



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO**

Centro de Investigaciones Económicas,  
Sociales y Tecnológicas de la Agroindustria  
y de la Agricultura Mundial

**EL RIEGO EN ZONAS CAÑERAS DE MÉXICO:  
IMPORTANCIA Y RETOS ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO**

T E S I S

QUE COMO REQUISITO PARCIAL  
PARA OBTENER EL GRADO DE

**DOCTOR EN PROBLEMAS ECONÓMICO  
AGROINDUSTRIALES**

P R E S E N T A

**ALBERTO SANTILLÁN FERNÁNDEZ**



DIRECCION GENERAL ACADEMICA  
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES  
OFICINA DE EXAMENES PROFESIONALES



**CIESTAAM**

Junio de 2015  
Chapingo, Estado de México

**EL RIEGO EN ZONAS CAÑERAS DE MÉXICO:  
IMPORTANCIA Y RETOS ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO**

Tesis realizada por Alberto Santillán Fernández bajo la dirección del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

**DOCTOR EN PROBLEMAS ECONÓMICO AGROINDUSTRIALES**

**DIRECTOR:**



---

**Dr. V. Horacio Santoyo Cortés**

**ASESOR:**



---

**Dr. Luis Ramiro García Chávez**

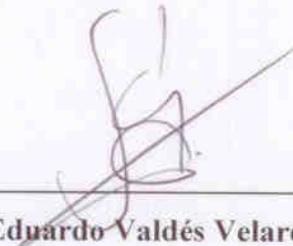
**ASESOR:**



---

**Dr. Ignacio Covarrubias Gutiérrez**

**LECTOR EXTERNO:**



---

**Dr. Eduardo Valdés Velarde**

## DEDICATORIA

*A mi gran amor Regina, porque un día te sientas orgullosa de ser mi hija.*

*A Kerén y Fernando, los amo.*

*A mis padres: Flor y Fernando.*

*A mis padrinos: Francisco y Guadalupe.*

*A mis hermanos: Esmeralda, Margarita y Fernando.*

*A mis abuelos: Jesús y Angélica.*

*A todos mis tíos, primos y sobrinos.*

*A mis compadres: Francisco y Samuel, porque nuestra amistad sea interminable.*

**Alberto**

## **AGRADECIMIENTOS**

*A quien me acompaña, guía y cuida en todo momento y hace posible realizar mis sueños, a Dios nuestro señor.*

*A la Universidad Autónoma Chapingo, CIESTAAM y CONACyT, por darme la oportunidad de realizar mis estudios doctorales.*

*Un especial agradecimiento al Dr. V. Horacio Santoyo Cortés y Dr. Luis Ramiro García Chávez; por compartirme mucha de su sabiduría y porque constantemente me hacen recordar hacia donde voy, por apoyarme en un momento crítico de mi existir, y por su colaboración en la presente investigación. Gracias a ellos puedo concluir una más de mis metas.*

*Al Dr. Ignacio Covarrubias Gutiérrez por su invaluable asesoramiento en la realización del presente trabajo.*

*Al Dr. Eduardo Valdés Velarde por su participación como lector externo, por los acertados comentarios que contribuyeron al enriquecimiento de la investigación y por todo su apoyo para la realización de la estancia profesional.*

*Al Dr. Agustín Merino García, por creer en mí aun cuando yo mismo no creía en mis capacidades. Por su apoyo incondicional para el desarrollo de la estancia en España, pero sobre todo por brindarme su amistad y valiosos consejos.*

*A mis compañeros y amigos del CIESTAAM, ITSVC y futbol. Muchas gracias por su amistad y apoyo.*

***Alberto***

## **DATOS BIOGRÁFICOS**

Alberto Santillán Fernández nace el 25 de septiembre de 1982, en el poblado de Todos Santos Almolonga, Tepexi de Rodríguez, Puebla. Ingresó a la Preparatoria Agrícola de la Universidad Autónoma Chapingo en 1998, donde se graduó en 2001, e ingresó a la Licenciatura en Estadística de la misma Universidad, obteniendo el grado en enero de 2006. Para agosto del mismo año, ingresó al Posgrado de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma Chapingo, obteniendo el grado en abril de 2009. De 2011 a 2014 cursó estudios doctorales en el Centro de Investigaciones Económicas Sociales y Tecnológicas de la Agroindustria y de la Agricultura Mundial (CIESTAAM) de la Universidad Autónoma Chapingo.

Su trayectoria profesional inicia con la logística de levantamiento en campo del Inventario Nacional Forestal para la CONAFOR con la empresa INyDES SA de CV. Ha sido consultor por parte del Colegio de Postgraduados para la SAGARPA en la evaluación nacional de infraestructura almacenaría de granos y oleaginosas; y en la determinación de áreas potenciales para el cultivo de maíz transgénico en México, empleando herramientas de sistemas de información geográfica.

Ha impartido talleres y conferencias sobre la aplicación de los sistemas de información geográfica en la conservación de recursos fitogenéticos a instituciones como el Sistema Nacional de Inspección y Certificación de Semillas, Instituto Tecnológico del Altiplano de Tlaxcala y, departamento de Fitotecnia y centro regional Huatusco de la Universidad Autónoma Chapingo.

Su trayectoria profesional también incluye estancias de investigación en el Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo, Texcoco, Estado de México; y en la Escuela Politécnica Superior de Santiago de Compostela, Lugo, España.

**EL RIEGO EN ZONAS CAÑERAS DE MÉXICO: IMPORTANCIA Y RETOS ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO**  
**THE IRRIGATION IN MEXICO SUGARCANE AREAS: IMPORTANCE AND CHALLENGES AGAINST CLIMATE CHANGE**

**Alberto Santillán Fernández<sup>1</sup>; V. Horacio Santoyo Cortés<sup>2</sup>**

**RESUMEN**

El problema de competitividad internacional de la agroindustria cañera en México, se ubica en la baja productividad en campo. En la presente investigación se estudia la evolución de los rendimientos en campo de las diferentes regiones cañeras del país y su relación con el uso de riego. Posteriormente se analiza la incidencia del cambio climático en las zonas cañeras, enfatizando en las variaciones en la disposición hídrica en las unidades ambientales que se manejan sin riego o con riego de auxilio. Finalmente se describen y analizan los factores que limitan el uso del riego para la caña de azúcar, mediante el estudio de caso de un distrito de riego donde no hay limitaciones de agua y sin embargo predomina el riego de auxilio. Entre 2000 y 2011, la producción de caña en México creció por el aumento de la superficie cultivada, como consecuencia de los precios atractivos que presentó el cultivo. Sin embargo, este crecimiento extensivo estuvo acompañado, para el 82 % de las áreas cañeras, de una caída en los rendimientos en campo. El ciclo de bajos precios que se presenta a partir de la zafra 2012-2013 está contrayendo la superficie cañera y se observa un retroceso tecnológico. La promoción y tecnificación del riego, la renovación de plantaciones y el uso más eficiente de los insumos deben ser impulsadas para mejorar la productividad de las áreas cañeras y revertir la regresión tecnológica en el campo cañero. El análisis de incidencia del cambio climático sobre la producción cañera muestra que en las unidades ambientales cañeras que se manejan sin riego o con riego de auxilio, sobre todo las del Sur y Sureste del país que representan el 58 % de la superficie nacional cultivada, es donde la disponibilidad hídrica tiende a decrecer con más intensidad, como producto de las alteraciones climáticas. En virtud de ello, el aprovechamiento del agua disponible con sistemas de riego se presenta como una alternativa viable para mejorar la productividad de las plantaciones cañeras. No obstante, el análisis de una zona cañera donde existen condiciones para introducir el riego, mostró que la mayoría de los productores cañeros no lo aplican o lo hacen en cantidades insuficientes. Las causas están en el minifundio, no hay escala de producción que permita la recuperación de las inversiones en sistemas de riego, existe amplia dispersión de los frentes de corte, lo que limita la compactación predios cañeros, pero sobre todo la ineficaz gobernanza de las unidades de riego, que reducen su mantenimiento y hacen cara y frecuentemente infructuosa la gestión del riego. En este contexto los apoyos para el mejoramiento de la infraestructura parcelaria son poco útiles y los impactos del cambio climático sobre la producción cañera, parecen inevitables.

**PALABRAS CLAVE:** Caña de azúcar, competitividad, rendimiento en campo, riego, cambio climático, México.

**ABSTRACT**

The problem of international competitiveness of the sugar cane industry in Mexico, is the low field productivity. In this research the evolution of sugarcane field performance from different country regions and the use relationship is studied. Subsequently, the climate impact changes of sugarcane areas is discussed, emphasizing in the variations of the environmental water units that are handled without irrigation or supplemental irrigation. Finally we describe and analyze the factors that limit the use of irrigation for sugarcane by the study case of an irrigation district where there are water limitations and auxiliary irrigation predominates. Between 2000 and 2011, sugarcane production in Mexico grew by the increasing of cultivated land field, because of attractive prices present the culture surface. However, this extensive growth was accompanied of a fall in the field's performance for the 82% of the sugarcane areas. The low prices cycle that comes from the 2012-2013 harvest sugarcane is contracting surface, and a technological retrogression is observed. Promoting and irrigation technology, renovation of plantations and the most efficient use of inputs should be driven to enhance the productivity of sugarcane areas and to reverse the technological regression in the sugarcane field. The analysis of climate change impacts on the sugarcane production in the sugarcane shows that environmental units handled without irrigation or watering aid, especially in the South and Southeast of the country that represents the 58% of the national cultivated land field, is where water availability tends to decrease with more intensity, as a result of climatic changes. Under this, the utilization of available water irrigation systems is presented as a viable option for improving the productivity of sugarcane plantations alternative. However, analysis of a sugarcane area where conditions to introduce irrigation already exist, showed that most of the sugarcane producers do not apply it or do so in insufficient quantities. The causes are smallholdings, there is no production scale that allows the investments recovery of irrigation system, there is wide dispersion of cutting fronts, limiting compaction sugarcane farms, but mostly ineffective governance units irrigation, reducing maintenance and expensive and often fruitless make irrigation management. In this context, the support for the improvement of infrastructure for land are not very useful, and the impacts climate change on sugarcane production, seem to be inevitable.

**KEY WORDS:** Sugar cane, competitiveness, crop yield, irrigation, climate change, Mexico

---

<sup>1</sup> Estudiante de doctorado del CIESTAAM

<sup>2</sup> Director de tesis doctoral, profesor investigador del CIESTAAM

## ÍNDICE

<b>DEDICATORIA</b> .....	<b>iii</b>
<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	<b>iv</b>
<b>DATOS BIOGRÁFICOS</b> .....	<b>v</b>
<b>RESUMEN</b> .....	¡Error! Marcador no definido.
<b>ABSTRACT</b> .....	¡Error! Marcador no definido.
<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO 2. LA DINÁMICA DE LA PRODUCCIÓN CAÑERA EN MÉXICO DE 2000 A 2011</b> .....	<b>8</b>
<b>Introducción</b> .....	<b>8</b>
<b>Materiales y métodos</b> .....	<b>10</b>
Datos .....	<b>10</b>
Métodos.....	<b>11</b>
<b>Resultados y Discusión</b> .....	<b>12</b>
<b>Conclusiones</b> .....	<b>20</b>
<b>CAPÍTULO 3. INCIDENCIA DEL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE LA PRODUCCIÓN Y MANEJO DE LA CAÑA DE AZÚCAR (<i>Saccharum spp.</i>) EN MÉXICO</b> .....	<b>21</b>
<b>Introducción</b> .....	<b>21</b>
<b>Materiales y Métodos</b> .....	<b>23</b>
Descripción del área de estudio .....	<b>23</b>
Asignación y definición de las unidades ambientales de los ingenios en México...	<b>24</b>
Evoluciones temporales del Índice de Humedad y productividad de la caña de azúcar .....	<b>26</b>
<b>Resultados y Discusión</b> .....	<b>27</b>
Delimitación de unidades ambientales.....	<b>27</b>
Balance Hídrico Climático, empleo de riego y productividad por unidad ambiental .....	<b>32</b>
Evolución del Índice de Humedad por unidad ambiental (1979 a 2009).....	<b>35</b>
Comportamiento de la productividad por unidad ambiental (2000 a 2011) .....	<b>38</b>
<b>Conclusiones</b> .....	<b>41</b>

<b>CAPITULO IV. FACTORES QUE LIMITAN EL RIEGO EN ZONAS CAÑERAS: ESTUDIO DE CASO DEL DISTRITO DE RIEGO 035, LA ANTIGUA, VERACRUZ.</b> .....	<b>42</b>
<b>Introducción</b> .....	<b>42</b>
Antecedentes .....	<b>42</b>
<b>Materiales y métodos</b> .....	<b>42</b>
Selección del caso .....	<b>42</b>
Región de estudio.....	<b>43</b>
Colecta de información .....	<b>44</b>
Análisis de la información .....	<b>45</b>
<b>Resultados y discusión</b> .....	<b>45</b>
Perfil del productor y equipamiento de las parcelas .....	<b>46</b>
Acceso al agua.....	<b>47</b>
Frentes de corte dispersos .....	<b>48</b>
La ubicación de las parcelas y tiempos de gestión del riego.....	<b>49</b>
La falta de gobernanza en las asociaciones de usuarios de las unidades de riego ...	<b>49</b>
Al acceso a subsidios y créditos para inversión .....	<b>50</b>
<b>Conclusiones</b> .....	<b>50</b>
<b>CONCLUSIONES GENERALES</b> .....	<b>52</b>
<b>LITERATURA CITADA</b> .....	<b>54</b>

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Diferencias estadísticas entre los periodos 2006-2011 respecto 2000-2005 de las variables de los factores climáticos, campo y fábrica en las áreas cañeras. ....	13
Cuadro 2. Tipología de ingenios por variaciones en la producción (Caña Molida Bruta) debidas a las variaciones en superficie cultivada y rendimiento en campo para el período 2006-2011. ....	17
Cuadro 3. Factores que explican el aumento (+) y disminución (-) de superficie cultivada y rendimiento en campo en los ingenios seleccionados. Obtenidos de CONADESUCA (2009), MAM (2011), entrevistas con especialistas de la Universidad Autónoma Chapingo y Colegio de Postgraduados, superintendentes de campo y técnicos del fondo de empresas expropiadas del sector azucarero (2012).....	18
Cuadro 4. Unidades ambientales obtenidas a partir de criterios climáticos que afectan al manejo y producción de caña de azúcar.....	28
Cuadro 5. Prueba de Tukey para los eigenvectores del PCA (Prin1 y Prin2) en las diferentes unidades ambientales. ....	31
Cuadro 6. Uso de riego y diferencias estadísticas por Tukey en indicadores de campo y producción por unidad ambiental de 2000 a 2011. ....	33
Cuadro 7. Características promedio de los productores de caña de azúcar del distrito de riego 035 La Antigua, Veracruz, según el empleo de riego en sus parcelas.....	47

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Estructura de investigación. El riego en zonas cañeras de México: Importancia y retos ante el cambio climático.....	7
Figura 2. Distribución geográfica de las áreas de producción cañeras en México, obtenidas a partir de datos del SIAP (2012b) y UNC (2013).....	9
Figura 3. Evolución nacional de la superficie cultivada y rendimientos en campo de caña de azúcar de 2000 a 2011.....	14
Figura 4. Evolución nacional de la superficie cultivada y precios reales (índice nacional de precios al consumidor base 2010) de caña de azúcar de 2000 a 2011. ....	15
Figura 5. Composición del crecimiento en la producción de 2006-2011 con respecto a 2000-2005. ....	16
Figura 6. Tipología de ingenios por variaciones en superficie cultivada y rendimiento en campo de 2006-2011 respecto de 2000-2005.....	17
Figura 7. Delimitación espacial de las unidades ambientales obtenidas a partir de criterios climáticos que afectan al manejo y producción de caña de azúcar. ....	29
Figura 8. Agrupación de ingenios por análisis de componentes principales a partir del balance hídrico climático, temperatura media y precipitación anual. Se consideraron valores para el período 1979-2009 (CLICOM, 2013). Para cada uno de los 54 ingenios, se seleccionaron entre 3 y 5 estaciones meteorológicas (n = 177). ....	30
Figura 9. Prueba de medias por Tukey aplicada a los datos de índice de humead para las unidades ambientales. Medias con la misma letra no son estadísticamente diferentes entre sí. Se consideraron valores para el período 1979-2009 (CLICOM, 2013). Para cada uno de los 54 ingenios, se seleccionaron entre 3 y 5 estaciones meteorológicas (n = 177). .	32
Figura 10. Comparación de los diagramas bioclimáticos construidos a partir de las medias de precipitación, potencial de evapotranspiración, déficit y exceso hídrico por unidad ambiental. Se consideraron valores para el período 1979-2009 (CLICOM, 2013). Para cada uno de los 54 ingenios, se seleccionaron entre 3 y 5 estaciones meteorológicas (n = 177). ....	34

Figura 11. Tendencia del índice de humedad en las diferentes unidades ambientales, empleando análisis de series temporales paramétricas (regresión lineal) y no paramétricas (Mann-Kendall). Se consideraron valores para el período 1979-2009 (CLICOM, 2013). Para cada uno de los 54 ingenios, se seleccionaron entre 3 y 5 estaciones meteorológicas (n = 177).....	37
Figura 12. Tendencia de los rendimientos en campo en las diferentes unidades ambientales, empleando análisis de series temporales paramétricas (regresión lineal) y considerando el régimen de riego para el periodo 2000 a 2011, obtenido del manual azucarero mexicano y sistema de información agrícola y pesquera para cada uno de los 54 ingenios. ....	40
Figura 13. Zona de abasto cañera en el Distrito de Riego 035 La Antigua, Veracruz.....	43

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

La obtención de sacarosa de caña de azúcar (*Saccharum spp.*) empieza en el campo, la variedad de caña, el suelo, las prácticas de manejo que incluyen riego, dosis y épocas de fertilización, y el grado de madurez determinan la calidad del material producido; aportando beneficios, tanto para ingenios como para productores (Larrahondo, 1995). Por ello el estudio de la producción, entendida como la interacción entre superficie cultivada y los rendimientos en campo, ocupa un lugar destacado dentro del análisis agrícola, por la importancia que representa como elemento central para la explicación de los demás fenómenos que determinan y condicionan la competitividad del sector (Gómez, 2004).

El rendimiento en campo constituye un aspecto importante en el análisis de la competitividad cañera, que depende de elementos aleatorios como los climatológicos y que en sus tendencias se expresan las prácticas de manejo utilizadas (Gómez, 2004).

Al respecto Van Ittersum y Rabbinge (1997) describen los factores que afectan el rendimiento de un cultivo. Concluyen que el rendimiento se explica por las interacciones entre factores determinantes, limitantes y reductores. Los primeros determinan el “rendimiento potencial” sin limitantes de agua y nutrientes, este potencial queda definido por la radiación, temperatura y el genotipo elegido, para un sitio en una fecha de siembra, y con una densidad determinada.

Los factores limitantes definen un “rendimiento alcanzable”, son básicamente agua y nutrientes. La menor disponibilidad o aprovechamiento de estos recursos abióticos, genera mermas en el crecimiento de la planta con su consecuente pérdida de rendimiento. Los factores reductores determinan un “rendimiento logrado”, que es lo que finalmente se cosecha, dentro de esta categoría se incluyen los factores bióticos como malezas, plagas y

enfermedades. Los factores limitantes y reductores producen distintos tipos de estrés durante el ciclo del cultivo, determinando disminuciones del rendimiento potencial llevándolo a un rendimiento logrado mas bajo.

Por otra parte Reig y Picazo (2002) mencionan que los rendimientos en campo tambien se ven afectados por el progreso técnico, la difusión de prácticas agrícolas más eficientes, las mejoras en la organización de la producción y la calificación de los recursos humanos. Asi pues, aunque los factores que influyen en la producción, maduración y rendimiento en campo de la caña de azúcar son múltiples y comprenden aspectos edáficos, botánicos, fisiológicos, culturales y económicos (Larrahondo y Villegas, 1995); diversos autores como Inman-Bamber (1991), Scarpari y Gomes (2004), Battie (2009), y Madera *et al.* (2009) entre otros, mencionan que con el simple hecho de aplicar riego se incrementa la biomasa y el rendimiento de sacarosa en campo. Palacio (2002) señala que en zonas del Sur de México, 10 a 12 riegos permiten rendimientos en campo de más de 250 t ha<sup>-1</sup>.

En México la producción de azúcar de caña se realiza en 54 ingenios distribuidos en 15 Estados y 227 municipios del país; en 664 mil hectáreas de cultivo de caña, alcanzando una producción cercana a los 5.6 millones de toneladas de azúcar con un valor de cerca de 27 mil millones de pesos. Además genera 440 mil empleos directos y tiene aportaciones en el PIB (Producto Interno Bruto) manufacturero de 2.1 %, y en el agropecuario de 8.6 % (CNIAA, 2011; Aguilar *et al.*, 2012).

En el contexto mundial, México ocupa el séptimo lugar en producción de azúcar con 5.6 millones de toneladas (mdt), Brasil es el primero con 32.4 mdt; el séptimo en consumo con 4.8 mdt (India ocupa el primer puesto con 23 mdt); el peldaño seis en producción de caña de azúcar con 51 mdt, por 645 mdt del primer lugar, Brasil; respecto al rendimiento

en campo México se sitúa en el lugar 30 de 100 países con  $65 \text{ t ha}^{-1}$ , por  $127 \text{ t ha}^{-1}$  del primer puesto, Etiopia (FAOSTAT, 2011; SIAP, 2012a).

La agroindustria azucarera mexicana, y su posicionamiento competitivo medido por el rendimiento en campo presenta un rezago importante con respecto a otros países. La superficie sembrada y cosechada de caña de azúcar, supera ampliamente a los países situados en los primeros lugares, pero su rendimiento en campo y la extracción de sacarosa es muy inferior. El análisis de la agroindustria cañera de México se realiza para el período 2000 a 2011 con la finalidad de integrar al menos dos ciclos cañeros de altibajos en la producción, relacionados con las condiciones climáticas y así poder identificar los factores que inciden en la productividad y competitividad del campo cañero de México.

La superficie cultivada de 2006 a 2011 se incrementó en 15 % con respecto a la de 2000 a 2005, mientras los rendimientos de caña en campo ( $\text{t ha}^{-1}$ ) se redujeron en 8 % (SIAP, 2012a), pasando de  $71 \text{ t ha}^{-1}$  a poco menos de  $65 \text{ t ha}^{-1}$ . Este aspecto ha sido documentado por la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (2007 y 2009); y por Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura (2009 y 2010), quienes la señalan como un punto crítico para la competitividad del sector cañero. Aguilar *et al.* (2012) coincide también en que el problema de competitividad internacional de la agroindustria cañera en México, se ubica en la baja de rendimientos en campo.

De 2000 a 2011 sobresalen por su alto rendimiento en campo los ingenios de Morelos y Puebla, con valores de  $108$  y  $103 \text{ t ha}^{-1}$  en riego, mientras en el otro extremo están los de Campeche y Tabasco con rendimientos de  $41$  y  $56 \text{ t ha}^{-1}$  en condiciones de secano. Respecto a la superficie cultivada destaca el estado de Veracruz con el 41 % del total, San

Luis Potosí y Jalisco con el 10 % cada uno (SIAP, 2012a). El 68 % de la superficie total cultivada es bajo condiciones de secano (SAGARPA, 2009).

De acuerdo con el SIAP (2009), los rendimientos promedios en campo de caña de azúcar en regiones de secano son de 64 t ha<sup>-1</sup> mientras que para riego son del orden de 92 t ha<sup>-1</sup>. De ahí la importancia del fomento de infraestructura de riego y fortalecimiento de la misma en el sistema productivo de caña de azúcar nacional. Como parte del fomento de riego la Comisión Nacional del Agua ha desarrollado programas que subsidian la infraestructura hidroagrícola en las regiones cañeras, donde concluye que para las áreas de secano el riego es económica, ambiental y socialmente viable.

Aunado a este panorama de baja de rendimientos en campo en México y su repercusión en la competitividad del sector, se suman evidencias de que el descenso de la precipitación, atribuido al cambio climático, es un factor que condiciona la baja de rendimientos en campo de la caña de azúcar en México (Bravo-Mosqueda, 2012); por lo que eventualmente su producción requiera de infraestructura hidroagrícola (Ojeda-Bustamante, 2011).

Bajo este contexto, en la presente investigación se estudia la evolución de los rendimientos en campo de las diferentes regiones cañeras de México, su relación con el empleo actual del riego y las necesidades de este a futuro, como una respuesta para incrementar los rendimientos en campo y por consecuencia la competitividad del sector; así mismo se caracterizan, mediante un estudio de caso, los factores que limitan el uso del riego en una zona cañera con disponibilidad de agua.

Con base en lo anterior los objetivos que se plantean en esta investigación son:

- 1) Identificar los factores que determinan la dinámica de la producción cañera en México de 2000 a 2011, verificando si las zonas cañeras han presentado cambios significativos en clima, campo o fábrica, para establecer cuanto del crecimiento de la producción es debido a superficie cultivada y cuanto a rendimiento en campo.
- 2) Asociar las alteraciones climáticas en las diferentes regiones donde se cultiva la caña de azúcar en México, con la baja de rendimientos en campo y el empleo de riego, mediante sistemas de información geográfica y técnicas estadísticas multivariadas, para trazar posibles estrategias de adaptación frente a las variaciones climáticas en las zonas cañeras mexicanas.
- 3) Describir los factores que limitan el uso del riego para el cultivo de caña de azúcar en un distrito de riego de México, a partir de un estudio de caso correspondiente a una región cañera donde sin restricciones importantes en la disponibilidad de agua, se utilice el recurso predominantemente para riegos de auxilio y con alta vulnerabilidad a los efectos del cambio climático; para establecer estrategias que fomenten la infraestructura hidroagrícola.

El trabajo se agrupa en cuatro capítulos ligados por un método deductivo (de general a lo particular), (Figura 1) donde se analiza de forma paralela, la producción en campo descompuesta por los factores superficie cultivada (ha) y rendimientos ( $t\ ha^{-1}$ ), la relación que el riego guarda respecto al incremento de los rendimientos en campo, y las necesidades hídricas actuales y a futuro de las diferentes zonas donde se cultiva la caña de azúcar, como consecuencia de las alteraciones climáticas previsibles; hasta aterrizar en un estudio de caso donde se describen las limitantes que condicionan el empleo de riego.

Para ello en el Capítulo II se identifican los factores que determinan la dinámica de la producción cañera de los 54 ingenios en México. Se verifica si las zonas cañeras han presentado cambios significativos en clima, campo o fábrica entre los periodos 2000-2005 y 2006-2011. Se precisa cuánto del crecimiento de la producción es debido a cambios en la superficie cultivada y cuánto a cambios en el rendimiento en campo. Se propone una tipología de ingenios en función del crecimiento productivo de las áreas cañeras asociadas a cada uno de los 54 ingenios.

En el capítulo III se diferencian por medio de sistemas de información geográfica y técnicas estadísticas multivariadas (análisis de componentes principales) tendencias de parámetros climáticos relacionados con la producción en las diferentes unidades ambientales donde se cultiva la caña de azúcar en México. Con el uso de modelos temporales paramétricos (regresión lineal) y no paramétricos (Mann-Kendall) se establecen las tendencias de la disponibilidad hídrica del suelo y la evolución de la productividad. Los patrones climáticos se relacionaron con el régimen de riego y los rendimientos en la actualidad y a futuro. Estableciéndose las zonas cañeras más vulnerables ante los cambio climáticos previsibles.

En el capítulo IV se analizan y describen los factores que limitan el uso del riego para el cultivo de caña de azúcar (*Saccharum spp.*) en un distrito de riego de México. Se presenta como estudio de caso a la zona cañera del Distrito de Riego 035, La Antigua, Veracruz.

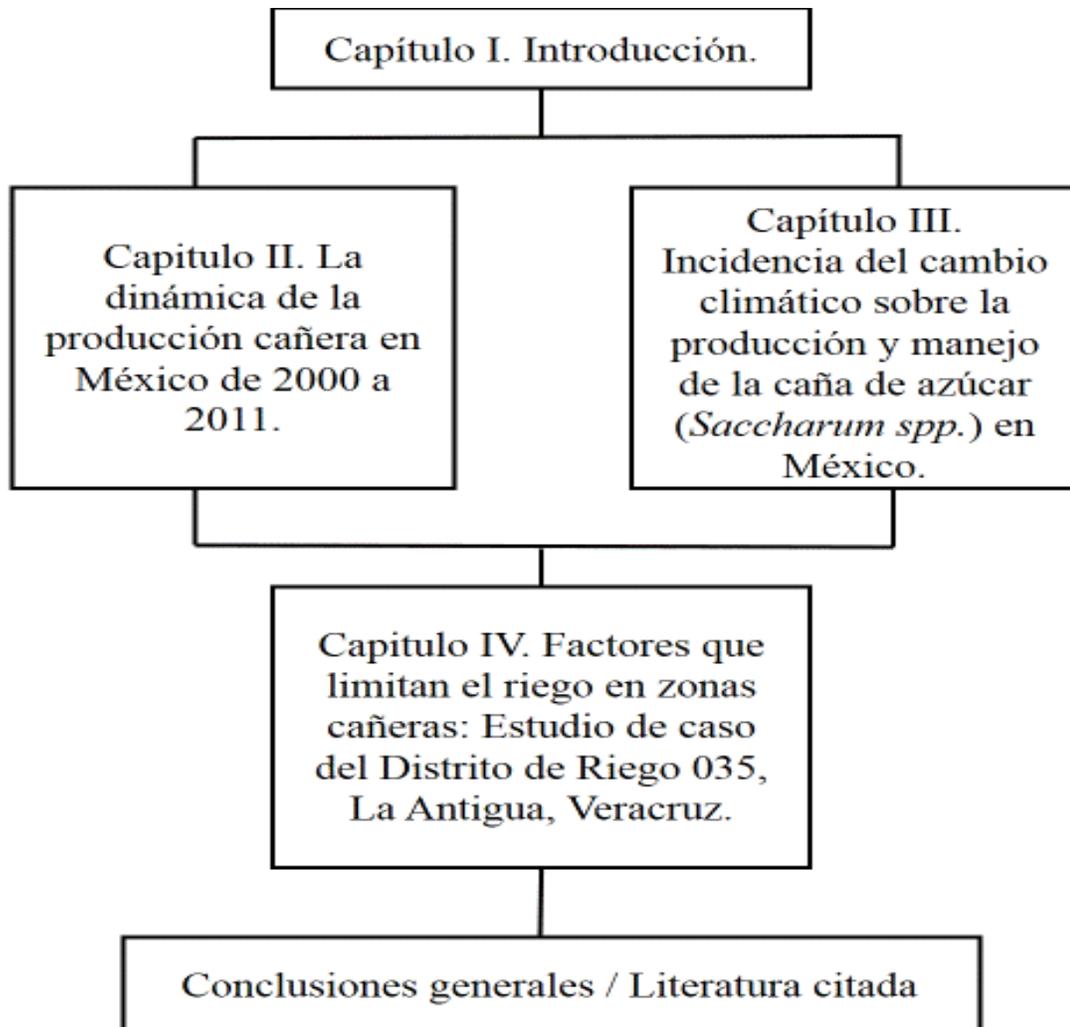


Figura 1. Estructura de la investigación. El riego en zonas cañeras de México: importancia y retos ante el cambio climático.

## **CAPÍTULO 2. LA DINÁMICA DE LA PRODUCCIÓN CAÑERA EN MÉXICO DE 2000 A 2011<sup>3</sup>**

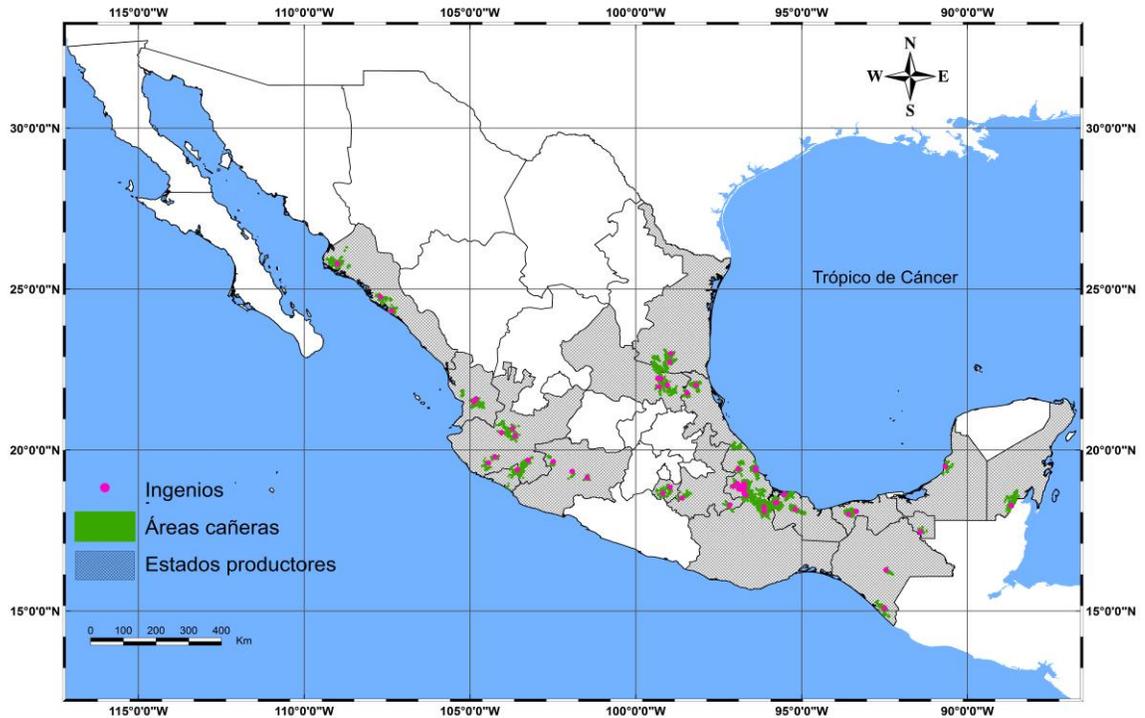
### **Introducción**

En México el cultivo de caña de azúcar (*Saccharum spp.*) ocupa el séptimo lugar en superficie cultivada con 673,480 hectáreas que representan el 3.4 % de la superficie cultivada nacional (SIAP, 2012a); genera 440 mil empleos directos y tiene aportaciones en el PIB (Producto Interno Bruto) manufacturero de 2.1 %, y en el agropecuario de 8.6 % (CNIAA, 2012).

Por los patrones de clima, suelo y precipitación que requiere la planta de caña de azúcar, se cultiva desde el Trópico de Cáncer hasta la frontera sur de México, en regiones tropicales y subtropicales que van del nivel de mar hasta 1600 msnm, con precipitaciones de 1000 a 2200 mm año<sup>-1</sup>, en topografía plana y eventualmente en lomeríos, con temperatura media anual de 20 a 32 °C y temperaturas mínimas mayores a 10 °C, y en muy diversos tipos de suelos pero en general de buena calidad (SIAP, 2012b). Las áreas cañeras (Figura 2) se ubican en 54 ingenios que se distribuyen en 15 estados de México (UNC, 2013).

---

<sup>3</sup> Este capítulo fue publicado como artículo en la revista AP AGROproductividad. 7(6):23-29. 2014.



**Figura 2. Distribución geográfica de las áreas de producción cañeras en México, obtenidas a partir de datos del SIAP (2012b) y UNC (2013)**

De 2000 a 2011 sobresalen por su alto rendimiento en campo los ingenios de Morelos y Puebla, con valores de 108 y 103 t ha<sup>-1</sup> en riego, mientras en el otro extremo están los de Campeche y Tabasco con rendimientos de 41 y 56 t ha<sup>-1</sup> en condiciones de secano. Respecto a la superficie cultivada destaca el estado de Veracruz con el 41 % del total, San Luis Potosí y Jalisco con el 10 % cada uno (SIAP, 2012a). El 68 % de la superficie total cultivada es bajo condiciones de secano (SAGARPA, 2009).

La superficie cultivada de 2006 a 2011 se incrementó en 8 % con respecto a la de 2000 a 2005, mientras el rendimiento de caña en campo (t ha<sup>-1</sup>) se redujo en 6 % (SIAP, 2012a). Un comparativo de México con Brasil y Colombia muestran rendimientos en fábrica similares (11.1 %, 12.1 % y 11.7 % respectivamente), en producción de azúcar por hectárea destaca Colombia (9.5 t ha<sup>-1</sup>, 9.7 t ha<sup>-1</sup> y 14.4 t ha<sup>-1</sup> respectivamente). En contraste

el rendimiento de caña en campo de México ( $65 \text{ t ha}^{-1}$ ) es muy inferior al de Brasil ( $85 \text{ t ha}^{-1}$ ) y Colombia ( $120 \text{ t ha}^{-1}$ ) (FAOSTAT, 2011; SIAP, 2012a). Lo que muestra que el problema de competitividad internacional de la agroindustria cañera en México, se ubica en la baja de rendimientos en campo.

La baja de rendimientos en el campo cañero nacional y su efecto sobre la competitividad del sector ha sido documentada por la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA, 2007) y por Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura (FIRA, 2009; FIRA, 2010), quienes la señalan como un punto crítico para su competitividad. Coinciden en establecer políticas públicas orientadas a la renovación del campo cañero, incremento y tecnificación del riego y mejoras tecnológicas diversas para revertir esta situación.

En este marco, el objetivo del estudio es identificar los factores que determinan la dinámica de la producción cañera en México de 2000 a 2011. Para ello se verifica si las zonas cañeras han presentado cambios significativos en clima, campo o fábrica. Se identifica cuanto del crecimiento de la producción es debido a superficie cultivada y cuanto a rendimiento en campo. Se propone una tipología de ingenios, en función del crecimiento de la producción de las áreas cañeras asociadas a cada uno de los 54 ingenios, y se describen los ingenios representativos de cada tipo.

## **Materiales y métodos**

### ***Datos***

Del Sistema de Información Agrícola y Pesquera (2012a), se obtuvieron las siguientes variables de los ingenios que reportaron operaciones continuas de 2000 a 2011: rendimiento en campo ( $\text{t ha}^{-1}$ ), superficie cultivada (ha), caña molida bruta (t), rendimiento

en fábrica (%), eficiencia en fábrica (%), sacarosa en caña (%), fibra en caña (%), pureza del jugo mezclado (%), KARBE (Kilogramo de Azúcar Recuperable Base Estándar), y precio de la caña (\$ t<sup>-1</sup>).

De la Comisión Nacional del Agua (CNA, 2012) se obtuvieron las temperaturas medias (°C), mínimas (°C), máximas (°C) y precipitación (mm) de 2000 a 2011 para los estados donde se ubican los ingenios. Con base en la información del Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar (CONADESUCA, 2009) se determinó el sistema de producción por ingenio: riego de auxilio se consideró a aquella zona cañera donde se aplican de 1 a 4 riegos por ciclo de producción, riego donde se emplean más de 4, y secano donde no se utilizan.

Las características de los ingenios que se describen, se obtuvieron del Manual Azucarero Mexicano (MAM, 2011). Los factores que explican las diferentes dinámicas, se recopilaron en 2012 a partir de entrevistas con profesores especialistas en el tema de la Universidad Autónoma Chapingo y Colegio de Postgraduados, superintendentes de campo y técnicos del fondo de empresas expropiadas del sector azucarero.

## **Métodos**

Dado el carácter perenne del cultivo de caña y a que los ciclos de renovación de las plantaciones corresponden a alrededor de 6 años (Larrahondo y Villegas, 1995; SAGARPA, 2009), el periodo de 2000 a 2011 se dividió en dos etapas, la primera que va de 2000 a 2005 y que se caracterizó por una fuerte intervención del gobierno con la expropiación de ingenios, y la segunda que va de 2006 a 2011 caracterizada por el impulso del Programa Nacional de la Agroindustria de la Caña de Azúcar.

La prueba de medias, entre variables de campo, fabrica y clima del periodo 2000 a 2005 respecto de 2006 a 2011, se hizo con base a Tukey. El modelo estadístico que relaciona la variable respuesta superficie cultivada (*SupCul*) en función del precio real de la caña (*P*) del año anterior, se efectuó por mínimos cuadrados ordinarios; y la correlación, por el coeficiente de Pearson.

El modelo quedó como:  $SupCul_T = \beta_0 + \beta_1 P_{t-1} + \epsilon_i$

Donde  $t = 2000, 2001, \dots, 2011$

El crecimiento del campo cañero por ingenio de 2006 a 2011, respecto de 2000 a 2005, se determinó por el método de los efectos en el crecimiento en la producción, que separa las variaciones experimentadas por la superficie cultivada, los rendimientos en campo y por la interacción de ambos (Gómez, 1994; Contreras, 2000; Aguilar *et al.*, 2004).

## **Resultados y Discusión**

El periodo 2006-2011 presenta diferencias estadísticamente significativas respecto a 2000-2005 en las variables de campo (Cuadro 1), mientras que en las variables de clima y fábrica no hay diferencia, con excepción de la temperatura mínima. Estos resultados sugieren que las diferencias de la producción cañera en México entre esos periodos, no resultan de factores ambientales o del entorno industrial, sino de la dinámica del campo cañero (superficie cultivada y rendimiento en campo). Coincide con lo señalado por FIRA (2009) que establece que la competitividad de caña en México disminuyó, debido a la falta de inversión en el campo.

El rendimiento en campo está relacionado principalmente con la disponibilidad de agua y de nutrientes, mientras que la superficie cultivada está relacionada con variables de tipo

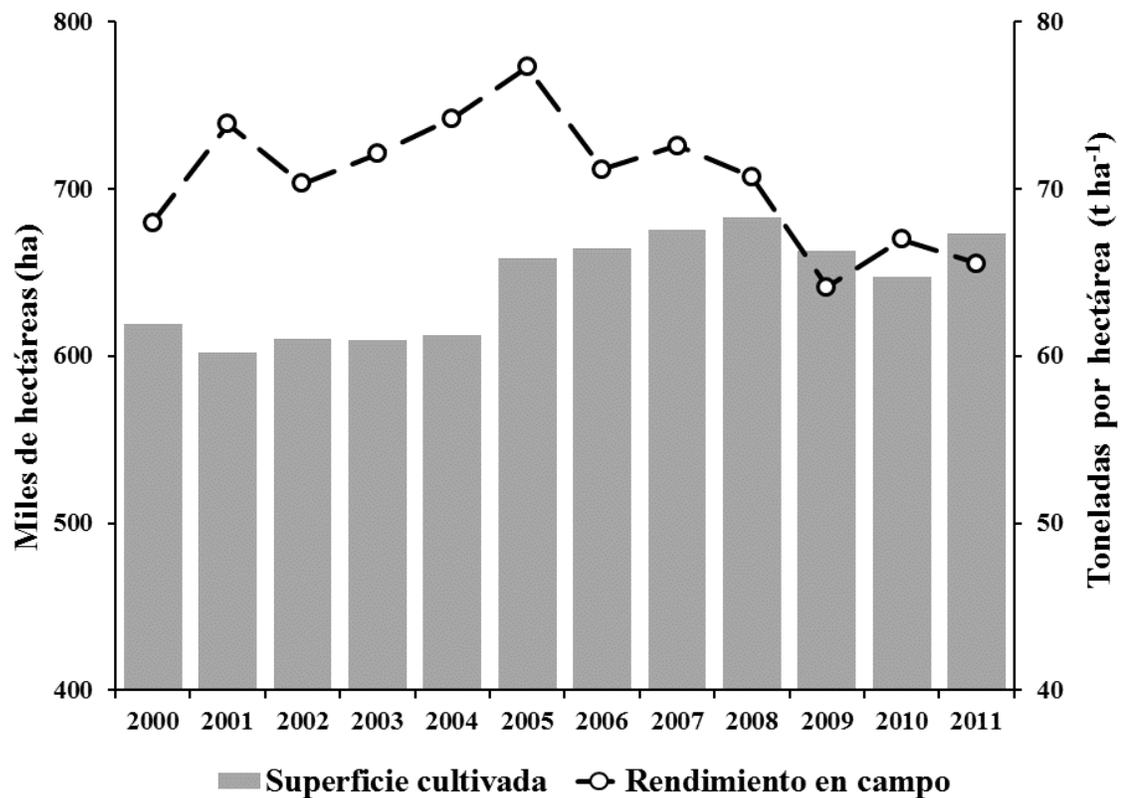
económicas como el precio de la caña y los beneficios sociales derivados de la caña, como el seguro social.

**Cuadro 1. Diferencias estadísticas entre los periodos 2006-2011 respecto 2000-2005 de las variables de los factores climáticos, campo y fábrica en las áreas cañeras.**

Factor	Variable	Medias		Pr > F
		2000-2005	2006-2011	
Clima	Temperatura Media (°C)	22.87 <sup>a</sup>	23.10 <sup>a</sup>	0.19
	Temperatura Máxima (°C)	30.22 <sup>a</sup>	30.49 <sup>a</sup>	0.44
	Temperatura Mínima (°C)	15.91 <sup>b</sup>	16.98 <sup>a</sup>	0.01*
	Precipitación (mm)	1325.93 <sup>a</sup>	1357.29 <sup>a</sup>	0.45
Campo	Superficie Cultivada (ha)	618,595.00 <sup>b</sup>	667,771.00 <sup>a</sup>	0.04*
	Rendimiento en campo (t ha <sup>-1</sup> )	72.64 <sup>a</sup>	68.52 <sup>b</sup>	0.00*
Fábrica	Caña molida bruta (t)	812,496.00 <sup>a</sup>	841,305.00 <sup>a</sup>	0.40
	Rendimiento en fábrica (%)	11.11 <sup>a</sup>	11.17 <sup>a</sup>	0.44
	Eficiencia en fábrica (%)	82.24 <sup>a</sup>	82.21 <sup>a</sup>	0.91
	Sacarosa en caña (%)	13.46 <sup>a</sup>	13.55 <sup>a</sup>	0.30
	Fibra en caña (%)	13.33 <sup>a</sup>	13.42 <sup>a</sup>	0.29
	Pureza en el jugo mezclado (%)	82.18 <sup>a</sup>	82.11 <sup>a</sup>	0.72
	Kilogramo de Azúcar Recuperable Base Estándar (KARBE)	116.43 <sup>a</sup>	117.65 <sup>a</sup>	0.12

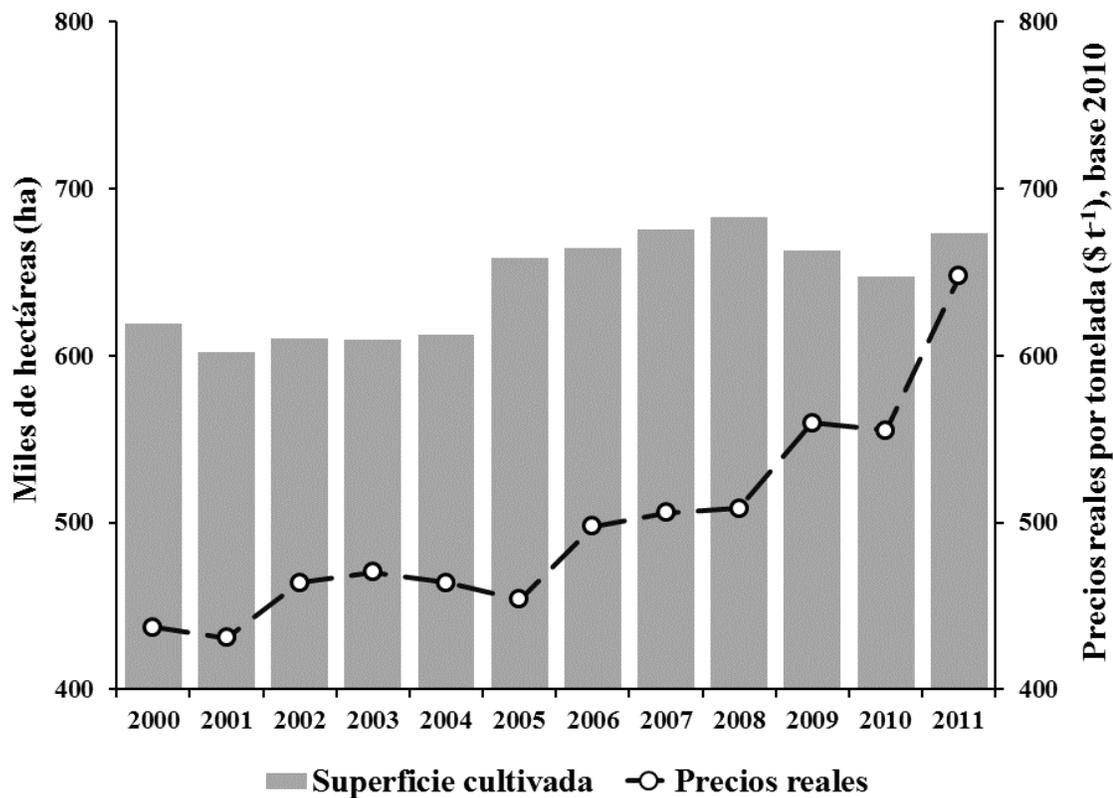
\* Significativo al 5 %.. Medias con la misma letra por fila no son estadísticamente diferentes (Tukey,  $\alpha=0.05$ )

De 2000 a 2005 los rendimientos en campo muestran una tasa media de crecimiento anual (TMCA) de 2.2 %, con un incremento anual de 1.6 t ha<sup>-1</sup>, al pasar de 67.9 t ha<sup>-1</sup> a 77.3 t ha<sup>-1</sup>. De 2006 a 2011 la TMCA es -1.4 %, implica un decremento de -1.7 t ha<sup>-1</sup> al variar de 77.3 t ha<sup>-1</sup> a 65.5 t ha<sup>-1</sup>. En tanto la superficie cultivada de 2000 a 2011 tiene una TMCA de 0.7 % (Figura 3), con un crecimiento anual de 4,511 ha, pasando de 619,343 ha a 673,480 ha, lo que ubica al sector en un modelo de producción extensivo.



**Figura 3. Evolución nacional de la superficie cultivada y rendimientos en campo de caña de azúcar de 2000 a 2011**

La evolución creciente de la superficie cultivada se explica por el incremento de precios reales (Índice Nacional de Precios al consumidor base 2010) de la caña de azúcar de 1999 a 2010, que mostraron una TMCA de 3.3 %, lo que representa un incremento anual de 17.5 \$ t<sup>-1</sup> al pasar de 437.1 \$ t<sup>-1</sup> a 647.6 \$ t<sup>-1</sup> (Figura 4).

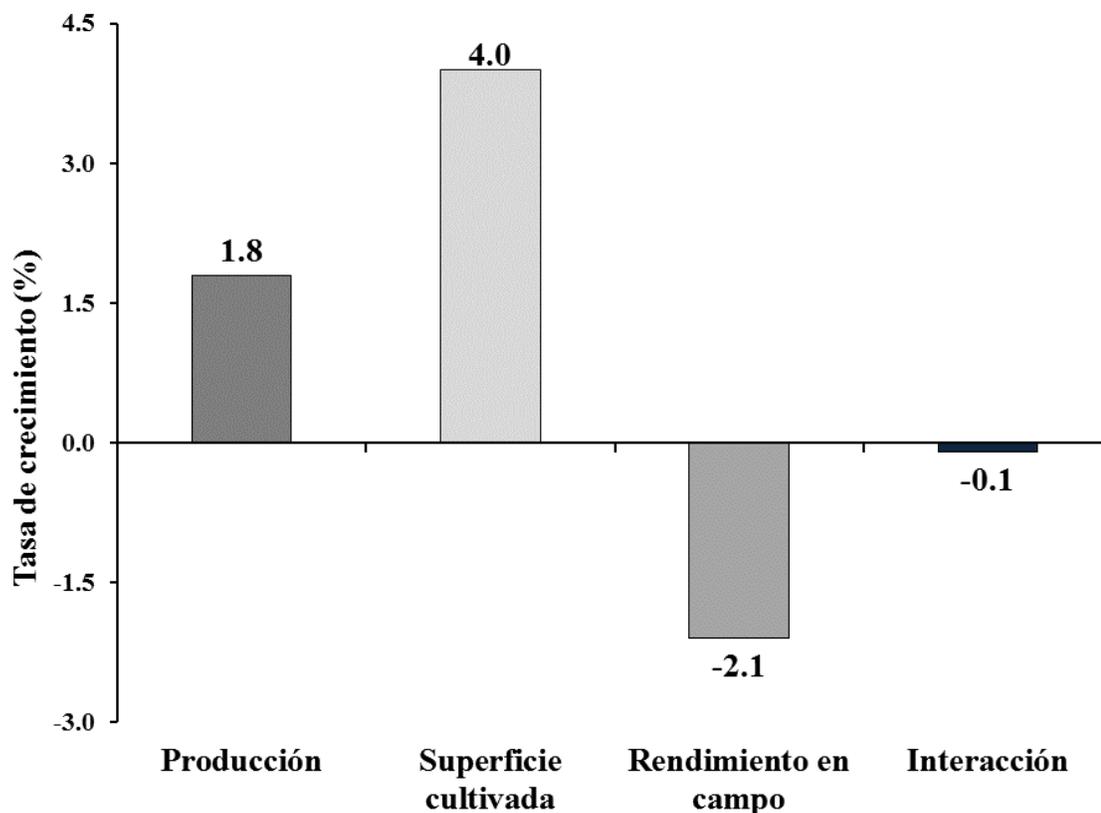


**Figura 4. Evolución nacional de la superficie cultivada y precios reales (índice nacional de precios al consumidor base 2010) de caña de azúcar de 2000 a 2011**

El modelo estadístico para explicar la superficie cultivada en función del precio real del año anterior, resulta altamente significativo ( $P \leq 0.01$ ) con un  $R^2$  de 0.47, y una correlación de 0.64. Esto indica que en general el productor nacional optó por extender la superficie agrícola para aumentar su producción de caña, reconvirtiendo terrenos ganaderos u otras actividades agrícolas menos rentables; en lugar de mejoras tecnológicas para lograr un incremento en el rendimiento en campo.

El análisis de la composición del crecimiento en la producción de caña de azúcar a nivel nacional muestra un incremento de 1.8 % entre la producción promedio de 2000-2005 y la del periodo 2006-2011, lo que representa 4.8 millones de t de caña, y se debe al aumento de la superficie cultivada en 4.0 % que compensó la baja de rendimientos en campo de 2.1

% (Figura 5). Es decir que el crecimiento de la producción en los últimos años ha sido un crecimiento extensivo asociado a los buenos precios relativos de la caña.



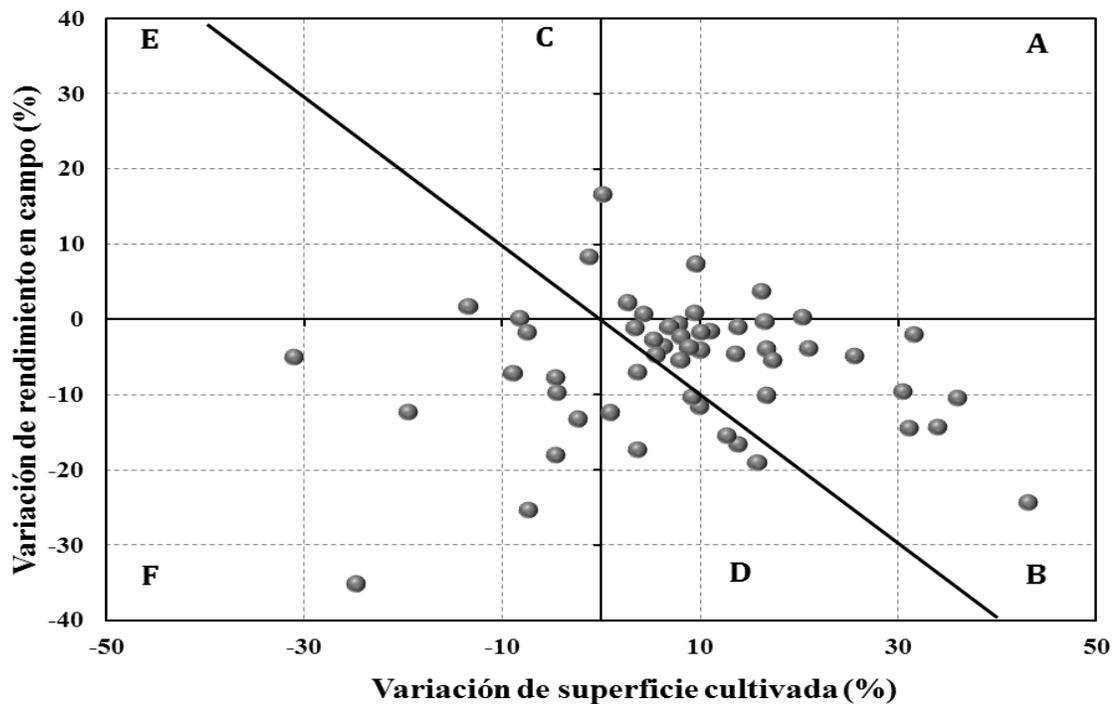
**Figura 5. Composición del crecimiento en la producción de 2006-2011 con respecto a 2000-2005**

El análisis de la composición del crecimiento de la producción cañera por ingenio, muestra que el 81.5 % de los ingenios que contribuyen con el 82.2 % de la superficie cultivada y el 79.9 % de la caña molida bruta, vieron una reducción en el rendimiento en campo, que fue compensado con el aumento de superficie cultivada con caña. Así el 75.9 % de los ingenios que representan el 83.7 % de la superficie cultivada y 83.7 % de la caña molida bruta han incrementado la superficie cultivada. Al hacer una clasificación de los ingenios en función de las diferentes combinaciones de crecimiento de la producción, superficie cultivada y rendimientos en campo se obtiene la tipología presentada en el cuadro 2.

**Cuadro 2. Tipología de ingenios por variaciones en la producción (Caña Molida Bruta) debidas a las variaciones en superficie cultivada y rendimiento en campo para el período 2006-2011**

Tipología de Ingenios	Producción	Superficie Cultivada	Rendimiento en Campo	Número de Ingenios	Participación en %		
					Ingenios	Superficie Cultivada	Caña Molida Bruta
A		Aumenta	Aumenta	7	12.96	13.96	15.96
B	Aumenta	Aumenta	Disminuye	26	48.15	50.86	51.92
C		Disminuye	Aumenta	1	1.85	0.72	1.13
D		Aumenta	Disminuye	8	14.82	18.87	15.85
E	Disminuye	Disminuye	Aumenta	2	3.70	3.10	3.04
F		Disminuye	Disminuye	10	18.52	12.49	12.10
Total				54	100.00	100.00	100.00

La figura 6 representa esta tipología, a partir de los ejes de crecimiento en superficie cultivada y rendimientos en campo, incluye además una diagonal que ubica por encima a los ingenios que tienen crecimiento en la producción y por debajo a los que tienen una reducción en la misma para el periodo 2006-2011.



**Figura 6. Tipología de ingenios por variaciones en superficie cultivada y rendimiento en campo de 2006-2011 respecto de 2000-2005**

Para mostrar algunos de los factores que explican los cambios de superficie cultivada y rendimiento en campo, se seleccionaron ingenios tipo por categoría (Cuadro 3). En las categorías A, B y C, se escogieron los ingenios con el mayor índice de crecimiento en la producción. Para las categorías D, E, y F, el ingenio analizado correspondió al de menor crecimiento en la producción.

**Cuadro 3. Factores que explican el aumento (+) y disminución (-) de superficie cultivada y rendimiento en campo en los ingenios seleccionados. Obtenidos de CONADESUCA (2009), MAM (2011), entrevistas con especialistas de la Universidad Autónoma Chapingo y Colegio de Postgraduados, superintendentes de campo y técnicos del fondo de empresas expropiadas del sector azucarero (2012)**

Tipo	Ingenio	Riego	Superficie cultivada	Rendimiento en campo
A	San Francisco Ameca	Auxilio	(+) Reversión de zonas maiceras a cañeras	(+) Tecnificación de riego por goteo
B	La Joya	No	(+) Crecimiento de zona de abasto por precios altos de la caña.	(-) Desinversión en el campo cañero.
C	Eldorado	Si	(-) Pérdida de competitividad de la caña frente al cultivo de hortalizas.	(+) Tecnificación de riego
D	Alianza Popular	No	(+) Crecimiento de zona de abasto por precios altos de la caña	(-) Por escasez de agua
E	Lázaro Cárdenas	Si	(-) Pérdida de competitividad de la caña frente al cultivo de frutillas (fresa y zarzamora)	(+) Tecnificación de riego
F	Calipam	No	(-) Productores venden su caña a otros ingenios	(-) Altos costos de agua

En general el incremento de los rendimientos en campo, se explica por la incorporación del riego o por la tecnificación del mismo; la caída, resulta por la dificultad de regar debido a los altos costos, disponibilidad de agua, o por falta de inversión en campo. Estos resultados coinciden con lo señalado por Scarpari y Gomes (2004) quienes mencionan que el riego impacta directamente en el sistema de producción, maduración y rendimiento cañero. Palacios (2002) establece que el número de riegos es proporcional al rendimiento

en campo, muestra que en Veracruz de 12 a 13 riegos permiten rendimientos en campo de más de 250 t ha<sup>-1</sup>.

Los ingenios que incrementan la superficie cultivada, se debe a los altos precios de la caña frente a otras opciones como la ganadería o el maíz; mientras que los que la reducen, lo hacen por pérdida de competitividad de la caña frente a otros cultivos más intensivos como hortalizas o frutillas.

De los 20 ingenios que presentan un decrecimiento en su producción, el 50% se encuentra en una situación crítica, al bajar tanto superficie cultivada como rendimientos en campo; y corresponden al tipo F. Las causas principales de ese mal desempeño se resumen en 4 aspectos: (1) los productores prefieren vender la caña a ingenios aledaños que les ofrecen mejores servicios y tiempos de pago, (2) factores climáticos como inundaciones o sequías prolongadas, (3) competencia con otros cultivos por el uso de la tierra y (4) problemas organizacionales entre productores (Cuadro 4). En general estas causas se ven difíciles de revertir por lo que el futuro de estos ingenios está bastante comprometido.

**Cuadro 4. Factores que explican el comportamiento de los Ingenios cuya superficie cultivada y rendimiento en campo han decrecido en el periodo 2006-2011. Obtenidos de CONADESUCA (2009), MAM (2011), entrevistas con especialistas de la Universidad Autónoma Chapingo y Colegio de Postgraduados, superintendentes de campo y técnicos del fondo de empresas expropiadas del sector azucarero (2012)**

Ingenio	% Decrecimiento en Producción	Causas
Calipam	-54.30	1 y 4
Bellavista	-34.90	1
Azsuremex - Tenosique	-31.26	2
Los Mochis	-29.97	3
San Pedro	-21.97	2
Plan De Ayala	-15.48	2
Pablo Machado (La Margarita)	-15.31	4
El Modelo	-13.76	1, 2 y 4
San Miguelito	-12.06	1
Pedernales	-9.15	3

## **Conclusiones**

El crecimiento de la producción de caña en México se basó en aumentar la superficie cultivada, como consecuencia de los precios atractivos que presentó el cultivo entre 2006 y 2011. Sin embargo, este crecimiento extensivo estuvo acompañado, para el 82% de las áreas cañeras, de una caída de la productividad. El ciclo de bajos precios que se presenta a partir de la zafra 2012-2013 reducirá sensiblemente la producción y comprometerá el abasto de los ingenios del país. En este marco, la promoción y tecnificación del riego, la renovación de plantaciones y el uso más eficiente de los insumos deben ser impulsadas en las áreas cañeras.

Las diez áreas cañeras que muestran reducciones en superficie cultivada y rendimientos en campo entre los periodos analizados, presentan problemáticas difíciles de revertir, por lo que su futuro está muy comprometido.

### **CAPÍTULO 3. INCIDENCIA DEL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE LA PRODUCCIÓN Y MANEJO DE LA CAÑA DE AZÚCAR (*Saccharum spp.*) EN MÉXICO**

#### **Introducción**

Los factores que influyen en la producción, maduración y rendimiento de la caña de azúcar (*Saccharum spp.*) son múltiples y comprenden aspectos edáficos, botánicos, fisiológicos, culturales y económicos (Larrahondo y Villegas, 1995). Sin embargo Scarpari y Gomes (2004) mencionan que el clima y en particular la lluvia determina el proceso de crecimiento, la cantidad de azúcar producida, el desarrollo de enfermedades y plagas en el cultivo. Los factores climáticos no se pueden controlar, en especial la temperatura y precipitación, pero si se conocen sus cambios a través del tiempo, es posible manejar el ciclo del cultivo, adaptándolo a las condiciones del clima (Van Ittersum y Rabbinge, 1997). El Balance Hídrico Climático y el índice de humedad son herramientas útiles para la planificación agrícola, al permitir conocer el exceso o déficit hídrico a lo largo del cultivo. Diferentes trabajos (p.e. Inman-Bamber and Smith, 2005) muestran el efecto negativo del déficit hídrico, reduciendo la cantidad de biomasa y la acumulación de sacarosa. En relación a esto, el riego puede incrementar en 3.6 t ha<sup>-1</sup> la sacarosa (Inman-Bamber, 2004).

Los rendimientos promedio en las distintas zonas cañeras oscilan entre 92 y 64 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> en función de las condiciones climáticas y si se emplea riego (SIAP, 2009). En este sentido, el 45 % de la superficie total cultivada en México es bajo condiciones de secano (temporal), principalmente Tabasco, Veracruz, y Chiapas, donde se registran elevadas precipitaciones. En el resto del país se maneja con riego de auxilio o riego completo

(Puebla, Morelos, Jalisco, principalmente). Algunos autores como Palacios (2002) muestran que el riego mejora el rendimiento de las producciones en áreas donde la caña se cultiva en régimen de secano. Con riegos bien aplicados se pueden lograr rendimientos en campo de más de  $250 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ .

Existen evidencias de que el cambio climático afecta los rendimientos en campo de caña de azúcar ( $\text{t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ). Por citar algunos ejemplos, Knox *et al.* (2009) en Sudáfrica, Biggs *et al.* (2013) en Australia, y Santos *et al.* (2012) y Marin *et al.* (2013) en Sudamérica. Sin embargo pocos estudios relacionan las variaciones climáticas con la productividad de caña de azúcar, se limitan a asociarlos.

Méndez *et al.* (2008) y Munroe *et al.* (2014) encontraron evidencias de un descenso (de hasta 30 mm por década) en las precipitaciones para el Sur y Sureste de México, atribuidos al cambio climático. Al respecto Gay (2000), Conde *et al.*, (2011) y INECC (2012) pronostican mediante escenarios futuros de cambio climático, que la vertiente del Golfo de México será una región altamente vulnerable a la sequía meteorológica. Y de acuerdo con Ojeda-Bustamante *et al.* (2011) estas consecuencias del cambio climático tendrán un efecto radical en las demandas de riego y en la gestión de los sistemas de riego para la agricultura mexicana.

México presenta un descenso en la última década del 8 % de los rendimientos en campo (de  $72$  a  $64 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ), que algunos investigadores atribuyen a esas alteraciones climáticas (Bravo-Mosqueda *et al.*, 2012). No obstante, también habría que considerar otros factores como manejos inadecuados del cultivo relacionados con la disponibilidad de agua (FIRA, 2009 y 2010). Estos descensos podrían mermar la competitividad internacional de la agroindustria cañera en el país (Aguilar *et al.*, 2012).

Los estudios anteriores sugieren que el descenso de precipitaciones como consecuencia de alteraciones climáticas puede ser la causa del descenso de rendimientos que se han documentado en México, tal como se han descrito en otras zonas de América y otros. Sin embargo, hasta la fecha no existe ningún trabajo capaz de relacionar las variaciones climáticas con la productividad en el país. Para abordar esta cuestión el objetivo del presente estudio es identificar las alteraciones climáticas en las diferentes unidades climáticas donde se cultiva la caña en México. Estas alteraciones se relacionaron con las tendencias en los rendimientos. Este análisis permitirá trazar posibles estrategias de adaptación frente a las variaciones climáticas en las zonas cañeras mexicanas.

## **Materiales y Métodos**

### ***Descripción del área de estudio***

En este trabajo se incluyeron las áreas de producción de caña de azúcar de los 54 ingenios de México reconocidos por SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación) que reportaron operaciones continuas desde 2000 hasta 2011. Estos ingenios están distribuidos en los Estados de Campeche (1 ingenio; 1% superficie sembrada), Chiapas (2; 4%), Colima (1; 2%), Jalisco (6; 10%), Michoacán (3; 2%), Morelos (2; 2%), Nayarit (2; 4%), Oaxaca (3; 6%), Puebla (2; 2%), Quintana Roo (1; 3%), San Luis Potosí (4; 11%), Sinaloa (3; 3%), Tabasco (3; 4%), Tamaulipas (2; 4%), y Veracruz (19; 40%). De estos ingenios se cuenta con información sobre el tipo de riego y variables de producción, como la superficie sembrada, rendimientos en campo y caña molida bruta (SIAP, 2012a; CONADESUCA, 2013). La localización georeferenciada de la superficie sembrada se obtuvo del SIAP (2012b).

### ***Asignación y definición de las unidades ambientales de los ingenios en México***

Los ingenios anteriores se localizan en diferentes regiones ambientales, lo que condiciona aspectos de manejo (riego y variedad, principalmente) y también los rendimientos de caña de azúcar. Para definir las condiciones climáticas, se realizó una primera aproximación, para lo que se utilizaron los datos climáticos (precipitación media anual, régimen de temperatura, y temperatura media anual) y altitud georeferenciados (*shape*), publicados por la CONABIO (2001).

Con la herramienta intersect del software GvSIG v2.0 (2014) de sistemas de información geográfica, se combinaron el *shape* de las zonas cañeras, con los *shape's* de las variables climáticas y altitud, siguiendo la *Metodología de Unidades Ambientales* de Gómez-Orea (1994). En esta primera aproximación, los umbrales climáticos de referencia para las unidades ambientales fueron los propuestos por Buenaventura-Osorio (1981): a) temperatura media:  $\geq 23$  °C y  $< 23$  °C, b) precipitación:  $\geq 1200$  mm y  $< 1200$  mm, y c) altitud:  $\geq 1000$  y  $< 1000$  msnm.

Para comprobar estadísticamente el ajuste de la asignación de los ingenios a las Unidades Ambientales obtenidas por la metodología de Gómez-Orea (1994), se realizaron diversos análisis que tuvieron en cuenta los promedios mensuales de diferentes variables climáticas (temperaturas mínima, máxima y media, precipitación y evaporación) obtenidos en la base de datos climatológica para la serie 1979-2009 de CLICOM (CLImate COMputing Project, 2013). En cada uno de los 54 ingenios se seleccionaron entre 3 y 5 estaciones meteorológicas. Se consideraron un total de 177 estaciones, en las que se determinó el Balance Hídrico Climático (*BHC*) y índice de humedad por año (*WI*) siguiendo las siguientes metodologías.

1. Balance Hídrico Climático (*BHC*) propuesto por Thornthwaite y Mather (1957). Para ello se empleó una Capacidad de Almacenamiento de agua del Suelo (*CAS*) de 200 mm (Santillán *et al.*, 2013), para estimar la evapotranspiración potencial (*PET*), el exceso hídrico (*WS*) y el déficit hídrico (*WD*) mensuales en cada ingenio y unidad ambiental.
2. Con la evapotranspiración potencial en mm año<sup>-1</sup> (*PET*), exceso hídrico en mm año<sup>-1</sup> (*WS*) y déficit hídrico en mm año<sup>-1</sup> (*WD*) se calculó el índice de humedad por año (*WI*) expresado en %, para cada unidad ambiental (Ruíz-Álvarez *et al.*, 2012) mediante la ecuación:

$$MI = \frac{100(WS - WD)}{PET}$$

A las variables potencial de evapotranspiración, déficit hídrico y exceso hídrico, obtenidas mediante el Balance Hídrico Climático, más temperatura media y precipitación anual, de los 54 ingenios para el período 1979-2009, se les aplicó un Análisis de Componentes Principales (ACP) con la finalidad de comprobar estadísticamente la bondad de la asignación de los ingenios a las Unidades Ambientales obtenidas por la metodología de Gómez-Orea (1994).

El factor que más influye en el manejo y producción de la caña de azúcar es la disponibilidad de agua en el suelo. Por este motivo, se consideró de manera especial el Índice de Humedad (*WI*). Su cálculo considera la precipitación, temperatura media, evapotranspiración potencial, déficit hídrico y exceso hídrico. A esta variable se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) y prueba de medias por Tukey para corroborar las diferencias estadísticas entre las Unidades Ambientales.

Una vez hecha la asignación de los ingenios, se procedió a analizar diferentes parámetros en cada unidad ambiental: a) superficie cultivada ( $\text{ha año}^{-1}$ ), b) el empleo de riego, c) rendimientos de caña de azúcar ( $\text{t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ) y d) producción total como caña molida bruta ( $\text{t año}^{-1}$ ). Estos datos se obtuvieron a partir de los promedios anuales en la serie 2000-2011 para los 54 ingenios (SIAP, 2012a).

Para analizar la influencia del clima sobre los rendimientos para cada unidad ambiental se tuvo en cuenta el régimen de riego. Se consideró la superficie anual manejada por riego completo, riego de auxilio y secano por cada ingenio, en el período de 2000 a 2011. Se consideró riego completo aquellas áreas con más de 4 riegos por ciclo de producción. Se considera riego de auxilio cuando se emplea entre 1 a 4 riegos. Estos datos se obtuvieron de CONADESUCA (2013) y del *Manual Azucarero Mexicano*, publicado anualmente por la Cámara Nacional de las Industrias Azucarera y Alcohólica (CNIAA) de 2000 a 2011.

Un análisis de varianza (ANOVA) y prueba de medias por *Tukey* permitió establecer las diferencias estadísticas entre las unidades ambientales, respecto a variables climáticas, uso de riego, e indicadores de productividad como la superficie cultivada ( $\text{ha año}^{-1}$ ), rendimientos ( $\text{t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ) y caña molida bruta ( $\text{t año}^{-1}$ ). Mientras que un análisis de regresión lineal simple fue utilizado para mostrar la asociación entre superficie irrigada y rendimiento en las diferentes unidades ambientales.

### ***Evoluciones temporales del Índice de Humedad y productividad de la caña de azúcar***

Una vez establecida la zonificación ambiental se relacionó la evolución del índice de humedad del suelo con la de los indicadores de productividad por Unidad Ambiental. Para ello se consideró la evolución de los rendimientos para las superficies manejadas con diferente régimen de riego en cada uno de los ingenios, que fueron agrupados en sus

Unidades Ambientales. Para el estudio de la evolución temporal del Índice de Humedad (*WI*) se consideró la serie 1979-2009. Para los rendimientos por régimen de riego (riego completo, riego de auxilio y secano) se emplearon los datos disponibles, de 2000 a 2011. El análisis de estas tendencias se realizó mediante modelos temporales paramétricos (regresión lineal), por el método de mínimos cuadrados (Gujarati, 2007). En el caso del *WI*, por disponer de una serie suficientemente amplia, también se emplearon modelos no paramétricos. Se utilizó la prueba de Mann Kendall, frecuentemente utilizada en el análisis de tendencias de series hidrometeorológicas (Aziz *et al.*, 2006; Méndez *et al.*, 2008). Mediante la ecuación:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X$$

En donde *Y* es la recta de ajuste, *X* toma el valor del año correspondiente,  $\beta_0$  y  $\beta_1$  son estimadores;  $\beta_1$  (pendiente) indica la tendencia en el tiempo (*X*).

Finalmente, la información sobre ciertos factores no cuantitativos (factores socioeconómicos, principalmente) que explican parte de las dinámicas de producción, se recopiló a partir de entrevistas efectuadas en 2012 a profesores especialistas de la Universidad Autónoma Chapingo y Colegio de Postgraduados, así como superintendentes de campo y técnicos de los diferentes ingenios.

## **Resultados y Discusión**

### ***Delimitación de unidades ambientales***

Con el propósito de delimitar las zonas cañeras en función de su climatología, se utilizaron los datos georeferenciados (*shape*) obtenidos de la CONABIO (2001) y de las áreas cultivadas de caña del SIAP (2012b). Al aplicar los criterios climáticos propuestos por Buenaventura-Osorio (1981) a los *shape's* conforme la metodología de delimitación de

unidades ambientales de Gómez-Orea (1994), se obtuvieron 7 unidades ambientales homogéneas (Cuadro 4 y Figura 7). Los resultados obtenidos alcanzan una mayor precisión que la regionalización propuesta por el CONADESUCA (2013) y UNC (2013), establecida de manera empírica considerando localización geográfica, aspectos socioeconómicos y uso de riego en caña de azúcar. En la clasificación realizada en este trabajo se consigue diferenciar la región de Veracruz en dos subunidades, Centro Sur y Centro Norte, por su diferente temperatura.

**Cuadro 4. Unidades ambientales obtenidas a partir de criterios climáticos que afectan al manejo y producción de caña de azúcar.**

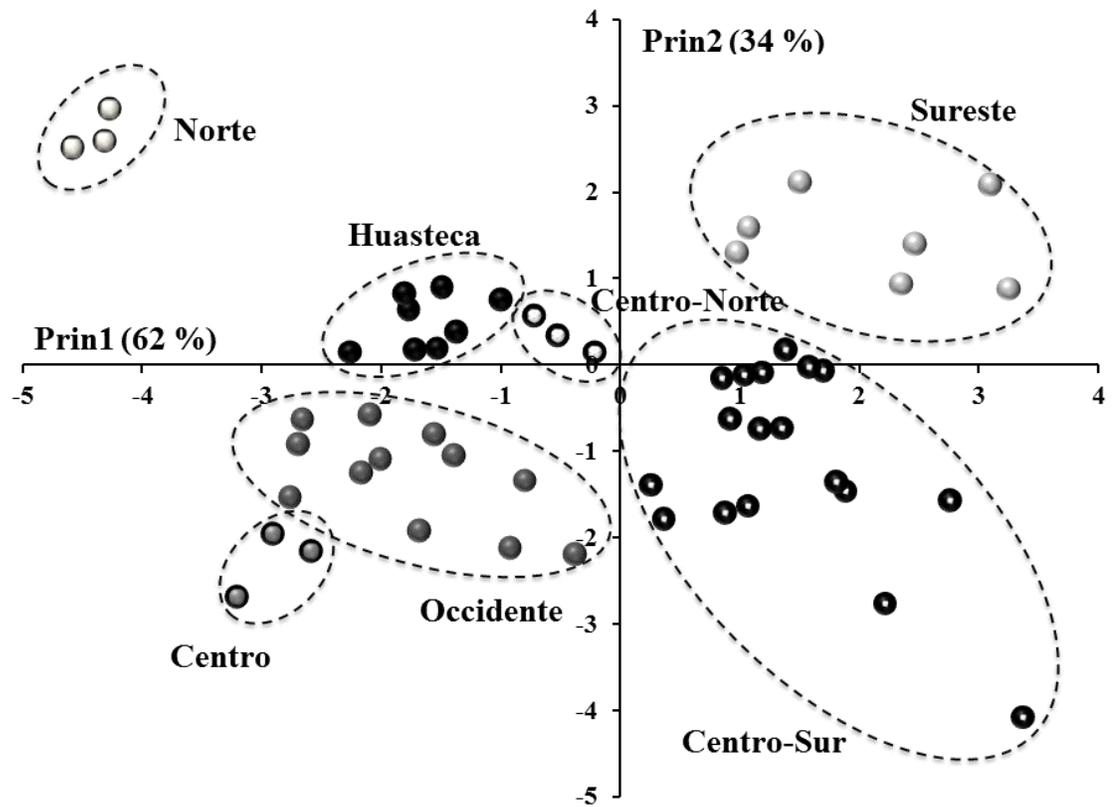
<b>Temperatura Media</b>	<b>Precipitación</b>	<b>Elevación</b>	<b>Régimen de Temperatura</b>	<b>Unidad Ambiental</b>
< 23 °C	< 1,200 mm	≥ 1,000 msnm	Cálida seca alta	Centro
> 23 °C	< 1,200 mm	< 1,000 msnm	Muy Cálida seca	Norte
≤ 23 °C	< 1,200 mm	≥ 1,000 msnm	Semicálida seca	Occidente
≥ 23 °C	< 1,200 mm	< 1,000 msnm	Cálida seca baja	Huasteca
			Semicálida	
≥ 23 °C	≥ 1,200 mm	< 1,000 msnm	húmeda	Centro-Norte
≤ 23 °C	≥ 1,200 mm	< 1,000 msnm	Cálida húmeda	Centro-Sur
			Muy cálida	
> 23 °C	≥ 1,200 mm	< 1,000 msnm	húmeda	Sureste



**Figura 7. Delimitación espacial de las unidades ambientales obtenidas a partir de criterios climáticos que afectan al manejo y producción de caña de azúcar**

Con el propósito de comprobar la bondad de los agrupamientos establecidos en esa primera fase, se aplicó el análisis de componentes principales (PCA) a los datos climáticos de los 54 ingenios (Figura 8 y Cuadro 5). Para cada ingenio se consideraron un mínimo de tres estaciones meteorológicas para el período 1979-2009. Con estos datos se calcularon las variables para realizar el balance hídrico climático (exceso y déficit hídrico y ETP), además de la temperatura media y precipitación anual. En el ACP se encontró que la primer componente (Prin1) relaciona a la precipitación anual, déficit y exceso hídrico, y explica el 62 % de la varianza total en los datos, la segunda componente (Prin2) contempla la evapotranspiración potencial y temperatura media, y aporta el 34 %; entre ambas explican el 96 % de la varianza total de los datos. La dispersión de los datos permitió agrupar y diferenciar las 7 unidades ambientales definidas anteriormente (Figura

8). El ANOVA para los eigenvectores (Cuadro 5) reveló que las regiones Centro Norte y Huasteca, y Centro y Occidente son parecidas entre sí.



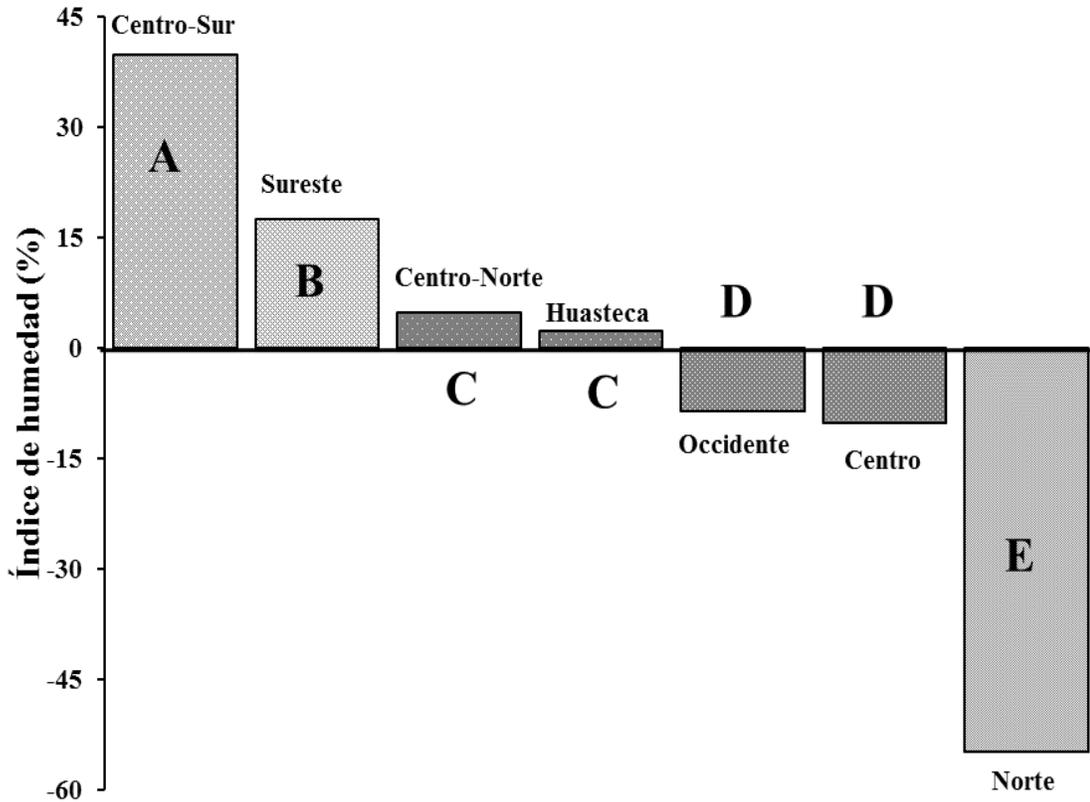
**Figura 8.** Agrupación de ingenios por análisis de componentes principales a partir del balance hídrico climático, temperatura media y precipitación anual. Se consideraron valores para el período 1979-2009 (CLICOM, 2013). Para cada uno de los 54 ingenios, se seleccionaron entre 3 y 5 estaciones meteorológicas (n = 177).

**Cuadro 5. Prueba de Tukey para los eigenvectores del PCA (Prin1 y Prin2) en las diferentes unidades ambientales.**

Unidad Ambiental	Prin1	Prin2
Centro	-2.9 <sup>c</sup>	-2.2 <sup>d</sup>
Norte	-4.4 <sup>d</sup>	2.7 <sup>a</sup>
Occidente	-1.8 <sup>b,c</sup>	-1.2 <sup>d</sup>
Huasteca	-1.6 <sup>b,c</sup>	0.5 <sup>c</sup>
Centro-Norte	-0.5 <sup>b</sup>	0.4 <sup>c</sup>
Centro-Sur	1.4 <sup>a</sup>	-1.1 <sup>d</sup>
Sureste	2.1 <sup>a</sup>	1.6 <sup>b</sup>

R<sup>2</sup> = 0.89 para Prin1 y R<sup>2</sup> = 0.78 para Prin2. Medias con la misma letra por columna no son estadísticamente diferentes (Tukey,  $\alpha=0.05$ )

Finalmente, para diferenciar las unidades ambientales por sus características climáticas se aplicó un ANOVA y prueba de medias por *Tukey* a un parámetro climático integrado, como es el índice de humedad (*WI*). Estas técnicas confirmaron las diferencias entre las 7 unidades ambientales ( $Pr > F$  de  $<.0001$  y un  $R^2$  de 0.74; Figura 9). Estadísticamente, las regiones Occidente y Centro, y Huasteca y Centro Norte no se diferenciaron entre sí. Sin embargo por la diferente ubicación geográfica y manejo agroecológico del cultivo, se decidió analizarlas por separado.



**Figura 9.** Prueba de medias por Tukey aplicada a los datos de índice de humedad para las unidades ambientales. Medias con la misma letra no son estadísticamente diferentes entre sí. Se consideraron valores para el período 1979-2009 (CLICOM, 2013). Para cada uno de los 54 ingenios, se seleccionaron entre 3 y 5 estaciones meteorológicas (n = 177).

***Balance Hídrico Climático, empleo de riego y productividad por unidad ambiental***

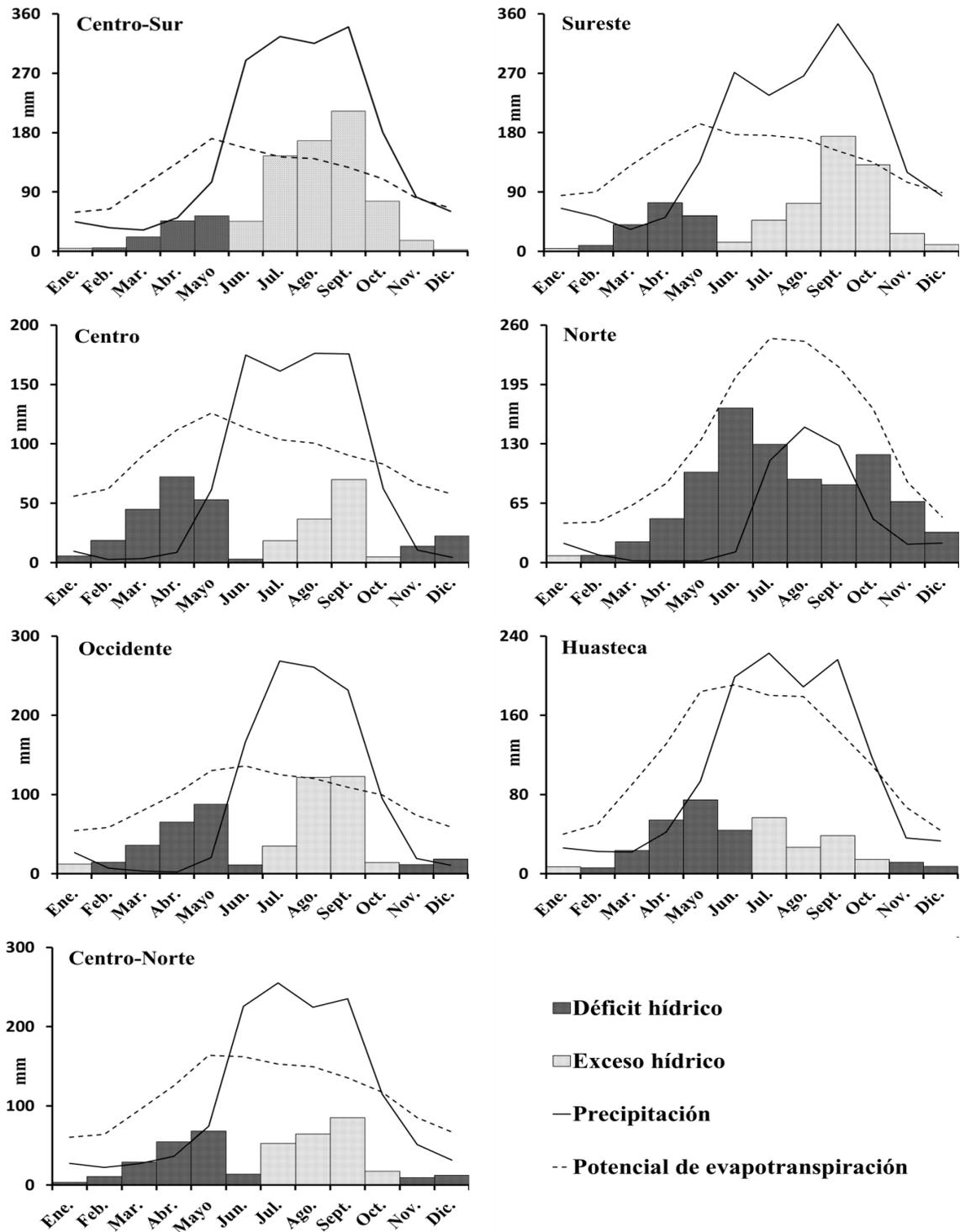
En la figura 10 se muestran los diagramas bioclimáticos construidos a partir de las medias anuales de las estaciones meteorológicas de los ingenios en cada unidad ambiental. Estos datos se relacionaron con el empleo de riego (completo, auxilio o seco) y la productividad de caña de azúcar. El Cuadro 6 recoge los datos de empleo de riego y su relación con la productividad (valores medios de 2000 a 2011), obtenidos del Manual Azucarero Mexicano y Sistema de Información Agrícola y Pesquera.

**Cuadro 6. Uso de riego y diferencias estadísticas por Tukey en indicadores de campo y producción por unidad ambiental de 2000 a 2011.**

Unidad ambiental	Número de ingenios	Superficie (%) RC/RA/S	Rendimiento en campo (t ha <sup>-1</sup> )	Superficie Sembrada (ha,%)	Caña molida bruta (t, %)
Centro	3	100/0/0	110.1 <sup>a</sup>	25,390 <sup>d</sup> (4.0)	2,797,025 <sup>e</sup> (6.3)
Norte	3	100/0/0	88.0 <sup>b</sup>	21,205 <sup>d</sup> (3.4)	1,760,230 <sup>f</sup> (3.9)
Occidente	12	70/15/15	82.5 <sup>b</sup>	112,721 <sup>b</sup> (17.8)	9,208,918 <sup>b</sup> (20.6)
Huasteca	8	56/9/35	64.9 <sup>c</sup>	104,413 <sup>b</sup> (16.5)	6,681,277 <sup>c</sup> (14.9)
Centro Norte	3	28/47/25	90.0 <sup>b</sup>	29,576 <sup>d</sup> (4.7)	2,681,979 <sup>e</sup> (6.01)
Centro Sur	18	2/27/71	65.8 <sup>c</sup>	254,849 <sup>a</sup> (40.4)	16,058,895 <sup>a</sup> (35.9)
Sureste	7	8/22/70	63.5 <sup>c</sup>	83,303 <sup>c</sup> (13.2)	5,464,298 <sup>d</sup> (12.2)
<b>Total</b>	<b>54</b>		<b>74.1</b>	<b>631,457</b> <b>(100.0)</b>	<b>2,797,025</b> <b>(100.0)</b>

RC=Riego Completo/RA=Riego de Auxilio/S=Secano. Medias con la misma letra por columna no son estadísticamente diferentes (Tukey,  $\alpha=0.05$ )

La figura 10 muestra que la mayor disponibilidad de agua para el cultivo de caña de azúcar se presenta en las unidades ambientales Centro Sur y Sureste, con elevados índices de exceso hídrico de junio a enero. Estas áreas concentran el 54 % de la superficie sembrada y aportan el 48 % de la producción nacional (caña molida bruta). En estas unidades ambientales el régimen de cultivo es principalmente en secano (71 %) (Cuadro 6). A pesar de estas favorables condiciones climáticas, los rendimientos registrados en campo son los más bajos de México, normalmente inferiores a 65 t ha<sup>-1</sup>. De acuerdo con Palacios (2002) en estas unidades el rendimiento es proporcional al número de riegos. De este modo, 10 a 12 riegos anuales permiten rendimientos en campo de más de 250 t ha<sup>-1</sup>; de ahí la importancia de conocer las relaciones hídricas para implementar y mejorar la gestión de riegos (Inman-Bamder, 2004).



**Figura 10. Comparación de los diagramas bioclimáticos construidos a partir de las medias de precipitación, potencial de evapotranspiración, déficit y exceso hídrico por unidad ambiental. Se consideraron valores para el período 1979-2009 (CLICOM, 2013). Para cada uno de los 54 ingenios, se seleccionaron entre 3 y 5 estaciones meteorológicas (n = 177).**

Por el contrario, la unidad Norte presenta la menor disponibilidad de agua y la mayor evapotranspiración lo que provoca un déficit hídrico durante la mayor parte del año, por lo que en ella el riego completo se realiza en el 100 % de la superficie. En las regiones Huasteca, Occidente y Centro, el déficit hídrico se centra en los meses de noviembre a junio. De acuerdo con Inman-Bamder (2004) en regiones con más de 6 meses de déficit hídrico se hace necesaria la infraestructura de riego para el cultivo de caña de azúcar. En relación a esto, la superficie de estas unidades se maneja entre 56, 70 y 100 % con riego completo, respectivamente. En la mayor parte de estas unidades, cuya superficie se maneja en régimen de riego, se encuentran rendimientos elevados, superiores a 80 t ha<sup>-1</sup>. La excepción es la unidad de Huasteca, en la que de acuerdo a expertos, los moderados rendimientos se atribuyen a mala eficiencia del riego rodado por gravedad, que es mayormente empleado en esta unidad.

En una situación intermedia a los grupos anteriores, se encuentra la unidad Centro Norte. Ésta presenta un periodo de más de 7 meses de déficit hídrico. La mayor parte de la superficie se maneja en régimen de riego de auxilio. Los rendimientos son también superiores a 80 t ha<sup>-1</sup>.

Finalmente la regresión lineal entre el porcentaje de la superficie irrigada y los rendimientos en campo de las diferentes unidades ambientales muestran un ajuste bastante bueno ( $P < 0.001$  y  $R^2 = 0.69$ ) lo que confirma que el riego es un factor determinante de los rendimientos para todas las unidades ambientales.

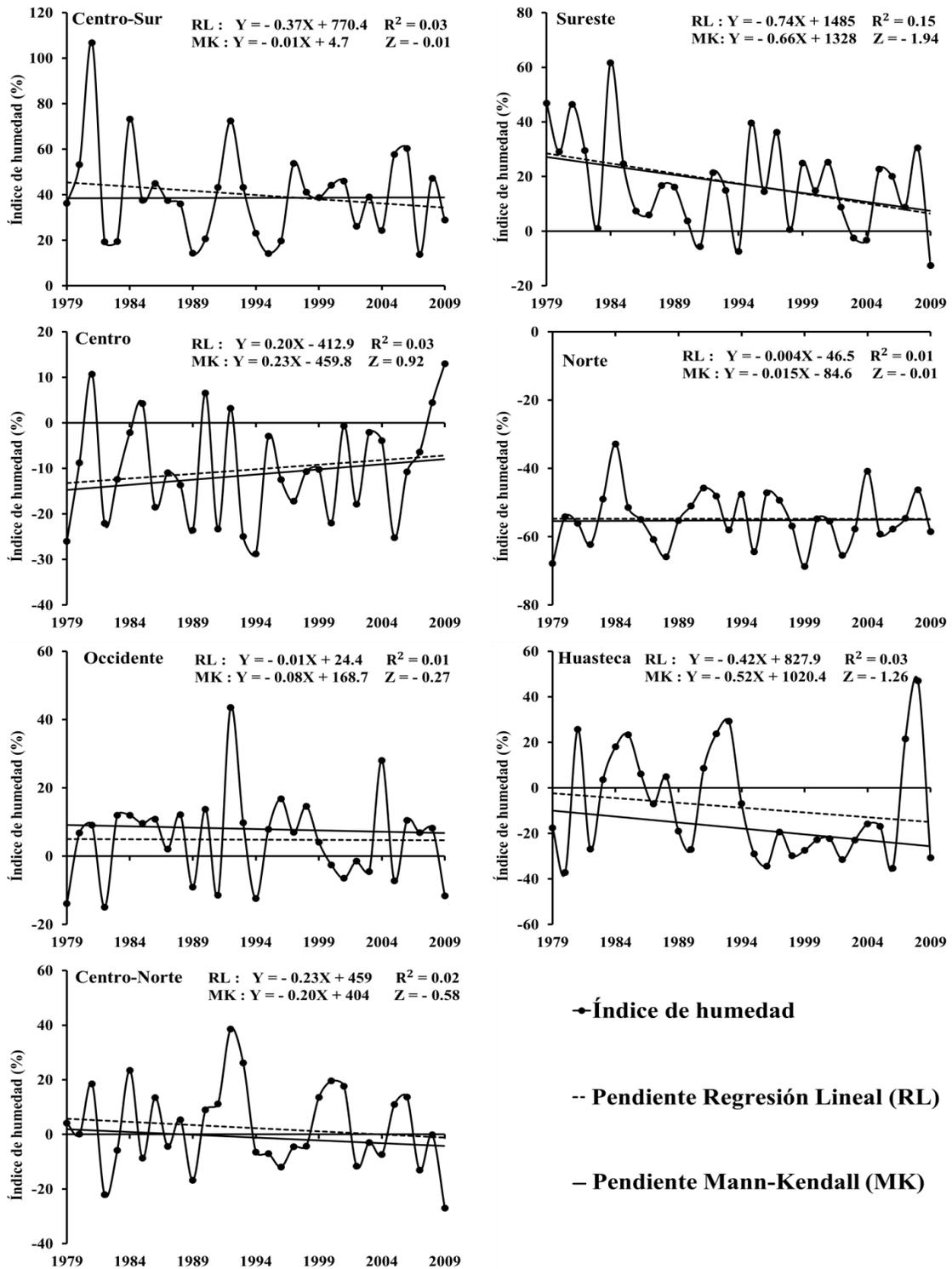
#### ***Evolución del Índice de Humedad por unidad ambiental (1979 a 2009)***

El Índice de Humedad (*WI*) agrupa en su cálculo datos climáticos (precipitación, temperatura media, evapotranspiración potencial) y edáficos (reserva de agua). Este índice

mide la disponibilidad de agua para la vegetación por lo que se considera como un parámetro climático-edáfico que determina la producción en zonas de déficit hídrico (Ruíz-Álvarez *et al.*, 2012).

El estudio del *WI* se realizó para la serie de 1979 a 2009, empleando los datos de la red de observatorios anteriormente descrita (177). Para analizar la tendencia de este parámetro se emplearon tanto técnicas paramétricas (regresión lineal) como no paramétricas (Mann-Kendall) de análisis de series temporales. Esta última técnica se emplea debido a que las series de precipitación no cumplen con el supuesto de normalidad. El contraste de técnicas paramétricas y no paramétricas se empleó para comprobar la bondad de las tendencias.

La figura 11 muestra los modelos temporales del *WI* obtenidos para las diferentes unidades ambientales. La comparación de ambas técnicas muestra escasas diferencias en los parámetros estimados de las tendencias. Las predicciones de las dos técnicas, en general, siguen la misma tendencia en cada unidad ambiental. Si bien en algún caso (Centro Sur) se encontraron ligeras diferencias en la magnitud de la pendiente. Es de resaltar que en general los coeficientes de regresión tienen signo negativo, pero no tienen significancia estadística. Sin embargo, los casos más relevantes son las unidades ambientales localizadas en el Golfo de México (Sureste, Huasteca, Centro Norte y Centro Sur) donde la tendencia a que el índice de humedad decrezca es más clara. En relación a esto, Pereyra-Díaz *et al.* (2004), Méndez *et al.* (2008) y Munroe *et al.* (2014) hallaron que precisamente en la región del Golfo de México existe un descenso en las precipitaciones (de hasta 30 mm por década), atribuible al cambio climático. Mientras que Gay (2000), Conde *et al.*, (2011) y INECC (2012) pronostican para esta zona un alta vulnerabilidad a la sequía meteorológica.



**Figura 11. Tendencia del índice de humedad en las diferentes unidades ambientales, empleando análisis de series temporales paramétricas (regresión lineal) y no paramétricas (Mann-Kendall). Se consideraron valores para el período 1979-2009 (CLICOM, 2013). Para cada uno de los 54 ingenios, se seleccionaron entre 3 y 5 estaciones meteorológicas (n = 177).**

### ***Comportamiento de la productividad por unidad ambiental (2000 a 2011)***

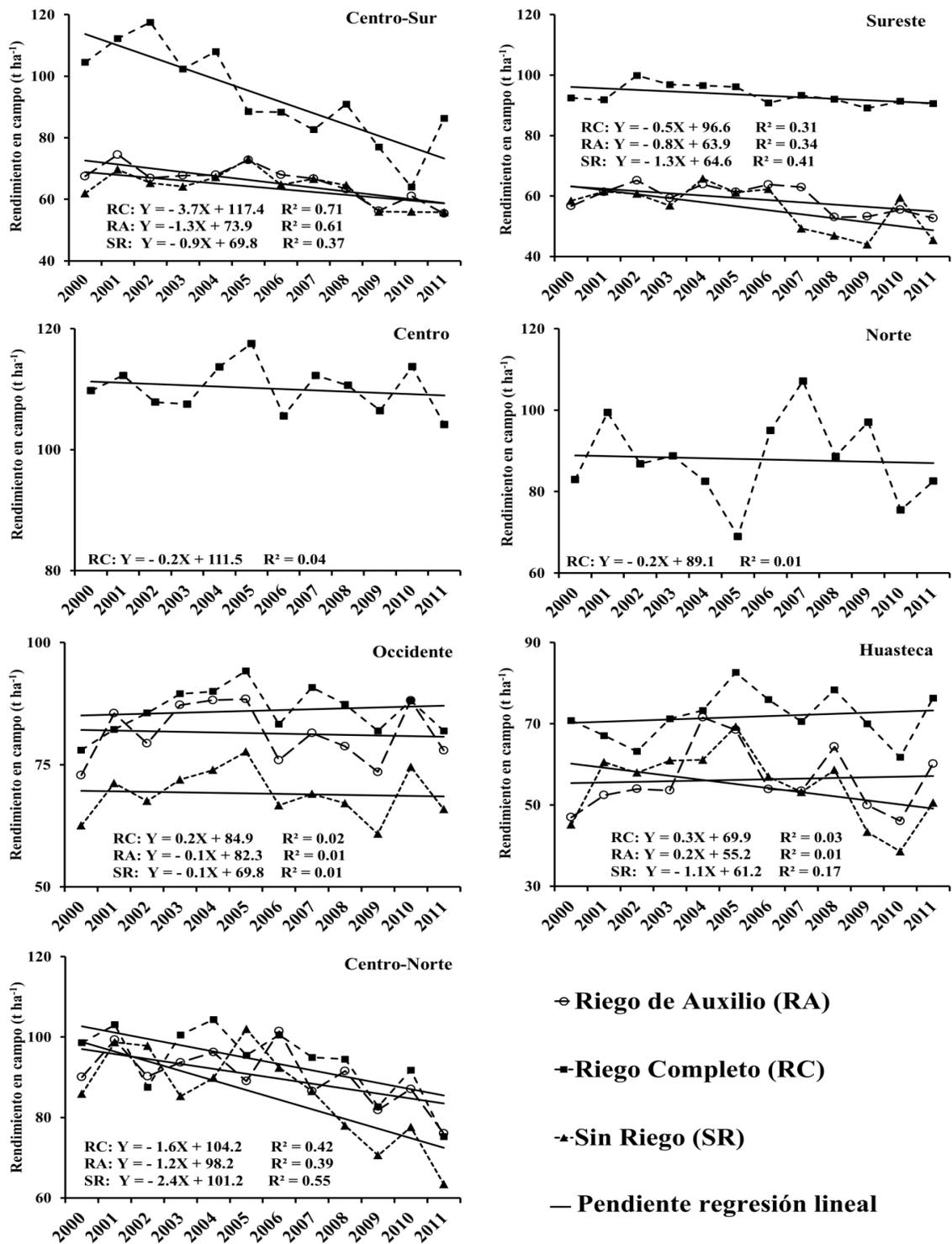
La decreciente disponibilidad actual y futura de agua, descrita en las unidades del Golfo, podría impactar negativamente sobre los rendimientos en campo de caña de azúcar. Al respecto Ojeda-Bustamante *et al.* (2011) sugieren un mayor empleo del riego para reducir los efectos de la creciente sequía temporal.

La relación entre la producción y la tendencia temporal del *WI* se realizó para cada una de las unidades ambientales. Para ello se tuvo en cuenta el empleo de riego (riego completo, riego de auxilio y secano). La figura 12 muestra los modelos temporales para los rendimientos en campo de 2000 a 2011 por unidad ambiental y empleo de riego. En las 7 unidades ambientales consideradas los rendimientos en campo de áreas con riego completo fueron mayores que los de las áreas con riego de auxilio y secano.

Los modelos temporales muestran una tendencia decreciente de los rendimientos en campo a partir de 2005. Las áreas con régimen de secano y riego de auxilio son donde se dio un descenso más pronunciado. Coincidiendo con las tendencias del *WI*, los mayores descensos en los rendimientos tanto de riego completo, auxilio y secano, se producen en las unidades ambientales ubicadas en el Golfo de México (Centro Sur, Centro Norte y Sureste).

Existen estudios que asocian el impacto del cambio climático en la agricultura mexicana (p. e. Ojeda-Bustamante *et al.*, 2011). Sin embargo existe poca investigación que relacione las variaciones climáticas con la producción en general y particularmente en caña de azúcar. El descenso en los rendimientos durante los últimos años ya ha sido documentado por SAGARPA (2007 y 2009) y FIRA (2009 y 2010), quienes lo señalan como un punto crítico para la competitividad del sector cañero. Estos organismos coinciden en establecer

políticas orientadas a la renovación de las plantaciones y al incremento y tecnificación del riego. A la luz de nuestros resultados el fomento de infraestructura de riego y su fortalecimiento parecen de particular importancia.



**Figura 12.** Tendencia de los rendimientos en campo en las diferentes unidades ambientales, empleando análisis de series temporales paramétricas (regresión lineal) y considerando el régimen de riego para el periodo 2000 a 2011, obtenido del manual azucarero mexicano y sistema de información agrícola y pesquera para cada uno de los 54 ingenios.

Un comparativo con dos referentes mundiales, Brasil y Colombia, que relaciona el rendimiento en campo con superficie cultivada que se maneja con riego, muestra que el rendimiento promedio en campo es de 85 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> y 120 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> (FAOSTAT, 2011) con 5% (Battie, 2009) y 90% (Madera *et al.*, 2009) de superficie cultivada con riego respectivamente. Aspecto que refuerza la importancia del riego en el incremento de rendimientos en campo para la caña de azúcar.

De acuerdo con el SIAP (2009), los rendimientos promedios en campo de caña de azúcar en regiones de secano son de 64 t ha<sup>-1</sup> mientras que para riego son del orden de 92 t ha<sup>-1</sup>. De ahí la importancia del fomento de infraestructura de riego y fortalecimiento de la misma en el sistema productivo de caña de azúcar nacional. Como parte del fomento de riego la Comisión Nacional del Agua ha desarrollado programas que subsidian la infraestructura hidroagrícola en las regiones cañeras, donde concluye que para las áreas de secano el riego es económica, ambiental y socialmente viable.

### **Conclusiones**

El riesgo agroclimático comprende la capacidad de enfrentar las situaciones climáticas adversas como consecuencia de los cambios en los parámetros de precipitación y temperatura. El presente estudio muestra que la reducción de la precipitación y los cambios en su distribución anual provocan descensos en los rendimientos de la caña de azúcar de México. Este efecto se produce especialmente en determinadas regiones del Golfo de México, que podrían verse muy afectadas por manejarse en régimen de secano. Esto implica la necesidad de adaptar el manejo del cultivo a las nuevas condiciones climáticas, optimizando el agua y fortaleciendo la infraestructura de riego.

**CAPITULO IV. FACTORES QUE LIMITAN EL RIEGO EN ZONAS  
CAÑERAS: ESTUDIO DE CASO DEL DISTRITO DE RIEGO 035, LA  
ANTIGUA, VERACRUZ.**

**Introducción**

*Antecedentes*

Los resultados de los capítulos anteriores muestran que el uso eficiente del riego es un elemento muy importante para incrementar la producción (Santillán-Fernández *et al.*, 2014) y eventualmente mitigar los efectos del cambio climático (Incidencia del cambio climático sobre la producción y manejo de la caña de azúcar (*Saccharum spp.*) en México). Sin embargo, ambos estudios se realizaron a una escala muy amplia (Nacional), por lo que es necesario precisar los incentivos o restricciones que tienen los cañeros para incorporar el riego ya a nivel de unidad de producción.

Por ello el propósito de este estudio es identificar y describir los factores que limitan el uso del riego para el cultivo de caña de azúcar (*Saccharum spp.*) en un distritos de riego de México. A partir de un estudio de caso correspondiente a una región cañera donde sin restricciones importantes en la disponibilidad de agua, se utilice el recurso predominantemente para riegos de auxilio y con alta vulnerabilidad a los efectos del cambio climático.

**Materiales y métodos**

*Selección del caso*

Se seleccionó el Distrito de Riego 035, La Antigua en Veracruz (Figura 13), por ser este Estado el principal productor de caña de azúcar con el 41 % de la superficie nacional

cultivada, ser la región donde se presentan los mayores porcentajes (51%) de riego de auxilio a nivel Nacional (CONADESUCA, 2013). Ser vulnerable al cambio climático (Conde *et al.*, 2000) y tener mala eficiencia en el uso de agua, a pesar de presentar disponibilidad física y bajos costos (SIAP, 2009).



**Figura 13. Zona de abasto cañera en el Distrito de Riego 035 La Antigua, Veracruz.**

### ***Región de estudio***

En el Distrito de Riego 035, La Antigua, Veracruz, la actividad económica más importante es el cultivo de la caña de azúcar (*Saccharum spp.*). Con una superficie de 21 851 ha, el 82 % de la producción está destinada a los ingenios La Gloria y El Modelo para la producción de azúcar; el restante 18 % se distribuye entre forrajes, maíz, mango, hortalizas y cítricos (CONAGUA, 2012).

El 42 % del área de abasto de los ingenios La Gloria y El Modelo, se maneja bajo riego completo (más de 4 riegos por ciclo de producción con láminas de 155 cm), el 51 % con riego de auxilio (1 a 4 riegos) y el 7 % en seco (CONADESUCA, 2013). La diferencia en rendimientos es significativa, mientras que en riego completo se alcanzan rendimientos de 140 t ha<sup>-1</sup>, en riego de auxilio son del orden de 90 t ha<sup>-1</sup> y en seco de 70 t ha<sup>-1</sup> (MAN, 2011).

La Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA), a través del Programa Nacional de la Agroindustria de Caña de Azúcar (PRONAC) 2007-2012, estableció la pertinencia ambiental, social, económica y financiera de introducir y/o fortalecer el riego en la región, encontró que estas acciones pueden incrementar los rendimientos promedios hasta en 29 t ha<sup>-1</sup>, con un beneficio/costo de 1.4 para el productor. Por otra parte la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) ha desarrollado programas para subsidiar la adopción y/o fortalecimiento de la infraestructura hidroagrícola en zonas de cultivo de caña de azúcar de la región; sin embargo a pesar de estos incentivos el riego se ha mantenido en un 51% como riego de auxilio (SIAP, 2009).

### ***Colecta de información***

Entre junio y diciembre de 2014 se encuestaron 63 productores de caña con base a su disponibilidad y referencias en la región. Adicionalmente se entrevistó al Jefe del Distrito de Riego (1), a líderes de la asociación de usuarios de las unidades de riego (3), a jefes de campo de los ingenios (2), y a líderes de las organizaciones cañeras más importantes (2).

La encuesta incluyó preguntas sobre edad, escolaridad, superficie cultivada, tenencia de la tierra y años de experiencia en el sector. Conforme a la *Guía para el diseño de encuestas*

de CIMMYT (CIMMYT, 1993) se contemplaron aspectos sobre el conocimiento que el productor tiene de las bondades y costos del riego, fertilización, control de plagas y enfermedades; así como de otros factores que podrían condicionar el fortalecimiento o adopción de riego, tales como el clima, la fisiografía de la parcela, los costos de producción, la gestión del recurso ante los administradores del distrito de riego, la conducción del agua a la parcela, el manejo y el equipamiento parcelario, entre otros.

Las guías de entrevista se enfocaron en precisar la importancia económica y social del cultivo de la caña de azúcar en la región, la problemática en el empleo de riego desde la autorización de permisos hasta la conducción a las parcelas, y qué se debe gestionar para que el productor fortalezca el riego y mejore su competitividad. La información recabada se complementó con pláticas con expertos, observaciones de campo y revisión de informes de las Unidades de Riego y de los ingenios.

### ***Análisis de la información***

Se caracterizaron a los productores según el empleo de riego: completo, auxilio y secano. Para determinar mediante estadística descriptiva, cualidades comunes en cada bloque y asociarlas con el régimen de producción y rendimientos en campo. A su vez se describieron los incentivos y restricciones que tienen los cañeros para incorporar el riego a sus unidades de producción.

### **Resultados y discusión**

El 75 % de los agricultores encuestados producen caña con riego de auxilio , 14% con secano y solo 11% con riego completo, son pequeños productores (< 6 ha) con más de diez años produciendo caña. Los principales atractivos para producir caña son que los

proveedores de caña de los ingenios y sus familias tienen acceso al servicio médico del IMSS (Instituto Mexicano del Seguro Social) y a que la caña se produce bajo contrato, lo que ofrece un mercado seguro.

De acuerdo a los datos, en la región existe una diferencia en los rendimientos promedio de  $50 \text{ t ha}^{-1}$  de caña, entre producir en secano y emplear riego completo. Dado que la cuota anual por el uso de agua es de \$ 1,150 (independientemente de la cantidad empleada) y que el costo del aplicador (encargado de la conducción desde el suministro principal y secundario hasta la parcela) es de \$ 400; la aplicación de 9 riegos genera un incremento de costos de \$ 119 por cada tonelada adicional. Considerando un precio de \$  $400 \text{ t}^{-1}$  la relación beneficio/costo es de 3.4. Para precisar porque sí es económicamente rentable y existe disponibilidad de agua en la región la mayoría de los productores cañeros no aplican riego o lo hacen en cantidades insuficientes, se analizaron los siguientes factores.

### ***Perfil del productor y equipamiento de las parcelas***

En general, la edad del productor no es un factor que afecte el régimen hídrico de producción, aunque los productores bajo secano tienen menores niveles de estudio (Cuadro 7). La experiencia como productor, el nivel de estudios y la edad también limitan el fortalecimiento del riego, Alcón *et al.* (2008) describe que productores de mayor edad son más renuentes a cambios en sus sistemas de producción, por considerar que siempre lo han hecho así y para ellos está bien hecho.

**Cuadro 7. Características promedio de los productores de caña de azúcar del distrito de riego 035 La Antigua, Veracruz, según el empleo de riego en sus parcelas.**

Riego	n	Años			Superficie (ha) (CV)	Rendimiento (t ha <sup>-1</sup> ) (CV)	% IF* (CV)
		Edad (CV)	Estudios (CV)	Experiencia (CV)			
Completo	7	43 <sup>a</sup> (0.13)	11 <sup>a</sup> (0.16)	17 <sup>a,b</sup> (0.19)	5.8 <sup>a</sup> (0.26)	120 <sup>a</sup> (0.17)	84 <sup>a</sup> (0.14)
Auxilio	47	47 <sup>a</sup> (0.32)	9 <sup>a</sup> (0.24)	11 <sup>b</sup> (0.58)	3 <sup>b</sup> (0.52)	89 <sup>b</sup> (0.05)	52 <sup>b</sup> (0.36)
Secano	9	53 <sup>a</sup> (0.17)	6 <sup>b</sup> (0.35)	23 <sup>a</sup> (0.19)	1.9 <sup>b</sup> (0.25)	70 <sup>c</sup> (0.05)	39 <sup>b</sup> (0.28)

\* % IF: Porcentaje del ingreso familiar (\$) que representa el cultivo de caña de azúcar. CV: Coeficiente de Variación. Medias con la misma letra por columna no son estadísticamente diferentes (Tukey,  $\alpha=0.05$ )

Los productores que realizan riego completo se caracterizan por tener mayor superficie (no en áreas compactas), ya que en el minifundio, es más complicado que los productores fortalezcan sus sistemas de producción con nuevas infraestructuras (Hartwich *et al.*, 2007). Por otra parte, este mismo estrato de productores es el que tiene mayores rendimientos (50 y 30 t ha<sup>-1</sup> más que el secano y el riego de auxilio) y los ingresos por la caña son superiores al 80% del ingreso familiar, lo que explique su mayor interés en manejar adecuadamente su caña.

Prácticamente todos los productores que riegan, lo hacen por riego rodado, sin ninguna tecnificación, por lo que el equipamiento parcelario no es un factor que explique el uso completo o limitado del riego.

### ***Acceso al agua***

La disponibilidad de agua no es limitante, el 53 % de los productores considera que siempre tiene agua suficiente para regar, el 44 casi siempre. Sin embargo, solo el 11 % riega más de 9 veces por ciclo de producción, el 75 % de 1 a 4 veces y el 14 % depende de las lluvias. El 89 % que no riega o riega 4 o menos veces, piensa que el problema en su parcela no es el agua, ya que la caña no requiere más riegos.

Sin embargo el 43 % de los productores está consciente de que quizá en un futuro se requiera, al mencionar que han percibido variaciones en los patrones de lluvia. Al respecto Conde *et al.*, (2011) y INECC (2012) catalogan a esta zona como altamente vulnerable a la sequía meteorológica; Ojeda-Bustamante *et al.* (2011) establece que estas consecuencias tendrán un efecto radical en las demandas de riego y en la gestión de los sistemas de riego para la agricultura en la región. En este sentido la percepción de los productores de que no es necesario regar tanto puede cambiar en los próximos años.

### ***Frentes de corte dispersos***

El riego está programado en función de la zafra, que a su vez establece la logística de corte conforme las variedades (precoces, medias y tardías), por lo que el 75 % de los productores considera que por las características edáficas de la zona (suelos arcillosos que retienen mucha humedad), son obligados a suspender los riegos aun cuando no les toque corte y se encuentren en época de secas, para facilitar el traslado de la caña al ingenio.

Ya que, por el minifundio y descontrol en la siembra de variedades, es común que estas estén intercaladas, complicando la logística de corte y afectando la programación de riegos, para asegurar que los vehículos saca-cosecha puedan transitar sin problema hacia los frentes de corte. Al respecto Crecente y Álvarez (2000) describen los beneficios de la concentración parcelaria (sesión de derechos de uso, no tanto de propiedad) como medida de adaptación al minifundio y pulverización de siembras. La concentración parcelaria, o al menos la compactación del tipo de variedades, son una condición para fortalecer el uso del riego.

### ***La ubicación de las parcelas y tiempos de gestión del riego***

El 89 % de los encuestados no aplica riego o lo hace en cantidades insuficientes, debido principalmente a la ubicación de sus parcelas en relación con las fuentes de suministro. Al respecto políticas como el Programa Nacional de la Agroindustria de Caña de Azúcar de Alta Rentabilidad (PRONAC) no han dado el resultado esperado de compactar áreas de cosecha de caña para introducir un paquete tecnológico en donde se manifiesten las economías de escala. Por ejemplo para que funcione un pozo de riego de 6 pulgadas se requiere que se integren entre 40 y 60 hectareas en una unidad compacta de producción (SAGARPA, 2007).

El 95 % del riego en la región es por gravedad, solo el 34 % de los canales primarios está revestido, por lo que gran parte del agua se pierde por filtración, siendo las parcelas más alejadas las que menor agua reciben. A mayor proximidad al centro de bombeo el número de riegos en la parcela aumenta.

Otra razón, según el líder de la unidad de riego, “La Esperanza”, son los tiempos de gestión del riego, pues ante la falta de organización de los productores, las autoridades benefician a los productores más grandes y a los productores minifundistas se les retardan las autorizaciones; “por eso muchos productores prefieren no aplicar o aplicar solo riego de auxilio”.

### ***La falta de gobernanza en las asociaciones de usuarios de las unidades de riego***

Otro aspecto que limita el fortalecimiento es la desconfianza que existe por parte del productor ante las autoridades que lo representan. El 68 % de los encuestados mencionó que los funcionarios bloquean los recursos y solo apoyan a productores macro, complementado con modelos de reelección, sobornos y falta de auditorías, han hecho que

el productor promedio opte por no aspirar a los apoyos de financiación que el Gobierno otorga. En efecto, la gobernanza de las unidades de riego esta en el centro de la cuestión, es decir lo que atañe a cómo se toman las decisiones relacionadas con infraestructura de riego y los usuarios que dependen de ella, quién es responsable, cómo se ejerce el poder, y cómo se produce la rendición de cuentas (Mayntz, 2001). Estos problemas han sido ampliamente tratados por varios autores, mostrando la generalidad de esta problemática en los distritos de riego de México, y en general su solución queda fuera del alcance de los cañeros (ver Palerm y Martínez, 2009).

### ***Al acceso a subsidios y créditos para inversión***

El 86 % de los productores encuestados consideran ser un buenos productores; sin embargo, están conscientes de sus limitantes en aspectos relacionados con el acceso a créditos y apoyos de gobierno, para mejorar la infraestructura hidroagrícola. Ya que para acceder a ellos, el productor debe estar conformado en figuras jurídicas, y estar totalmente en orden los aspectos legales asociados al riego: concesión de CONAGUA (Comisión Nacional del Agua), uso de electricidad y perforación de pozos. Lo cual es excepcional en la región estudiada.

Las autoridades del DDR a través de talleres y pláticas informales han incentivado a las asociaciones de usuarios a constituirse legalmente para acceder a los créditos y poder así fortalecer el riego; sin embargo esta labor no ha sido muy fructífera por lo ya señalado

### **Conclusiones**

El riego se presenta como una alternativa viable para mejorar la competitividad del productor cañero, ya que en la zona de estudio, puede representar 70% más de

rendimiento. Sin embargo, la mayoría de los cañeros no lo aplican o lo hacen en cantidades insuficientes, debido al minifundio, a la amplia dispersión de los frentes de corte, pero sobre todo la ineficaz gobernanza de las unidades de riego, que reducen su mantenimiento y hacen cara y frecuentemente infructuosa la gestión del riego. En este contexto los apoyos para el mejoramiento de la infraestructura parcelaria son poco útiles y los impactos sobre la producción cañera del cambio climático, parecen inevitables.

## CONCLUSIONES GENERALES

La caña de azúcar representa el cultivo perenne más importante en la agricultura mexicana. Sin embargo, su productividad está muy por debajo de su potencial. En efecto, el crecimiento de la producción de caña en México se basó en aumentar la superficie cultivada, como consecuencia de los precios atractivos que presentó el cultivo entre 2006 y 2011. Sin embargo, este crecimiento extensivo estuvo acompañado, para el 82% de las áreas cañeras, de una caída de la productividad. El ciclo de bajos precios que se presenta a partir de la zafra 2012-2013 podría reducir sensiblemente la producción y comprometer el abasto de los ingenios del país. En este marco, la promoción y tecnificación del riego, la renovación de plantaciones y el uso más eficiente de los insumos deben ser impulsadas en las áreas cañeras. Las diez áreas cañeras que muestran reducciones en superficie cultivada y rendimientos en campo entre los periodos analizados, presentan problemáticas difíciles de revertir, por lo que su futuro está muy comprometido.

El riesgo agroclimático comprende la capacidad de enfrentar las situaciones climáticas adversas como consecuencia de los cambios en los parámetros de precipitación y temperatura. El presente estudio muestra que la reducción de la precipitación y los cambios en su distribución anual provocan descensos en los rendimientos de la caña de azúcar de México. Este efecto se produce especialmente en determinadas regiones del Golfo de México, que podrían verse muy afectadas por manejarse en régimen de secano. Esto implica la necesidad de adaptar el manejo del cultivo a las nuevas condiciones climáticas, optimizando el agua y fortaleciendo la infraestructura de riego.

La reducción de la cantidad de agua disponible para el desarrollo de la caña en áreas de secano, junto con la irregularidad de las lluvias está provocando que los rendimientos en

campo se reduzcan. Con el cambio climático exige aprovechar mejor el agua disponible incrementando y fortaleciendo la infraestructura de riego para poder proveer de la cantidad de agua que necesita la caña, hay un margen considerable para mejorar la producción a través del riego. La vulnerabilidad de la caña de azúcar en México se concentra en las zonas de producción que dependen mayormente de las precipitaciones y que representan el 58 % de la superficie cultivada, ubicada en el golfo de México. El Índice de Humedad en estas áreas presenta una tendencia negativa, lo que implica que la cantidad de agua disponible para el cultivo ha disminuido.

En este marco, el riego se presenta como una alternativa viable para mejorar la productividad cañera en las áreas de secano o de riego de auxilio, no obstante en estas últimas regiones se debe considerar que muchos productores cañeros no aplican riego o lo hacen en cantidades insuficientes, debido al minifundio, a la amplia dispersión de los frentes de corte, pero sobre todo la ineficaz gobernanza de las unidades de riego, que reducen su mantenimiento y hacen cara y frecuentemente infructuosa la gestión del riego.

## LITERATURA CITADA

- Aguilar, J., Schwentesius, R. (2004). *La producción de cebada maltera en México: Ventaja Comparativa no Capitalizada*. Universidad Autónoma Chapingo, México.
- Aguilar, R.N., Rodríguez, L., Enríquez, R., Castillo, M., Herrera, S. (2012). The Mexican sugarcane industry, overview, constraints, current status and long-term trends. *Sugar Tech*. 14: 207-222.
- Alcón, F., De Miguel, M.D., y Burton, M. (2008). Adopción de tecnología de distribución y control del agua en las Comunidades de Regantes de la Región de Murcia. *Economía Agraria y Recursos Naturales* 8(1): 83-102.
- Battie, L.P., Laclau, J.P. (2009). Growth of the whole root system for a plant crop of sugarcane under rainfed and irrigated environments in Brazil. *Field Crops Res*. 114: 351–360.
- Biggs, J.S., Thorburn, P. J., Crimp, S., Masters, B., Attard, S.J. (2013). Interactions between climate change and sugarcane management systems for improving water quality leaving farms in the Mackay Whitsunday region, Australia. *Agric. Ecosyst. Environ*. 180: 79-89.
- Bravo-Mosqueda, E., Medina-García, G., Ruíz-Corral, J.A., Báez-González, A.D., Mariles-Flores, V. (2012). Cambio climático y su impacto potencial en el sistema producto caña de azúcar en el área de abasto del Ingenio Adolfo López Mateos. INIFAP. Publicación Especial Núm. 11. Sto. Domingo Barrio Bajo, Etna, Oaxaca, México. 43 p.

- Buenaventura-Osorio, C. (1981). Factores climáticos que afectan el crecimiento, producción y desarrollo de la caña de azúcar. 9-14 pp.
- CIMMYT. (1993). Programa de Economía del Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo. La adopción de tecnologías agrícolas: Guía para el diseño de encuestas. México, D.F.
- Conde, C., Estrada, F., Martínez, B., Sánchez, O., Gay, C. (2011). Regional climate change scenarios for México. *Atmósfera* 24(1): 125-140.
- CONADESUCA. (2013). Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar. *Mapas* [en línea]. Consultado 15 de marzo 2014. <http://www.cndsca.gob.mx/regionesriego.html>
- CONADESUCA. (2009). Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar. *Proyecto de sistematización de información del diagnóstico de ingenios azucareros 2009*. [En línea]. Consultado 15 de marzo 2013. [http://www.cndsca.gob.mx/eficienciaproductiva/Reporte\\_Diagnosticos\\_2.pdf](http://www.cndsca.gob.mx/eficienciaproductiva/Reporte_Diagnosticos_2.pdf)
- CONAGUA. (2012). Comisión Nacional del Agua. Atlas Digital del Agua México 2012 Sistema Nacional de Información del Agua. [En línea]. Consultado 7 de enero 2015. <http://www.conagua.gob.mx/atlas/usosdelagua32.html>
- Crecente, R. y Álvarez, C. J. (2000). Una revisión de la concentración parcelaria en Europa. *Estudios Agrosociales y Pesqueros* 187: 221-274.
- CLICOM. (2013). CLImate COMputing Project. *Mapa*. [En línea]. Consultado 10 de octubre 2013. <http://clicom-mex.cicese.mx/mapa.html/>

- CONABIO. (2001). Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. *Portal de Geoinformación*. [En línea]. Consultado 15 de noviembre 2014. <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- CNA. (2012). Comisión Nacional del Agua. *Temperaturas y lluvias*. [En línea]. Consultado 15 de abril 2013. [http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com\\_content&view=article&id=12&Itemid=77](http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=12&Itemid=77).
- CNIAA. (2011). Cámara Nacional de las Industrias Azucarera y Alcohólica. *Sabías que?*. [En línea]. Consultado 15 de mayo 2013. [http://www.camaraazucarera.org.mx/pagina\\_2011](http://www.camaraazucarera.org.mx/pagina_2011)
- Contreras, J. M. (2000). *La Competitividad de las Exportaciones Mexicanas de Aguacate: Un Análisis Cuantitativo*. Reporte de investigación 46. Universidad Autónoma Chapingo, México.
- FAOSTAT. (2011). The Statistics Division of the Food and Agriculture Organization of the United Nations. *Producción*. [En línea]. Consultado 19 de noviembre 2012. <http://faostat.fao.org/site/567/DesktopDefault.aspx?PageID=567#ancor>
- FIRA. (2009). Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura. *Competitividad de la Industria del Azúcar en México* [En línea]. Consultado 3 de agosto 2013. <http://www.fira.gob.mx/InfEspDtoXML/TemasUsuario.jsp>
- FIRA. (2010). Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura. *Producción Sostenible de Caña de Azúcar en México* [En línea]. Consultado 10 de agosto 2013. <http://www.fira.gob.mx/InfEspDtoXML/TemasUsuario.jsp>

- Gay, G.C. (Compilador). (2000). México: una visión hacia el siglo XXI. El cambio climático en México. Instituto Nacional de Ecología, Universidad Nacional Autónoma de México, US Country Studies Program. México, 220 p.
- Gómez, L. (1994). *La política agrícola en el nuevo estilo de desarrollo Latinoamérica*. Segunda edición. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura. Santiago, Chile.
- Gómez-Orea, D. (1994). Ordenación del Territorio. Una aproximación desde el Medio Físico. Editorial Agrícola Española, Madrid.
- Granados, R.R., Aguilar, S.G., Díaz, P.G., Medina, B.M. (2011). Alteraciones de los indicadores agroclimáticos en años con presencia del fenómeno el niño en la región centro-occidente de México. *Revista Geográfica de América Central*, Número Especial EGAL, 1-16 pp.
- Gujarati, D.N. (2007). *Econometría*. McGrawHill. Cuarta Edición. 560-571 pp.
- Hartwich, F., Arispe, T., Monge, M. y Ampuero, L. (2006). *Innovación en el Cultivo de Quinoa en Bolivia: Efectos de la Interacción Social y de las Capacidades de Absorción de los Pequeños Productores*. IFPRI Discussion Paper.
- INECC. (2012). Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. México. Quinta Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. México, 442 p.
- Inman-Bamber, N.G. (2004). Sugarcane water stress criteria for irrigation and drying off. *Field Crops Res.* 89: 107-122.

- Inman-Bamber, N.G., Smith, D.M. (2005). Water relations in sugarcane and response to water deficits. *Field Crops Res.* 92: 185-202.
- Knox, J.W., Rodríguez-Díaz, J.A., Nixon, D.J., Mkhwanazi, M. (2009). A preliminary assessment of climate change impacts on sugarcane in Swaziland. *Agricultural Systems.* 103: 63–72.
- Larrahondo, J. E., y Villegas, F. (1995). *Control y características de maduración*. En CENICAÑA. El cultivo de la caña en la zona azucarera de Colombia. Cali, Colombia. p: 297-313.
- MAM. 2011. Manual Azucarero Mexicano 2011. 54 Edición. Compañía Editora del Manual Azucarero, S. A de C. V. México, D. F.
- Mamani, O., Almaguer G., Cervantes, F. (2013). “Niveles de relacionamiento y balance estructural de la red de innovación de hule (*Hevea brasiliensis* Muell Arg.). Estudio de Caso”. Editorial Juan Pablos, México D.F.
- Madera, C.A., Silva, J., Mara, D.D., Torres, P. (2009). Wastewater use in agriculture: Irrigation of sugar cane with effluents from the Cañaveralejo wastewater treatment plant in Cali, Colombia. *Environmental Technology.* 30: 1011-1015.
- Marin, F.R., Jones, J.W., Singels, A., Royce, F., Assad, E.D., Pellegrino, G.Q., Justino, F. (2013). Climate change impacts on sugarcane attainable yield in southern Brazil. *Climatic Change.* 117: 227–239.
- Mayntz, R. (2001). El Estado y la sociedad civil en la gobernanza moderna. CLAD *Reforma y Democracia.* 21: 1-8

- Méndez, G.J., Návar, C.J., González, O.V. (2008). Análisis de tendencias de precipitación (1920-2004) en México. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM.* 65: 38-55.
- Munroe, R., Crawford, T., Curtis, S. (2014). Geospatial analysis of space–time patterning of ENSO forced daily precipitation distributions in the Gulf of Mexico. *The Professional Geographer.* 66(1): 91–101.
- Ojeda-Bustamante, W., Sifuentes-Ibarra, E., Íñiguez-Covarrubias, M., Montero-Martínez, M.J., (2011). Impacto del cambio climático en el desarrollo y requerimientos hídricos de los cultivos. *Agrociencia.* 45(1): 1-11.
- Ojeda-Bustamante, W., Sifuentes-Ibarra, E., Íñiguez-Covarrubias, M. y Montero-Martínez, M. J. (2011). Impacto del cambio climático en el desarrollo y requerimientos hídricos de los cultivos. *Agrociencia* 45(1): 1-11.
- Palacios, V. E. 2002. *¿Por qué, cuándo, cuánto y cómo regar? Para lograr mejores cosechas.* Primera Edición. Editorial Trillas. México.
- Palerm, J., Martinez, S.T. (2009). Aventuras con el agua la administración del agua de riego: historia y teoría. Colegio de Postgraduados. Mexico, 458 p.
- Ramírez-López, A., Beuchelt, T. D., Velasco-Misael, M. (2013). Factores de adopción y abandono del sistema de agricultura de conservación en los valles altos de México. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo* 10: 195-214.
- Reig M., E. y A.J. Picazo. 2002. Crecimiento y productividad de la agricultura española. [En línea]. Consultado 20 de noviembre 2012. [http://www.infoagro.com/calidad/crecimiento\\_agricultura.htm](http://www.infoagro.com/calidad/crecimiento_agricultura.htm)

- Ruíz-Álvarez, O., Arteaga-Ramírez, R., Vázquez-Peña, M.A., Ontiveros-Capurata, R.E., López-López, R. (2012). Balance hídrico y clasificación climática del Estado de Tabasco, México. *Universidad y Ciencia: Trópico Húmedo*. 28(1): 1-14.
- SAGARPA. (2007). Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. *Programa Nacional de la Agroindustria de la Caña de Azúcar*. [En línea]. Consultado 10 de octubre 2012. <http://siazucar.siap.gob.mx/materiales/pdf/Pronac.pdf>
- SAGARPA. (2009). Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. *Proyecto Nacional de Alta Rentabilidad para el Reordenamiento y Transformación del Campo Cañero Mexicano*. [En línea]. Consultado 17 de octubre 2012. <http://www.zafranet.com/---files/PDF/PRONARHomologada.pdf>
- Santillán, G.E., Dávila-Vázquez, G., de Anda, S.J. (2013). Estimación del balance hídrico mediante variables climáticas, en la cuenca del río Cazones, Veracruz, México. *Ambient-Agua*. 8(3): 104-117.
- Santillán-Fernández, A., Santoyo-Cortés, V.H., García-Chávez, L.R., Covarrubias-Gutiérrez, I. (2014). Dinámica de la producción cañera en México: periodo 2000 a 2011. *AP AGROproductividad*. 7(6):23-29.
- Santos, D.L., Sentelhas, P.C. (2012). Climate change scenarios and their impact on the water balance of sugarcane production areas in the State of São Paulo, Brazil. *Ambient-Agua*. 7(2): 7-17.
- Scarpari, M.S., Gomes, F. (2004). Sugarcane maturity estimation through edaphic-climatic parameters. *Scientia Agricola*. 61(5): 486-491.

- SIAP. (2009). Sistema de Información Agrícola y Pesquera. “*Estudio de gran visión para la identificación de necesidades de riego y drenaje en las zonas de abasto cañeras y propuestas de tecnificación en zonas potenciales como base para el desarrollo de proyectos de inversión*” [En línea]. Consultado 23 de abril 2014. [http://www.infocana.gob.mx/materiales/Estudios/INFORME\\_FINAL.pdf](http://www.infocana.gob.mx/materiales/Estudios/INFORME_FINAL.pdf)
- SIAP. (2012a). Sistema de Información Agrícola y Pesquera. *Infocaña*. [En línea]. Consultado 23 de octubre 2012. <http://www.campomexicano.gob.mx/azcf/reportes/reportes.php?tipo=CIERRE>
- SIAP. (2012b). Sistema de Información Agrícola y Pesquera. *Sistema Nacional de Información de la Agroindustria Azucarera*. [En línea]. Consultado 23 de octubre 2012. [http://siazucar.siap.gob.mx/informacion.php?cv\\_cl=2&cv\\_in=5](http://siazucar.siap.gob.mx/informacion.php?cv_cl=2&cv_in=5)
- Thornthwaite, C.W., Mather, J.R. (1957). Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and water balance. Laboratory of Climatology, Drexel Institute of Technology. 185–311 pp.
- UNC. 2013. Unión Nacional de Cañeros. *Regiones cañeras*. [En línea]. Consultado 15 de julio 2014. <http://www.caneros.org.mx/>
- Van-Ittersum, M.K., Rabbinge, R. (1997). Concepts in production ecology for analysis and quantification of agricultural input-output combinations. *Field Crop Res.* 52: 197-208.