidad de agua, una precipitación anual entre 1,000 y 2,500 mm es adecuada para el desarrollo de la caña de azúcar. Regiones con un déficit hídrico anual superior a 150 mm requerirán de riegos de auxilio (Ruiz-Corral y Medina-García, 2012). Se estima que para producir 1 kg de caña de azúcar se requieren alrededor de 1,500 L de agua (UN-WATER, 2012). Para las condiciones de México, donde la producción se distribuye en un 62% en áreas de temporal y el

restante 38% en áreas con riego (CONADESUCA, 2011), el consumo de agua promedio varía de 5.48 a 6.84 mm por día, lo que equivale a una precipitación de 2,000 hasta 2,500 mm por año. Debido a las variaciones climáticas entre las regiones, el consumo diario de agua cambia, por ejemplo, en un clima templado cálido la fluctuación es de 3.8 a 8.6 mm, mientras que en un clima cálido de 4.8 a 8.9 mm, es decir, se necesitaría una lámina anual de 1,387 a 3,139 mm para el clima templado cálido y otra de 1,752 a 3,248 mm para el clima cálido (García-Espinoza 1984). Es importante destacar que de acuerdo a las estimaciones reportadas por Moyer (2010), México es el segundo país más vulnerable a los efectos del cambio climático global, y debido a ello, la producción agrícola podría disminuir en más de 25% hacia el año 2080 si el país no desarrolla estrategias eficientes de adaptación a este fenómeno. Para el caso del cultivo de la caña de azúcar, el cuál es uno de los más demandantes de agua y fertilizantes, la búsqueda de alternativas de solución para enfrentar este desafío ambiental resulta imperante, y debe abarcar no solo el desarrollo de genotipos que se adapten al nuevo entorno restrictivo en agua, nutrientes y fluctuaciones drásticas de temperatura, sino también nuevos esquemas productivos que hagan uso de los adelantos tecnológicos más avanzados, incluyendo aplicaciones biotecnológicas, nanotecnológicas y de agricultura de precisión, entre otros.

La radiación solar para el buen desarrollo de la caña de azúcar fluctúa entre los 18 y 36 MJ m<sup>-2</sup>, con un valor promedio anual de 6,350 MJ m<sup>-2</sup>. Cerca del 60% de esta radiación es interceptada por el follaje, durante la fase formativa y en la fase del gran crecimiento, lo que indica que un índice de área foliar (IAF) para una efectiva

utilización de la energía estará entre 3 a 3.5 como óptimo (Aceves-Navarro, 2009). Las condiciones de irradiación mensual en promedio para México se encuentran entre 15 y 22 MJ m<sup>-2</sup>, presentando los niveles más altos de febrero a mayo, niveles medios de junio a agosto y niveles bajos de septiembre a enero (Valdés et al., 2012).

Los suelos para la producción de caña de azúcar en México presentan características físicas y químicas en general adecuadas para el cultivo. Debido su rusticidad, la caña de azúcar puede adaptarse a diferentes condiciones edáficas, por lo tanto, no hay limitaciones en cuanto a fertilidad, la cual puede ser corregida. Sin embargo, las limitantes existentes corresponde a aspectos físicos, por lo que deben ser evitados suelos con profundidades menores a 1 m, con alto manto freático, excesivamente arcillosos y mal drenados, excesivamente arenosos y suelos con pendiente mayores al 15% (Andrade, 2006).

Entre los suelos de México aptos para el desarrollo de la caña de azúcar destacan los siguientes: fluvisoles éutricos, vertisoles éutricos, cambisoles éutricos, cambisoles crómicos, leptosoles réndzicos, luvisoles gléyicos, y cambisoles endogléyicos (Palma-López, 2009).

En México, las plantaciones de caña de azúcar se ubican en distintas posiciones topográficas, desde zonas planas hasta pendientes pronunciadas. La intensidad, frecuencia, distribución y cantidad de la lluvia captada origina diversos problemas cuyo grado de afectación depende de las características de cada suelo, incluyendo limitantes respecto a erosión, acidez, acumulación de sales, lixiviación

de nutrientes y anegamiento prolongado, entre otros. La variación de algunos indicadores físicos y químicos del ambiente edáfico se muestra en el Cuadro 4, los cuales tienen relación directa o indirecta con la captación de agua en las regiones (lluvia y capacidad de almacenamiento hídrico del suelo) (COLPOS, 2008).

**Cuadro 4.** Indicadores físicos y químicos de los suelos y sus porcentajes de cobertura en las zonas de abasto de los ingenios azucareros de México.

CE		pH		MO		AI		Arcilla		IRA	
dS m <sup>-1</sup>	%*	Valor	%*	Contenido	%*	cmol kg <sup>-1</sup>	%*	Contenido porcentual	%*	Porcentaje	%*
<1.0	91.3	<4.5	6.5	<1.0	5.5	0.0	65.1	<10	2.2	1	77.8
1.0-2.0	5.9	4.6-5.5	16.6	1.0-2.0	17.7	0.01-0.10	11.6	10-20	12.2	2	4.0
2.1-3.0	2.7	5.6-6.5	21.9	2.1-3.0	27.0	0.11-0.20	6.2	21-30	18.7	3	7.2
3.1-5.0	7.1	6.6-7.5	18.6	3.1-5.0	37.2	0.21-0.40	4.4	31-40	20.8	4	6.2
>5.1	0.1	>7.6	36.4	>5.1	12.6	>0.41	12.6	>41	46.0	5	4.9

CE: Conductividad Eléctrica; MO: Materia Orgánica; AI: Acidez Intercambiable; IRA: Índice del Riesgo de Anegamiento.

\* La frecuencia porcentual indica la superficie que presenta la característica dada con referencia al total del área dedicada a la producción de caña de azúcar en México.

Respecto a la disponibilidad de nutrimentos en los suelos cañeros del país, cerca del 70% de éstos presenta concentraciones de nitrógeno de entre 10 y 20 kg ha<sup>-1</sup>, lo que hace necesario la aplicación de fertilizantes nitrogenados. El 27.2% de los suelos presentan concentraciones superiores a 30 kg ha<sup>-1</sup> de fósforo, y el 74% de ellos muestra contenidos de potasio mayores a 160 kg ha<sup>-1</sup>. En su mayoría, los suelos dedicados a este cultivo muestran niveles de calcio de entre 2,500 y 10,000 kg ha<sup>-1</sup> (68.3%), mientras que los de magnesio fluctúa entre 500 y más de 1,000 kg ha<sup>-1</sup> en el 65% de los terrenos cañeros (Cuadro 5) (COLPOS, 2008).

**Cuadro 5.** Distribución de la frecuencia de la concentración de N, P, K, Ca y Mg en suelos de áreas de abasto de ingenios azucareros en México.

Nitrógeno		Fósforo		Potasio		Calcio		Magnesio	
kg ha <sup>-1</sup>	%*								
<10	6.7	<5	29.4	<40	0.2	<250	0.2	<50	0.1
10-20	68.5	5-10	16.2	40-80	6.2	250-2500	22.1	50-100	1.1
21-30	14.7	11-15	9.9	81-120	12.3	2501-5000	34.7	101-500	33.5
31-50	7.4	16-30	17.3	212-160	7.4	5001-10000	33.6	501-1000	26.6
>50	2.7	>30	27.2	>160	74.0	>10000	9.4	>1000	38.7

\* La frecuencia porcentual indica la superficie que presenta la característica dada con referencia al total del área dedicada a la producción de caña de azúcar en México.

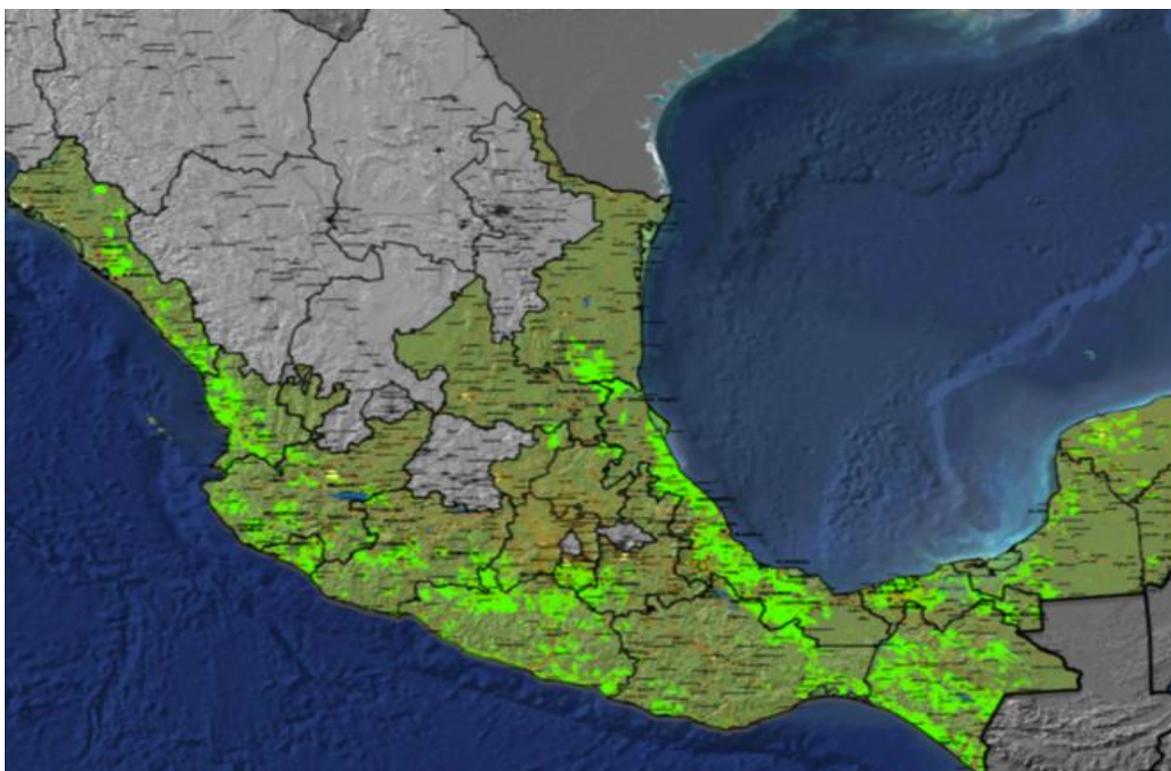
En cuanto a micronutrientes, la concentración de Fe y Mn es muy alta en la mayoría de los casos, incluso en terrenos con condiciones alcalinas y calcáreas. Las concentraciones de cobre se encuentran en su mayoría entre 0.5 y 3 mg kg<sup>-1</sup> de suelo, mientras que la mayor parte del zinc se encuentra en concentraciones menores a 1 mg kg<sup>-1</sup> de suelo (COLPOS, 2008) (Cuadro 6).

**Cuadro 6.** Distribución de la frecuencia de la concentración de Fe, Cu, Zn y Mn en suelos de áreas de abasto de ingenios azucareros en México.

Hierro		Cobre		Zinc		Manganeso	
mg kg <sup>-1</sup>	%*						
<0.5	1.0	<0.5	40.7	<0.5	54.7	<0.5	1.8
0.5-1.0	0.2	0.5-1.0	7.6	0.5-1.0	12.1	0.5-1.0	0.2
1.1-3.0	0.6	1.1-3.0	31.4	1.1-3.0	18.7	1.1-3.0	1.9
3.1-5.0	1.0	3.1-5.0	9.6	3.1-5.0	7.2	3.1-5.0	1.3
>5.0	97.2	>5.0	10.8	>5.0	7.3	>5.0	94.8

\* La frecuencia porcentual indica la superficie que presenta la característica dada con referencia al total del área dedicada a la producción de caña de azúcar en México.

Las características climáticas y edáficas en general de las áreas productoras de caña de azúcar indican que existen las condiciones favorables para el desarrollo del cultivo, las cuales, permiten identificar ventajas o limitaciones físicas y químicas que las zonas de abasto de caña de azúcar. Estos datos son determinantes para hacer predicciones sobre desarrollo, adaptabilidad y producción del cultivo, además, de buscar nuevas zonas de cultivo. Una proyección sobre las zonas con mayor potencial para expandir el cultivo de la caña de azúcar en México se muestra en la Figura 5, lo que hace evidente que la superficie actual dedicada a este cultivo podría crecer hasta 5 millones de hectáreas (aproximadamente 500 mil hectáreas con potencial alto y 4.5 millones de hectáreas con potencial medio) (SIAZUCAR, 2009).



**Figura 5.** Zonas con potencial (fluorescentes) para el cultivo de caña de azúcar en México (Fuente: SIAZUCAR, 2009).

### **3.3. FACTORES AGRONÓMICOS**

El Programa Nacional para la Alta Rentabilidad (PRONAR, 2009), estima que la baja productividad promedio que se ha obtenido en la última década es debido a la incipiente tecnología usada en campo, ya que escasamente se realizan análisis de agua y suelo; no se cuenta con un programa de manejo de suelo; no se dispone de un programa nacional eficiente para la generación y utilización de nuevas variedades (los esfuerzos se hacen de manera independiente por cada ingenio); no se cuenta con semilleros certificados; no existe un programa nacional coordinado para el manejo y control de enfermedades, plagas ni malezas; y el manejo de la cosecha no tiene controles de calidad. Además, la caña de azúcar en México se cultiva en ciclos de siete años, y la superficie sembrada está compuesta en un 13% por plantilla (nuevas plantaciones, de 1 año de edad), 15% soca (segunda cosecha, de 2 años de edad) y 72% de resoca (plantaciones de al menos tres años de edad) (Aguilar-Rivera et al., 2012), lo que en consecuencia implica viejas plantaciones con baja productividad. Ante esta problemática, el PRONAR tiene como objetivo transformar el campo cañero mexicano en un campo rentable, competitivo y ganador a través de los siguientes diez pasos: 1. Creer que se puede y comprometerse; 2. Diagnosticar factores limitantes (agua y suelo); 3. Sistematizar labranza y preparación de suelo; 4. Programar fecha y densidad de siembra; 5. Seleccionar variedades y semilla adecuada; 6. Aplicar fertilización balanceada; 7. Manejar de agua y drenaje adecuadamente; 8. Manejar de manera integrada los problemas de plagas y malezas; 9. Preparar el sistema para la cosecha; y 10. Aumentar la capacidad de cosecha mecanizada (PRONAR,

2009). Aunque a la fecha aún se tiene mucho que mejorar, el PRONAR ha facilitado el crecimiento de producción y la productividad de caña a partir de su implementación, como se refleja en rendimientos en campo y fábrica (CONADESUCA, 2013a).

### **3.3.1. PLAGAS Y SU MANEJO**

Las plagas de la caña de azúcar de mayor importancia en México son: mosca pinta (diferentes géneros), barrenador del tallo (diferentes géneros) y rata cañera (diferentes géneros) (INIFAP, 2011), mismas que se distribuyen en todas las zonas cañeras (Flores-Cáceres, 2007).

La mosca pinta o salivazo ocasiona pérdidas que fluctúan entre 5 y 20 t ha<sup>-1</sup> (CNPR, 2004). Cuando el insecto es joven (ninfa) absorbe agua y nutrientes de las raíces y tallos de la planta, en tanto que el adulto (mosca) absorbe la savia de los retoños y hojas. En los dos estados inyecta toxinas, lo que lleva a una disminución de la función de la raíz y de la fotosíntesis, y en consecuencia, una pérdida de la productividad. Entre los métodos de control se encuentra el biológico con la aplicación del hongo *Metarhizium anisopliae*, el uso de rastras fitosanitarias y el control químico (Hernández-Rosas, 2012).

Respecto al barrenador del tallo, se estima que por cada 1% de incremento de la intensidad de la plaga se generan pérdidas de azúcar de 5.8 kg ha<sup>-1</sup> y disminución del 2 al 50% del rendimiento (Aday-Díaz et al., 2003; Rodríguez del Bosque y Vejar-Cota, 2008). Las larvas construyen galerías en el interior del tallo, reduciendo el flujo de agua y nutrientes en la planta (Serra y Trumper, 2006), lo

que disminuye la productividad y aumenta la incidencia de infecciones fungosas y la contaminación del jugo (Salazar et al., 2006). El control integrado de esta plaga consiste en la eliminación de hospederos en los campos de cultivo, la utilización de rastras fitosanitarias y el uso de insecticidas en menor grado (Sánchez-Galván, 2005). El control biológico con la liberación de parasitoides y depredadores (enemigos naturales) como *Trichogramma atopovorilia*, *Chelonus sonorensis*, *Apanteles diatreae*, *Cotesia flaviper* y *Paratheresia claripalpis* y la aplicación de hongos *Metarhizium anisopliae* y *Beauveria bassiana* han dado buenos resultados sobre el manejo de las poblaciones de esta plaga (Rodríguez del Bosque, 2012).

La rata cañera constituye la plaga más destructiva de los cañaverales del país, atacando alrededor del 30% de la superficie cultivada (Flores-Cáceres, 2007; CONADESUCA, 2012b; Vázquez-López et al., 2013). Se estima que por cada 1% de tallos afectados hay una reducción de 500 kg ha<sup>-1</sup> de caña de azúcar. Adicionalmente, se estima una pérdida de 2.2 kg de azúcar por tonelada métrica por cada 1% de intensidad de daño, en el proceso de recuperación de sacarosa en fábrica (Márquez, 2002). El daño principal de la rata cañera se localiza en los canutos inferiores de la planta, ocasionando el acame y propiciando el enraizamiento del tallo. La caña acamada es roída casi en su totalidad, lo que ocasiona pérdidas de yemas y en casos severos la muerte de los tallos, facilita el ingreso de otras plagas, que en consecuencia, baja la producción en campo y la calidad del jugo y rendimiento en fábrica (Flores-Cáceres, 2007). Entre los métodos de control para este roedor se encuentra el cultural, basado en la modificación del hábitat de la rata cañera, con prácticas sencillas de control de

malezas en las parcelas, bordos y canales de riegos, el control biológico, con la utilización de aves de rapiña como *Accipiter* spp., *Buteo* spp. y *Aguila chysaetos*, y serpientes como *Boa constrictor*, *Conopsis* spp. y *Crotalus* spp., logrando una disminución de los daños del 50% (Cervantes y Ballesteros-Barrera, 2012; Peña-Ramos et al., 2009; Vázquez-López, 2005; Vázquez-López et al., 2013). En el Cuadro 7 se enlistan las principales plagas, parasitoides y predadores de la caña de azúcar en México y los productos para su control se enlistan en el Cuadro 10.

**Cuadro 7. Plagas, parasitoides y predadores más importantes en el cultivo de la caña de azúcar en México.**

Especie	Orden: Familia	Nombre común en español (Inglés)
<b>Plagas en hojas</b>		
<i>Aeneolamia contigua</i> Walker	Hemiptera: Cerpopidae	Mosca pinta o salivazo (Spittlebug)
<i>Aeneolamia contigua campecheana</i> Fennah	Hemiptera: Cerpopidae	Mosca pinta o salivazo (Spittlebug)
<i>Aeneolamia contigua santa-rosae</i> Fennah	Hemiptera: Cerpopidae	Mosca pinta o salivazo (Spittlebug)
<i>Aeneolamia albofasciata</i> Walker	Hemiptera: Cerpopidae	Mosca pinta o salivazo (Spittlebug)
<i>Aeneolamia vilior</i> Fowl.	Hemiptera: Cerpopidae	Mosca pinta o salivazo (Spittlebug)
<i>Aeneolamia postica</i> Walker	Hemiptera: Cerpopidae	Mosca pinta o salivazo (Spittlebug)
<i>Aeneolamia postica occidentalis</i> Fennah	Hemiptera: Cerpopidae	Mosca pinta o salivazo (Spittlebug)
<i>Prosapia contigua</i> Walker	Hemiptera: Cerpopidae	Mosca pinta o salivazo (Spittlebug)
<i>Prosapia bicinta</i> Say.	Hemiptera: Cerpopidae	Mosca pinta o salivazo (Spittlebug)
<b>Plagas en hojas</b>		
<i>Prosapia bicinta angustata</i> Walker	Hemiptera: Cerpopidae	Mosca pinta o salivazo (Spittlebug)
<i>Prosapia tepeana</i> Fennah	Hemiptera: Cerpopidae	Mosca pinta o salivazo (Spittlebug)
<i>Prosapia simulans</i> Walker	Hemiptera: Cerpopidae	Mosca pinta o salivazo (Spittlebug)
<i>Zulia</i> ( <i>Neozulia vilior</i> Fowl.)	Hemiptera: Cerpopidae	Mosca pinta o salivazo (Spittlebug)
<i>Leptodictya tabida</i> (Herrich- Schaeffer)	Hemiptera: Tingidae	Chinche de encaje (Sugarcane lace bug)

**Cuadro 7. (Continuación)**

Espece	Orden: Familia	Nombre común en español (Inglés)
<i>Blissus leucopterus</i> Say	Hemiptera: Lygaeidae	Chinche negra (Chinch bug)
<i>Saccharicoccus sacchari</i> Cockerell	Hemiptera: Pseudococcidae	Chinche rosada (Pink sugarcane mealybug)
<i>Saccharosydne saccharivora</i> Westwood	Hemiptera: Delphacidae	Saltahoja antillano (Leafhopper)
<i>Sipha flava</i> Forbes	Hemiptera: Aphididae	Pulgón amarillo (Yellow sugarcane aphid)
<i>Dysmicoccus boninsis</i> Kuwana	Hemiptera: Pseudococcidae	Chinche gris (Gray sugarcane mealybug)
<i>Mocis latipes</i> Guenée	Lepidoptera: Noctuidae	Gusano medidor (Striped grassworm)
<i>Trichoplusia ni</i> Hübner	Lepidoptera: Noctuidae	Gusano falso medidor (Cabbage looper)
<i>Cirphis latiuscula</i> Herr. Sch.	Lepidoptera: Noctuidae	Gusano soldado (Army worms)
<i>Spodoptera frugiperda</i> J.E. Smith	Lepidoptera: Noctuidae	Gusano cogollero (Fall armyworm)
<i>Elasmopalpus lignosellus</i> Zeller	Lepidoptera: Pyralidae	Barrenador coralillo (Lesser Cornstalk Borer)
<b>Plagas en hojas</b>		
<i>Chromacris colorata</i> Serville	Orthoptera: Acrididae	Chapulín (Grasshopper)
<i>Taeniopoda auricornis</i> Walker	Orthoptera: Romaleidae	Chapulín (Grasshopper)
<i>Tropinotus mexicanus</i> Burmeister	Orthoptera: Romaleidae	Chapulín (Grasshopper)
<b>Plagas en tallos</b>		
<i>Diatrea considerata</i> Heinrich	Lepidoptera: Crambidae	Barrenador del tallo (Sugarcane borer)
<i>Diatrea grandiosella</i> Dyar	Lepidoptera: Crambidae	Barrenador del tallo (Sugarcane borer)

**Cuadro 7.** (Continuación)

Especie	Orden: Familia	Nombre común en español (Inglés)
<b>Plagas en tallos</b>		
<i>Diatrea saccharalis</i> Fabricius	Lepidoptera: Crambidae	Barrenador del tallo (Sugarcane borer)
<i>Diatrea veracruzana</i> Box	Lepidoptera: Crambidae	Barrenador del tallo (Sugarcane borer)
<i>Diatraea lineolata</i> Walker	Lepidoptera: Crambidae	Barrenador del tallo (Sugarcane borer)
<i>Diatraea muellerella</i> Dyar & Heinrich	Lepidoptera: Crambidae	Barrenador del tallo (Sugarcane borer)
<i>Eoreuma loftini</i> Dyar	Lepidoptera: Crambidae	Barrenador del tallo (Sugarcane borer)
<i>Cholus morio</i> Champiom	Coleoptera: Curculionidae	Picudo del tallo (Sugarcane stalk weevil)
<b>Plagas en raíces</b>		
<i>Phyllophaga crinalis</i> Bates	Coleoptera: Scarabaeidae	Gallina ciega o mayate (Masked chafers)
<i>Phyllophaga sturmi</i> Bates	Coleoptera: Scarabaeidae	Gallina ciega o mayate (Masked chafers)
<b>Plagas en raíces</b>		
<i>Euethela bidentata</i> Burmeister	Coleoptera: Scarabaeidae	Mayatito de la caña (Sugarcane Beetle)
<i>Euethela humillis</i> Burmeister	Coleoptera: Scarabaeidae	Mayatito de la caña (Sugarcane Beetle)
<i>Euethela rugiceps</i> Le Conte	Coleoptera: Scarabaeidae	Mayatito de la caña (Sugarcane Beetle)
<i>Pyrophorus stella</i> Candéze	Coleoptera: Elateridae	Gusanos de alambre (Wireworms)
<i>Heterotermes tenuis</i> Hagen	Isoptera: Heterotermitidae	Termitas (Termite)
<i>Amitermes beaumonti</i> Banks	Isoptera: Termitidae	Termitas (Termite)

**Cuadro 7.** (Continuación)

Especie	Orden: Familia	Nombre común en español (Inglés)
<b>Plagas en raíces</b>		
<i>Reticulitermes flavipes</i> Kollar	Isoptera: Rhinotermitidae	Termitas (Termite)
<i>Radopholus similis</i> (Cobb) Thorne	Tylenchida: Pratylenchidae	Nemátodo perforador (Burrowing nematode)
<i>Pratylenchus brachyurus</i> Goldfrey.	Pratylenchidae: Pratylenchidae	Nemátodo daga (Dagger nematode)
<i>Haplolaimus</i> sp.	Tylenchida: Haplolaimidae	Nemátodo lanza (Lance nematode)
<i>Criconema</i> sp.	Tylenchida: Criconematidae	Nematodo de la columna vertebral (Spine Nematode)
<i>Sigmodon toltecus</i> Saussure	Rodentia: Muridae	Rata cañera (Rats)
<i>Sigmodon arizonae</i> Mearns	Rodentia: Muridae	Rata cañera (Rats)
<i>Sigmodon mascotensis</i> J.A. Allen	Rodentia: Muridae	Rata cañera (Rats)
<i>Oryzomys couesi</i> Alston	Rodentia: Muridae	Rata cañera (Rats)
<b>Plagas en raíces</b>		
<i>Peromyscus maniculatus</i> Wagner	Rodentia: Muridae	Rata cañera (Rats)
<i>Rattus rattus</i> Linnaeus	Rodentia: Muridae	Rata cañera (Rats)
<i>Dipodomys phillipsii</i> Gray	Rodentia: Heteromyidae	Rata cañera (Rats)
<i>Liomys pictus</i> Thomas	Rodentia: Heteromyidae	Rata cañera (Rats)
<i>Sigmodon hispidus</i> Say and Ord	Rodentia: Cricetidae	Rata algodónera (Hispid Cotton Rat)

**Cuadro 7.** (Continuación)

Especie	Orden: Familia	Nombre común en español (Inglés)
<b>Plagas en raíces</b>		
<i>Orthogeomys hispidus</i> Le Conte	Rodentia: Geomyidae	Tuza (Pocket gopher)
<i>Orthogeomys grandis</i> Thomas	Rodentia: Geomyidae	Tuza (Pocket gopher)
<i>Crathogeomys merriami merriami</i>	Rodentia: Geomyidae	Tuza (Pocket gopher)
<b>Predadores</b>		
<i>Coleomegilla maculata</i> De Geer	Coleoptera: Coccinellidae	Catarina (Ladybirds)
<i>Castolus plagiaticollis</i> Stol	Hemiptera: Reduviidae	Chinches predatoras (Predatory Bugs)
<b>Parasitoides</b>		
<i>Lixophaga diatraeae</i> Townsed	Diptera: Tachinidae	Mosca cubana (Cuban fly)
<i>Metagonistylum minense</i> Townsed	Diptera: Tachinidae	Mosca amazónica (Amazon fly)
<i>Paratheresia claripalpis</i> Van der Wulp	Diptera: Tachinidae	Mosca mexicana (Mexican fly)
<i>Telenomus alecto</i> Crawford	Hymenoptera: Scelionidae	Parásitos de los huevecillos (Egg parasitoid)
<i>Iridomyrmex humilis</i> Mayr	Hymenoptera: Formicidae	Hormiga argentina (Argentine ant)
<i>Atta fervens</i> Drury	Hymenoptera: Formicidae	Hormiga defoliadora (Leafcutter ants)

Fuente: Flores-Cáceres, 2007; Vásquez-López et al., 2013.

### 3.3.2. ENFERMEDADES Y SU MANEJO

Como la mayoría de los cultivos el método más eficiente y económico de mitigar los efectos nocivos de las enfermedades sobre la producción, es mediante la búsqueda de variedades tolerantes o resistentes a los patógenos. En México, se han reportado 55 enfermedades, 22 de origen parasitario y 33 de origen no parasitario (Chinea-Martín y Milanés-Ramos, 2006). Entre las enfermedades de mayor importancia destacan: roya, carbón, mosaico y escaldadura (CONADESUCA, 2012c). Además de la resistencia genética, el uso de semilla libre de patógenos se ha implementado para evitar la propagación de enfermedades. Los tratamientos térmicos y el cultivo de tejido son métodos de desinfección que garantizan el estado fitosanitario de la caña como semilla (Morán-Castillo et al., 2006). Aunque el control de enfermedades de la caña de azúcar en campos comerciales en México no es una práctica común, recientemente, con la detección de la roya naranja (*Puccinia kuehni*) en el país, el Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria (SENASICA) ha registrado diversos productos para el control de hongos, como cyproconazole recomendado para controlar este tipo de roya (SENASICA, 2011a). Adicionalmente, combinaciones de otros fungicidas como thiabendazol+(tiametoxam+clorantraniliprol), thiabendazol+fipronil y metil tiofanato+fipronil se están utilizando como tratamiento antes de la siembra para el control de la marchitez de la caña de azúcar causada por *Fusarium verticillioides* (Rebollar-Alviter et al., 2012). En el Cuadro 8 se enlistan las principales enfermedades de caña de azúcar en México.

**Cuadro 8. Enfermedades más comunes en el cultivo de la caña de azúcar en México.**

Especie	Tipo	Nombre en español (Inglés)
<i>Cercospora longipes</i> E. J. Butler	Fungoso	Peca o mancha café (Brow spot)
<i>Leptosphaeria sacchari</i> B. de Hann	Fungoso	Mancha de anillo (Ring spot)
<i>Bipolaris sacchari</i> (E.J. Butler) Shoemaker	Fungoso	Mancha de Ojo (Eye spot)
<i>Capnodium</i> sp.	Fungoso	Fumagina de la hoja (Sooty mould)
Anamorph: <i>Fusarium moniliforme</i> J. Sheld. = <i>Gibberella subglutinans</i> (E.T. Edwards) P.E. Nelson, Toussoun & Marasas	Fungoso	Cogollo retorcido (Pokkah-boeng)
<i>Pythium</i> spp.	Fungoso	Pudrición del sistema radicular (Pythium root rot)
<i>Ceratocystis paradoxa</i> (Dade) C. Moreau	Fungoso	Enfermedad de la piña (Pineapple disease)
<i>Phaeocystostroma sacchari</i> (Ellis & Everh.) B. Sutton	Fungoso	Enfermedad de la corteza (Rind disease)
<i>Marasmius sacchari</i> Wakker and <i>Marasmius stenospilus</i> Montagne	Fungoso	Pudrición de la base del tallo, de la raíz y de la vaina (Marasmius basal stem, root and sheath rot)
<i>Cephalosporium sacchari</i> E. J. Butler = <i>Fusarium sacchari</i> (E. J. Butler) W. Gams	Fungoso	Marchitez (Wilt)
<i>Cytospora sacchari</i> E. J. Butler	Fungoso	Pudrición de la vaina (Sheath rot)
<i>Glomerella tucumanensis</i> (Speg.) Arx & E. Müller = <i>Phyalospora tucumanensis</i> Speg.	Fungoso	Pudrición roja del tallo (Red rot)
<i>Ustilago scitaminea</i> = <i>Sporisorium scitamineum</i> (Syd.) M. Piepenbr., M. Stoll & Oberw	Fungoso	Carbón (Smut)
<i>Puccinia melanocephala</i> Syd. & P. Syd.	Fungoso	Roya café (Brown rust)

**Cuadro 8.** (Continuación)

Especie	Tipo	Nombre en español (Inglés)
<i>Puccinia kuehnii</i> (W. Krüger) E.J. Butler	Fungoso	Roya naranja (Orange rust)
<i>Pseudomonas rubrilineans</i> (Lee et al.) Starr & Burkholder. = <i>Acidovorax avenae</i> subsp. <i>Avenae</i>	Bacteriano	Raya roja (Red stripe)
<i>Clavibacter xyli</i> = <i>Leifsonia xyli</i> subsp. <i>xyli</i> (Davis et al.) Evtushenko	Bacteriano	Raquitismo de las socas (Ratoon stunt)
<i>Xanthomonas albilineans</i> (Ashby) Dowson.	Bacteriano	Escaldadura de la hoja (Leaf scald)
Virus del mosaico de la caña de azúcar (SCMV)	Viral	Mosaico de la caña (Mosaic)
Síndrome de la hoja amarilla (YLS)	Viral	Hoja amarilla (Yellow leaf)

Fuente: Koike, 1988; Chinea-Martín y Rodríguez-Lema, 1994; Flores-Cáceres, 1997.

### 3.3.3. MALEZAS Y SU MANEJO

El control de la vegetación no deseada o malezas es una práctica esencial en las etapas iniciales de desarrollo de la caña de azúcar, ya que si no son controladas oportunamente, pueden ocasionar pérdidas en la productividad del cultivo del 10 hasta el 84% (Cruz-González, 2009). Las especies de malezas más perjudiciales corresponden a las familias Poaceae y Cyperaceae, pero especies de bejuquillo (*Ipomoea* spp.) pueden interferir en el desarrollo de las plantas de caña de azúcar (Cheavegatti-Gianotto et al., 2011). El uso de herbicidas (control químico) es la forma más común de controlar la maleza, en la mayor parte de las áreas productoras del mundo. En México, los herbicidas más usados son la ametrina y el diurón, los cuales se recomiendan en aplicación postemergente y tienen una residualidad de uno a dos meses, dependiendo de la humedad y el tipo de suelo (Esqueda, 1999). El Cuadro 9 muestra una lista de las principales malezas que se encuentran en el cultivo de caña de azúcar en México y los productos para su control se enlistan en el Cuadro 10.

**Cuadro 9.** Principales especies de malezas en el cultivo de caña de azúcar en México.

Especie	Familia	Nombre común español (Inglés)
<b>Anuales</b>		
<i>Thunbergia alata</i> Bojer ex Sims	Acanthaceae	Ojo de pájaro (Blackeyed Susan vine)
<i>Commelina diffusa</i> Burm. f.	Commelinaceae	Tripa de pollo (Climbing dayflower)
<i>Bidens pilosa</i> L.	Asteraceae	Acahual blanco (Beggarticks)
<i>Melampodium divaricatum</i> (L. C. Rich.) DC.	Asteraceae	Botón de oro (Blackfoots)
<i>Parthenium hysterophorus</i> L.	Asteraceae	Escoba amarga (Santa Maria feverfew)
<i>Chamaesyce hirta</i> (L.) Millsp.	Euphorbiaceae	Hierba de paloma (Pillpod sandmat)
<i>Pharbitis purpurea</i> (L.) Voigt	Convolvulaceae	Bejuquillo (Morning glory)
<i>Digitaria ciliaris</i> (Retz.) Koeler	Poaceae	Zacate conejo (Southern crabgrass)
<i>Spermacoce assurgens</i> R.L.	Rubiaceae	Celestina azul (Falso Buttonweed)
<i>Amaranthus viridis</i> L.	Amaranthaceae	Bledo verde (Green amaranth)
<i>Amaranthus hybridus</i> L.	Amaranthaceae	Quintonil (Red amaranth)
<i>Heliotropium indicum</i> L.	Boraginaceae	Molto (Indian heliotrope)
<i>Ageratum houstonianum</i> P. Mill.	Asteraceae	Yerba del zopilote (Blue billygoat weed)
<i>Euphorbia hyssopifolia</i> L.	Euphorbiaceae	Hierba de la golondrina (Hyssop spurge)
<i>Euphorbia dentata</i> Michx.	Euphorbiaceae	Lechosilla (Toothed spurge)
<i>Cenchrus echinatus</i> L.	Poaceae	Zacate cadillo (Burgrass)

**Cuadro 9.** (Continuación)

Especie	Familia	Nombre común español (Inglés)
<i>Rottboellia cochinchinensis</i> (Lour.) Clayton	Poaceae	Caminadora (Ichtgrass)
<i>Senna obtusifolia</i> (L.) H. S. Irwin & Barneby	Caesalpiniaceae	Palo zorrillo (Java-bean)
<i>Phytolacca purpurascens</i> A. Br. et Buuche	Phytolaccaceae	Chichán (Pokeweeds)
<i>Brachiaria fasciculata</i> B.	Poaceae	Zacate de año (Signalgrass)
<i>Solanum nigrum</i> L.	Solanaceae	Hierba mora (Black nightshade)
<i>Conyza canadensis</i> (L.) Cronquist	Asteraceae	Cola de caballo (Horseweed)
<i>Tithonia</i> spp.	Asteraceae	Gigantón (Mexican sunflower)
<i>Momordica charantia</i> L.	Cucurbitaceae	Melón amargo (Bitter melon)
<i>Argemone mexicana</i> L.	Papaveraceae	Cardosanto (Mexican prickly-poppy)
<i>Plantago major</i> L.	Plantaginaceae	Llantén mayor (Broadleaf plantain)
<i>Portulaca oleracea</i> L.	Portulacaceae	Verdolaga (Purslane)
<b>Perennes</b>		
<i>Oxalis</i> spp.	Oxalidaceae	Trébol (Mexican oxalis)
<i>Borreria</i> spp.	Rubiaceae	Estrella blanca (False buttonweed)
<i>Mecardonia procumbens</i> (Mill.) Small	Scrophulariaceae	Hierba té (Waterhyssop)
<i>Verbena</i> spp.	Verbenaceae	Verbena (Vervain)
<i>Talinum paniculatum</i> (Jacq.) Gaertn.	Portulacaceae	Rama de sapo (Big talinum)

**Cuadro 9.** (Continuación)

Especie	Familia	Nombre común español (Inglés)
<b>Perennes</b>		
<i>Cenchrus echinatus</i> L.	Poaceae	Zacate cadillo (Southern sandspur)
<i>Paspalum distichum</i> L.	Poaceae	Camalote (Knotgrass)
<i>Brachiaria mutica</i> (Forssk.) Stapf	Poaceae	Súrbana (Signalgrass)
<i>Cynodon dactylon</i> (L.) Pers.	Poaceae	Zacate bermuda (Bermuda grass)
<i>Sida</i> spp.	Malvaceae	Malva (Fanpetals)
<i>Mimosa pudica</i> L.	Mimosaceae	Dormilona (Sensitive plant)
<i>Paspalum notatum</i> Flüggé	Poaceae	Zacate bahía (Bahia grass)
<i>Sporobolus jacquemontii</i> K.	Poaceae	Zacate de mi casa (American rat's tail grass)
<i>Melinis repens</i> (Willd.) Zizka	Poaceae	Pasto rosado (Rose natal grass)
<i>Setaria macrostachya</i> Kunth	Poaceae	Zacate cola de zorra (Large-spike bristlegrass)
<i>Megathyrsus maximus</i> (Jacq.) B. K. Simon & S. W. L. Jacobs	Poaceae	Zacate privilegio (Guinea grass)
<i>Cynodon Plectostachyus</i> P.	Poaceae	Pasto estrela (Bermuda Grass)
<i>Sorghum halepense</i> (L.) Pers.	Poaceae	Zacate Johnson (Johnson grass)
<i>Cyperus iria</i> L.	Cyperaceae	Coquillo paragüita (Rice flatsedge)
<i>Cyperus rotundus</i> L.	Cyperaceae	Coquillo rojo (Nut grass)
<i>Ipomoea batatas</i> (L.) Lam.	Convolvulaceae	Camote (Sweet potato)

Fuente: Ordoñez-Barahona, 2000; CNPR, 2011; CONABIO, 2012.

En los últimos años en México se ha impulsado el concepto y la práctica de manejo integrado de enfermedades, plagas y malezas, el cual hace uso de manera irracional de algunos productos fitosanitarios. En el Cuadro 10 se enlistan los productos químicos de uso agrícola registrados ante el Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria (SENASICA, 2011b) y que están permitidos en el cultivo de la caña de azúcar en México y su modo de acción de acuerdo al Comité de Acción para la Resistencia a los Insecticidas (IRAC, 2011). Adicionalmente, se sigue investigando el uso de diferentes organismos y sustancias activas de origen natural para el manejo y control de la sanidad de los cañaverales (Arredondo-Bernal y Rodríguez del Bosque, 2008; Nájera-Rincón y Souza, 2010; Salgado-García et al., 2013).

**Cuadro 10.** Productos registrados por el Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria (SENASICA) para el manejo integrado de malezas y plagas de la caña de azúcar en México.

Grupo químico	Nombre común	Nombres comerciales
<b>Malezas</b>		
<b>Reguladores de crecimiento</b>		
Fenoxicarboxílicos	2,4-D	Agrester 400 CE, Esteron* 47 M/Formula 40, Uniamina 720 CE, Herbipol 4-EB, Desmonte 4EB, Cuproester, Herbipol 334-E, Hierbester, 2,4-D Amina 72, Machetazo 2000, Novamina 480, Focus, Banvel 12-24, Crosser, Quron, Tordon 472-M, Diurpax, Resplandor 400,
Benzoicos	Dicamba	Fortune, 2-Camba, Herbamba, Banvel 12-24, Marvel
Piridincarboxílicos	Picloram	Crosser, Quron, Tordon 472-M
<b>Inhibidores de la germinación</b>		
Dinitroanilinas	Pendimethalin	Prowl 400
<b>Inhibidores de la fotosíntesis</b>		
Triazinas	Atrazina	Gesaprim Calibre 90 GDA, Agrox 90 DF, Tetrimex 90 DF, Novaprin 501 FW, Atrapol, Atrazine 500, Desyerbal 500, Combi 80 PH, Caña Z, Atramet Combi 50 SC, Marvel
	Ametrina	Ametrex 80 WG, Gesapax Combi 80 PH, Ametrex 50 WP, Ametrina 500 FW, Novopax 501, Krismat 75 GS, Caña Z, Atramet Combi 50 SC, Diurpax

**Cuadro 10.** (Continuación)

Grupo químico	Nombre común	Nombres comerciales
<b>Malezas</b>		
<b>Inhibidores de la fotosíntesis</b>		
Triazinas	Ametrina	Resplandor 400, Sinerge 500 CE
Triazinonas	Hexazinona	Hexapar 240 CE, Velpar K3, Advance
Triazolinonas	Amicarbazone	Orion
Fenilureas	Diuron	Diurpax, Cention 800 FLO, Karmex 80 DF, Diurex 80 WG, Guerrero 800 DF, Advance, Velpar K3, Karmex Plus, Gramocil
<b>Inhibidores de la síntesis de pigmentos</b>		
Isoxazolidinonas	Clomazone	Gamit 480 CE, Command 480 CE, Sinerge 500 CE,
Isoxazoles	Isoxaflutole	Provence 75 WG, Monte Limpio 75 WG, Merlin 75 WG
<b>Inhibidores de la síntesis de aminoácidos</b>		
Sulfonilureas	Metsulfuron	Karmex Plus, Ally 60 WG, Escort,
Imidazolinonas	Imazapic	Plateau
<b>Desintegradores de membranas plasmáticas</b>		
Bipiridilos	Paraquat (uso restringido)	Quemoxone, Helmquat, Herbipol, Gramoxone, Agroquat, Dragocson, Gramocil
Triazolinonas	Carfentrazone	Affinity 240 CE, Focus,

**Cuadro 10. (Continuación)**

Grupo químico	Nombre común	Nombres comerciales
<b>Malezas</b>		
<b>Desintegradores de membranas plasmáticas</b>		
Arsenicales orgánicos	MSMA	Bueno 6, Daconate, Ansar 6, Target 720 SA, Gramopol
<b>Plagas</b>		
<b>Acción sobre el sistema nervioso o muscular</b>		
Carbamato	Carbofuran	Furadan 5G, Furadan 350 L, Mastin 5G, Convoy 5% G, Interfuran 3-G
	Aldicarb	Temik 15 G, Aldicine 15 G
Organofosforado	Clorpirifos	Magnum L-480, Clorpirifos 48% CE, Libero 480, Dinafos
	Terbufos	Counter FC-15% G
Neonicotinoides	Thiametoxam	Actara 25 GS
	Imidacloprid	Jade
Piretroide	Bifentrina	Brigadier 0.3 G, Talstar 0.3 G, Capture 0.3 G, Hercules Ultra, Alstar 0.3 G
Organoclorados	Endosulfan	Thionex 350 EC, Mantis 350 CE, Endosulfan 350 CE, Endopol
Fenilpirazoles (Fiproles)	Fipronil	Regent 4 SC
<b>Acción sobre el sistema digestivo</b>		
Biológico	Bacillus thuringiensis	Xentari GRD, Javelin WG, Dipel 2X, Thuricide PH, Agree, Delta BT, Aztron

**Cuadro 10. (Continuación)**

Grupo químico	Nombre común	Nombres comerciales
<b>Plagas</b>		
<b>Acción sobre el sistema digestivo</b>		
	Beauveria bassiana	Naturalis L
<b>Anticoagulante por interferencia con la interconversión cíclica de la vitamina K</b>		
Cumarínicos	Difetialona	Rodilon, Solvirex 15%, Disyston 10 GR

Fuente: SENASICA, 2011; IRAC, 2011.

#### **4. ESTRUCTURA DEL SISTEMA AGROINDUSTRIAL AZUCARERO MEXICANO**

El sistema productivo de la caña de azúcar en México es un mosaico de elementos y factores de orden cultural, social, político, económico, técnico, educacional, entre otros, que limitan el desarrollo rural e industrial cañero y tienen inmerso al sistema en un rezago. Para contribuir a su solución es necesario tomar como punto de partida el sector primario, es decir, el campo, caracterizado por bajos ingresos y rendimientos por unidad de producción, fertilización deficiente; superficies de cultivo muy reducidas (en promedio 3 ha por productor), resistencia al cambio tecnológico consecuencia de sus valores culturales y creencias, relaciones sociales complejas, falta de aplicación de reglamentación fitosanitaria, y forma de organización que determinan la presencia del círculo vicioso de bajos rendimientos–bajos ingresos–pobreza–marginación social, económica, ambiental y política (Aguilar-Rivera et al., 2013). Un análisis reciente, sin embargo, refleja que son tres los factores determinantes de la productividad azucarera: rendimiento de campo y agroindustrial, crédito y riego, lo cual contrasta con la priorización de las necesidades de investigación-desarrollo-innovación que han propuesto los productores: generación de nuevas variedades, control de plagas y enfermedades (CONADESUCA, 2013c). Si bien hoy en día existe una cierta dinámica de transformación y modernización, no solo para hacer más productiva esta actividad, sino también para hacer frente a los retos que el cambio climático y la globalización, incluyendo el uso de nuevas tecnologías, con maquinaria y equipos más modernos y ajustándonos a los requerimientos de sustentabilidad ambiental, laboral y social, lo cierto es que estas iniciativas son errátiles, poco consistentes y sostenidas en el tiempo, lo que restringe la consolidación de una verdadera

competitividad global del sistema, que en términos de generación de valor, se constituye como el segundo más importante del país, solo después de la cadena de valor del maíz (Aguilar et al., 2012).

En términos de estructura operativa, los 55 ingenios azucareros que actualmente operan en México pertenecen a 14 los grupos industriales, en tanto que seis ingenios son independientes (Cuadro 11) (MAM, 2013). Así, el 76% de los ingenios azucareros está en manos de la iniciativa privada, y el restante 24% está bajo el control del gobierno federal.

La productividad de los ingenios azucareros es muy variable y en general poco competitiva. Por ejemplo, en la última zafra (2012/2013) el rendimiento promedio de zonas de abastecimiento fluctuó de 53.8 t ha<sup>-1</sup> en Aszuremex Tenosique (Tabasco) a 125.8 t ha<sup>-1</sup> en Tamazula (Jalisco) con un rendimiento promedio nacional de 78.7 t ha<sup>-1</sup>, en tanto que en la zafra anterior (2011/2012) el rendimiento más bajo fue de 35.9 t ha<sup>-1</sup> en el ingenio Alianza Popular (San Luis Potosí) y el más alto fue de 121.4 t ha<sup>-1</sup> en Atencingo (Puebla), con un promedio nacional de 65.8 t ha<sup>-1</sup> para esa zafra (CONADESICA, 2013a). El detalle del análisis de los últimos 30 años se muestra más adelante.

**Cuadro 11.** Grupos Industriales e Ingenios Independientes involucrados en la transformación de la materia prima de la caña de azúcar en México.

Grupo industrial	Ingenio	Estado	Nivel de productividad
Agazucar S.A. DE C.V.	Puga	Nayarit	Medio
SAGARPA-FEESA (Gobierno Federal)	Atencingo	Puebla	Muy alto
	Casasano (La Abeja)	Morelos	Muy alto
	El Modelo	Veracruz	Alto
	El Potrero	Veracruz	Medio
	Emiliano Zapata	Morelos	Muy alto
	La Providencia	Veracruz	Medio
	Plan de San Luis	San Luis Potosí	Muy bajo
	San Cristóbal	Veracruz	Bajo
	San Miguelito	Veracruz	Alto
Grupo Azucarero del Trópico S.A. DE C.V.	La Gloria	Veracruz	Alto
	La Joya	Campeche	Muy bajo
Grupo Azucarero México S.A. DE C.V.	El Dorado	Sinaloa	Alto
	Tala	Jalisco	Alto
	Lázaro Cárdenas	Michoacán	Alto
	Presidente Benito Juárez	Tabasco	Muy bajo

**Cuadro 11.** (Continuación)

Grupo industrial	Ingenio	Estado	Nivel de productividad
Grupo Beta San Miguel	Constancia	Veracruz	Medio
	Quesería	Colima	Alto
	San Francisco Ameca	Jalisco	Alto
	San Miguel del Naranjo	San Luis Potosí	Bajo
	San Rafael de Pucté	Quintana Roo	Muy bajo
	Santa Rosalia (La Chontalpa)	Tabasco	Muy bajo
Grupo García González	Calípam	Puebla	Alto
	El Carmen	Veracruz	Medio
	Nuevo San Francisco	Veracruz	Muy bajo
Grupo La Margarita	Central Progreso	Veracruz	Bajo
	José María Morelos	Jalisco	Medio
	La Margarita	Oaxaca	Medio
Grupo Motzorongo	Central Motzorongo	Veracruz	Medio
	El Refugio (Santa Isabel)	Oaxaca	Medio
Grupo Pantaleón	Fomento Azucarero del Golfo (Zapoapita)	Veracruz	Alto
Grupo Porres	Huixtla	Chiapas	Alto

**Cuadro 11. (Continuación)**

Grupo industrial	Ingenio	Estado	Nivel de productividad
Grupo Porres	San Pedro	Veracruz	Bajo
	Santa Clara	Michoacán	Alto
Grupo Promotora Industrial Azucarera S.A. DE C.V. (PIASA)	Adolfo López Mateos	Oaxaca	Medio
	Tres Valles	Veracruz	Bajo
Grupo Sáenz	Aarón Sáenz Garza	Tamaulipas	Alto
	El Mante	Tamaulipas	Medio
	Tamazula	Jalisco	Muy alto
Ingenios Santos S.A. de C.V.	Alianza Popular	San Luis Potosí	Muy bajo
	Bellavista	Jalisco	Medio
	Cuatotolapan	Veracruz	Bajo
	Pedernales	Michoacán	Alto
	Plan de Ayala	San Luis Potosí	Muy bajo
	San Gabriel	Veracruz	Bajo
Zucarmex	Cía. Azucarera La Fe (Pujiltic)	Chiapas	Alto
	El Higo	Veracruz	Alto
	Mahuixtlán	Veracruz	Alto
	Melchor Ocampo	Jalisco	Muy alto

**Cuadro 11.** (Continuación)

Grupo industrial	Ingenio	Estado	Nivel de productividad
Independientes	Avance Regional (La Primavera)	Sinaloa	Alto
	Azuremex (Tenosique)	Tabasco	Muy bajo
	El Molino	Nayarit	Medio
	Los Mochis	Sinaloa	Alto
	San José de Abajo	Veracruz	Bajo
	San Nicolás	Veracruz	Medio

Fuente: MAM, 2013; Aguilar-Rivera et al., 2012.

Esta dicotomía entre la baja y la alta productividad es debida a las diferencias en tamaño y capacidad de los ingenios, antigüedad y nivel tecnológico, con predominancia de ingenios medianos y pequeños, con antigüedad promedio de 77 años, y tecnologías obsoletas e ineficientes, todo lo cual aumenta los costos de producción y disminuye productividad. Además, esta cadena de valor enfrenta serios problemas de impacto ambiental y es severamente criticada debido a que ocupa grandes extensiones de tierra fértil que podría ser utilizada para la producción de granos básicos, pero también puede acelerar procesos de deforestación, degradación de tierras, el monocultivo implícito, y contaminación generada en suelos, aguas superficiales y subterráneas y aire, a través del uso indiscriminado de fertilizantes, plaguicidas, herbicidas y otros productos de desecho y quema de cañaverales (90% de la superficie sembrada es quemada previo a la cosecha) (Aguilar-Rivera et al., 2012). También es común observar en este sistema el pago de salarios muy bajos y estacionales, excesivas jornadas de trabajo en condiciones deplorables, y el empleo de niños y mujeres en labores por demás riesgosas. De hecho, en México no existe un proyecto sistematizado y que haya permanecido a través de años para desarrollar capacidades humanas en ninguna de las etapas de la cadena de valor, y en promedio, por ejemplo, 71% de los productores del campo solo cuentan con educación básica (seis años de escuela primaria) y el 18% de ellos no sabe leer ni escribir (Aguilar-Rivera et al., 2011), lo que dificulta aún más la transformación de esta realidad.

## **5. LEGISLACIÓN Y ORGANIZACIONES DE LA INDUSTRIA AZUCARERA MEXICANA**

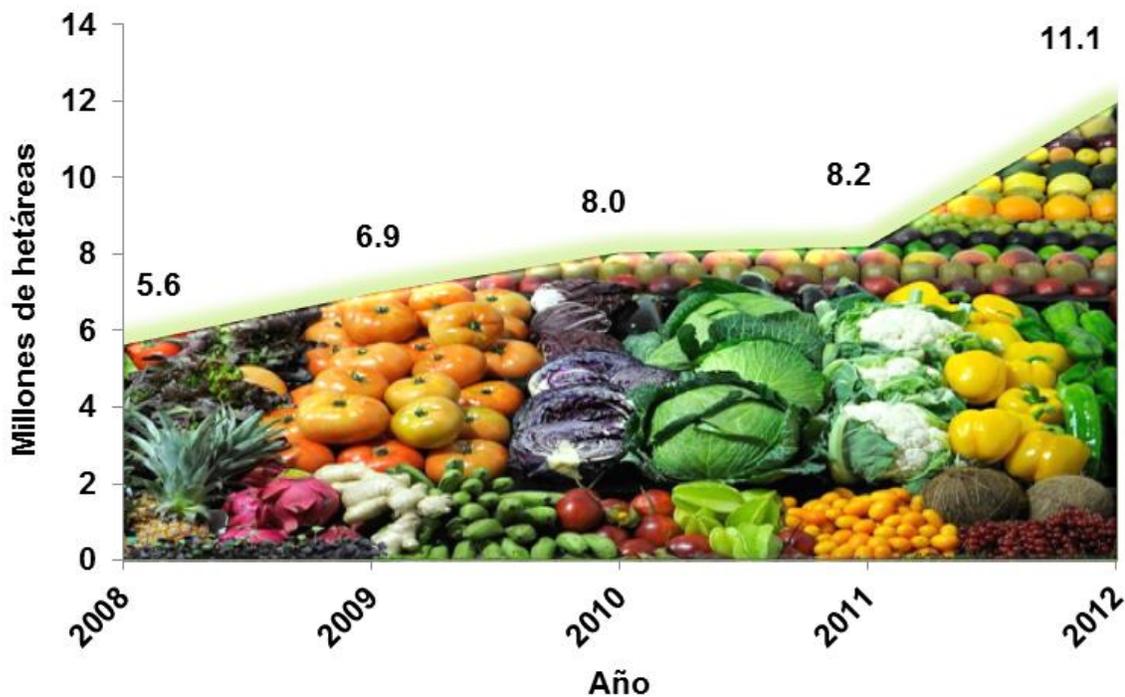
El marco legal que sustenta y regula la actividad azucarera en México es complejo y extenso, integrado por los siguientes leyes, contratos y acuerdos: Ley de Desarrollo Rural Sustentable, Ley de Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar, Programa Nacional de la Agroindustria Cañera 2007-2012, Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos, Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética, Ley del Seguro Social, Ley Federal del Trabajo y tratados internacionales de libre comercio, entre otras. Contrato Ley de la Agroindustria Azucarera y Alcohólica, El ámbito principal de este marco regulatorio tiene que ver con la definición operativa de la siembra, cultivo e industrialización de la caña de azúcar, el cual se diseña, ajusta e instrumenta en base a su propia dinámica y decisiones de sus participantes, en los diferentes órganos del gobierno y representa el nuevo mecanismo de coordinación entre gobierno, productores, industriales y otros agentes (Blackaller-Ayala, 2011). Derivados de la Ley de Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar (LDSCA, 2005), el Programa Nacional de la Agroindustria de la Caña de Azúcar (PRONAC, 2007) y el Acuerdo para la Modernización de la Agroindustria de la Caña de Azúcar pretenden dar mayor certidumbre a esta importante industria nacional en los ámbitos de compra-venta, siembra, cultivo, cosecha, entrega y recepción de caña de azúcar (Blackaller-Ayala, 2011; CONADESUCA, 2011).

En relación con las organizaciones de la agroindustria azucarera, las cuales cumplen funciones específicas en beneficio de esta cadena de valor, se cuenta

con las siguientes: Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar (CONADESUCA); Cámara Nacional de las Industrias Alcohólica y Azucarera (CNIAA); Asociación Nacional de Empresas Azucareras, A.C. (ANEA); Asociación de Técnicos Azucareros de México, A.C. (ATAM); Sindicato de Trabajadores de la Industria Azucarera y Similares de la República Mexicana (STIASRM); Confederación Nacional de Propietarios Rurales, A.C. (CNPR); Unión Nacional de Cañeros, A.C.-CNPR (UNC); Unión Nacional de Productores de Caña de Azúcar, C.N.C., A.C. (UNPCA); y Confederación Regional Obrera Mexicana (CROM).

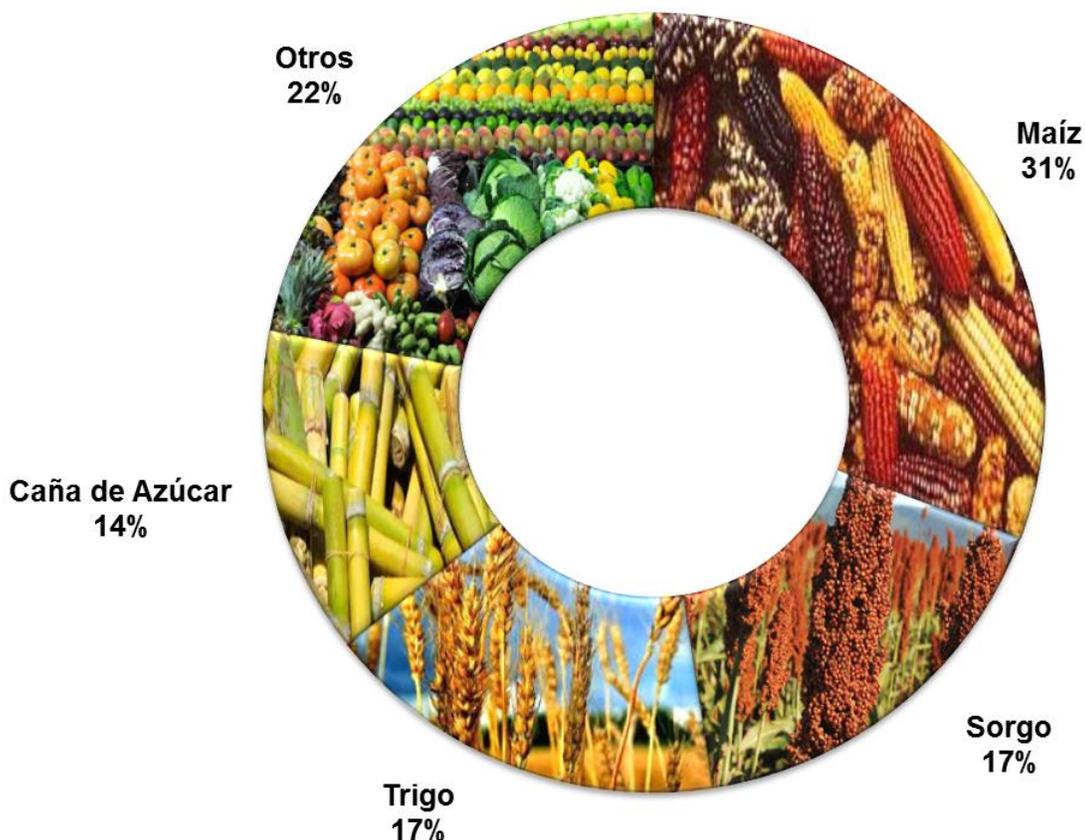
## **6. SEGUROS AGRÍCOLAS Y PARA CAÑA DE AZÚCAR EN MÉXICO**

El sector agropecuario mexicano, presenta fuertes asimetrías en su estructura productiva y una agricultura preponderadamente de temporal, condición en la cual, se encuentra el 78% de la superficie sembrada, dependiente de factores climáticos para su producción. En este contexto, por sus propias características y la ubicación geográfica del país, esta actividad es altamente vulnerable a la incidencia de fenómenos naturales adversos, asociados principalmente a sequía, que representa el 80% del riesgo catastrófico del país, y fenómenos meteorológicos ciclónicos con afectaciones del 18% (AGROASEMEX, 2006). En 2012, casi 12 millones de hectáreas de la agricultura nacional (54% de la superficie cultivada del país) contaron con algún tipo de seguro. Ésta es una cifra récord, que forma parte de una cadena de crecimientos sostenidos en la cobertura desde 2008 (Figura 6), con una tasa de crecimiento del 11.62% que equivale a 1.4 millones de hectáreas de incremento anual (SIAP, 2013).



**Figura 6.** Incremento de la superficie agrícola asegurada de 2008 a 2012 (Fuente: SIAP, 2013).

Del total de los cultivos desarrollados en México, el 80% de los seguros se concentran solo en cuatro: maíz, sorgo, trigo y caña de azúcar, y de este 80% (Figura 7), en tanto que del total de aseguramientos, el 76.4% es operado por los fondos de aseguramiento gubernamentales y el 23.6% por las aseguradoras privadas. Respecto al cultivo de la caña de azúcar, cuyo aseguramiento representa el 14% de la superficie agrícola total asegurada en México, el 91.2% de los seguros son aportados por empresas privadas (AGROASEMEX, 2013).



**Figura 7.** Porcentaje de superficie asegurada por cultivo en México (Fuente: AGROASEMEX, 2013).

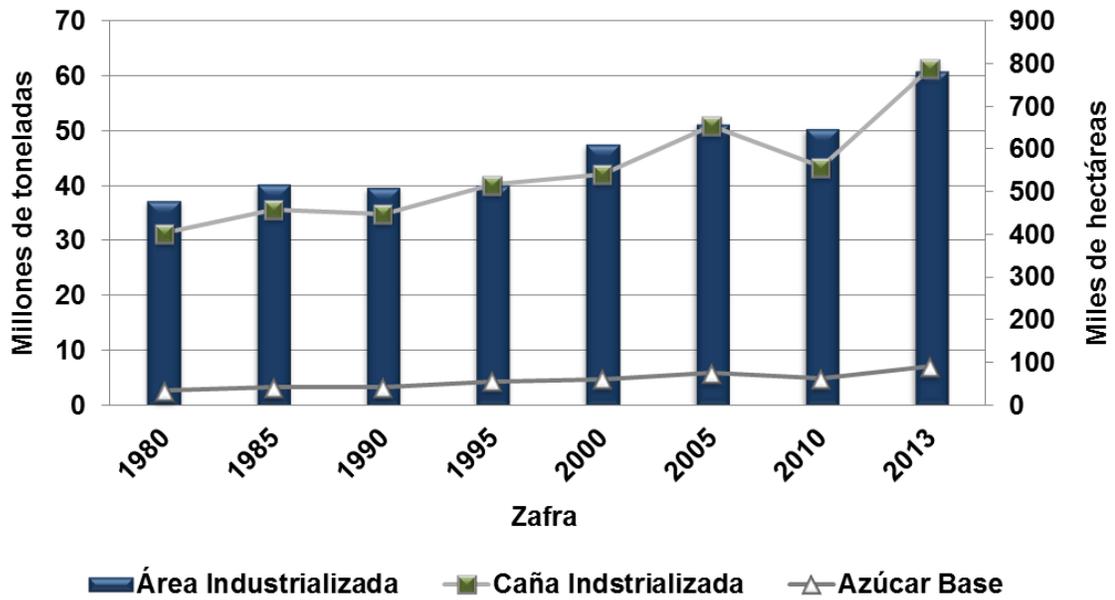
En los últimos años el aseguramiento de la caña de azúcar no ha tenido un crecimiento marcado debido que este cultivo es catalogado como de baja siniestralidad (Altamirano-Cárdenas, 2001). Sin embargo, se calcula que más de 14 mil hectáreas de este cultivo son afectadas cada año, lo que implica pérdidas del orden de los 15.1 millones de dólares anuales (Rivera y Belk, 2012).

Actualmente, de las más de 780 mil hectáreas plantadas con este cultivo en México, 321 mil hectáreas se encuentran aseguradas, lo que representa un 41% de total de superficie sembrada de caña de azúcar (AGROASEMEX, 2013). Este porcentaje de superficie asegurada en caña de azúcar es un indicativo de que se le está dando mayor importancia a los daños y pérdidas por fenómenos naturales

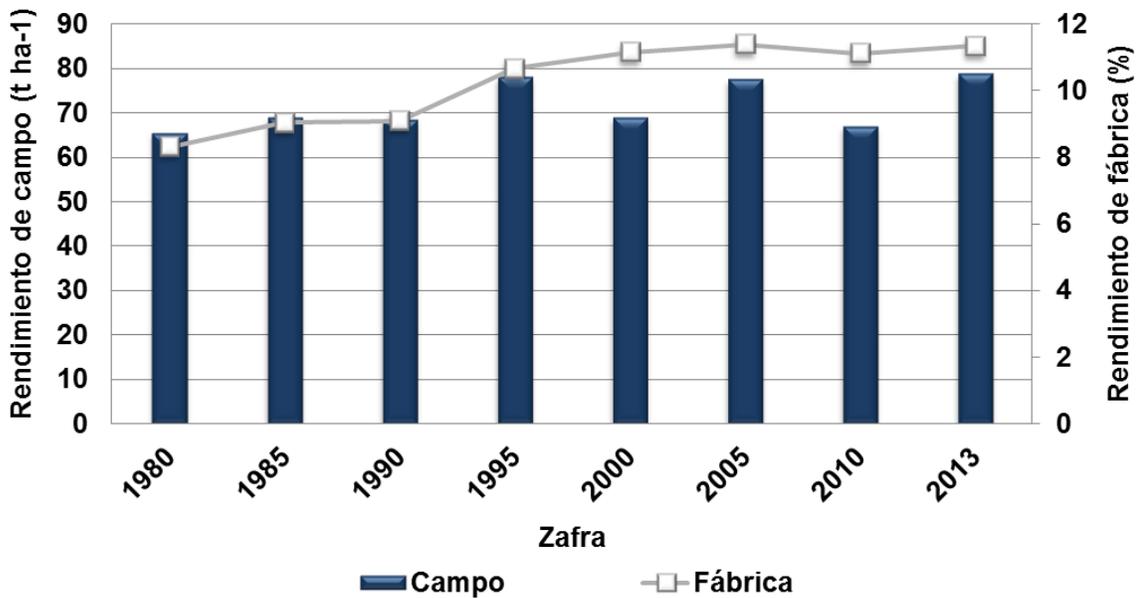
al cultivo, logrando garantizar que el productor cañero, pueda obtener ganancias de su cultivo siniestrado, a través de un pago de subsidio.

## **7. PRODUCTIVIDAD HISTÓRICA DE CAÑA DE AZÚCAR Y AZÚCAR EN MÉXICO**

La producción de la industria azucarera mexicana ha tenido un desarrollo irregular en los últimos treinta años. Por ejemplo, el número de ingenios ha pasado de 67 en 1980, 61 en 1990, 56 en 2000 y 55 al cierre de 2013. En cambio, en este mismo periodo (1980-2013), la superficie sembrada ha aumentado en 39%, la productividad de las zonas de abasto creció 17%, la eficiencia de fábrica de los ingenios mejoró 19%, y la producción de azúcar en 62% (Figuras 8 y 9). La ganancia relativa ha sido debida 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.



**Figura 8.** Incremento en la producción total de caña de azúcar y la superficie sembrada en las últimas tres décadas en México (Fuente: CNIAA, 2013).



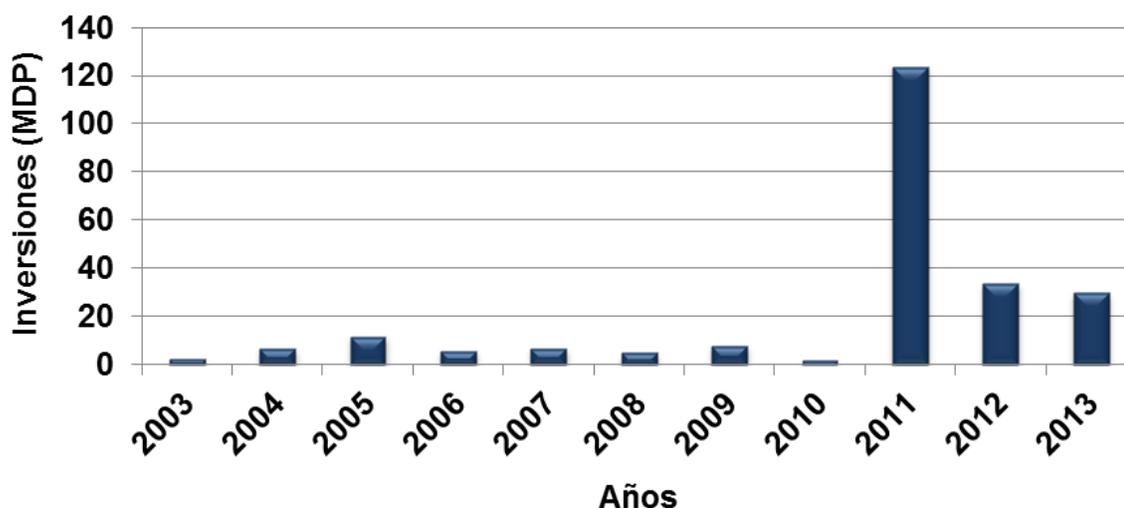
**Figura 9.** Rendimientos caña de azúcar en campo y fábrica en las últimas tres décadas en México (Fuente: CNIAA, 2013).

A pesar de esta tendencia al crecimiento en términos absolutos, si se toman en cuenta cifras relativas, es evidente que la mejora en los indicadores de productividad es modesta. Por ejemplo, mientras el rendimiento promedio en campo en los últimos tres periodos de cosecha (zafras 2010/2011, 2011/2012 y 2012/2013) fue de 70.2 t ha<sup>-1</sup>, en otros países de América Latina como Guatemala, Colombia y Perú, el rendimiento superó las 100 t ha<sup>-1</sup> (SE, 2012). Además, estos aumentos se han sustentado mayoritariamente en subsidios del gobierno y aumento en la superficie sembrada, más que en la eficiencia de los procesos. La tecnología que se usan tanto en campo como en fábrica proviene en su mayoría de otros países, y la inversión en investigación científica, desarrollo tecnológico e innovación (I+D+i) es escasa y errátil, pues México invierte solo 0.49% del PIB en I+D+i (de un mínimo del 1% recomendado por la Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico) y en investigación agrícola solo se canalizan 200 millones de dólares en promedio anual (CONACYT, 2012; OECD, 2013).

## **8. APOYOS GUBERNAMENTALES PARA INVESTIGACIÓN EN CAÑA DE AZÚCAR**

Mientras países como Brasil destinan importantes recursos para la investigación de este cultivo, incluyendo cerca del 30% de la superficie sembrada dedicada a la experimentación, con por lo menos cuatro programas nacionales, en México se dedica menos del 1% de la superficie a esta actividad científica y solo existe un programa de mejoramiento genético con recursos económicos muy precarios (Quintero-Núñez, 2012), por lo que es necesario revertir esta tendencia y diseñar estrategias eficientes y fuentes de financiamiento que permitan aprovechar el

enorme potencial de la caña de azúcar. Los recursos privados para la investigación son prácticamente nulos, en tanto que los gubernamentales solo en los últimos tres años han tenido un repunte (Figura 10), con cerca de 188 millones de pesos aplicados en este periodo (2011-2013), y un total de 271.5 millones de pesos canalizados entre 2003 y 2013.



**Figura 10.** Montos económicos gubernamentales destinados a la investigación en caña de azúcar en México en el periodo de 2003 a 2013 (MDP: Millones de Pesos) (Fuente: CIDCA, 2013; SNITT, 2013).

En el periodo de análisis (2003-2013), los fondos para la investigación científica y desarrollo tecnológico coordinados por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) (principalmente los Fondos Mixtos y los Fondos Sectoriales), han brindado apoyos financieros para la ejecución y puesta en marcha de proyectos de investigación e innovación en el cultivo de la caña de azúcar (SNITT, 2013). Estos apoyos han aumentado de acuerdo a las prioridades que establecieron la LDSCA (2005) y el PRONAC (2007), mediante el Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar (CONADESECA), el cual, marca que las principales prioridades de innovación y transferencia

tecnológica son: generación de nuevas variedades, manejo y control de plagas y enfermedades, además de componentes agrícolas y de tecnificación en riego y la fertilización, de acuerdo con la demanda de los Comités de Producción y Calidad Cañera (CPCC) (CONADESUCA, 2011). Esta priorización, sin embargo, ha dejado sin atender importantes temas como la adaptación al cambio climático en general y el uso eficiente del agua en específico, tópicos de primordial importancia para México, debido a la vulnerabilidad que presentan las regiones agrícolas del país de acuerdo a estimaciones reportadas por Moyer (2010).

Por otra parte, en 2013, el gobierno federal, a través de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA), aprobó un Programa Emergente por la cantidad de 1,500 millones de pesos para el Paquete Tecnológico de la caña de azúcar, con lo que se pretende reforzar la productividad del cultivo en el país, a ser aplicados a partir de 2014 (Blackaller-Ayala, 2013). Con estas iniciativas, se pretende mejorar la productividad de la agroindustria de la caña de azúcar, generando nuevas y mejores tecnologías aplicables a las necesidades imperantes en esta cadena de valor. Sin embargo, si se desea establecer un impacto duradero en esta cadena de valor, tendrá que trabajarse no solamente en ámbitos puramente tecnológicos de campo y fábrica, sino generar las innovaciones en la organización, comercialización y gestión de todo el proceso.

## **9. MEJORAMIENTO GENÉTICO DE LA CAÑA DE AZÚCAR EN MÉXICO**

El desarrollo de variedades mejoradas de caña de azúcar ha sido un factor importante en el progreso y competitividad de la industria azucarera en México. Durante más de cuatro siglos prevalecieron las variedades Criollas Morada, Rayada y Cristalina y a partir de 1930 llegaron las variedades POJ 2878 y Co 290 de Java e India, las cuales mostraron una marcada declinación en la producción. Este hecho hizo necesario el establecimiento de un programa de mejoramiento genético, con el propósito de encontrar variedades adaptadas las condiciones ambientales de México, el cual tuvo su clímax en la década de 1970 y su declive hacia 1990 (Flores-Cáceres, 2001). Por lo tanto, el desarrollo de un programa nacional de impacto en la cadena de valor de la caña de azúcar no ha sido continuo, y por el contrario, enfrenta numerosas limitaciones de naturaleza ambiental, técnica, económica, social y política. Sin embargo, los esfuerzos encaminados por la Cámara Nacional de las Industrias Azucarera y Alcoholera (CNIAA), el Centro de Investigación y Desarrollo de la Caña de Azúcar (CIDCA), SAGARPA, CONADESUCA y las Organizaciones Cañeras (CNPR y CNC), han permitido mantener esta actividad y ser factor fundamental de los avances observados a la fecha.

En cuanto a mejoramiento genético, el principal objetivo de la estrategia nacional es seleccionar variedades adecuadas a las seis regiones agroecológicas del país, a través del trabajo coordinado de once Campos Experimentales Regionales (CER), una estación de Hibridación y otra de Cuarentena.

La estación de Hibridación se encuentran en las instalaciones del CIDCA, localizado en Tapachula, Chiapas, cuya ubicación geográfica proporciona excelentes condiciones naturales para obtener Fuzz (semilla botánica) de alta calidad y viabilidad. Cuenta con un banco de germoplasma compuesto por 2,768 variedades, de las cuales 250 se encuentran clasificadas por sexo y constituyen el Banco de Cruzamientos, que año con año se realizan para las diferentes zonas agroecológicas de nuestro país y compromisos internacionales (CIDCA, 2013). La Estación Nacional Cuarentenaria de la Caña de Azúcar (ENCCA) se localiza en Tizimín, Yucatán, en la cual, el material genético que se recibe de otros países es evaluado durante 18 meses para confirmar su sanidad. El material sano es remitido a los diferentes CER del país así como al CIDCA. El CIDCA ingresa al Banco de Germoplasma solo aquel genotipo que presenta características sobresalientes y utilizarlo como progenitor, dando continuidad para proseguir con el programa de hibridación (Flores-Revilla, 2012).

### **9.1. HIBRIDACIÓN**

El programa de mejoramiento genético inicia en el CIDCA con la hibridación durante los meses de octubre a diciembre (periodo durante el cual las variedades florecen en forma natural) dando lugar a los cruzamientos que son de dos tipos: los biparentales (apareamiento de dos individuos de sexo diferente) y multiparentales (apareamiento de tres o más individuos de diferente sexo). Ambos cruzamientos se realizan en farol para evitar la contaminación de polen extraño. A los dieciocho días después del cruzamiento, se cosecha el Fuzz, procedimiento que consiste en corta las espigas hembra en los cruzamientos biparentales y

espigas hembras y macho en los multiparentales (CIDCA, 2013). Posteriormente se realiza el secado, desgrane, despeluzado, sopleteado y envasado. Finalmente se conservan en refrigeración a 4°C hasta el momento de ser utilizadas (Flores-Revilla, 2012).

## **9.2. SELECCIÓN**

El CIDCA año con año produce Fuzz suficiente para iniciar el proceso de selección a nivel nacional con una población de hasta 360 mil híbridos, el cual, es distribuido entre los CER y el mismo CIDCA (Figura 11) durante el mes de julio del año posterior a la realización de la cruza, para dar inicio con el programa de selección regional, con una población de hasta 30 mil híbridos (Flores, 2012). El CIDCA inicia el proceso de selección de variedades, únicamente en las fases de Plántula y Surco, remitiendo un par de estacas de las variedades sobresalientes (entre 50 y 70) a cada uno de los CER, que dan continuidad con el proceso de selección, estableciendo la fase Cepa (CIDCA, 2013).



**Figura 11.** Coordinación del programa de mejoramiento genético y selección de variedades de caña de azúcar en México. El CIDCA coordina los Centros Experimentales Regionales (CER) y cada CER atiende a un número determinado de ingenios azucareros (Fuente: Flores-Revilla, 2012).

\* Ingenios azucareros que no presentaron actividad en los últimos tres periodos de zafra, mismos que se espera reanuden actividades en las siguientes zafras, por lo que son considerados dentro del programa de selección de variedades de caña de azúcar.

El proceso de selección está constituido por las fases siguientes: Plántula, Surco, Cepa, Parcela, Multiplicación I, Prueba de adaptabilidad, Multiplicación II, Evaluación Agroindustrial, Multiplicación III, Prueba Semicomercial y Semillero. Este proceso permite liberar de una a diez variedades cada 14 a 16 años (Cuadro 12) (IMPA, 1983; Flores-Cáceres, 2001). La nomenclatura de las variedades mexicanas será designada con las siglas Mex, seguidas del año de la generación, y la numeración restante se determinará con base a los rangos asignados a cada CER (Flores-Revilla, 2012).

**Cuadro 12.** Síntesis del proceso de selección de variedades de caña de azúcar en México.

Fase	Periodo de evaluación		Presión de selección	Población teórica	Nomenclatura	Parcela experimental	Superficie total (ha)	Localización	Actividad
	Ciclo	Meses							
Plántula	Soca	18	20%	30,000	Híbrido	1 Cepa c/1 m	4.5	Campo Experimental	Investigación Aplicada
Surco	Soca	24	20%	6,000	Clón	1 Surco de 3 m	4.5	Campo Experimental	Investigación Aplicada
Cepa	Soca	24	20%	6,000	Variedad	1 Cepa c/1.8 m	4.5	Campo Experimental	Investigación Aplicada
Parcela	Soca	24	20 %	1,200	Variedad	3 Surcos de 5 m	5	Campo Experimental	Investigación Aplicada
Multiplicación I	Plantilla	10 a 12	---	240	Variedad	4 Surcos de 5 m	1.2	Campo Experimental	Investigación Aplicada
Prueba de Adaptabilidad	Soca	24	20 %	240	Variedad	3 Surcos de 10 m	2	Campo Experimental	Investigación Aplicada
Multiplicación II	Plantilla	10 a 12	---	48	Variedad	5 Surcos de 25 m	1.2	Campo Experimental	Investigación Aplicada
Evaluación Agroindustrial	Resoca	38 a 42	20%	48	Variedad	6 Surcos de 12 m	1	Campo Experimental	Investigación Aplicada
Multiplicación III	Plantilla	10 a 12	---	1 a 10	Variedad Prometedora	15 Surcos de 50 m	1.2 a 12	Campo Experimental o Comercial	Investigación Aplicada
Prueba Semicomercial	Plantilla	10 a 12	---	1 a 10	Variedad Prospecto Comercial	1 Ha	1 a 10	Campo Comercial	Desarrollo Experimental
Semillero	Plantilla	10 a 12	---	1 a 10	Variedad Liberada	10 Ha	10 a 100	Campo Comercial	Desarrollo

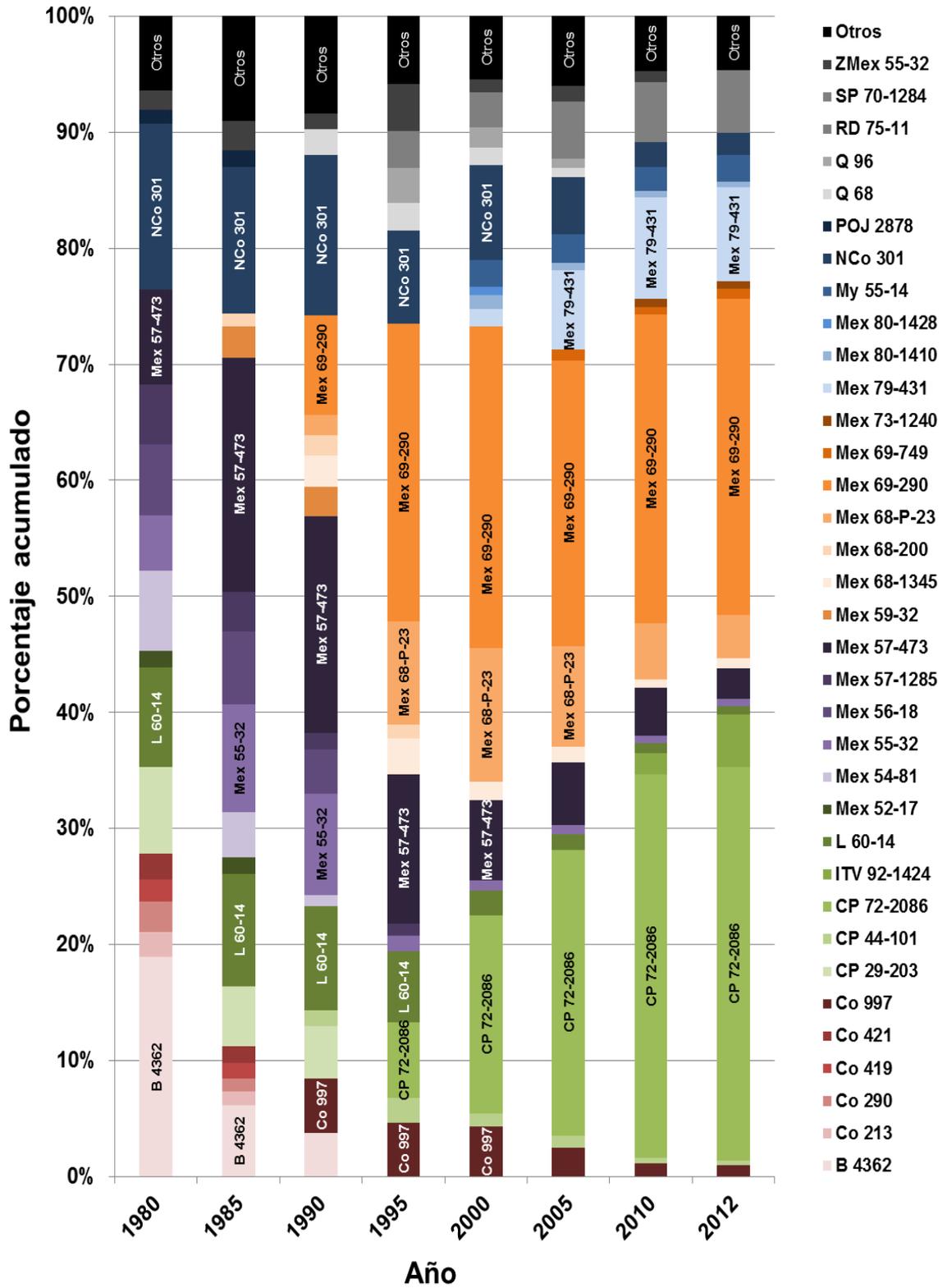
### **9.3. AVANCES EN EL MEJORAMIENTO GENÉTICO DE CAÑA DE AZÚCAR EN MÉXICO**

A partir del inicio de los trabajos de mejoramiento genético de caña de azúcar en México en 1943, se han observado importantes resultados que han contribuido a fortalecimiento de esta actividad. La primera variedad mexicana de caña de azúcar, la PoMex 72, fue generada a partir de este programa. Sin embargo, en un inicio se adolecía de una estructura definida, y con la creación del Instituto para el Mejoramiento de la Producción de Azúcar (IMPA) en 1949 y la Estación de Hibridación en 1951, se reorganizaron los trabajos de hibridación. Fue en 1952 que se logró la producción de más de 50 mil híbridos, y se pudieron obtener las variedades Mex 52-29, Mex 52-32 y ZMex 52-32 (IMPA, 1975).

A partir de la desaparición del IMPA hacia 1990, los trabajos de hibridación y selección de variedades de caña de azúcar en México se han desarrollado de forma irregular y discontinua (Flores-Cáceres, 2001; Valdez-Balero, 2009). La Estación de Hibridación en el actual CIDCA retomó la mayor parte del trabajo y ha permitido que más de 150 variedades mexicanas se hayan liberado, y ocupen el 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 CNIAA (CIDCA, 2013). Las variedades mexicanas sobresalientes son: Mex 69-290, Mex 79-431, ITV 92-1424, Mex 68-P-23, Mex 57-473, ATEMEX 96-40, Mex 69-749, Mex 68-1345, Mex 55-32, Mex 73-1240 y Mex 80-1410, en tanto que las extranjeras de mayor importancia son: CP 72-2086, RD

75-11, My 55-14, NCo 310, SP 70-1284, Co 997, L 60-14 y CP 44-101 (MAM, 2013).

Gracias al programa de mejoramiento genético, la producción y productividad de caña de azúcar ha ido en aumento y han tenido un crecimiento anual del 0.4%. Sin embargo, en comparación con los aumentos en rendimiento observados en Brasil, los cuales han alcanzado el 1.5% anual (Waclawovsky et al., 2010), las ganancias que se han obtenido en México son aún precarias. Por otro lado, mientras en 1980, nueve variedades ocupaban el 70% de área cultivada, en 2013, este número se ha reducido a solo cuatro variedades que ocupan el mismo porcentaje de superficie de cultivo (Figura 12). Esto indica que el programa de mejoramiento del país necesita ampliar su base genética, dada la tendencia a una mayor homogeneidad de los materiales que hacen más vulnerable al sistema ante embates de naturaleza tanto biótica como abiótica (Alejandre-Rosas et al., 2010; González-Jiménez et al., 2011).



**Figura 12.** Distribución porcentual de variedades de caña de azúcar extranjeras y nacionales en México de 1980 a 2012 (Fuente: MAM, 1981, 1986, 1991, 1996, 2001, 2006, 2011 y 2013).

En términos de capacidades científicas, México cuenta con una importante infraestructura en laboratorios y centros de investigación, incluyendo el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), la Universidad Autónoma Chapingo (UACH), el Colegio de Postgraduados (COLPOS), la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN), el Centro de Investigación en Alimentos y Desarrollo (CIAD), el Centro de Investigación y Estudios Avanzados (CINVESTAV), los cuales conjuntan una planta científica de más de 5,000 investigadores, y la matrícula de estudiantes en ciencias agrícolas en el país asciende a más de 44 mil (CONACYT, 2012; OCDE, 2013; ANUIES, 2012), lo cual constituye una de las grandes ventajas que pudieran aprovecharse para atender las necesidades de innovación para el mejoramiento genético y demás procesos en campo y fábrica.

## **10. NUEVAS DIRECTRICES EN LA CADENA DE VALOR DE LA CAÑA DE AZÚCAR**

En cuanto a campo, uno de las primeras directrices a seguir para mejorar la competitividad de la cadena de valor de la caña de azúcar es elevar las capacidades humanas a través del desarrollo de conocimientos y habilidades en todos los actores involucrados, pero principalmente en los productores primarios y los técnicos de campo. Éstos últimos deberían continuar y consolidar el programa de capacitación en manejo de tecnologías de información y comunicación (TIC) que la SAGARPA inició en 2008, pero que no ha tenido el debido seguimiento para su implementación en la práctica en el 100% de los ingenios y las zonas de abasto de caña de azúcar del país.

Si bien el país aún tiene capacidad para incrementar hasta siete veces la superficie de cosecha de caña de azúcar (pasar de 800 mil a 5 millones de hectáreas), este crecimiento tiene que estar acompañado de una excelente planeación del destino de la materia prima para alimento, biocombustible, industria farmacéutica y sucroquímica, entre otras, dado que por ejemplo, los ingenios no se han modernizado y el número de destilerías para producción de etanol han decrecido significativamente. La mayor potencialidad para tal crecimiento 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 (deficiente selección de variedades mejoradas, manejo de suelo, riego y drenaje, labores culturales, manejo de fertilizantes y productos fitosanitarios y cosecha), ambiental (embates de naturaleza biótica y abiótica como plagas, enfermedades, malezas, sequías, heladas, inundaciones y huracanes) y socioeconómico (compleja organización de productores, con un importante componente político, bajo nivel educativo, escasa inversión en I+D+i, marco legal limitativo, reducida superficie por productor, deficiente acceso al crédito pero altos subsidios, entre otros).

En el análisis de los últimos ciclos de producción (de 1980 a la fecha), el rendimiento en campo ha sido irregular y con excepción de la última zafra (2012/2013), en general este indicador ha ido a la baja, al pasar de 70.4 t ha<sup>-1</sup> en la zafra 2010/2011 a 66.2 t ha<sup>-1</sup> en 2011/2012. Los puntos a atender en este aspecto tienen que ver con los factores limitantes ya descritos para campo, pero

además, también entra en juego la posibilidad aumentar la competitividad de la industria, a través de diferentes estrategias que implican incrementar el rendimiento en campo y fábrica, el acceso al crédito y la superficie de riego. La posibilidad de aprovechar de manera integral productos, coproductos, subproductos y derivados en ramas tan variadas como alimentación, salud, agricultura, industria química, energía, transporte, vivienda y construcción, es otra alternativa que tiene que ser analizada por los tomadores de decisiones, productores, industriales, científicos y académicos, a fin de aprovechar esta ventana de oportunidad que implica la apertura económica y el crecimiento industrial del país.

Debido a situaciones endémicas que provocan rezagos tanto en los procesos de campo como de fábrica y a la escasa inversión en procesos de I+D+i, la tecnología con que se cuenta en México para la producción de materia prima y azúcar es obsoleta e ineficiente, y no se han construido los espacios y estrategias para generar desarrollos apropiados para atender las demandas del sector. De ahí que la mayor parte de las herramientas y paquetes tecnológicos se importen. En México es frecuente encontrar una estrecha relación entre el desarrollo y las políticas para el campo, principalmente a través de la canalización de apoyos gubernamentales y el control de los pagos por los propietarios de los ingenios, sin la creación de tecnologías domésticas ni avances tecnológicos para incrementar la productividad sustentable y el uso eficiente de la materia prima proveniente de la caña de azúcar, lo que en parte ha sido la causa de crisis recurrentes en este sector productivo y ha disminuido el interés de los grupos industriales por apoyar

la gestión de innovaciones que impulsen esta cadena de valor. Por ello, es necesario replantear políticas y estrategias tendientes a mejorar las condiciones actuales del sistema y desarrollar con éxito sus capacidades y potencialidades. Generación de tecnologías propias, desarrollo de procesos productivos sustentables y con responsabilidad social, aplicación de tecnologías de la información y comunicación, nanociencias y biotecnologías son algunas de las directrices sugeridas para alcanzar estos cometidos.

Es importante resaltar que aun en las condiciones poco óptimas para lograr avances destacados, en México se siguen generando nuevas variedades de caña de azúcar, se tiene un importante avance en la digitalización del campo cañero, se han generado paquetes tecnológicos para el manejo integrado de plagas y enfermedades, haciendo uso de control biológico y un número creciente de ingenios hacen uso del cultivo *in vitro* de plantas para la propagación de materiales libres de enfermedades y de alta calidad. Sin embargo, poco se ha hecho en términos del estudio del genoma de la caña de azúcar y de la biota asociada. Actualmente, el país cuenta con capacidad para desarrollar proyectos de secuenciación de genomas y metagenomas, lo cual abre una gran posibilidad para impulsar el desarrollo de esta cadena de valor.

Así, el nuevo sistema de producción de caña de azúcar en México debe plantearse desde una perspectiva integral, con enfoques inter y transdisciplinarios. El desarrollo de equipos de trabajo con conocimientos y habilidades complementarios (productores, industriales, tomadores de decisiones, científicos y académicos de diferentes disciplinas) será determinante para el logro de estas

estrategias. En las agendas de trabajo, será prioritario plantear el desarrollo programas educativos, de desarrollo humano y de gestión del conocimiento, en la primera escala jerárquica, principalmente en los productores con menor nivel educativo, a fin de que éste se constituya como un detonante en el proceso de gestión del cambio. De allí, y en concordancia con el PRONAR, será necesario continuar con aspectos técnicos como el diagnóstico de las condiciones edáficas y climáticas limitantes; labranza y conservación del suelo y el agua; fechas y densidades de siembra; generación, selección de variedades y producción de semilla adecuada; manejo apropiado de la nutrición (fertilización) del cultivo; manejo sustentable de agentes patógenos, plagas y malezas; cosecha mecanizada y cosecha en verde. Este mismo esquema de trabajo tendría que aplicarse en fábrica, de manera que las innovaciones se completen hasta la gestión del proceso, incluyendo aspectos tecnológicos, organizacionales y comerciales.

## **11. CONCLUSIONES**

La caña de azúcar es un cultivo con grandes posibilidades de crecimiento en México, dado que su potencial de rendimiento puede llegar a más de 800 t ha<sup>-1</sup> en verde, mientras que actualmente se obtienen aproximadamente 70 t ha<sup>-1</sup>; por otro lado, las proyecciones de tierras con potencial para el cultivo en el país podrían expandirse a cerca de 5 millones de hectáreas.

México cuenta con infraestructura científica importante, aunque no suficiente para atender las demandas de esta y otras ramas del sector, por lo que se hace necesario continuar el crecimiento de inversiones tanto públicas como privadas,

que actualmente son escasas y errátiles. Dentro de los aspectos que es necesario atender resulta prioritario el desarrollo de capacidades en todos los agentes involucrados en la cadena de valor, pero prioritariamente en los productores con menor grado de escolaridad, así como continuar los trabajos para fortalecer los programas de generación de nuevas variedades (ampliar la base genética) capaces de producir en las condiciones adversas que enfrenta el país por efecto del cambio climático, mejorar las prácticas agronómicas en cuanto al manejo del agua y la nutrición del cultivo (fertilización balanceada y con base en el estudio de las necesidades de la planta), ampliar el sistema de captación y aprovechamiento del agua y los sistemas de riego, continuar la búsqueda de estrategias sustentable para el manejo integral de agentes patógenos causantes de enfermedades, plagas y malezas, aumentar la mecanización y la cosecha en verde, mejorar la distribución de las zonas de abasto para hacer uso eficiente de los medios de transporte y el combustible y hacer uso de tecnologías avanzadas de información y comunicación, incluyendo en lo posible una mayor automatización de procesos. La diversificación de la cadena de valor es una alternativa que podría incrementar la rentabilidad de esta actividad, y que se debe implementar con base en una eficiente planeación y negociación pertinente con los agentes involucrados; en este componente, el aumento de rendimientos en campo y fábrica, el acceso al crédito y la infraestructura para el riego resultan determinantes.

La cadena de valor de la caña de azúcar es la segunda más importante del país, y resulta estratégica para generar mayores empleos, energía alterna, y sustratos para otras industrias como la farmacéutica, la sucroquímica y nuevos enfoques

como biofábrica para la producción de azúcares de alto valor, bioplásticos y proteínas farmacológicas, entre otros.

La actual crisis por la que atraviesa esta cadena de valor (rendimientos de campo y fábrica por debajo de la media mundial, baja rentabilidad, obsoleta infraestructura, personal poco capacitado, adversidades bióticas y abióticas, reducidas superficies de cultivo que dificultan la sistematización y programación de las cosechas, complicado régimen de tenencia de la tierra, escaso acceso al crédito y a la inversión, negativo impacto en el ambiente y desafíos impuestos por la entrada de edulcorantes sustitutos del azúcar) reclama un esfuerzo considerable de todos los actores involucrados, empezando por la educación y el desarrollo humano y considerando los actuales y futuros adelantos tecnológicos que hagan de esta actividad una rama competitiva a nivel global.

## LITERATURA CITADA

- Aceves-Navarro, L.A., 2009.** La caña de azúcar y el clima. In: Valdez-Balero, A., Guerrero-Peña, A., García-López, Obrador-Olán, J.J. (Eds.), Manual para el cultivo y producción de caña de azúcar. Colegio de Postgraduados, México, pp. 3-8.
- Aday-Díaz, O.C., Barroso-Medina, F., Izquierdo-Rojas, L.N., 2003.** Estimación de pérdidas causadas por *Diatrea saccharalis* (Fab.), en la provincia de Villa Clara, Cuba. Centro Agrícola 30, 37-40.
- AGROASEMEX, 2006.** La Experiencia Mexicana en el Desarrollo y Operación de Seguros Paramétricos Orientados a la Agricultura. <http://www.agroasemex.gob.mx/index.php/es/atencionclientes/descargas/funcion-startdown/292/> (consultado octubre 2013).
- AGROASEMEX, 2013.** Programa del Subsidio a la Prima del Seguro Agropecuario. Informe de Avance al Tercer Trimestre de 2013. <[http://www.agroasemex.gob.mx/images/RecursosFederales/SubsidioPrima/PROGRAMA\\_DEL\\_SUBSIDIO\\_A\\_LA\\_PRIMA\\_DEL\\_SEGURO\\_AGROPECUARIO\\_3ER\\_TRIMESTRE\\_2013.pdf](http://www.agroasemex.gob.mx/images/RecursosFederales/SubsidioPrima/PROGRAMA_DEL_SUBSIDIO_A_LA_PRIMA_DEL_SEGURO_AGROPECUARIO_3ER_TRIMESTRE_2013.pdf)> (consultado octubre 2013).
- Aguilar Rivera, N., Rodríguez L.D.A., Enríquez, R.V., Castillo, M.A., Herrera, S.A., 2012.** The Mexican Sugarcane Industry: Overview, Constraints, Current Status and Long-Term Trends. Sugar Tech. 14, 207-222.
- Aguilar-Rivera N., 2012.** Paradigma de la diversificación de la agroindustria azucarera de México. Convergencia Revista de Ciencias Sociales 59, 187-213.

- Aguilar-Rivera, N., 2011.** Competitividad de la agroindustria azucarera de la huasteca México tesis que para obtener el grado de doctorado en ciencias ambientales. Tesis de Doctorado. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. 502 p.
- Aguilar-Rivera, N., 2013.** Análisis de productividad de etanol de caña de azúcar en ingenios azucareros de México. *Ciencia Ergo Sum.* 20, 17-28.
- Aguilar-Rivera, N., Arturo-Rodríguez, A., Castillo-Morán, A., Herrera-Solano, A., 2012.** Sucroquímica, alternativa de diversificación de la agroindustria de la caña de azúcar. *Multiciencias* 12, 7-15.
- Aguilar-Rivera, N., Galindo-Mendoza, G., Fortanelli-Martínez, J., Contreras-Servín, C., 2010.** Competitividad internacional de la industria azucarera mexicana. *Theoria* 19, 7-29.
- Aguilar-Rivera, N., Galindo-Mendoza, G., Fortanelli-Martínez, J., Contreras-Servín, C., 2011.** Factores de competitividad de la agroindustria de la caña de azúcar en México. *Región y Sociedad* 13, 261-297.
- Alejandro-Rosas, J.A., Galindo-Tovar, M.E., Lee-Espinoza, H.E., 2010.** Variabilidad genética en 22 variedades híbridas de caña de azúcar (*Saccharum* spp. Híbrido). *Phyton* 79, 87-94.
- Altamirano-Cárdenas, J.R., 2001.** La Reforma al Sistema de Aseguramiento Agropecuario y la Participación de los Productores Organizados en la Operación del Seguro. Comisión Nacional de Seguros y Finanzas, México, D. F. 165 p.  
<<http://www.cnsf.gob.mx/Eventos/Premios/2001%20Seguros/2001%20Seguros%20Segundo%20vf.pdf>> (consultado octubre 2013)

- Andrade, L.A.B., 2006.** Cultura de cana de açúcar. In: Cardoso, M.G. (Ed.), Produção de aguardente de cana, 2ª Edição. UFLA, Brasil, pp. 25-67.
- ANUIES, 2012.** Anuario Estadístico Digital 2012. Asociación de Universidades e Instituciones de Educación Superior. México, D. F. <<http://www.anuies.mx/content.php?varSectionID=166>> (consultado octubre 2013).
- Arredondo-Bernal, H.C., Rodriguez del Bosque, L.A., 2008.** Casos de control biológico en México. Mundiprensa-INIFAP. México, D. F. 423 p.
- Blackaller-Ayala, C., 2011.** La agroindustria mexicana de la caña de azúcar en México. Unión Nacional de Cañeros, A.C.-CNPR. <[http://www.caneros.org.mx/site\\_caneros/descargas/pleno\\_aguascalientes/presentacion\\_Blackaller-Ayala.pdf](http://www.caneros.org.mx/site_caneros/descargas/pleno_aguascalientes/presentacion_Blackaller-Ayala.pdf)> (consultado octubre 2013).
- Blackaller-Ayala, C., 2013.** Aprueba gobierno federal mil 500 millones de pesos para paquete tecnológico de la caña de azúcar: cba. <[http://www.caneros.org.mx/site\\_caneros/bol/bol01/BOLETIN\\_OCT\\_021.pdf](http://www.caneros.org.mx/site_caneros/bol/bol01/BOLETIN_OCT_021.pdf)> (consultado octubre 2013)
- Cervantes, F.A., Ballesteros-Barrera, C., 2012.** Estudios sobre la Biología de Roedores Silvestres Mexicanos. Instituto Biología. Universidad Nacional Autónoma de México. Universidad Autónoma Metropolitana. 280 p.
- CIDCA, 2013.** Centro de Investigación y Desarrollo de la Caña de Azúcar (CIDCA). <<http://www.camaraazucarera.org.mx/cidca.asp>> (consultado octubre 2013).
- CNIAA, 2011.** Manual Azucarero Mexicano. Cámara Nacional de las Industrias Azucarera y Alcoholera. Edición 54º. México, D. F.

**CNIAA, 2013.** Resumen de producción de la agroindustria azucarera mexicana zafras 1959/1960-2012/2013. Cámara Nacional de las Industrias Alcohólica y Azucarera. México, D.F.

**CNPR, 2004.** Mosca pinta.  
<[http://www.caneros.org.mx/site\\_caneros/investigaciones/moscapinta2004.pps](http://www.caneros.org.mx/site_caneros/investigaciones/moscapinta2004.pps)> (consultado octubre 2013).

**CNPR, 2011.** Malezas.  
<[http://www.caneros.org.mx/site\\_caneros/investigaciones/malezas.pps](http://www.caneros.org.mx/site_caneros/investigaciones/malezas.pps)>  
(consultado octubre 2013).

**CNPR, 2013.** Estadísticas de la Agroindustria de la Caña de Azúcar 2003/2012. Confederación Nacional de Productores Rurales. Unión Nacional de Cañeros.  
<[http://www.caneros.org.mx/site\\_caneros/estadisticas/nacional.pdf](http://www.caneros.org.mx/site_caneros/estadisticas/nacional.pdf)>  
(consultado octubre 2013)

**COLPOS, 2008.** Manejo Sustentable de la Fertilidad del Suelo y de la Nutrición de la Caña de Azúcar. Colegio de Postgraduados.  
<[http://siazucar.siap.gob.mx/materiales/pdf/Resumen\\_Informe.pdf](http://siazucar.siap.gob.mx/materiales/pdf/Resumen_Informe.pdf)>  
(consultado octubre 2013)

**CONABIO, 2012.** ¡Bienvenidos al sitio Malezas de México!.  
<<http://www.conabio.gob.mx/malezasdemexico/2inicio/home-malezas-mexico.htm>> (consultado octubre 2013)

**CONACYT, 2012.** Informe General del Estado de la Ciencia, la Tecnología y la Innovación. Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. México, D. F.

[http://www.siicyt.gob.mx/siicyt/docs/Estadisticas3/Informe2011/INFORME\\_2011.pdf](http://www.siicyt.gob.mx/siicyt/docs/Estadisticas3/Informe2011/INFORME_2011.pdf) (consultado octubre 2013)

**CONADESUCA, 2009.** Diagnósticos de suelos.  
<[http://www.infocana.gob.mx/informacion.php?cv\\_cl=2&cv\\_in=5](http://www.infocana.gob.mx/informacion.php?cv_cl=2&cv_in=5)>  
(consultado octubre 2013).

**CONADESUCA, 2011.** Estrategia Integral para Incrementar la Productividad del Campo Cañero.  
<<http://www.cndsca.gob.mx/foro%20Jalisco/Estrategia%20integral.pdf>>  
(consultado octubre 2013).

**CONADESUCA, 2012a.** Boletín de la Corrida de Campo 20.  
<[http://www.infocana.gob.mx/mos\\_boletin.php?id=131](http://www.infocana.gob.mx/mos_boletin.php?id=131)> (consultado octubre 2013).

**CONADESUCA, 2012b.** Boletín de la Corrida de Campo 24.  
<[http://www.infocana.gob.mx/mos\\_boletin.php?id=135](http://www.infocana.gob.mx/mos_boletin.php?id=135)> (consultado octubre 2013)

**CONADESUCA, 2012c.** Proyecto nacional para el control de plagas y enfermedades de la caña de azúcar.  
<<http://www.colpos.mx/web11/pdf/Investigacion/Reunion/3CP%20septiembre%202012.pdf>> (consultado octubre 2013).

**CONADESUCA, 2013a.** Sistema INFOCaña. Campo y Fábrica: Zafra 2012-2013.  
<<http://www.campomexicano.gob.mx/azcf/entrada/menu.php>> (consultado agosto 2013).

**CONADESUCA, 2013b.** PARTICIPACIÓN ESTATAL DE CAÑA DE AZÚCAR MOLIDA (2012/2013).

<<http://www.cndsca.gob.mx/regionesparticipacionestatal.html>> (consultado agosto 2013).

**CONAPO, 2010a.** Índice de marginación por entidad federativa y municipio 2010.

<[http://www.conapo.gob.mx/es/CONAPO/Indices\\_de\\_Marginacion\\_2010\\_por\\_entidad\\_federativa\\_y\\_municipio](http://www.conapo.gob.mx/es/CONAPO/Indices_de_Marginacion_2010_por_entidad_federativa_y_municipio)> (consultado octubre 2013).

**CONAPO, 2010b.** Índice de marginación por localidad 2010.

<[http://www.conapo.gob.mx/es/CONAPO/Indice\\_de\\_marginacion\\_por\\_localidad\\_2010](http://www.conapo.gob.mx/es/CONAPO/Indice_de_marginacion_por_localidad_2010)> (consultado octubre 2013).

**Cruz-González, E., 2009.** El manual del productor de caña de azúcar. ATIDER, México, D. F. 79 p.

**Cheavegatti-Gianotto, A., Couto de Abreu, H.M., Arruda, P., Bessalho-Filho, J.C., Lee-Burnquist, W., Creste, S., di Ciero, L., Aparecido-Ferro, J., Vargas de Oliveira Figueira, A., de Sousa-Filgueiras, T., Grossi-de-Sá, M.F., Guzzo, E.G., Hoffmann, H.P., Andrade-Landell, M.G., Macedo, N., Matsuoka, S., de Castro-Reinach, F., Romano, E., da Silva, W.J., de Castro-Silva-Filho, M., Ulian, E.C., 2011.** Sugarcane (*Saccharum X officinarum*): a reference study for the regulation of genetically modified cultivars in Brazil. *Trop. Plant Biol.* 4, 62-89.

**Chinea-Martín, A., Milanés-Ramos, N., 2006.** Enfermedades de la caña de azúcar en México. In: Castillo-Morán, A., Rodríguez-Lagunes, A., Milanés-Ramos, N., Aguilar-Rivera, N., Ordoñez-Barahona, P., Enríquez-Ruvalcaba, V., Herrera-Solano, A., Ortiz-Romero, H. (Eds.), *Temas selectos de la caña de azúcar 1*. Dirección General Editorial. Universidad Veracruzana, Veracruz, México, pp.72-85.

- Chinea-Martín, A., Rodríguez-Lema, E.L., 1994.** Enfermedades de la caña de azúcar. INICA, Cuba. 100 p.
- Dal-Bianco, M., Sampaio-Carneiro, M., Takeshi-Hotta, C., Giacomini-Chapola, L., Hoffmann, H.P., Franco- Garcia, A.A., Mendes-Souza, G., 2012.** Sugarcane improvement: how far can we go? Curr. Opin. Biotechnol. 23, 265-270.
- Esqueda, V.A., 1999.** Control de malezas en caña de azúcar con clomazone y ametrina. Agronomía Mesoamericana 10, 23-30.
- FAOSTAT, 2013.** Sugarcane production. Food and Agriculture Organization. Rome, Italy. <<http://faostat.fao.org/site/339/default.aspx>> (consultado noviembre 2013).
- Flores-Cáceres, C. S., 2001.** Las variedades de caña de azúcar en México. Editorial ATAM, México. 308 p.
- Flores-Cáceres, S., 1997.** Las enfermedades de la caña de azúcar en México. ATAM, México. 283 p.
- Flores-Cáceres, S., 2007.** Las plagas de la caña de azúcar en México. ATAM, México. 288 p.
- Flores-Revilla, C., 2012.** Proyectos: Avances y Resultados 2012. <[http://www.caneros.org.mx/site\\_caneros/descargas/pleno\\_gdl/04\\_PONENCIA\\_ESTACIONES\\_HIBRIDACION.pdf](http://www.caneros.org.mx/site_caneros/descargas/pleno_gdl/04_PONENCIA_ESTACIONES_HIBRIDACION.pdf)> (consultado octubre 2013).
- García-Espinoza, A., 1984.** Manual de campo en caña de azúcar. IMPA. México. 468 p.
- Gómez-Merino, F.C., Hernández-Anguiano, A.M., 2013.** El Contexto del Sector Agroalimentario en México. In: Hernández-Anguiano, A.M., Gómez-Merino,

F.C. Pérez-Hernández, L.M., Villanueva, J.J.A. (Eds.), Líneas Prioritarias de Investigación. Informe de Gestión 2009-2011. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. pp. 11-20.

**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. In press

**González-Jiménez, V., Valdez-Balero, A., Gómez-Merino, F.C., Silva-Rojas, H.V., Pérez-Flores, J., Ortiz-García, C.F., 2011.** Caracterización molecular de variedades de caña de azúcar cultivadas en el estado de Tabasco, México. *Biotecnología Vegetal* 11, 107-113.

**Hernández-Rosas, F., 2012.** Estrategias de investigación y transferencia de tecnología transferencia de tecnología para el Manejo Integrado de la Mosca Pinta. <  
[http://www.caneros.org.mx/site\\_caneros/descargas/pleno\\_gdl/06\\_Presentation\\_manejo\\_mosca\\_pinta191212.pdf](http://www.caneros.org.mx/site_caneros/descargas/pleno_gdl/06_Presentation_manejo_mosca_pinta191212.pdf) > (consultado octubre 2013).

**IMPA, 1975.** Veinticinco años de investigación cañera en México. Instituto para el Mejoramiento de la Producción Azucarera-Cámara Nacional de la Industria Azucarera y Alcohólica, México, D. F. 303 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.

**INEGI, 2009.** Estadísticas históricas de México 2009. <  
[http://www.inegi.org.mx/prod\\_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/in](http://www.inegi.org.mx/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/in)

tegracion/pais/historicas10/Tema1\_Poblacion.pdf> (consultado octubre 2013).

**INEGI, 2010.** Cuéntame. Información por entidad. Territorio-Población-Economía. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. <<http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/default.aspx?tema=me>> (consultado octubre 2013).

**INIFAP, 2011.** Primer Foro Nacional de Investigación y Tecnología en Caña de Azúcar. <[http://www.caneros.org.mx/site\\_caneros/descargas/pleno\\_aguascalientes/mesa\\_uno/alerta\\_fitosanitaria\\_UNC-INIFAP\\_2011\\_M1.pdf](http://www.caneros.org.mx/site_caneros/descargas/pleno_aguascalientes/mesa_uno/alerta_fitosanitaria_UNC-INIFAP_2011_M1.pdf)> (consultado octubre 2013).

**IRAC, 2011.** Clasificación del Modo de Acción de Insecticidas y Acaricidas, IRAC-España. 18 p. <[http://www.illac-online.org/content/uploads/modo\\_de\\_accion\\_Oct11.pdf](http://www.illac-online.org/content/uploads/modo_de_accion_Oct11.pdf)> (consultado septiembre 2013).

**Koike, H., 1988.** Sugar-cane diseases. A guide for field identification. FAO, Rome, Italy. 129 p.

**LDSCA, 2005.** Ley de Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar. Diario Oficial de la Federación. <<http://www.ordenjuridico.gob.mx/leyes.php>> (consultado octubre 2013).

**MAM, 1981.** 24<sup>o</sup> Edición. Compañía Editora del Manual Azucarero. México, D.F.

**MAM, 1986.** 29<sup>o</sup> Edición. Compañía Editora del Manual Azucarero. México, D.F.

**MAM, 1991.** 34<sup>o</sup> Edición. Compañía Editora del Manual Azucarero. México, D.F.

**MAM, 1996.** 39<sup>o</sup> Edición. Compañía Editora del Manual Azucarero. México, D.F.

- MAM, 2001.** 44<sup>o</sup> Edición. Compañía Editora del Manual Azucarero. México, D.F.
- MAM, 2006.** 49<sup>o</sup> Edición. Compañía Editora del Manual Azucarero. México, D.F.
- MAM, 2011.** 54<sup>o</sup> Edición. Compañía Editora del Manual Azucarero. México, D.F.
- MAM, 2013.** 56<sup>o</sup> Edición. Compañía Editora del Manual Azucarero. México, D.F.
- Márquez, J.M., 2002.** Metodología del muestreo de daño y pérdidas ocasionadas por rata en caña de azúcar.  
<[http://www.cengicana.org/publicaciones/manejo-rata/Perdidas\\_por\\_Rodadores\\_y\\_Metodologia\\_de\\_Muestreo.31.pdf](http://www.cengicana.org/publicaciones/manejo-rata/Perdidas_por_Rodadores_y_Metodologia_de_Muestreo.31.pdf)>  
(consultado octubre 2013)
- Morán-Castillo, A., Milanés-Ramos, N., Rodríguez-Lagunes, D.A., Aguilar-Rivera, N., 2006.** Producción de “semilla” de caña de azúcar. In: Castillo-Morán, A., Rodríguez-Lagunes, A., Milanés-Ramos, N., Aguilar-Rivera, N., Ordoñez-Barahona, P., Enríquez-Ruvalcaba, V., Herrera-Solano, A., Ortiz-Romero, H. (Eds.), Temas selectos de la caña de azúcar 1. Dirección General Editorial. Universidad Veracruzana, Veracruz, México, pp.33-41.
- Moyer, M., 2010.** How much is left? A graphical accounting of the limits to what one planet can provide. Scientific American. pp. 74-81.
- Nájera-Rincón, M.B., Souza, B., 2010.** Insectos benéficos. Guía para su identificación. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Uruapan, Michoacán, México, 73 p. <[http://www.agroeco.org/socla/pdfs/INSECTOS\\_BENEFICOS.pdf](http://www.agroeco.org/socla/pdfs/INSECTOS_BENEFICOS.pdf)>  
(consultado octubre 2013).
- OECD, 2013.** OECD Science, Technology and Industry Scoreboard 2013. Innovation for Growth. Organization for Economic Cooperation and

Development. Paris, France. [http://dx.doi.org/10.1787/sti\\_scoreboard-2013-en](http://dx.doi.org/10.1787/sti_scoreboard-2013-en) (consultado octubre 2013).

**Ordoñez-Barahona, P., 2000.** Estudio de las malezas en diferentes ambientes de la caña de azúcar (*Saccharum spp.*) en el Ingenio San Miguelito, Veracruz, México. Tesis de Maestría en Manejo y Explotación de los Agrosistemas de la Caña de Azúcar presentada a la Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias de la Universidad Veracruzana, Región Córdoba-Orizaba, México.

**Palma-López, D.J., 2009.** La caña de azúcar y el clima. In: Valdez-Balero, A., Guerrero-Peña, A., García-López, Obrador-Olán, J.J. (Eds.), Manual para el cultivo y producción de caña de azúcar. Colegio de Postgraduados, México, pp. 8-15.

**Peña-Ramos, J.L., López-Collado, J., Alarcón-Zúñiga, B., Vargas-Mendoza, M., Vázquez-López, I., Landeros-Sánchez, C., 2009.** Composición de la dieta de *Sigmodon hispidus* (Rodentia: Cricetidae) en caña de azúcar. *Mastozool. Neotrop.*16, 365-378.

**Pérez-Zamorano, A., 2007.** Tenencia de la tierra y agroindustria azucarera. Editorial Porrúa. México, D. F. 214 p.

**PRONAC, 2007.** Programa Nacional de la Agroindustria de la Caña de Azúcar (PRONAC) 2007-2012. Cámara Nacional de las Industrias Azucarera y Alcoholera.

<[http://www.camaraazucarera.org.mx/pagina\\_2011/Pronac/Default.asp](http://www.camaraazucarera.org.mx/pagina_2011/Pronac/Default.asp)>  
(consultado agosto 2013).

**PRONAR, 2009.** Proyecto Nacional de Alta Rentabilidad para el Reordenamiento y Transformación del Campo Cañero Mexicano. < <http://www.zafranet.com/---files/PDF/PRONARHomologada.pdf>> (consultado octubre 2013).

**Quintero-Núñez, S., 2012.** Proyecto de mejoramiento genético de caña de azúcar (PMGCA). Grupo PIASA. <<http://www.cndsca.gob.mx/citcana/PROYECTO%20MEJORAMIENTO%20GEN%C3%89TICO%20PIASA.pdf>> (consultado octubre 2013).

**Rebollar-Alviter, A., Sánchez-Pale, J.R., Silva-Rojas, H.V., 2012.** Manejo integrado de *Fusarium* spp. en variedades cultivadas y prometedoras de caña de azúcar. CANIEM, México, D.F. 20 p.

**Rivera, R., Belk, B., 2012.** Transferencia de Riego en la Agroindustria de Caña de Azúcar. < [http://www.caneros.org.mx/site\\_caneros/descargas/pleno\\_gdl/02\\_Rolando\\_Rivera\\_AgroCorporateSolutions\\_Presentation\\_CANA\\_RR2.pdf](http://www.caneros.org.mx/site_caneros/descargas/pleno_gdl/02_Rolando_Rivera_AgroCorporateSolutions_Presentation_CANA_RR2.pdf) > (consultado octubre 2013)

**Rodríguez del Bosque, L.A., 2012.** Proyecto Nacional: Manejo Integrado de Barrenadores de la Caña de Azúcar en México. < [http://www.caneros.org.mx/site\\_caneros/descargas/pleno\\_gdl/05\\_barrenadores\\_GUADALAJARA\\_dic2012.pdf](http://www.caneros.org.mx/site_caneros/descargas/pleno_gdl/05_barrenadores_GUADALAJARA_dic2012.pdf)> (consultado octubre 2013).

**Rodríguez del Bosque, L.A., Vejar-Cota, G., 2008.** Barrenadores del tallo (Lepidoptera:Crambidae) del maíz y caña de azúcar. In: Arrendon-Bernal, H.C., Rodríguez del Bosque, L.A. (Eds.), Casos de control biológico en México. Ed. MundiPrensa, México, pp. 9-22.

**Ruiz-Corral, J.A., Medina-García, G., 2012.** Metodología de la caracterización edafoclimática de áreas cañeras. In: Báez-González, A.D., Medina-García, G., Ruiz-Corral, J.A., Ramos-González, J.L. (Eds.), Características climáticas y edáficas de las zonas de abastecimiento de ingenios cañeros en México. Libro Técnico No. 13. INIFAP, Zacatecas, México. 519 p.

**Salazar, J.D., Quiros, O., Morera, E., Oviedo, R., Barrantes, J.C., 2006.** Estimación del Factor de Pérdida por Daños del Barrenador del Tallo (*Diatraea* spp.) en Cinco Regiones de Costa Rica. <<http://www.laica.co.cr/biblioteca/buscar.do?p=1&q=ESTIMACION+DEL+FACTOR+DE+P%C9RDIDA+POR+DA%D1OS+DEL+BARRENADOR+DEL+TALLO+%28Diatraea+spp%29+EN+CINCO+REGIONES+DE+COSTA+RICA&x=51&y=10>> (consultado octubre 2013).

**Salgado-García, S., Lagunes-Espinoza, L.C., Núñez-Escobar, R., Ortiz-García, C.F., Bucio-Alanis, L., Aranda-Ibañez, E., 2013.** Caña de azúcar. Producción sustentable. Mundi Prensa-Colegio de Postgraduados. México, D. F. 528 p.

**Sánchez-Galván, C., 2005.** Manejo integrado de plagas de la caña de azúcar (Mosca pinta y Barrenadores). <<http://biblioteca.inifap.gob.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/321/66.pdf?sequence=1>> (consultado octubre 2013).

**SE, 2012.** Análisis de la situación económica, tecnológica y de política comercial del sector edulcorantes en México. Secretaría de Economía. <[http://www.economia.gob.mx/files/comunidad\\_negocios/industria\\_comercio/Analisis\\_Sectorial\\_Mercado\\_Edulcorantes.pdf](http://www.economia.gob.mx/files/comunidad_negocios/industria_comercio/Analisis_Sectorial_Mercado_Edulcorantes.pdf)> (accessed August 2013).

- SENASICA, 2011a.** Roya anaranjada de la caña de azúcar (Orange rust) (Puccinia kuehnii (Krüger). <[http://www.cndsca.gob.mx/documentosmenuvertical/Ficha%20Tecnica%20ROYA%20NARANJA%20DE%20LA%20CA%C3%91A%20DE%20AZUCAR%20\(Puccinia%20kuehnii\).pdf](http://www.cndsca.gob.mx/documentosmenuvertical/Ficha%20Tecnica%20ROYA%20NARANJA%20DE%20LA%20CA%C3%91A%20DE%20AZUCAR%20(Puccinia%20kuehnii).pdf)> (consultado octubre 2013).
- SENASICA, 2011b.** Listado de Plaguicidas de Uso Agrícola. Última Actualización Enero 2011. <<http://www.senasica.gob.mx/>> (consultado octubre 2013).
- Serra, G., Trumper, E., 2006.** Estimación de incidencia de daños provocados por larvas de *Diatraea saccharalis* (Lepidoptera: Crambidae) en tallos de maíz mediante evaluación de signos externos de infestación. *Agriscientia* 23, 1-7.
- SIAP, 2012.** Cierre de la producción agrícola por cultivo 2012. <[http://www.siap.gob.mx/index.php?option=com\\_wrapper&view=wrapper&Itemid=350](http://www.siap.gob.mx/index.php?option=com_wrapper&view=wrapper&Itemid=350)> (consultado octubre 2013)
- SIAP, 2013.** Una mirada al panorama agroalimentario de México y el mundo. <<http://www.campomexicano.gob.mx/boletinsiap/007-e.html>> (consultado octubre 2013).
- SIAZUCAR, 2009.** Convención Nacional de Geografía 2009. <<http://mapserver.inegi.org.mx/geografia/espanol/eventos/cng2009/memoria/cng2009/20091019%20siazucar%20para%20cng%20julio%20c-rivera.pps>> (consultado octubre 2013).
- Singelmann, P., 2003.** La transformación política de México y los gremios cañeros del PRI. *Revista Mexicana de Sociología* 65, 117-152.
- SNITT, 2013.** Proyectos en proceso y concluidos. Sistema Nacional de Investigación y Transferencia Tecnológica para el Desarrollo Rural

Sustentable. <[http://www.snitt.org.mx/p\\_cientifica.html](http://www.snitt.org.mx/p_cientifica.html)> (accessed October 2013).

**UN-WATER, 2012.** How much water is needed to produce your meal? <[http://www.unwater.org/worldwaterday/downloads/WWD2012\\_VW\\_LIST1.pdf](http://www.unwater.org/worldwaterday/downloads/WWD2012_VW_LIST1.pdf)> (consultado octubre 2013).

**Valdés-Barrón, M., Estévez-Pérez, H.R., Riveros-Rosas, D., Bonifaz-Alfonso, R., Jiménez-de la Cuesta, E., 2012.** Energía solar disponible. <[http://www.geofisica.unam.mx/ors/energia\\_solar.pdf](http://www.geofisica.unam.mx/ors/energia_solar.pdf)> (consultado octubre 2013)

**Valdez-Balero, A., 2009.** Variedades. In: Valdez-Balero, A., Guerrero-Peña, A., García-López, Obrador-Olán, J.J. (Eds.), Manual para el cultivo y producción de caña de azúcar. Colegio de Postgraduados, México, pp. 15-25.

**Vásquez-López, I., Lorenzo-Monterrubio, C., Bolaños-Citalan, J., 2013.** Roedores Habitantes de los Agroecosistemas Cañeros. Guía de Campo. PROSGRAF, Xalapa, Veracruz, México. 197 p.

**Vázquez-López, I., 2005.** Factores que intervienen en las fluctuaciones poblacionales de *Sigmodon hispidus* (Rodentia: Cricetidae) en agroecosistemas cañeros, Veracruz, México. Tesis inédita de Doctor en Ciencias. Colegio de Postgraduados, México.

**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, 263-76.

**Yadav D.V., Jain, R. and Rai, R., K., 2010.** Impact of Heavy Metals on Sugarcane. In: Sherameti, I. and Varma, A. (Eds.). Soil Heavy Metals-Soil Biology, pp. 339-367.

**ZAFRANET, 2013.** Avances en la producción de azúcar (Zafra). Nuestro país, sexto productor mundial de azúcar y quinto en exportaciones del dulce. <<http://www.zafranet.com/category/es/analisis-es/mexico-analisis-es/avances-de-la-zafra/>> (consultado octubre 2013).

### CAPITULO 3. ANÁLISIS FILOGENÉTICO DE VARIEDADES DE CAÑA DE AZÚCAR (*Saccharum* spp.) EN MÉXICO

#### RESUMEN

Se utilizaron secuencias de ADN para evaluar las relaciones filogenéticas entre *Saccharum*, *Miscanthus* e híbridos modernos de caña de azúcar. Se secuenciaron dos regiones de ADN, que incluye el intrón *trn* L y el espacio intergénico *trn* L-F del genoma de cloroplasto. La reconstrucción filogenética se realizó con el método estadístico de Máxima Parsimonia. Se incluyeron accesiones depositadas en el GenBank correspondientes a nueve especies del género *Saccharum*, tres de *Miscanthus*, una de *Dimeria* y otra de *Pennisetum* (como fuera de grupo). Se observó la formación de un grupo polifilético, el cual revela que existen aportaciones del género *Miscanthus* en los híbridos estudiados, y que la cercanía de la mayoría de éstos es con especies del género *Saccharum*, destacando *S. officinarum* y *S. spontaneum*. Dentro de este grupo se formó un grupo central, el cual se separó del resto, con dos híbridos originarios de Canal Point, Florida (CP 44-101, CP 72-2086), el híbrido mexicano ITV 92-1424 y la especie *Miscanthidium junceum* que es considerando dentro del género *Miscanthus*. Esto indica que estos híbridos tienen más cambios en su ADN y se alejan del género *Sacharum*, pero que guarda cierta relación, debido a que *Sacharum* es el pariente más cercano del género *Miscanthus*.

**Palabras clave:** Andropogoneae, *Saccharum*, Azúcar, Máxima Parsimonia, *trn* L, *trn* L-F, Árbol filogenético

### CHAPTER 3. PHYLOGENETIC ANALYSIS OF VARIETIES OF SUGARCANE (*Saccharum* spp.) IN MEXICO

#### ABSTRACT

ADN sequences were used to assess the phylogenetic relationships among *Saccharum*, *Miscanthus* and modern hybrids of sugarcane. Two regions of ADN, including the *trn* L intron and *trn* L-F intergenic spacer chloroplast genome were sequenced. Phylogenetic reconstruction was performed using the statistical method of Maximum Parsimony. Accessions deposited in the GenBank corresponding to nine species of the genus *Saccharum*, three to *Miscanthus*, one to *Dimeria* and other to *Pennisetum* (outside of the group) were included. A polyphyletic group was observed, which reveals a contribution of the genus *Miscanthus* in the hybrids studied, and that the proximity of most of these is to the genus *Saccharum*, standing out the species, *S. officinarum* and *S. spontaneum*. Within this group, a core group which was separated from the rest, with two hybrids original from Canal Point, Florida (CP 44-101 and CP 72-2086), the Mexican hybrid ITV 92-1424 and *Miscanthidium junceum* species was formed. This indicates that these hybrids show more changes in their ADN and away the genus *Saccharum*, but somewhat related, because *Sacharum* is the closest relative of the genus *Miscanthus*.

**Keywords:** Andropogoneae, *Saccharum*, Sugar, Maximum Parsimony, *trn* L, *trn* L-F, Phylogenetic tree

## 1. INTRODUCCIÓN

Los esfuerzos en el mejoramiento del cultivo de caña de azúcar (*Saccharum* spp.) se han encaminado en la búsqueda de formas varietales que presenten mayor contenido de sacarosa, destacando la especie *Saccharum officinarum*, que hasta inicios del siglo XX era responsable de la materia prima mundial (Flores-Cáceres, 2001).

La taxonomía actual indica que la caña de azúcar pertenece a la familia Poaceae y al género *Saccharum*, con seis especies: *S. officinarum* ( $2n = 80$ ), *S. spontaneum* ( $2n = 40-128$ ), *S. robustum* ( $2n = 60-80$ ), *S. sinense* ( $2n = 81-124$ ), *S. barberi* ( $2n = 111-120$ ) y *S. edule* ( $2n = 60-80$ ) (Brandes 1958; Daniels y Roach, 1987). Los cultivares actuales (*Saccharum* spp.) son complejos híbridos interespecíficos entre *S. officinarum* y *S. spontaneum* (Berding y Roach, 1987), con aportaciones de *S. robustum*, *S. sinense* y *S. Barberi* (Cheavegatti-Gianotto et al., 2011) y géneros afines como *Miscanthus*, *Narenga* y *Erianthus* (Moore et al., 2013). Presentan un alto número cromosómico ( $2n = 100-130$ ), de los cuales entre el 70 y 80% proviene de *S. officinarum*, del 10 al 20% de *S. spontaneum*, y aproximadamente el 10% son recombinaciones entre las dos especies (D'Hont et al., 1995; Piperidis et al. 2000). Lo anterior es indicador de una base genética restringida, que limita los avances en los programas de mejoramiento genético, asociados con el alto nivel de ploidía, la ocurrencia de aneuploidía y su complejidad citogenética de los híbridos interespecíficos (Grivet y Arruda, 2001; Creste et al., 2010). Además de presentar un genoma extraordinariamente grande, con pequeños cromosomas, lo que complica los estudios citogenéticos (Pan et al., 2000).

Las relaciones entre los géneros *Saccharum*, *Ripidium*, *Erianthus*, *Miscanthus*, *Narenga* y *Sclerostachya* han sugerido un grupo interrelacionado en el origen de la caña de azúcar, el cual se conoce como el “complejo *Saccharum*” (Mukherjee, 1957). Por consiguiente, se han utilizado los géneros afines como *Miscanthus* para la introgresión de genes (Lo et al., 1986). El uso de *Erianthus* spp. es más reciente (Tai y Miller, 1988) por sus características genotípicas deseables, tales como vigor, tolerancia al estrés ambiental, y resistencia a enfermedades de la caña de azúcar (Piperidis et al., 2000).

Análisis filogenéticos realizados en *Miscanthus*, *Saccharum* y otros géneros mostraron que algunas especies de *Saccharum* están más estrechamente relacionados con *Miscanthus* que otras especies de *Saccharum* o del complejo *Saccharum* (Sobral et al., 1994). Sin embargo, datos moleculares han demostrado que sólo son dos las verdaderas especies en el género *Saccharum*: *S. spontaneum* y *S. officinarum* (Irvine, 1999; Grivet et al., 2004). Datos genómicos recientes para la evaluación genética de la diversidad dentro de *Saccharum* sugieren relaciones entre las accesiones que pueden producir en última instancia, una clasificación definitiva para el grupo (Moore et al., 2013).

Existen varias estrategias para el análisis de estas relaciones y a la fecha se han llevado a cabo varios estudios empleando Polimorfismos en la Longitud de los Fragmentos de Restricción (RFLP) (D’Hont et al., 1994; Jannoo et al., 1999; Coto et al., 2002; Schenck et al., 2004), ADN ribosomal (Glazsmann et al., 1990), Polimorfismos en la Longitud de Fragmentos Amplificados (AFLP) (Lima et al., 2002; Hoarau et al., 2002; Butterfield et al., 2004), y microsatélites (Piperidis et al.,

2000; Pan et al., 2003; Cordeiro et al., 2003). Entre los diferentes tipos de marcadores moleculares disponibles, los microsatélites son los más utilizados por ser altamente polimórficos, presentar alta reproducibilidad y ser codominantes (Creste et al., 2010), por lo que se ha evaluado el potencial de estos marcadores a partir de bibliotecas de ADN genómico de cultivares (*Saccharum* spp.), lo que indica que este tipo de marcador es una herramienta eficaz en genética de caña de azúcar y su selección, incluyendo el análisis de germoplasma, la identificación de cultivares y evaluación de progenitores (Cordeiro et al., 2006). Por lo tanto, la determinación de la distribución de secuencias de ADN repetitivas en las especies del género *Saccharum* y otros géneros permitirá una mejor comprensión de las relaciones entre los genomas de estas especies y de la taxonomía del grupo, además de la secuenciación del genoma completo de la caña de azúcar (Nishiyama-Jr et al., 2010).

En términos de análisis filogenético en caña de azúcar, se han empleado marcadores moleculares de genes nucleares, de cloroplastos y mitocondriales (Bacci-Jr et al., 2001). Los marcadores utilizados en genes nucleares son: *18S* (Hillis y Dixon, 1991; Duff y Nickernt, 1999; Soltis et al., 1999; Soltis y Soltis, 2000), *ITS1*, *5.8S*, *ITS2* (Hillis y Dixon, 1991), *EF-1 alfa* (Baldauf et al., 1996). Para genes mitocondriales se ha repotado el uso de *COI* (Goto y Kimura, 2001), *COII* (Monteiro y Pierce, 2001), y *COIII* (Hiesel et al., 1994). En lo que refiere a genes de cloroplastos se han utilizado *rcbL* (Olmstead y Palmer, 1994; Soltis et al., 1999; Soltis y Soltis, 2000), *rp16* (Olmstead y Palmer, 1994), *atpB* (Olmstead y Palmer,

1994; Soltis et al., 1999), y intrón *trn* L y el espacio intergénico *trn* L-F (Hodkinson et al., 2002).

En este contexto, pocos estudios se han realizado en diversidad y relaciones filogenéticas de las variedades cultivadas y utilizadas en los programas de hibridación de México. Alejandre-Rosas et al. (2010), estudió la diversidad de 22 variedades utilizadas como progenitores en el programa de hibridación mexicano. Para el estudio, probó catorce iniciadores tipo RAPDs, los cuales se analizaron mediante distancias genéticas. Observaron tres grupos principales, los cuales no guardaron ninguna relación en cuanto a características agroindustriales, de origen o distribución geográfica. Concluyeron que las variedades B 35187, POJ 2878 y Mex 68-P-23 son buenos progenitores, debido a ser genéticamente las más alejadas. González-Jiménez et al. (2011), caracterizó la variabilidad genética de doce variedades cultivadas en el estado de Tabasco, mediante AFLP. Utilizó doce combinaciones de enzimas de restricción *Eco*RI y *Mse*I. Los resultados mostraron dos grupos bien diferenciados y una variedad fuera de ellos, indicando que la variedad Mex 68-P-23 resulta ser un buen progenitor en los programas de hibridación y selección de variedades de caña de azúcar.

El conocimiento previo acerca de la taxonomía y relaciones evolutivas de los progenitores de variedades de caña, y el desarrollo histórico de variedades nuevas, es importante en la apreciación alguna de las características clave de la caña de azúcar. El objetivo de este estudio fue analizar las relaciones filogenéticas de cultivares caña de azúcar del complejo *Saccharum*, mediante el análisis de las secuencias correspondientes al intrón *trn*L y el espacio intergénico *trn*L-F del

cloroplasto de doce variedades de caña de azúcar utilizadas como progenitores en el programa de mejoramiento genético de México.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 MATERIAL VEGETAL

Se colectaron doce variedades de caña de azúcar del banco de germoplasma del Centro de Investigación y Desarrollo de la Caña de Azúcar (CIDCA) ubicado en Tapachula, Chiapas, México (Cuadro 1).

**Cuadro 1.** Variedades de caña de azúcar utilizadas para la identificación filogenética

Variedad	Progenitores		País de origen
	Hembra ♀	Macho ♂	
ATEMEX 96-40	Mex 59-641	X Mex 57-473	México
Co 997	Co 683	X P 63-32	India
CP 44-101	Co 281	X CP 1165	Estados Unidos
CP 72-2086	CP 62-374	X CP 63-588	Estados Unidos
ITV 92-1424	Polinización libre de CP 72-2086	X ?	México
Mex 68-P-23	Mex 59-89	X ?	México
Mex 69-290	Mex 56-476	X Mex 53-142	México
Mex 79-431	Co 421	X Mex 57-473	México
My 55-14	CP 34-79	X B 45181	Cuba
NCo 310	Co 421	X Co 312	India
POJ 2878	POJ 2364	X EK 28	India
SP 70-1284	CB 41-76	X ?	Brasil

?. Cruza multiparental o de polinización libre con progenitor masculino no identificado.

Estas variedades se encuentran distribuidas en todos los estados productores de caña de azúcar del país (Figura 1) y forman parte del programa de hibridación, debido a sus características industriales, agronómicas y fitosanitarias.



**Figura 1.** Distribución de las variedades de caña de azúcar en las regiones productoras de México.

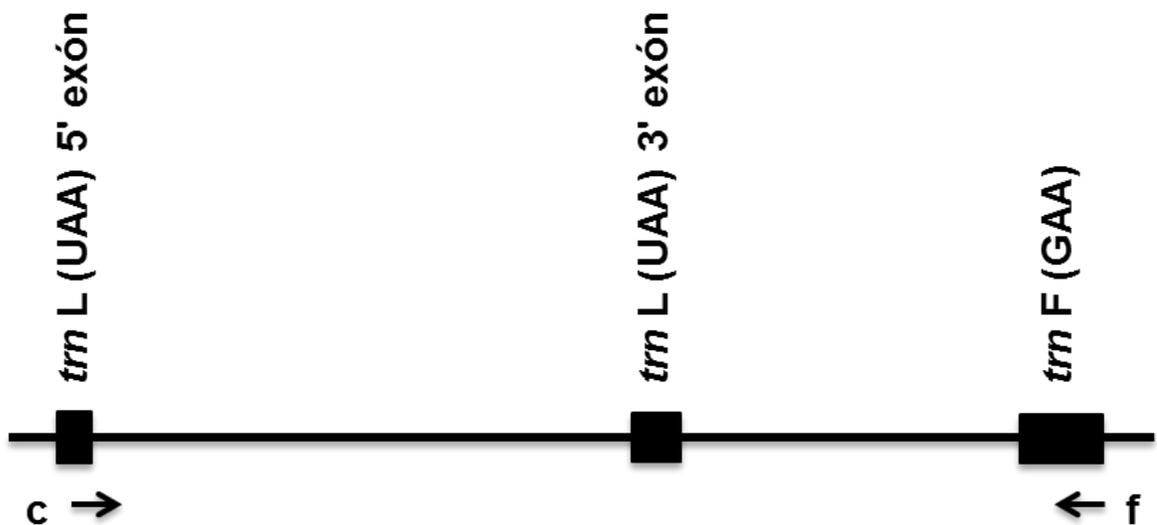
## **2.2. EXTRACCIÓN DE ADN**

Se extrajo ADN de hojas jóvenes frescas del material colectado haciendo modificaciones al procedimiento de extracción del CTAB 2% establecido por Doyle y Doyle (1990). El material se molió con 0.1 g de polivinilpirrolidona (PVP) y nitrógeno líquido, en morteros estériles. Se transfirió el tejido molido en tubos de microcentrífuga, previamente enfriado en nitrógeno, y se agregaron 800  $\mu$ L de buffer de extracción CTAB 2% precalentado a 60 °C. Se dejaron incubar por una

hora a 65 °C, mezclando por intervalos de 10 min con vortex. Se adicionaron 800 µL cloroformo-álcohol isoamílico (24:1), y se mezclaron por inversión durante 10 min. Posteriormente los tubos se centrifugaron a 10,000 rpm durante 10 min, recuperando la fase acuosa en tubos nuevos, donde se efectuó otro lavado con cloroformo-álcohol isoamílico (24:1), mezclando nuevamente por inversión durante 10 min y centrifugando a 10,000 rpm por 10 min. Se recuperó el sobrenadante, y para precipitar el ADN se utilizó isopropanol al 100%, dejándolo reposar durante 2 horas a -20 °C. La hebra de ADN se sedimentó por medio de centrifugación (10,000 rpm durante 10 min). Posteriormente se lavaron dos veces con etanol al 70% (el número de lavados dependió del color de la pastilla) centrifugando a 10,000 rpm por 10 min por cada lavado. Se eliminó el etanol por decantación y se dejaron secar las pastillas durante la noche. La resuspensión del ADN se realizó con 400 µL de agua HPLC, incubando a 55 °C durante 15 min. Se le adicionó 34 µL acetato de sodio 3 M y 1 µL de etanol al 95%. Los tubos se colocaron durante una hora a -20 °C. Después se centrifugó a 10,000 rpm durante 30 min. Se eliminó el sobrenadante por decantación. Posteriormente se lavó (el número de lavados dependió del color de la pastilla) la pastilla con 1 mL de isopropanol al 70%, centrifugando a 10,000 rpm durante 5 min. Se dejó secar la pastilla durante la noche y se resuspendió nuevamente con 100 µL de agua HPLC estéril. Posteriormente se verificó la integridad del ADN en gel de agarosa al 1.5% y la calidad se determinó en base a las relaciones de absorbancia 260/280 en un Nanodrop2000 (Thermocientific, USA). El ADN se almacenó a -20 °C hasta su utilización.

### 2.3. AMPLIFICACIÓN MEDIANTE PCR

El intrón *trn* L y el espacio intergénico *trn* L-F (Figura 2) se amplificó con los iniciadores universales *c* (CGAAATCGGTAGACGCTACG) y *f* (ATTTGAACTGGTGACACGAG) descritos por Taberlet et al. (1991). Se preparó la reacción de PCR en un volumen total de 25  $\mu$ L con: 5  $\mu$ L de buffer de corrida, 0.5  $\mu$ L de dNTP's y de cada iniciador (Forward y Reverse), 0.3  $\mu$ L de *Taq* polimerasa, 5  $\mu$ L de ADN templado (20 ng  $\mu$ L<sup>-1</sup>) y 13.2  $\mu$ L de agua HPLC. Se utilizó un termocilcador modelo C1000 Touch (BIORAD, Estados Unidos). El programa de amplificación inició con una predesnaturalización a 94 °C por 2 min, seguida por 30 ciclos (desnaturalización a 94 °C por 1 min, la alineación a 56 °C por 30 s, y una extensión a 72 °C por 1.3 min). Finalmente una extensión final a 72 °C por 7 min. Las amplificaciones se verificaron en gel de agarosa al 1.5% y se fotodocumentaron en un translimunador de luz UV (BIORAD, EE. UU.).



**Figura 2.** Posición y dirección de los iniciadores universales *c* y *f* utilizados para la amplificación del intrón *trn* L y el espacio intergénico *trn* L-F.

## **2.4. LIMPIEZA DE PRODUCTOS DE PCR**

Los productos de PCR se limpiaron con la enzima ExoSAP-IT, de acuerdo a las recomendaciones del fabricante. En un tubo para PCR se agregaron 5  $\mu\text{L}$  de producto de PCR y 2  $\mu\text{L}$  de la enzima, para obtener un volumen final de 7  $\mu\text{L}$ , el cual se incubó en un termociclador a 37 °C durante 15 min para activar la enzima y dar inicio a la eliminación de ADN monocatenario, primers y nucleótidos no utilizados durante la reacción de PCR. Posteriormente, la enzima se inactivó por calentamiento a 80 °C durante 15 min.

## **2.5. SECUENCIACIÓN DIRECTA DE PRODUCTOS DE PCR**

La reacción de secuenciación se llevó a cabo en un termociclador modelo C1000 Touch (BIORAD, Estados Unidos). Se utilizó el paquete de secuenciación BigDye Terminator v.3.1, siguiendo las recomendaciones del fabricante. Se preparó la reacción de secuenciación en un volumen total de 20  $\mu\text{L}$  con: 4  $\mu\text{L}$  de Ready Reaction Premix, 2  $\mu\text{L}$  5X Big Dye Sequencing Buffer, 1  $\mu\text{L}$  de iniciador, 2  $\mu\text{L}$  del producto de PCR limpio y 11.5  $\mu\text{L}$  de agua HPLC. Se utilizaron los mismos iniciadores para la amplificación. Posteriormente, se realizó la secuenciación. El programa de secuenciación inició en una desnaturalización inicial de 95 °C por 1 min, seguida por 35 ciclos (desnaturalización a 96 °C por 10 s, la alineación a 50 °C por 5 s y la extensión a 60 °C por 4 min). La resolución de los fragmentos se realizó mediante electroforesis capilar con un 3130 Genetic Analyzer (Applied Biosystem, EE. UU.).

## 2.6. ANÁLISIS FILOGENÉTICO

Las secuencias correspondientes al intrón *trn* L y el espacio intergénico *trn* L-F de cloroplasto se analizaron en el software Sequencing Analysis 5.3.1, para verificar la calidad de las secuencias. Posteriormente, se realizó un ensamblaje de las secuencias con la opción CAP (Contig Assembly Program) del Software BioEdit Sequence Alignment Editor v.7.1.7. (Hall, 1999). A cada secuencia consenso se le realizó un alineamiento con la plataforma BLAST en la base de datos del GenBank, con el objetivo de identificar la máxima identidad de la secuencia con las que se encuentran depositadas en la base de datos. Se verificó que las secuencias estuvieran en sentido +/+.

El análisis filogenético se realizó con el programa MEGA 5.2.2. (Tamura et al., 2011). Se realizó un alineamiento de todas las secuencias con la opción ClustalW del mismo software. Posteriormente se guardó en formato Mega y Fasta. Para la construcción del árbol se utilizaron accesiones del GenBank correspondientes a nueve especies del género *Saccharum*, tres de *Miscanthus*, una de *Dimeria* y otra de *Pennisetum* (ésta última fuera de grupo) (Cuadro 2). El análisis filogenético se realizó con el método estadístico de Máxima Parsimonia, y la prueba de filogenia con el método de Bootstrap con 5,000 repeticiones. El árbol obtenido se visualizó con la opción de topology only.

**Cuadro 2.** Especies y especímenes voucher utilizados en la reconstrucción filogenética.

Familia	Subfamilia	Tribu	Género/especie	Número de accesión	Referencia
Poaceae	Panicoideae	Andropogoneae	<i>Saccharum spontaneum</i> L.	JN642308	Jiang et al. 2012
			<i>Saccharum spontaneum</i> L.	AY116259	Hodkinson et al., 2002
			<i>Saccharum officinarum</i> L.	EU434103	Sungkaew et al. 2009
			<i>Saccharum officinarum</i> L.	AY116253	Hodkinson et al., 2002
			<i>Saccharum narenga</i> (Nees ex Steud.) Wall. ex Hack. = <i>Narenga porphyrocoma</i> (Hance ex Trimen) Bor	GQ870010	Teerawatananon et al. 2011
			<i>Saccharum</i> híbrido cultivar SP80-3280	AE009947	Calsa et al. 2010
			<i>Saccharum</i> híbrido cultivar NCo 310	AP006714	Asano, 2010
			<i>Saccharum contortum</i> (Elliott) Nutt. = <i>Erianthus brevibarbis</i> var. <i>contortus</i> (Elliott) D.B.Ward	AY116256	Hodkinson et al., 2002
			<i>Saccharum baldwinii</i> Baldwin = <i>Erianthus</i> <i>strictus</i> Baldwin	DQ004980	Skendzic et al., 2007
			<i>Miscanthus sinensis</i> Andersson	DQ005095	Skendzic et al., 2007
			<i>Miscanthus nepalensis</i> Hodkinson	AY116252	Hodkinson et al., 2002

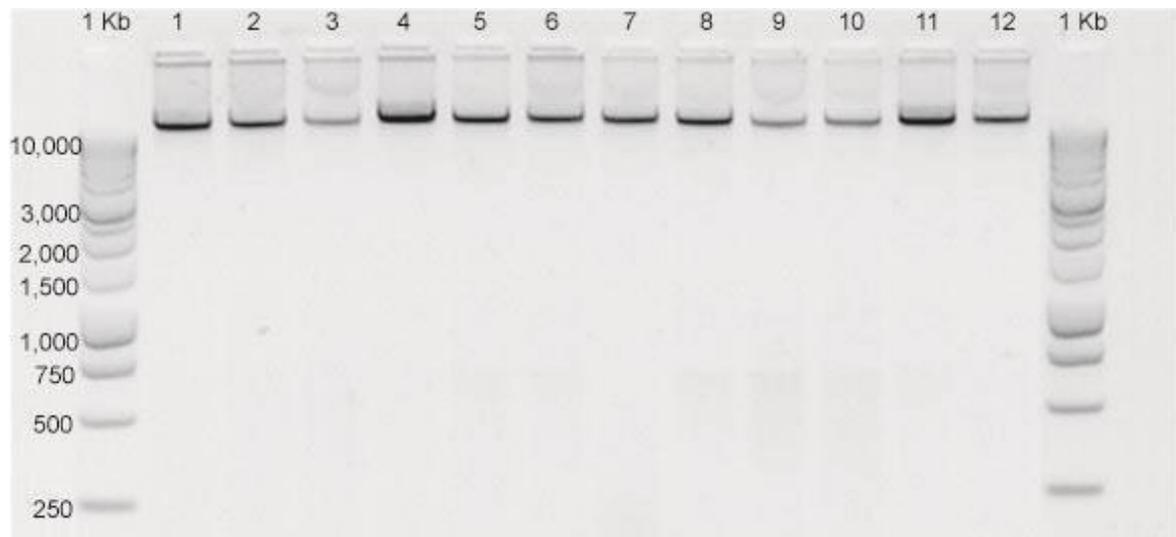
**Cuadro 2.** (Continuación)

Familia	Subfamilia	Tribu	Género/especie	Número de accesión	Referencia
Poaceae	Panicoideae	Andropogoneae	<i>Miscanthidium junceum</i> (Stapf) Stapf	EF137582	Bouchenak-Khelladi et al. 2008
			<i>Dimeria fuscescens</i> Trin.	GQ869969	Teerawatananon et al. 2011
		Paniceae	<i>Pennisetum macrourum</i> Trin. = <i>Cenchrus</i>		
			<i>macrourus</i> (Trin.) Morrone	AY116266	Hodkinson et al., 2002

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1. EXTRACCIÓN DE ADN GENÓMICO

Las modificaciones al método de extracción de ADN propuesto por Doyle y Doyle (1990), permitieron obtener grandes cantidades de ADN que oscilaron entre los 250 y 300 ng  $\mu\text{L}^{-1}$ , y su calidad en la relación  $A_{260}/A_{280}$  fluctuó entre 1.8 y 2.0, lo que indica que con este método se puede obtener grandes cantidades de ADN genómico a partir de hojas jóvenes de caña de azúcar con excelente calidad. La integridad del ADN genómico se verificó por electroforesis en un gel de agarosa al 1.5%, mostrando una excelente calidad e integridad del ADN (Figura 3).

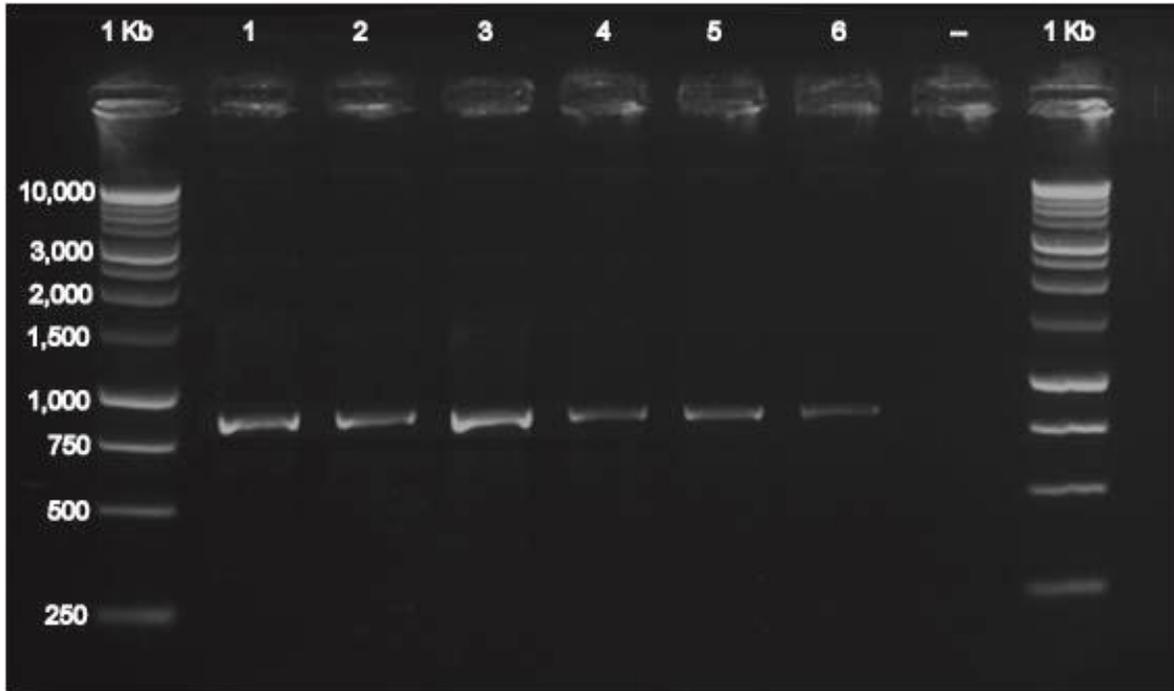


**Figura 3.** ADN genómico obtenido de las 12 variedades de caña de azúcar, con el método modificado de extracción de ADN descrito por Doyle y Doyle (1990).

#### 3.2. AMPLIFICACIÓN MEDIANTE PCR

Las condiciones en las que se realizó la amplificación de la región de interés del cloroplasto (intrón *trn* L y el espacio intergénico *trn* L-F) fueron idóneas para obtener bandas nítidas y definidas, sin presentar residuos de iniciadores y

nucleótidos. Las amplificaciones se verificaron por electroforesis en un gel de agarosa al 1.5% (Figura 4), donde se pudieron observar las bandas entre 750 y 1,000 pares de bases (pb).



**Figura 4.** Productos amplificados PCR con los iniciadores universales c y f. 1 kb = marcador de peso molecular; 1, 2, 3, 4, 5 y 6 corresponden a las amplificación de las variedades ATEMEX 96-40, Co 997, CP 44-101, CP 72-2086, ITV 92-1424 y Mex 68-P-23 respectivamente. - = control negativo.

### 3.3. SECUENCIACIÓN

Se secuenciaron por separado las hebras, las cuales se ensamblaron y editaron con el programa BioEdit, con el cual se obtuvo una secuencia consenso para cada variedad. Los consensos se compararon en la plataforma BLAST de GenBank, para encontrar regiones de máxima identidad entre secuencias depositadas. Se identificó una máxima identidad en las secuencias del 99 y 100% de identidad, destacando seis especies del género *Saccharum*, más de 10 especies de

*Miscanthus*, las cuales son integrantes del complejo *Saccharum*, una de *Miscanthidium* que se considera dentro de *Miscanthus*, además de 2 híbridos de caña de azúcar. También se observó identidades del 98, 99 y 100% con otros géneros *Zea*, *Dimeria*, *Imperata*, respectivamente, y algunos más pertenecientes a la tribu Andropogonea.

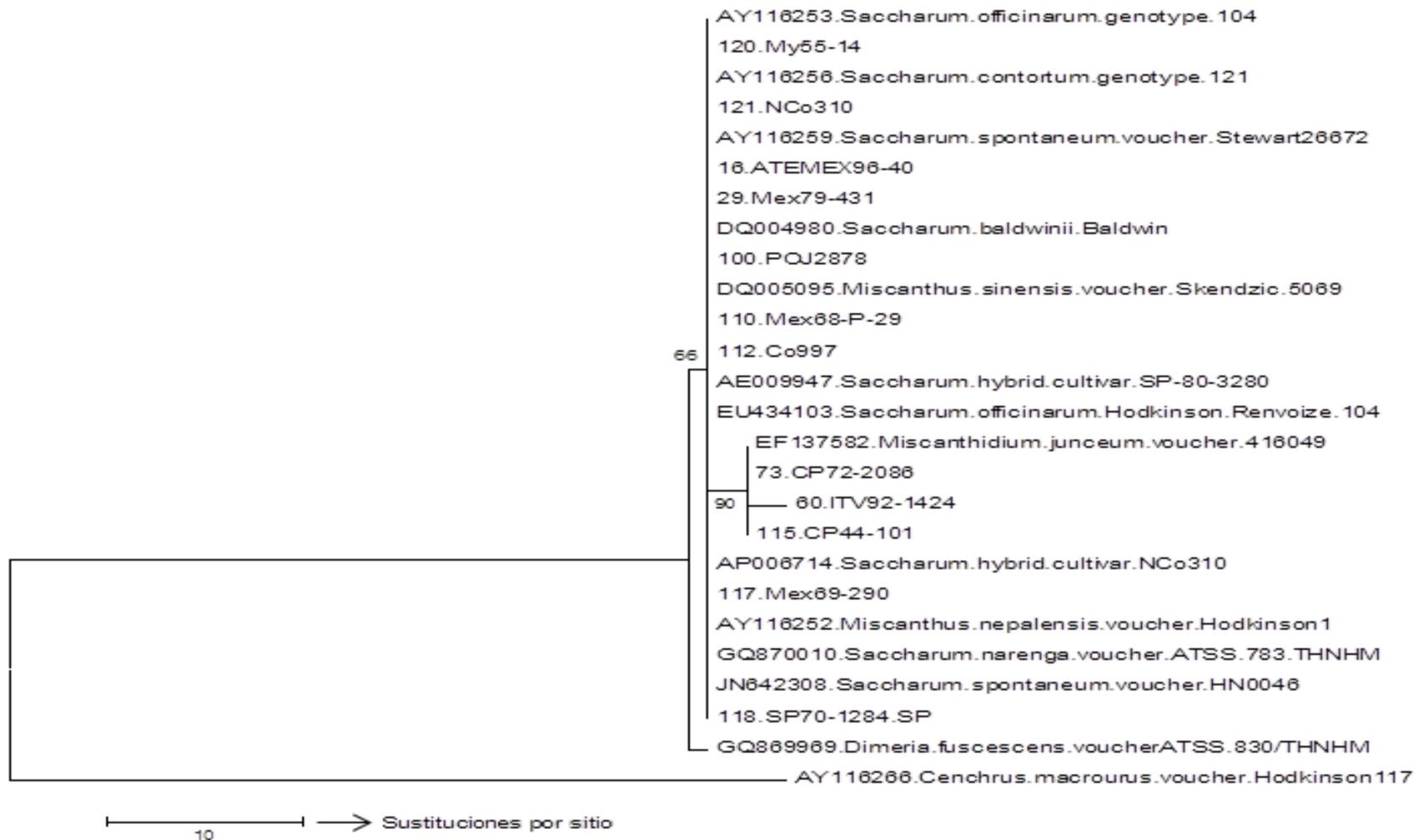
### 3.4. ANÁLISIS FILOGENÉTICO

En alineamiento de las secuencias tuvo un tamaño de 845 pb incluyendo gaps. Se analizaron los sitios variables dentro de las secuencias de las variedades estudiadas y las accesiones de referencia del GenBank, encontrando 86 sitios variables y tres sitios informativos. Hodkinson et al. (2002) encontraron 126 sitios variables y 26 informativos, mientras que Skendzic et al. (2007) repotaron 160 sitios variables y 69 informativos con estas mismas regiones.

La reconstrucción filogenética con Máxima Parsimonia (Figura 5), de la base genética utilizada, formó un grupo polifilético, lo que indica que los híbridos tienen como ancestros a especies del género *Saccharum* y al género *Miscanthus*. Esto comprueba la hipótesis propuesta por Sobral et al. (1994), en relación a que el género *Saccharum* es el pariente más cercano de *Miscanthus* y los cuales se hibridan frecuentemente. Por lo tanto, los híbridos estudiados presentan aportaciones de este género, lo cual concuerda con Moore et al. (2013). Dentro del clado, se presenta un grupo central bien definido, el cual no corresponde a la taxonomía existente (Hodkinson et al., 2002), agrupando a *Miscanthidium junceum* (considerado dentro del género *Miscanthus*) (Watson y Dallwitz, 1992) con tres

híbridos comerciales: CP 72-2086, ITV 92-1424 y CP 44-101. En este grupo están los híbridos provenientes de Canal Point, Florida, y la variedad mexicana ITV 92-1424, cuyo progenitor es la CP 72-2086, por una cruce de polinización libre (Moreno-Torres, 2010).

Los cultivares actuales de caña de azúcar clasificados como *Saccharum* spp., son complejos híbridos interespecíficos entre *S. officinarum* y *S. spontaneum* (Berding y Roach 1987), por lo que, el resto de las variedades se encuentran estrechamente relacionadas a los géneros utilizados, para la construcción del árbol filogenético, y su cercanía se centra hacia *Saccharum*, lo que sugiere que su herencia genética de las variedades presenta entre el 70 y 80% de *S. officinarum*, del 10 al 20% de *S. spontaneum*, y aproximadamente el 10% son recombinaciones entre las dos especies (D'Hont et al., 1995; Piperidis et al., 2000). Esta inferencia se debe a que los primeros cruzamientos se enfocaron a *Saccharum officinarum*, seleccionando clones de esta especie, los cuales se utilizaron para el proceso de "nobilización" que incluyó retrocruzamientos con *S. officinarum* y *S. spontaneum*. Probablemente, la variedad más importante producida durante esta fase fue la POJ 2878, seleccionada en Java en 1921, la cual se considera el ancestro de mayor importancia de los cultivares modernos (Jackson, 2005).



**Figura. 5.** Árbol filogenético construido a partir de secuencias del intrón *trnL* y el espacio intergenico *trnL-F* y accesiones con el método de Máxima Parsimonia. Se utilizaron secuencias de referencia depositadas en GenBank.

#### 4. CONCLUSIONES

La secuenciación de ADN es particularmente adecuada para estudios de las relaciones filogenéticas y se ha utilizado ampliamente para tales fines en diferentes niveles taxonómicos. El intrón *trn* L y el espacio intergénico *trn* L-F, son regiones con información para construir hipótesis filogenéticas con métodos de parsimonia, las cuales se pueden utilizar para identificar a los cultivares modernos, asociando esta identificación con características agronómicas, industriales y botánicas.

El análisis filogenético muestra que los cultivares modernos de caña de azúcar presentan una restringida base genética, y esto debido a que los fitomejoradores durante el proceso de nubilización encontraron grandes ganancias genéticas por selección recurrente de la progenie, dejando atrás la posibilidad de hacer más cruzamientos con otras especies de *Saccharum*. En consecuencia, este proceso constituye una restricción en la carga genética actual de las variedades. Sin embargo, de manera natural se dieron recombinaciones entre dos géneros (*Saccharum* y *Miscanthus*), lo que sugiere que durante el proceso hubo clones de especies de *Saccharum* que se pudieron originar a partir de la cruce de una especie de *Saccharum* y otra de *Miscanthus*, lo que indica que existe la posibilidad de aumentar la diversidad genética de los cultivares de caña de azúcar, ya que en la construcción filogenética algunas de las variedades tales como la CP 44-101, CP 72-2086 y la ITV 92-1424, son filogenéticamente cercanas a *Miscanthus*. Por lo tanto, la introgresión de genes de otros géneros afines y específicamente en el caso de caña de azúcar, con la participación de varios géneros conocidos como el

complejo *Saccharum*, destacando *Ripidium*, *Erianthus*, *Miscanthus*, *Narenga* y *Sclerostachya* y las especies del genero *Saccharum*, son una alternativa para aumentar la diversidad genética y obtener nuevos y mejores híbridos adaptados a las condiciones que hoy día presentan las regiones productoras de caña de azúcar a nivel mundial.

## LITERATURA CITADA

- Alejandro-Rosas, J.A., Galindo-Tovar, M.E., Lee-Espinosa, H.E., Alvarado-Gómez, O.G., 2010.** Variabilidad genética en 22 variedades híbridas de caña de azúcar (*Saccharum* spp. Híbrido). *Phyton* 79, 87-94.
- Bacci-Jr M., Miranda, V.F.O., Martins, V.G., Figueira, A.V.O., Lemos, M.V., Pereira J.O., Marino, C.L., 2010.** A search for markers of sugarcane evolution. *Genetics and Molecular Biology* 24, 169-174.
- Baldauf, S.L., Palmer, J.D., Doolittle, W.F., 1996.** The root of universal tree and the origin of eukaryotes based on elongation factor phylogeny. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 93, 7749-7754.
- Berding, N., Roach, B.T., 1987.** Germplasm collection, maintenance, and use. In: Heinz, D.J. (Ed.), *Sugarcane Improvement through Breeding*. Elsevier, Amsterdam. pp. 143-210.
- Brandes, E.W., 1958.** Origin, classification and characteristics. In: Artschwager, E., Brandes, E.W. (Eds.), *Sugarcane (Saccharum officinarum L.)*, Department of Agriculture Handbook 122, 1-35.
- Butterfield, M.K., Rutherford, R.S., Carson, D.L., Hockett, B.I., 2004.** Application of gene discovery of varietal improvement in sugarcane. *South African Journal of Botany* 70, 167-172.

- Cheavegatti-Gianotto, A., Couto de Abreu, H.M., Arruda, P., Bespalhok-Filho, J.C., Lee-Burnquist, W., Creste, S., di Ciero, L., Aparecido-Ferro, J., Vargas de Oliveira Figueira, A., de Sousa-Filgueiras, T., Grossi-de-Sá, M.F., Guzzo, E.G., Hoffmann, H.P., Andrade-Landell, M.G., Macedo, N., Matsuoka, S., de Castro-Reinach, F., Romano, E., da Silva, W.J., de Castro-Silva-Filho, M., Ulian, E.C., 2011.** Sugarcane (*Saccharum X officinarum*): a reference study for the regulation of genetically modified cultivars in Brazil. *Tropical Plant Biology* 4, 62-89.
- Cordeiro, G., Elliott, F., McIntyre, C.L., Casu, R.E., Henry R.J., 2006.** Characterisation of single nucleotide polymorphisms in sugarcane ESTs. *Theoretical and Applied Genetics* 113, 331-343.
- Cordeiro, G.M., Pan, Y.B., Henry, R.J., 2003.** Sugarcane microsatellites for the assessment of genetic diversity in sugarcane germplasm. *Plant Science* 166, 181-189.
- Coto, O., Cornide, M.T., Calvo, D., Canales, E., D'Hont, A., Prada, F., 2002.** Genetic diversity among wild sugarcane germoplasm from Laos revealed with markers. *Euphytica* 123, 181-189.
- Creste, S., Junior, V.E.R., Pinto, L.R., Albino, J.C., Figueira, A.V.O., 2010.** A biotecnologia como ferramenta para o melhoramento genético. In: Dinardo-Miranda, L.L., Vasconcelos, A.C.M., Landell, M.G.A. (Eds.), *Cana de açúcar*. Campinas: Instituto Agronomico. pp.157-176.

- D'Hont, A., Lu, Y., Gonzáles de León, D., Grivet, L., Feldmann, P., Lanaud, C., Glaszmann, J.C., 1994.** A molecular approach to unravelling the genetics of sugarcane, a complex polyploid of the andropogoneae. *Genome* 37, 222-230.
- D'Hont, A., Rao, P.S., Feldmann, P., Grivet, L., Islam-Faridi, N., Taylor, P., Glaszmann, J.C., 1995.** Identification and characterisation of sugar cane intergeneric hybrids, *Saccharum officinarum*, *Erianthus arundinaceus*, with molecular markers and ADN in situ hybridization. *Theoretical and Applied Genetics* 91, 320-326.
- Daniels, J., Roach, B.T., 1987.** Taxonomy and evolution. In: Heinz, D.J. (Ed.), *Sugarcane improvement through breeding*. Elsevier, New York. pp. 7–84
- Doyle, J.J., Doyle, J.L., 1990.** Isolation of plant ADN from fresh tissue. *Focus* 12, 13-15.
- Duff, R.J., Nickrent, D.L., 1999.** Phylogenetic relationships of land plants using mitochondrial small-subunit rADN sequences. *American Journal of Botany* 86, 372-386.
- Flores-Cáceres, S., 2001.** *Las variedades de caña de azúcar en México*. ATAM, México, DF. 308 p.
- Glazsmann, J.C., Lu, Y.K., Lannaud, C., 1990.** Variation of nuclear ribosomal ADN in sugarcane. *Journal of Genetics and Breeding* 44, 191-198.
- González-Jiménez, V., Valdez-Balero, A., Gómez-Merino, F.C., Silva-Rojas, H.V., Pérez-Flores, J., Ortiz-García, C.F., 2011.** Caracterización molecular de variedades de caña de azúcar cultivadas en el estado de Tabasco, México. *Bioteología Vegetal* 11, 107-113.

- Goto, S.G., Kimura, M.T., 2001.** Phylogenetic utility of mitochondrial COI and nuclear Gpdh genes in *Drosophila* molecular phylogenetics and evolution. *Molecular Phylogenetics and Evolution* 18, 404-422.
- Grivet, L., Arruda, P., 2001.** Sugarcane genomics: depicting the complex genome of an important tropical crop. *Current Opinion in Plant Biology* 5, 122-127.
- Grivet, L., Daniels, C., Glaszmann, J.C., D'Hont, A., 2004.** A Review of Recent Molecular Genetics Evidence for Sugarcane Evolution and Domestication. *Ethnobotany Research & Applications* 2, 9-17.
- Hall, T.A., 1999.** BioEdit: a user-friendly biological sequence alignment editor and analysis program for Windows 95/98/NT. *Nucleic Acids Symposium Series* 41, 95-98.
- Hiesel, R., Haeseler, U.V., Brennicke, A., 1994.** Plant mitochondrial nucleic acid sequences as a tool for phylogenetic analysis. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 91, 629-633.
- Hillis, D.M., Dixon, M.T., 1991.** Ribosomal ADN: molecular evolution and phylogenetic inference. *Quarterly Review of Biology* 66, 411-453.
- Hoarau, J.Y., Grivet, L., Offmann, B., 2002.** Genetic dissection of a modern sugarcane cultivar (*Saccharum* spp.). II. Detection of QTLs for yield components. *Theoretical and Applied Genetics* 105, 1027-1037.
- Hodkinson, T.R., Chase, M.W., Lledó, M.D., Salamin, N., Renvoize, S.A., 2002.** Phylogenetics of *Miscanthus*, *Saccharum* and related genera (Saccharinae, Andropogoneae, Poaceae) based on ADN sequences from ITS nuclear

ribosomal ADN and plastid trnL intron and trnL-F intergenic spacers. Journal of Plant Research 115, 381-392.

**Irvine, J.E., 1999.** *Saccharum* species as horticultural classes. Theoretical and Applied Genetics 98, 186-194.

**Jackson, P.A., 2005.** Breeding for improved sugar content in sugarcane. Field Crops Research 92, 277-290.

**Jannoo, N., Grivet, L., Dookun, A., D'Hont, A., Glaszmann, J.C., 1999.** Linkage disequilibrium among modern sugarcane cultivars. Theoretical and Applied Genetics 99, 1053-1060.

**Lima, M.L.A., Garcia, A.A.F., Oliveira, K.M., Matsuoka, S., Arizondo, H., Souza JR.C.L., Souza, A.P., 2002.** Analysis of genetic similarity detected by AFLP and coefficient of parentage among genotypes of sugarcane (*Saccharum officinarum*). Theoretical and Applied Genetics 104, 1432-2242.

**Lo, C.C., Chen, Y.H., Huang, Y.J., Shih, S.C., 1986.** Recent progress. In: Miscanthus nobilization process. Proc. ISSCT 19, 514-521.

**Monteiro, A., Pierce, N.E., 2001.** Phylogeny of *Bicyclus* (Lepidoptera:Nymphalidae) inferred from *COI*, *COII*, and *EF-1 alpha* gene sequences. Molecular Phylogenetics and Evolution 18, 264-281.

**Moore, P.H., Paterson, A.H., Tew, T., 2013.** Sugarcane: The Crop, the Plant, and Domestication. In: Moore, P.H. and Botha, F.C. (Eds.). Sugarcane: Physiology, Biochemistry, and Functional Biology. First Edition. Wiley Blackwell. Ames, Iowa, USA. pp. 1-17.

- Moreno-Torres, V.M., 2010.** Nuevas variedades de caña de azúcar. Fundación Produce Colima A.C.  
<<http://www.siac.org.mx/fichas/38%20Colima%20Cana%20VF.pdf>>  
(consultado noviembre 2013).
- Mukherjee, S.K., 1957.** Origin and distribution of *Saccharum*. Botanical Gazette 119, 55-61.
- Nishiyama-Jr, M.Y., Vicente, F.F.R., Lembke, C.G., Sato, P.M., Dal-Bianco, M.L., Fandiño, R.A., Hotta, C.T., Souza, G.M., 2010.** The SUCEST-FUN regulatory network database: designing an energy grass. Proc. Int. Soc. Sugar Cane Technol 27, 1-10.
- Olmstead, R.G., Palmer, J.D., 1994.** Chloroplast ADN systematics: a review of methods and data analysis. American Journal of Botany 81, 1205-1224.
- Pan, Y.B., Burner, D.M., Legendre, B.L., 2000.** An assessment of the phylogenetic relationship among sugarcane and related taxa based on the nucleotide sequence of 5S rRNA intergenic spacers. Genetica, 108, 285-295.
- Pan, Y.B., Miller, J.D., Schnell li, R.J., Richard Jr, E.P., Wei, Q., 2003.** Application of microsatellite and RAPD fingerprints in the Florida sugarcane variety program. Plant and Animal Genome. Florida, USA. 43 p.
- Piperidis, G., Christopher, M.J., Carroll, B.J., Berding, N., D'Hont, A., 2000.** Molecular contribution to selection of intergeneric hybrids between sugar cane and the wild species *Erianthus arundinaceus*. Genome 43,1033-1037.

- Schenck, M., Crepau, M.W., Wu, K.K., Moore, P.H., Yu, Q., Ming, R., 2004.** Genetic diversity and relationships in native hawaiian *Saccharum officinarum* sugarcane. *Journal of Heredity* 95, 327-331.
- Skendzic, E.M., Columbus, J.T., Cerros-Tlatilpa, R., 2007.** Phylogenetics of Andropogoneae (Poaceae: Panicoideae) Based on Nuclear Ribosomal Internal Transcribed Spacer and Chloroplast trnL–F Sequences. *Aliso: A Journal of Systematic and Evolutionary Botany* 23, 1-16.
- Sobral, B.W.S., Braga, D.P.V., LaHood, E.S., Keim, P., 1994.** Phylogenetic analysis of chloroplast restriction enzyme site mutations in the Saccharinae Griseb. subtribe of the Andropogoneae Dumort. tribe. *Theoretical and Applied Genetics* 87, 843-853.
- Soltis, E.D., Soltis, P.M., 2000.** Contributions of plant molecular systematics to studies of molecular evolution. *Plant Molecular Biology* 42, 45-75.
- Soltis, P.S., Soltis, D.E., Chase, M.K., 1999.** Angiosperm phylogeny inferred from multiple genes as a tool for comparative biology. *Nature* 402, 402-404.
- Taberlet, P., Gielly, L., Pautou, G., Bouvet, J., 1991.** Universal primers for amplification of three non-coding regions of chloroplast ADN. *Plant Molecular Biology* 17, 1105-1109.
- Tai, P.Y.P., Miller, J.D., 1988.** Phenotypic characteristics of the hybrids of sugar cane related grasses, *J. Am. Soc. Sugar Cane Technol.* 8, 5-11.
- Tamura, K., Peterson, D., Peterson, N., Stecher, G., Nei, M., Kumar, S., 2011.** MEGA5: Molecular Evolutionary Genetics Analysis Using Maximum

Likelihood, Evolutionary Distance, and Maximum Parsimony Methods.  
Molecular Biology and Evolution 28, 2731-2739.

**Watson, L., and Dallwitz, M.J., 1992.** The grass genera of the world: descriptions, illustrations, identification, and information retrieval; including synonyms, morphology, anatomy, physiology, phytochemistry, cytology, classification, pathogens, world and local distribution, and references. <<http://delta-intkey.com/grass/www/amblyopy.htm>> (consultado noviembre 2013).