

AGRO
PRODUCTIVIDAD

AP


CONACYT **ÍNDICE DE REVISTAS MEXICANAS**
DE DIVULGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA

Papel artesanal de paja de
**CAÑA DE
AZÚCAR**
(*Saccharum* spp.)
pág. 48

Año 10 • Volumen 10 • Número 11 • noviembre, 2017

SISTEMA NACIONAL DE INVESTIGACIÓN Y TRANSFERENCIA TECNOLÓGICA (SNITT)	3
LA DIVERSIFICACIÓN DE LA AGROINDUSTRIA AZUCARERA COMO ESTRATEGIA PARA MÉXICO	7
SUBPRODUCTOS, COPRODUCTOS Y DERIVADOS DE LA AGROINDUSTRIA AZUCARERA	13
CADENA DE VALOR DE LA DIVERSIFICACIÓN DE LA AGROINDUSTRIA DE LA CAÑA DE AZÚCAR EN MÉXICO	21
VENTAJA COMPARATIVA Y COMPETITIVA DE LA PRODUCCIÓN DE PANELA EN LA REGIÓN DE HUATUSCO, VERACRUZ, MÉXICO	29
EVALUACIÓN DE LA CALIDAD E INOCUIDAD DE LA PANELA DE VERACRUZ, MÉXICO	35

y más artículos de interés...

Guía para autores

Estructura

Agroproductividad es una revista de divulgación científica y tecnológica, auspiciada por el Colegio de Postgraduados de forma mensual para entregar los resultados obtenidos por los investigadores en ciencias agrícolas y afines. En ella se publica información original y relevante para el desarrollo agropecuario, social y otras disciplinas relacionadas, en formato de artículo, nota o ensayo. Las contribuciones son arbitradas y la publicación final se hace en idioma español. La contribución debe tener una extensión máxima de 15 cuartillas, incluyendo las ilustraciones. Deberá estar escrita en Word a doble espacio empleando el tipo Arial a 12 puntos y márgenes de 2.5 cm. Debe evitarse el uso de sangría al inicio de los párrafos. Las ilustraciones serán de calidad suficiente para su impresión en offset a colores, y con una resolución de 300 dpi en formato JPEG, TIFF o RAW.

La estructura de la contribución será la siguiente:

1) Artículos: una estructura clásica definida por los capítulos: Introducción, Resumen, abstract, objetivos, Materiales y Métodos, Resultados y Discusión, Conclusiones y Literatura Citada; 2) Notas, Ensayos y Relatorias: deben tener una secuencia lógica de las ideas, exponiendo claramente las técnicas o metodologías que se transmiten o proponen.

Formato

Título. Debe ser breve y reflejar claramente el contenido. Cuando se incluyan nombres científicos deben escribirse en *italicas*.

Autor o Autores. Se escribirán él o los nombres completos, separados por comas, con un índice progresivo en su caso. Al pie de la primera página se indicará el nombre de la institución a la que pertenece el autor y la dirección oficial, incluyendo el correo electrónico.

Cuadros. Deben ser claros, simples y concisos. Se ubicarán inmediatamente después del primer párrafo en el que se mencionen o al inicio de la siguiente cuartilla. Los cuadros deben numerarse progresivamente, indicando después de la referencia numérica el título del mismo (Cuadro 1. Título), y se colocarán en la parte superior. Al pie del cuadro se incluirán las aclaraciones a las que se hace mención mediante un índice en el texto incluido en el cuadro.

Figuras. Corresponden a dibujos, fotografías, gráficas, diagramas. Las fotografías serán a colores y con una resolución de 300 dpi en formato JPEG, TIFF o RAW y las gráficas o diagramas serán en formato de vectores (CDR, EPS, AI, WMF o XLS).

Unidades. Las unidades de pesos y medidas usadas serán las aceptadas en el Sistema Internacional.

Citas libros y Revistas:

- Bozzola J. J., Russell L. D. 1992. Electron Microscopy: Principles and Techniques for Biologists. Ed. Jones and Bartlett. Boston. 542 p.
- Calvo P., Avilés P. 2013. A new potential nano-oncological therapy based on polyamino acid nanocapsules. Journal of Controlled Release 169: 10-16.
- Gardea-Torresdey J. L., Peralta-Videa J. R., Rosa G., Parsons J. G. 2005. Phytoremediation of heavy metals and study of the metal coordination by X-ray absorption spectroscopy. Coordination Chemistry Reviews 249: 1797-1810.

El costo por publicación aceptada es \$3500.00 MX.

Año 10, Volumen 10, número 11, noviembre 2017, Agro productividad es una publicación mensual editada por el Colegio de Postgraduados. Carretera México-Texcoco Km. 36.5, Montecillo, Texcoco, Estado de México. CP 56230. Tel. 5959284427. www.colpos.mx. Editor responsable: Dr. Jorge Cadena Iñiguez. Reservas de Derechos al Uso Exclusivo No. 04-2017-031313492200-203. ISSN: 2594-0252, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Subdirección de Organización y Cómputo del Colegio de Postgraduados, Dr. Martiniano Castro Popoca, Carretera México-Texcoco Km. 36.5, Montecillo, Texcoco, Estado de México, CP 56230. Tel. 58045980 ext. 1035. Fecha de última modificación, 31 de noviembre de 2017.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor de la publicación.

Queda prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización del Colegio de Postgraduados.





105

Contenido

3	SISTEMA NACIONAL DE INVESTIGACIÓN Y TRANSFERENCIA TECNOLÓGICA (SNITT)
7	LA DIVERSIFICACIÓN DE LA AGROINDUSTRIA AZUCARERA COMO ESTRATEGIA PARA MÉXICO
13	SUBPRODUCTOS, COPRODUCTOS Y DERIVADOS DE LA AGROINDUSTRIA AZUCARERA
21	CADENA DE VALOR DE LA DIVERSIFICACIÓN DE LA AGROINDUSTRIA DE LA CAÑA DE AZÚCAR EN MÉXICO
29	VENTAJA COMPARATIVA Y COMPETITIVA DE LA PRODUCCIÓN DE PANELA EN LA REGIÓN DE HUATUSCO, VERACRUZ, MÉXICO
35	EVALUACIÓN DE LA CALIDAD E INOCUIDAD DE LA PANELA DE VERACRUZ, MÉXICO
41	INNOVACIONES EN EL TRAPICHE PANELERO: LA PRODUCCIÓN DE PANELA GRANULADA
48	PAPEL ARTESANAL DE PAJA DE CAÑA DE AZÚCAR (<i>Saccharum</i> spp.)
54	MÉTODOS PARA EXTRAER CELULOSA DE LA PAJA DE CAÑA DE AZÚCAR (<i>Saccharum</i> spp.)
60	PLANTA PILOTO PARA OBTENCIÓN DE CELULOSA DE RESIDUOS DE CAÑA DE AZÚCAR (<i>Saccharum</i> spp.) Y ELABORACIÓN DE RECIPIENTES BIODEGRADABLES
66	MANEJO POR CORTE DE CAÑA DE AZÚCAR (<i>Saccharum</i> spp.) PARA PRODUCCIÓN DE FORRAJE, COMO ENSILAJE
70	CAÑA DE AZÚCAR (<i>Saccharum</i> spp.) EN LA ALIMENTACIÓN DE RUMIANTES: EXPERIENCIAS GENERADAS CON CAÑAS FORRAJERAS
76	COLOR DEL TEJIDO ADIPOSEO DE TORETES FINALIZADOS CON ENSILADO DE CAÑA DE AZÚCAR (<i>Saccharum</i> spp.)
81	EFICIENCIA EN EL USO DE COMBUSTIBLE PARA LA PRODUCCIÓN DE CAÑA DE AZÚCAR (<i>Saccharum</i> spp.) EN LA REGIÓN GOLFO DE MÉXICO
87	INTERPRETACIÓN DEL ANÁLISIS DE SUELOS CAÑEROS BASADO EN LAS RELACIONES ENTRE PROPIEDADES Y ELEMENTOS
93	FASES EXPERIMENTALES EN EL MEJORAMIENTO GENÉTICO DE LA CAÑA DE AZÚCAR (<i>Saccharum</i> spp.) EN MÉXICO
99	RESIDUOS ORGÁNICOS DE LA AGROINDUSTRIA AZUCARERA: RETOS Y OPORTUNIDADES
105	EVALUACIÓN DE VARIABLES DE CALIDAD EN HÍBRIDOS DE <i>Saccharum</i> spp. EN DIFERENTES AMBIENTES AGROECOLÓGICOS DE JALISCO, MÉXICO
112	POTENCIAL DEL USO DEL RASTROJO DE LA CAÑA DE AZÚCAR (<i>Saccharum</i> spp.) PARA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS
116	EFICIENCIA DE LA APLICACIÓN MECANIZADA DE ESTIÉRCOL LÍQUIDO Y SU EFECTO SOBRE EL RENDIMIENTO DE MAÍZ (<i>Zea mays</i> L.) FORRAJERO
121	EFFECTO DE LA ADICIÓN DE HOJAS DE <i>Azadirachta indica</i> A. Juss Y <i>Stevia rebaudiana</i> Bertoni EN LA CALIDAD SENSORIAL DE UN PAN DULCE

SAGARPA
SECRETARÍA DE AGRICULTURA,
GANADERÍA, DESARROLLO RURAL,
PESCA Y ALIMENTACIÓN



CONACYT
ÍNDICE DE REVISTAS MEXICANAS
DE DIVULGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA

EBSCO
INFORMATION SERVICES

USDA

latindex

CENGAGE
Learning

PERIÓDICA
Revista de Biología y Agrociencias del Estado de Jalisco

CABI

Clarivate
Analytics

CAB ABSTRACTS

Corrección de estilo: Hannah Infante Lagarda

Maquetación: Alejandro Rojas Sánchez

Suscripciones, ventas, publicidad, contribuciones de autores:

Guerrero 9, esquina Avenida Hidalgo, C.P. 56220, San Luis Huexotla, Texcoco, Estado de México.

Teléfono: 01 (595) 928 4703 jocadena@colpos.mx; jocadena@gmail.com

Impresión 3000 ejemplares.

Es responsabilidad del autor el uso de las ilustraciones, el material gráfico y el contenido creado para esta publicación.

Las opiniones expresadas en este documento son de exclusiva responsabilidad de los autores, y no reflejan necesariamente los puntos de vista del Colegio de Postgraduados, de la Editorial del Colegio de Postgraduados, ni de la Fundación Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas.



Dr. Jorge Cadena Iñiguez

Directorio

Said Infante Gil
Editor General del Colegio de Postgraduados

Rafael Rodríguez Montessoro[†]
Director Fundador

Jorge Cadena Iñiguez
Director de Agroproductividad

Comité Técnico-Científico

Colegio de Postgraduados—Montecillo
Ma. de Lourdes de la Isla
Dr. Ing. Agr. Catedrática Aereopollución

Ángel Lagunes T.
Dr. Ing. Agr. Catedrático Entomología

Enrique Palacios V.
Dr. Ing. Agr. Catedrático Hidrociencias

Colegio de Postgraduados—Córdoba
Fernando Carlos Gómez Merino
Dr. Ing. Agr. Biotecnología

Colegio de Postgraduados—San Luis Potosí
Fernando Clemente Sánchez
Dr. Ing. Agr. Fauna Silvestre

Luis Antonio Tarango Arámbula
Dr. Ing. Agr. Fauna Silvestre

Instituto de Investigaciones Forestales,
Agrícolas y Pecuarias
Pedro Cadena I.
Dr. Ing. Agr. Transferencia de Tecnología

Carlos Mallen Rivera
M. C. Director de Promoción y Divulgación

Instituto Interamericano de Cooperación
para la Agricultura
Victor Villalobos A.
Dr. Ing. Agr. Biotecnología

Instituto Interamericano de Cooperación
para la Agricultura
(Guatemala)
Manuel David Sánchez Hermosillo
Dr. Ing. Agr. Nutrición Animal y manejo de Pastizales

Servicio Nacional de Inspección y
Certificación de Semillas
(SNICS-SAGARPA)
Manuel R. Villa Issa
Dr. Ing. Agr. Economía Agrícola.
Director General

Editorial

Volumen 10 • Número 11 • noviembre, 2017.

La diversificación en las actividades primarias es una constante en las políticas públicas de muchos gobiernos, algunas ocasiones el contexto y concepto se confunde con dar valor agregado a los productos que resultan de dichas actividades, sin embargo, esto ni es totalmente cierto, ni está totalmente separado. La idea de diversificar, es dar variación a la actividad principal sin menoscabo del producto primario u original, lo cual puede generar nuevos productos o coproductos. Raras veces puede un coproducto ser más importante que el original, sin embargo, en caña de azúcar, esto puede cambiar en algún periodo plausible que determine la oferta y la demanda, por ejemplo, si los requerimientos de energía superan los precios del azúcar granulada, por los del etanol, biogás y electricidad que requieren las ciudades, o bien desarrollando productos innovadores a partir de los residuos. Un caso interesante puede ser la generación de bebidas alcohólicas locales partiendo del piloncillo artesanal, productos que históricamente han diversificado en grandes industrias y fuentes de divisas por su comercio, entonces la variación de la actividad inicial genera también valor agregado. Las bondades de la diversificación debieran ser que exista el desarrollo horizontal de coproductos (no vertical que sustituye) con su propio valor en el mercado y permita que el objeto de la producción original se mantenga, y ello aumente los empleos, sean nuevas fuentes generadoras de recursos económicos y facilite la rentabilidad.

Dr. Jorge Cadena Iñiguez
Director de 

SISTEMA NACIONAL DE INVESTIGACIÓN Y TRANSFERENCIA TECNOLÓGICA (SNITT)

PLANIFICACIÓN, TRANSFERENCIA E INNOVACIÓN EXITOSA PARA EL SECTOR RURAL

Espinosa-Mancinas, César Adrián

Guillermo Pérez Valenzuela 127, Edificio Q., Colonia Del Carmen, Coyoacán, Ciudad de México, C.P. 04100.

Autor de Correspondencia: cesar.espinosa@snitt.org.mx

INTRODUCCIÓN

En cumplimiento al Artículo 34 de la Ley de Desarrollo Rural Sustentable (LDRS), la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA), establece el Sistema Nacional de Investigación y Transferencia de Tecnología para el Desarrollo Rural (SNITT) como un órgano auxiliar y consultivo de la Comisión Intersecretarial para el Desarrollo Rural Sustentable. Su objetivo es "coordinar y concertar las acciones de instituciones públicas, organismos sociales y privados que promuevan y realicen actividades de investigación científica, desarrollo tecnológico y validación y transferencia de conocimientos en la rama agropecuaria, tendientes a la identificación y atención tanto de los grandes problemas nacionales en la materia como de las necesidades inmediatas de los productores y demás agentes de la sociedad rural respecto de sus actividades agropecuarias".

Estructura orgánica del SNITT

El Sistema está integrado actualmente por: 1. Consejo Directivo. 2. Comité Técnico. 3. Secretario Ejecutivo. 4. Comisiones Técnicas Estatales. En la actualización del Plan participaron, en el seno del Comité Técnico del SNITT, destacados miembros de la comunidad científica del país, representantes de las principales instituciones de enseñanza e investigación del Sector Agropecuario y Pesca, representantes de organizaciones de apoyo a la investigación y transferencia de tecnología, de la Dirección General de Vinculación y Desarrollo Tecnológico y de la Dirección General de Servicios Profesionales para el Desarrollo Rural de la SAGARPA. El presente Plan actualiza y amplía la Misión, Visión, Usuarios/Beneficiarios y Socios, los Factores Críticos de Éxito, las Estrategias y Líneas de acciones.

La premisa fundamental, es que solamente con el trabajo coordinado de todos los actores que integran el SNITT, se generan impactos positivos en las actividades productivas del Sector Agropecuario y Pesca, en el bienestar social y económico de la población, y en la sustentabilidad del Sector; lo cual contribuirá al Desarrollo Rural Sustentable del País.

MISIÓN

Proponer los lineamientos de política que permitan una estrategia permanente de generación de Investigación, Transferencia de Tecnología e Innovación para lograr y mantener la competitividad del Sector Rural. Articular los proyectos, programas y recursos públicos y privados, en materia de Investigación, Transferencia de Tecnología e Innovación, de las cadenas productivas de los subsectores, a efecto de asegurar la participación y contribución de instituciones de investigación y educación superior, prestadores de servicios, organizaciones sociales y privadas, así como asociaciones de productores y gobiernos estatales y municipales, con el propósito de lograr la competitividad de las cadenas agroalimentarias, acuícolas y pesqueras.

VISIÓN

Ser un sistema eficiente y eficaz que vincule y optimice los recursos gubernamentales y privados en materia de Investigación, Transferencia de Tecnología e Innovación, para lograr y mantener la competitividad de las cadenas agroalimentarias como factor estratégico en el desarrollo rural mexicano.

El SNITT tiene como uno de sus objetivos la articulación e identificación de demandas y proyectos productivos de innovación que hacen la diferencia en el sector rural. Es por eso que este sistema ofrece las herramientas necesarias para impulsar a México a un desarrollo agropecuario con mayor impacto y trascendencia para el crecimiento del país, la sociedad, la conservación de la biodiversidad, los ingresos económicos y el impacto en las nuevas tendencias.

Demandas actuales y prospectivas en ciencia, tecnología e innovación

Derivado de la consulta y aportaciones de la Dirección General de Fomento a la Agricultura, de la Dirección General de Productividad y Desarrollo Tecnológico, de los Sistemas Producto, así como de los miembros del Comité Técnico del SNITT; se presentan a consideración, los cultivos y temas transversales prioritarios de investigación que deben atenderse como una prioridad en el corto y mediano plazo. Estos temas presentan un nivel de generalidad amplio, no obstante, se plantea como prioridad en la estrategia de trabajo, derivada de las políticas de investigación, transferencia e innovación, el promover la creación de grupos interdisciplinarios e interinstitucionales, de investigadores que trabajen en torno a los temas propuestos con el fin de lograr en el

corto plazo la definición específica de las áreas de atención propuestas, considerando la atención en los dos grandes vertientes de la investigación en el Sector Rural: Sistemas Producto y Temas Transversales (Figura 1).

Por medio de la identificación de proyectos productivos del sector agropecuario, el SNITT logra unir a los sectores de la industria, academia y gobierno para la solución de demandas identificadas en talleres, foros y reuniones donde convergen los tres integrantes de un modelo denominado *triple hélice*. La función de dicho modelo inicia con una conversación con los productores, identificando sus demandas y necesidades. Una vez identificadas, el SNITT vincula a la academia con los productores para que se determine qué incentivo de innovación puede aplicar para cada proyecto en particular. Cabe recalcar que el apoyo que el SNITT gestiona a través del Componente de Innovación y del Fondo Sectorial SA-

GARPA-CONACYT, no es un subsidio; son herramientas que permiten a los proyectos llegar a un punto de sustentabilidad para que su desarrollo continúe de manera autónoma.

Herramientas

1. Agenda Mexicana Agroalimentaria (AMEXAGRO)

Es una plataforma en línea que ofrece información estratégica para productores, investigadores e instituciones gubernamentales en actividades agrícolas, pecuarias y acuícola-pesquero. Esta plataforma



Figura 1. Mesa de Análisis en el marco del Foro Estratégico Sobre el Capítulo Agropecuario del TLCAN-Sector Agrícola.

ofrece herramientas puntuales que determinan 39 cultivos estratégicos para el país, incluyendo cultivos básicos y cultivos con potencial de mercado como lo son el aguacate, arándano, cacao, café, frambuesa, jitomate, nuez, vainilla, entre otros. De igual forma se han integrado seis sistemas producto del rubro pecuario: apícola, bovinos carne, bovinos leche, caprinos, ovinos y porcinos. Además, recientemente se ha trabajado en la construcción e integración del rubro acuícola-pesquero que contempla 15 sistemas producto y/o especies que van desde camarón, pulpo, langosta y moluscos bivalvos, hasta especies de peces como bagre, mojarra, robalo, trucha y totoaba, entre otros (Figura 2).

La AMEXAGRO se construye y actualiza permanentemente gracias a la vinculación con diferentes actores del sector, y a través de talleres, reuniones y visitas a los lugares de trabajo y producción de la industria. También, el SNITT trabaja de la mano con diversas instituciones de investigación y organizaciones de productores, para definir los temas que requieren investigación e innovación para cada producto; evitando la duplicidad de apoyos e impulsar el trabajo entre productores, investigadores y gobierno.

De igual manera, este Sistema Nacional enfoca sus esfuerzos en que los proyectos tengan impacto sobre alguno de los siete temas transversales que impulsa la AMEXAGRO: **agricultura protegida, biotecnolo-**

gía, cambio climático, conservación y recuperación de suelos, producción y multiplicación de semillas mejoradas, recuperación de la biodiversidad y uso eficiente del agua (www.agenda2017.org)

2. Directorio de Científicos

Es un instrumento que va a la par de la Agenda Mexicana Agroalimentaria que se consulta, igualmente, en línea en el mismo portal. Integra a los especialistas en cultivos agrícolas, especies pecuarias y organismos obtenidos a través de la acuicultura y la pesca. Ofrece a los usuarios información sobre el recurso humano especializado que existe en México orientado en actividades agrícola, pecuaria, acuícola y pesquera. De esta manera, se garantiza el contacto directo con los científicos para buscar las alternativas de mayor eficiencia que eleven la productividad y resuelvan problemas en cada actividad.

Si eres investigador, te invitamos a ponerte en contacto con nosotros para formar parte de esta herramienta.



Figura 2. Primera Jornada de Innovación Agroalimentaria.

resolver problemas que limitan el desarrollo en el sector agropecuario. En este Fondo Sectorial, el SNITT identifica las necesidades en materia de investigación, desarrollo e innovación tecnológica en el sector agrícola, pecuario y acuícola. Mediante una metodología de identificación y priorización de demandas, grupos de trabajo técnico identifican, elaboran y analizan las demandas que finalmente son sometidas para su aprobación ante el Comité Técnico y de Administración (CTA) del Fondo Sectorial para su publicación como convocatoria en la página oficial del CONACyT (Figura 3).

4. SNITT - Cooperación Internacional

Una de las actividades sustantivas del SNITT, refiere la colaboración institucional con aquellas entidades internacionales, que contribuyan al desarrollo de investigaciones, innovaciones y transferencia de tecnología en el sector agroalimentario, con el propósito de fomentar esquemas de cooperación entre los países. En este sentido, las principales instancias internacionales con las que el SNITT trabaja bajo esquemas de cooperación bilateral o trilateral son: Fondo para el Medio Ambiente Mundial (GEF, por sus siglas en

3. Fondo Sectorial SAGARPA-CONACYT

El Fondo Sectorial de la Investigación en Materia Agrícola, Pecuaria, Acuicultura, Agrobiotecnología y Recursos Fitogenéticos, es un fideicomiso creado entre la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) y el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) para

inglés); Agencia Alemana de Cooperación Internacional (GIZ, por sus siglas en alemán); Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA); Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, por sus siglas en inglés); Banco Interamericano de Desarrollo (BID); Instituto Nacional de Alimentos y Agricultura (NIFA, por sus siglas en inglés) del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA, por sus siglas en inglés); Agregaduría Científica de la Embajada de Italia en México; Texas A&M University; Centro de Cooperación Internacional de Investigación Agronómica para el Desarrollo (CIRAD, por sus siglas en francés), y la Organización Internacional de la Viña y el Vino (OIV) (Figura 4).

CONCLUSIONES

El sector rural se transforma, las tecnologías avanzan y existen innovaciones para los sistemas de producción. Las necesidades del sector rural van evolucionando conforme cambian las demandas del mercado, y es por ello, que la transferencia de tecnología y herramientas que facilita el SNITT, simplifican la adecuación que los productores rurales requieren para lograr mayor productividad alcance económico.

Líneas de Acción

- Identificar las ventajas competitivas de las instituciones de educación superior y de los centros de investigación, y a fin de potenciar las mismas, evitar duplicidad de funciones, promover su complementariedad y fortalecer su vinculación.
- Fortalecer los mecanismos que incentiven y conduzcan las relaciones entre los centros de investigación, universidades y sectores demandantes de innovaciones y servicios profesionales.
- Considerar la implementación de "consorcios" o "parques tecnológicos", donde se especialice la participación de instituciones de educación superior y centros de investigación y desarrollo, en la atención de determinadas cadenas productivas.



Figura 3. Conferencia de Vinculación con el sector agropecuario.



Figura 4. Reunión de vinculación con CIMMYT y Medios de Comunicación.



LA DIVERSIFICACIÓN DE LA AGROINDUSTRIA AZUCARERA COMO ESTRATEGIA PARA MÉXICO

DIVERSIFICATION OF THE SUGAR AGROINDUSTRY AS A STRATEGY FOR MEXICO

Gómez-Merino, F.C.^{1*}; Trejo-Téllez, L.I.²; Salazar-Ortiz, J.¹; Pérez-Sato, J.A.¹;
Senties-Herrera, H.E.²; Bello-Bello, J.J.¹; Aguilar-Rivera, N.³

¹Colegio de Postgraduados Campus Córdoba. Carretera Córdoba-Veracruz km 348, Congregación Manuel León, Amatlán de los Reyes, Veracruz, México. C. P. 94961. ²Colegio de Postgraduados Campus Montecillo. Carretera México-Texcoco km 36.5, Montecillo, Texcoco, Estado de México. C. P. 56230. ³Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias. Universidad Veracruzana. Carretera Peñuela-Amatlán de los Reyes km 1, Amatlán de los Reyes, Veracruz, México. C. P. 94945.

***Autor de correspondencia:** fernandg@colpos.mx

RESUMEN

La caña de azúcar (*Saccharum* spp.) es actualmente el cultivo agroalimentario más productivo del mundo. Debido a la naturaleza química y bioquímica de la materia prima que produce presenta gran potencial para la diversificación productiva. En este artículo se presentan los avances sobre la generación de coproductos, subproductos y derivados de la caña de azúcar, y se analizan algunas oportunidades y desafíos de la agroindustria azucarera en México para lograr una eficiente diversificación.

Palabras clave: Caña de azúcar, México, diversidad de usos, ingenios azucareros

ABSTRACT

Sugarcane (*Saccharum* spp.) is currently the most productive agrifood crop in the world. Due to the chemical and biochemical nature of the raw material it produces, this crop presents great potential for productive diversification. This article presents the advancements regarding the generation of coproducts, byproducts and derivatives from sugarcane, and some opportunities and challenges to achieve efficient diversification of the sugar agroindustry in Mexico are analyzed.

Keywords: Sugarcane, Mexico, diversity in uses, sugar factories.

Agroproductividad: Vol. 10, Núm. 11, noviembre. 2017. pp: 7-12.

Recibido: mayo, 2017 **Aceptado:** octubre, 2017.

INTRODUCCIÓN

La caña de azúcar (*Saccharum* spp.) presenta un cultivo de gran importancia en la provisión de alimentos e insumos para la industria sucroquímica y bioenergética. El valor económico de este cultivo se basa en tres atributos: 1) es una especie altamente productiva; 2) es muy eficiente en el uso de insumos y recursos productivos; y 3) puede ser procesada de manera local y generar productos con valor agregado, tales como sacarosa, melaza, etanol y energía, todos ellos de fácil manejo, almacenamiento y transporte (Moore *et al.*, 2014; Gómez-Merino *et al.*, 2014a; Gómez-Merino y Senties-Herrera, 2015). De manera conjunta, todos estos atributos contribuyen a que la caña de azúcar sea un producto comercial de primera importancia en los más de 130 países y territorios donde se cultiva alrededor del mundo, cubriendo un área superior a los 27 millones de hectáreas, lo que representa alrededor de 1.9 % de la superficie total cultivada a nivel global. En esta superficie se producen más de 1,800 millones de toneladas de caña de azúcar como materia prima, lo que le convierte en el cultivo con la tasa más alta de producción de biomasa total (Gómez-

Merino *et al.*, 2014a; Gómez-Merino y Senties-Herrera, 2015; FAOSTAT, 2016; OCDE-FAO, 2013) (Cuadro 1).

En la Figura 1 se muestran los cambios que ha tenido tanto la producción de caña de azúcar en materia verde (Figura 1A) como la superficie destinada a este cultivo en el mundo (Figura 1B), en el periodo de 2010 a 2016. Se observa que aunque la superficie sembrada se ha mantenido con ligeros aumentos la producción de la materia prima tiende a la baja, posiblemente debido a un deterioro generalizado de los recursos naturales, efectos del cambio climático global, alza en los precios de los insumos para la producción y deterioro varietal, entre otros. Es de destacar que dentro de cultivos agroalimentarios la caña de azúcar muestra los rendimientos más altos, con un promedio mundial superior a las 70 t ha⁻¹, mismos que pueden incrementarse a través del mejoramiento genético y manejo agronómico, tal como la agricultura de precisión, y potencialmente llegar a producir poco más de 800 t ha⁻¹ (Moore, 2009; Dal-Bianco *et al.*, 2012; Yadav *et al.*, 2010).

Este enorme potencial de rendimiento hace de la caña de azúcar un cultivo multipropósito relevante por su

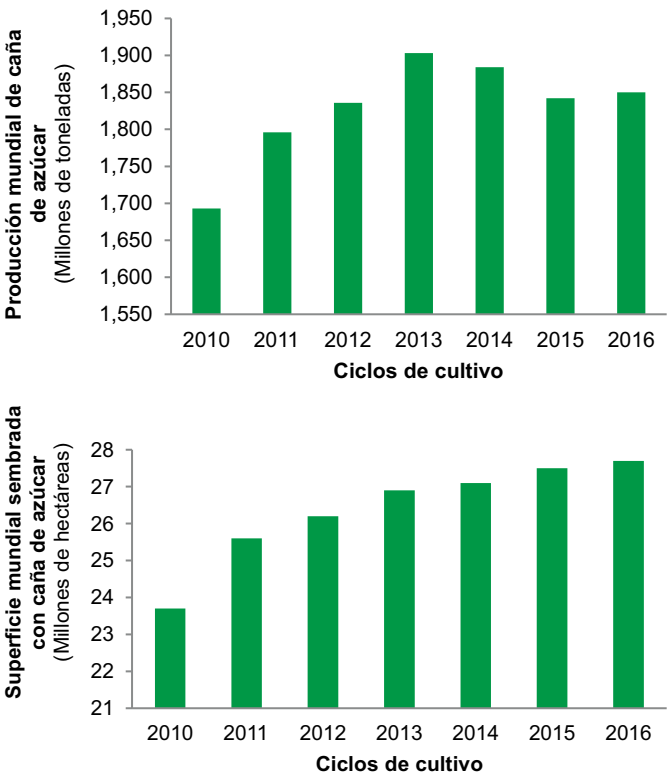


Figura 1. A: Producción de caña de azúcar (*Saccharum* spp.) en materia fresca. B: superficie destinada al cultivo en el mundo, en el periodo 2010-2016. Para 2015 y 2016 los datos de superficie son estimados de acuerdo con proyecciones de OCDE-FAO (2013).

Cuadro 1. Producción, superficie cultivada, rendimiento y fracción de la superficie cultivada a nivel mundial dedicada a los seis principales cultivos alimenticios (FAOSTAT, 2016).				
Cultivo	Producción (t)	Superficie sembrada (ha)	Rendimiento promedio (t ha ⁻¹)	Fracción de tierra cultivada que ocupa (%)
Caña de azúcar	1,884,426,253	27,124,725	72.1	1.9
Maíz	1,037,791,520	184,800,970	5.2	13.3
Arroz	741,477,712	162,716,863	4.2	11.7
Trigo	729,012,171	220,417,745	3.2	15.8
Papa	381,682,143	19,098,330	20.2	1.3
Remolacha azucarera	269,714,067	4,471,579	50.7	0.3

aprovechamiento, incluyendo su uso potencial como biofábrica para la síntesis de nuevos compuestos (Gómez-Merino *et al.*, 2014a; 2014b; 2015).

Los más de 130 países y territorios donde se cultiva la caña de azúcar están distribuidos en las zonas tropicales y subtropicales, entre los paralelos 35° al norte y sur del ecuador (Moore *et al.*, 2014; Senties-Herrera *et al.*, 2017). Por los niveles de producción de caña en verde destacan en este orden (los aportes porcentuales se indican en paréntesis); Brasil (36.4 %), India (17.4 %), China (12.4 %), Tailandia (5.1 %), Pakistán (3.3 %), México (2.8 %), Colombia (1.9 %), Filipinas (1.6 %), Australia (1.5 %), Indonesia (1.4 %), Estados Unidos (1.4 %), Guatemala (1.4 %) y Argentina (1.2 %). El resto del mundo produce 12.2 % de la caña (FAOSTAT, 2016; Senties-Herrera *et al.*, 2017). México es el sexto productor de caña y el séptimo de azúcar a nivel global. El sistema de producción de la caña de azúcar genera más de dos millones de empleos tanto directos como indirectos, y se desarrolla en 15 entidades federativas y 258 municipios (Enríquez-Poy, 2016; Senties-Herrera *et al.*, 2017). La zafra 2015-2016 se realizó en 51 ingenios, en una superficie cosechada de 778,7500 hectáreas, alcanzando una molienda de 54,188,609 t de caña y una producción de 6,117,048 t de azúcar (INFOCAÑA, 2017). Esta agroindustria aporta 1.98 % del PIB manufacturero, 16.44 % del PIB agropecuario y 8.29 % del PIB de la industria alimentaria (Enríquez-Poy, 2016), lo cual representa avances sustanciales, ya que para 2014 la industria participó con 0.4 % del PIB nacional, 2.5 % del manufacturero y 11.6 % del primario (Senties-Herrera *et al.*, 2014). En las zonas donde se desarrolla esta actividad vive 13 % de la población nacional, lo que destaca su importancia social (ZAFRANET, 2017). De acuerdo con Aguilar-Rivera *et al.* (2012), el principal producto de la caña de azúcar, la sacarosa, comúnmente llamada azúcar, está siendo sustituido en 40 % por edulcorantes alternativos, y las agresivas campañas publicitarias sobre los peligros de salud, principalmente obesidad y enfermedades relacionadas, derivados del consumo de azúcar, ha disminuido gradualmente su consumo. De ahí que esta industria requiera disminuir costos de producción y aplicar desarrollos tecnológicos e innovaciones que generen más valor y rentabilidad. En esta revisión temática se describe la importancia y la necesidad de diversificar esta cadena productiva, centrada principalmente en la producción de azúcar de mesa, y se exploran alternativas que pueden contribuir a lograr su sustentabilidad y competitividad.

Diversificación productiva del sector azucarero

La caña de azúcar es un cultivo con gran potencial de diversificación. De acuerdo con la Ley de Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar (<http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LDSCA.pdf>), y en los objetivos, metas y estrategias del Programa Nacional de la Agroindustria de la Caña de Azúcar (PRONAC) 2014-2018 (http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5343244&fecha=02/05/2014), se considera como diversificación productiva la obtención del azúcar de caña en todas sus presentaciones, además de los coproductos, subproductos y derivados de la planta. Los coproductos son una variedad de productos intermedios y finales que tienen como propósito dar un mejor uso a los residuos del proceso agrícola y de la industria de la caña de azúcar. Los subproductos son productos colaterales a la producción azucarera. Por último, los derivados son aquellos productos que se obtienen a partir de los coproductos y subproductos de la caña.

Brunstein (1994) propuso que las industrias de procesos que generan varios productos de manera conjunta, a partir de la misma materia prima, pueden clasificar su producción en tres categorías principales: 1) Los productos principales, que derivan de la transformación directa de la materia prima; en este caso, el azúcar de caña; 2) Los productos secundarios, que no son necesariamente deseables, pero tienen una importancia económica significativa y derivan de la transformación de la materia prima, tales como el alcohol de las melazas de caña; y 3) Los subproductos, los cuales no representan una importancia económica relevante bajo el criterio de la empresa; son considerados residuos de la transformación de la materia prima (bagazo de caña, vinazas de destilería, y cachaza que resulta del procesamiento de azúcar de caña y etanol). Además de evitar impactos negativos en el ambiente, el aprovechamiento integral de productos y subproductos genera nuevas fuentes de riqueza que aportan una mayor rentabilidad al proceso industrial (Guo *et al.*, 2006; Aguilar-Rivera, 2009; Aguilar-Rivera *et al.*, 2010). El concepto de diversificación en la agroindustria cañera ha evolucionado, desde producciones con tecnologías simples hasta las más recientes, basadas en la química sintética, biotecnología y en los procesos de obtención de nuevos materiales (Aguilar Rivera, 2009). Con estas definiciones se puede entender que azúcar, etanol y melaza son los principales productos y coproductos de la industria azucarera. Bagazo, cachaza, cenizas de calderas, paja y cogollo, gases de combustión, vinaza y aguas residuales constituyen los

subproductos de esta agroindustria. Ejemplos de derivados del bagazo son la celulosa, el xilitol y el carbón activado (Aguilar-Rivera et al., 2012). De acuerdo con Viniegra (2007), la diversificación del sector azucarero debe promover la transformación productiva y el desarrollo sostenible con cuatro líneas principales: 1) agricultura cañera sostenible; 2) ingenios diversificados o multipropósito; 3) uso integral de la biomasa cañera; y 4) desarrollo regional.

Oportunidades y desafíos de la diversificación de la agroindustria azucarera en México

De acuerdo con el Programa Nacional de la Agroindustria de la Caña de Azúcar (PRONAC, 2014), son dos las principales vertientes de diversificación que podría tomar la agroindustria azucarera nacional: la producción de alcohol y la cogeneración de energía. A pesar de que la producción de alcohol ha aumentado, aún se importa más de 50 % de la demanda nacional, lo que hace evidente la necesidad de impulsar esta industria, con los ajustes económicos y administrativos que se requieran. Respecto a la cogeneración de energía se requieren fuertes montos de inversión, lo que ha limitado el incremento de la capacidad instalada. Aumentar esta capacidad permitiría generar excedentes de energía para su comercialización a través de la red pública, aunque por varios factores esta potencialidad no se ha aprovechado (PRONAC, 2014). La diversificación productiva de la industria azucarera nacional tiene enormes ventajas económicas, sociales y ambientales. Sin embargo, su aplicación e impacto en el desarrollo social existente en las regiones cañeras del país es precario. En las actuales condiciones de operación de las factorías azucareras el

tratamiento o uso diversificado de los subproductos cañeros resulta costoso. Ni las instituciones encargadas de la investigación científica, el desarrollo tecnológico y la innovación, ni las empresas privadas, han llevado a cabo esta labor con eficacia, bien por falta de visión, exceso de legislación, falta de voluntad política, intereses diversos o por carencia de medios económicos (Aguilar-Rivera et al., 2010). Todo ello está contribuyendo a un deterioro ambiental en vastas extensiones de las regiones productoras de este cultivo, y un desperdicio de los coproductos y subproductos que pudieran estar generando dividendos. A pesar de que existe una amplia gama de productos (alrededor de 250) para la diversificación de la caña, únicamente cinco son aprovechados en la industria mexicana: azúcar, bagazo para cogeneración de energía, bagazo para la producción de papel, melaza y alcohol (Aguilar-Rivera, 2009). Todo proyecto de diversificación debe tomar en consideración los avances científico que se tengan respecto a coproductos, subproductos y derivados que se vayan a aprovechar de la industria azucarera. El potencial de diversificación de esta agroindustria deriva precisamente del volumen y calidad de éstos, ya que sus constituyentes químicos y bioquímicos (carbohidratos simples y estructurales principalmente) ofrecen diferentes posibilidades de industrialización a través de procesamientos físicos, químicos, bioquímicos y biotecnológicos (de la Torre, 1989; Gálvez, 2000; Aguilar-Rivera et al., 2010). Las iniciativas y estrategias de corto, mediano y largo plazo que se emprendan para diversificar la industria azucarera nacional deben brindar certidumbre a quien invierta en este tipo de proyectos (Aguilar-Rivera et

al., 2010; Aguilar-Rivera et al., 2012; Aguilar Rivera, 2013; Aguilar-Rivera et al., 2014).

De acuerdo con Aguilar et al. (2010), la diversificación de esta cadena de valor conllevaría a un impulso del desarrollo sostenible regional, tanto para los productores de la materia prima como para las industrias asociadas y, al mismo tiempo, reduciría la vulnerabilidad de la industria al cambio, al flexibilizar las futuras estrategias empresariales y al aumentar la capacidad de recuperación que la industria azucarera enfrenta con la disminución de los precios del azúcar, la introducción de edulcorantes alternativos y las campañas publicitarias en contra del consumo del azúcar de caña (CONADESUCA, 2016). Para el caso de México, de acuerdo con Enríquez-Poy (2016) y Senties-Herrera et al. (2017), durante las zafas 2015/2016, 2016/2017 y 2017/2018 se pronostican alzas en los precios de la caña, proyectados en 600 pesos la tonelada, lo cual es muy positivo para los productores. Sin embargo, hay que considerar que el alza es temporal y que es necesario impulsar estrategias de diversificación a corto, mediano y largo plazo. La composición química y bioquímica de la caña, de sus productos, coproductos y subproductos y su producción en cada zafra hace que su transformación sea atractiva, tanto técnica como económica, siempre y cuando se generen productos de alto valor agregado e interés para el mercado (Aguilar et al., 2010).

La puesta en marcha de iniciativas de diversificación del sector es urgente, dados los desafíos que actualmente enfrenta el mercado del azúcar en el mundo. Adicionalmente, se ha observado un aumento

en el consumo de edulcorantes alternativos, tales como sucralosa y aspartamo (CONADESUCA, 2016), y actualmente se importa más de un millón de toneladas de jarabe de maíz (*Zea mays* L.) de alta fructosa, lo cual está desplazando al azúcar en un segmento importante de mercado (García-Chávez, 2011; CONADESUCA, 2016). En este punto, es necesario que la agroindustria de la caña de azúcar desarrolle nuevos productos, acorde a necesidades y demandas del consumidor.

Existen dos estrategias posibles para el aprovechamiento de la biomasa residual de la caña de azúcar y los subproductos. La primera de ellas consiste en desarrollar, a partir de ella, derivados que se puedan insertar en las cadenas de producción y mercados ya existentes, tales como la panela y el ron (bebida alcohólica), entre otros principales. La segunda implica el desarrollo de nuevas tecnologías de aprovechamiento de los propios residuos con cuatro direcciones básicas: 1) Generación de energía; 2) Obtención de productos químicos; 3) Reciclado en la actividad agrícola; y 4) Utilización en la alimentación ganadera (CONADESUCA, 2016). Adicionalmente, a través de aplicaciones de la ingeniería genética, la caña de azúcar se podría convertir en una eficiente biofábrica para la producción de proteínas de importancia farmacológica y biopolímeros (Gómez-Merino *et al.*, 2014a; 2014b; 2015). La propia selección y el mejoramiento genético, a través de la integración de nuevas herramientas biotecnológicas, podría contribuir a la generación de variedades con caracteres superiores de acuerdo con los intereses de la industria (Senties-Herrera *et al.*, 2014; Senties-Herrera y Gómez-Merino, 2014).

CONCLUSIONES

Los desafíos que enfrenta actualmente la industria azucarera nacional requieren de reformas estructurales y coyunturales que permitan generar políticas públicas encaminadas a impulsar iniciativas de diversificación de los productos actuales en mercados diversos, además de coproductos y derivados de subproductos a través de estrategias eficientes, competitivas y amigables con el ambiente. Para ello, el sector requiere de la implementación de innovaciones, así como de desarrollos tecnológicos de investigación científica, a través de enfoques multidisciplinarios, interdisciplinarios y transdisciplinarios (Gómez-Merino *et al.*, 2014c). La necesidad de transformar la industria azucarera constituye una prioridad nacional y esta transformación podría enfocarse a la producción de alimentos alternativos, de insumos para la industria química y sucroquímica; por ejemplo, la generación de bioenergía, alimentos y piensos para ganado, entre otras, bajo un enfoque de desarrollo regional sustentable y con responsabilidad social.

LITERATURA CITADA

- Aguilar-Rivera N. 2009. Diversificación productiva de la industria azucarera ¿Reto tecnológico, económico o social? *Mundo Siglo XIX* 18: 53-66.
- Aguilar-Rivera N. 2013. Análisis de productividad de etanol de caña de azúcar en ingenios azucareros de México. *Ciencia Ergo Sum* 20: 17-28.
- Aguilar-Rivera N., Rodríguez-Lagunes D.A., Castillo-Morán A. 2010. Azúcar, coproductos y subproductos en la diversificación de la agroindustria de la caña de azúcar. *VirtualPro Procesos Industriales* 106: 1-28.
- Aguilar-Rivera N., Rodríguez-Lagunes D.A., Castillo-Morán A., Herrera-Solano A. 2012. Sucroquímica, alternativa de diversificación de la agroindustria de la caña de azúcar. *Multiciencias* 12: 7-15.
- Aguilar-Rivera N., Houbbron J.E., Espinosa-López R.A. 2014. Análisis de la capacidad de diversificación de zonas productoras de caña de azúcar por metodologías Emergy, análisis de ciclo de vida y evaluación multicriterio. *Revista Centro Azúcar* 41: 65-81.
- Brunstein I. 1994. Uma proposta de modelagem economica de processos com producao de produtos conjuntos. En: *Anais do 10º Congresso Brasileiro de Engenharia Química*. Sao Paulo, 13 a 16 de septiembre de 1994. Sao Paulo: USP: 1149-1152.
- CONADESUCA. 2016. Diversificación de la caña de azúcar para otros fines. Nota Técnica Informativa del sector de la caña de azúcar. <http://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/114368/CAMBIOSNotaABRIL2016.pdf>
- Dal-Bianco M., Sampaio-Carneiro M., Takeshi-Hotta C., Giacomini-Chapola L., Hoffmann H.P., Franco-García A.A., Mendes-Souza G. 2012. Sugarcane improvement: How far can we go? *Current Opinion in Biotechnology* 23: 265-270.
- de la Torre M.M. 1989. Biotecnología y el aprovechamiento de los derivados de la caña de azúcar. GEPLACEA-PNUD. México.
- Enríquez-Poy M. 2016. Historia, actualidad y futuro de la agroindustria de la caña de azúcar en México. Memoria del XXXVIII Convención ATAM y 10º Congreso ATALAC. Conferencia Magistral.
- FAOSTAT. 2016. Datos. Producción. Cultivos. Caña de Azúcar. <http://www.fao.org/faostat/es/#data/QC>
- Gálvez T.L. 2000. Manual de los Derivados de la Caña de Azúcar. Instituto Cubano de Investigación de los Derivados de la Caña de Azúcar, La Habana, Cuba. 485 p.
- García-Chávez L.R. 2011. Análisis del mercado de los edulcorantes en México. Universidad Autónoma Chapingo. México. <http://www.conadesuca.gob.mx/politica%20comercial/estudiosy analisis del sector/ analisis del mercado de edulcorantes en mexico.pdf>
- Gómez-Merino F.C., Trejo-Téllez L.I., Senties-Herrera H.E. 2014a. Sugarcane as a Novel Biofactory: Potentialities and Challenges. In: R. Guevara-González, I. Torres-Pacheco (Eds.). *Biosystems Engineering: Biofactories for Food Production in the Century XXI*. Springer, Cham, Switzerland. pp. 129-149. doi: 10.1007/978-3-319-03880-3_5
- Gómez-Merino F.C., Trejo-Téllez L.I., Senties-Herrera H.E. 2014b. Innovaciones biotecnológicas en caña de azúcar para potenciar su uso como biofábrica. *Revista ATAM* 27: 33-41.

- Gómez-Merino F.C., Trejo-Téllez L.I., Morales-Ramos V., Salazar-Ortiz J., Velasco-Velasco J., Senties-Herrera H.E., Ladewig, P. 2014c. Necesidades de innovación en la producción de caña de azúcar (*Saccharum* spp.). *Agroproductividad* 7: 22-26.
- Gómez-Merino F.C., Senties-Herrera H.E. 2015. Manual para la identificación varietal de caña de azúcar. Colegio de Postgraduados. Texcoco, México. 40 p.
- Gómez-Merino F.C., Trejo-Téllez L.I., Senties-Herrera H.E., Pérez-Sato J.A., Salazar-Ortiz J. 2015. La caña de azúcar ofrece más que Azúcar: Oportunidades de Diversificación. *Agroentorno* Vol. 166 No. 18: 24-25.
- Guo H.C., Chen B., Yu X.L., Huang G.H., Liu L., Nie X.H. 2006. Assessment of cleaner production options for alcohol industry of china. *Journal of Cleaner Production* 14: 94-103.
- INFOCAÑA. 2017. Cierre de Zafra 2015-2016. <http://www.campomexicano.gob.mx/azcf/reportes/reportes.php?tipo=CIERRE>
- Moore P.H. 2009. Sugarcane Biology, Yield, and Potential for Improvement. *In: Proceedings of the Workshop BIOEN on sugarcane improvement. Sao Paulo, Brazil. March 2009.* http://www.fapesp.br/pdf/bioen1803/Bioen_Moore.pdf
- Moore P.H., Paterson A.H, Tew T. 2014. Sugarcane: the crop, the plant and domestication. *In: P. H. Moore, F. C. Botha (Eds.). Sugarcane: physiology, Biochemistry and functional biology.* John Wiley, New York, NY, USA. pp. 1-17. doi: 10.1002/9781118771280.ch1.
- OCDE-FAO. 2013. Perspectivas Agrícolas 2013-2022. <http://www.fao.org/docrep/018/i3307s/i3307s.pdf>
- PRONAC. 2014. Programa Nacional de la Agroindustria de la Caña de Azúcar. Diario Oficial de la Federación. Federación. 02-05-2014. http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5343244&fecha=02/05/2014
- Senties-Herrera H.E., Gómez-Merino F.C. 2014. Nuevas directrices en mejoramiento genético de caña de azúcar (*Saccharum* spp.). *Agroproductividad* 7: 9-15.
- Senties-Herrera H.E., Gómez-Merino F.C., Valdez-Balero A., Silva-Rojas H.V., Trejo-Téllez L.I. 2014. The Agro-Industrial Sugarcane System in Mexico: Current Status, Challenges and Opportunities. *Journal of Agricultural Science* 6: 26-55.
- Senties-Herrera H.E., Trejo-Téllez L.I., Gómez-Merino F.C. 2017. The Mexican Sugarcane Production System: History, Current Status, and New Trends. *In: R. Murphy (Ed.). Sugarcane: Production Systems, Uses and Economic Importance.* Nova Publishers, New York, USA. pp. 39-71.
- Viniegra G.G. 2007. La tecnología mexicana al servicio de la industria casos de éxito presentados en los seminarios regionales de competitividad 2005-2006. Foro Consultivo Científico y Tecnológico 2007. México, D. F.
- Yadav D.V., Jain R., Rai R.K. 2010. Impact of Heavy Metals on Sugarcane. *In: I. Sherameti, A. Varma (Eds.). Soil Heavy Metals-Soil Biology.* Springer, Heidelberg, Germany. pp. 339-367. doi: 10.1007/978-3-642-02436-8.
- ZAFRANET. 2017. Caña de azúcar y agroenergías. Productores Cañeros. <https://www.zafranet.com/productores-caneros/>



SUBPRODUCTOS, COPRODUCTOS Y DERIVADOS DE LA AGROINDUSTRIA AZUCARERA

BYPRODUCTS, COPRODUCTS AND DERIVATIVES OF THE SUGAR AGROINDUSTRY

Aguilar-Rivera, N.^{1*}; Debernardi-Vázquez, T.J.¹; Herrera-Paz, H.D.¹

¹Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias. Universidad Veracruzana. Carretera Peñuela Amatlán de los Reyes km 1. Amatlán de los Reyes, Veracruz México. C. P. 94945.

*Autor de correspondencia: naguilar@uv.mx

RESUMEN

El uso de coproductos y subproductos para obtener derivados de la agroindustria azucarera son elementos emergentes que están acelerando la competitividad del sector. En la literatura especializada la diversificación puede apreciarse en numerosos estudios, considerándolo como eje estratégico dentro del paradigma tecno-económico. Sin embargo, los hallazgos continúan siendo fragmentados y sujetos a controversias, y no existe consenso respecto al concepto, definición y forma de establecer una estrategia adecuada para implementarla. En este trabajo se hace una revisión de los usos de la caña, subproductos, coproductos y derivados, innovaciones tecnológicas desde un contexto histórico, socioeconómico y tecnológico, y se analizan las perspectivas del sector cañero-azucarero dentro del paradigma de la bioeconomía, los bioproductos y las biorefinerías.

Palabras clave: *Saccharum* spp., competitividad, bioeconomía.

ABSTRACT

The use of coproducts and byproducts to obtain derivatives from the sugar agroindustry are emerging elements that are accelerating the competitiveness of the sector. In the specialized literature diversification can be appreciated in numerous studies, considering it as a strategic axis within the techno-economic paradigm. However, the findings continue to be fragmented and subject to controversy, and there is no consensus with regard to the concept, definition and way of establishing an adequate strategy to implement it. A review is presented in this study of the uses, byproducts, coproducts and derivatives of sugar cane, as well as the technological innovations from a historical, socioeconomic and technological context; and the perspectives of the sugar cane sector are analyzed within the paradigm of bioeconomy, bioproducts and biorefineries.

Keywords: *Saccharum* spp., competitiveness, bioeconomy.

INTRODUCCIÓN

Los modelos

de producción azucarera y derivados convencionales de la caña como el piloncillo, aguardiente, miel de trapiche, azúcar estándar, mascabado, blanco popular, refinado, melazas, etanol de 96° G. L. y 99.6° G. L., abonos orgánicos, cenizas de calderas y vinazas de destilería para fertirrigación han sido materias primas o insumos, desde el siglo XX, para empresas convencionales, tales como celulosa, papel, alimentos y bebidas, ácidos orgánicos y compostas, entre otros. Su uso surgió en la llamada “Revolución del azúcar” y triángulos de comercio (azúcar, ron y esclavos) en los siglos XVI y XVII como una de las industrias más antiguas del mundo, pionera en la revolución industrial, en la variedad de productos y la administración de la producción. Un paso decisivo en la tecnología del azúcar se produjo con la invención del trapiche vertical de tres rodillos, *trapetto* (se atribuyen su invención a Pietro Speciale, prefecto de Sicilia en 1449, y al saber agronómico árabe-andaluz, que era impulsado por agua o tracción animal) (Deerr y Brooks, 1940). Este trapiche podía ser operado por dos o tres personas que pasaban la caña por los rodillos de ida y de regreso. Por otra parte, ingenio, engenho, es el modo de sacar el azúcar de las cañas o ingenio de azúcar. Von Wobeser (1990) mencionó que se llamaba ingenio a las haciendas cuyo equipo de molienda utilizaba como fuerza motriz el agua y producían azúcar; por otra parte, se le llamaba trapiches a los que empleaban fuerza animal y producían piloncillo. El trapiche era un molino de dos o tres rodillos de tamaño minúsculo y con bajos costos de producción, siendo su objetivo principal la panela, mientras que el ingenio constituía una verdadera fábrica, con grandes inversiones e infraestructura, y trabajadores bajo algún régimen laboral, destinado a la producción de azúcar blanca.

Entonces, la diferenciación de la producción azucarera surgía a partir de la relación existente entre la población trabajadora, la superficie cultivada y el tipo de derivado de la caña de azúcar producido (Sánchez-Santiró, 2006). Como resultado de casi 500 años de producción de caña en México, el impacto ambiental y los usos de los subproductos no solo han modelado gran parte de los paisajes sociales en México (las estructuras sociales, la organización del territorio, la dinámica demográfica, las características del mercado de trabajo, etcétera); también ha incidido en la cultura y cosmovisión hacia el monocultivo de caña de azúcar y la mono producción de azúcar. Esto se debe en gran parte a la relación entre la producción del azúcar y su consumo, que cambió con el tiempo, y los usos que se le atribuyeron al producto, primeramente como artículo de lujo o especia, inclusive medicina, y posteriormente como integrante de la canasta básica de la población. Desde su introducción en el siglo XVI hasta el día de hoy, el azúcar alteró su relación con otros alimentos con los que se combinó (café, chocolate, conservas) y otros a los que finalmente llegó a reemplazar, tales como piloncillo, miel de trapiche, miel de abeja, principalmente (Mintz, 1996). La tradicional agroindustria azucarera o cadena del azúcar consta de siete grandes eslabones en relación con el producto final, azúcar: 1) El cultivo y la cosecha de caña; 2) El transporte de la caña cortada a la fábrica o al ingenio; 3) La comercialización del producto mediante los intermediarios o de manera directa; 4) El transporte del producto terminado; 5) La comercialización para el consumo

directo; 6) El uso en industrias como el pan, la confitería y las bebidas y 7) El consumidor final.

Diversificación o reconversión de la agroindustria azucarera

De acuerdo con Bhatnagar et al. (2016), el aumento en la producción de caña de azúcar para azúcar, etanol y energía implica un incremento de subproductos de la agroindustria azucarera; sin embargo, trae como consecuencia graves problemas debido a la falta de soluciones sostenibles para su gestión como materia prima en biorefinerías. De acuerdo con Aguilar-Rivera et al. (2014) se requiere atención de forma multidisciplinaria para transformarlos en materias primas y reducir al mínimo la contaminación ambiental y riesgos de salud. Es decir, utilizando criterios de ahorro de energía y potencial de emisiones de CO₂ con opciones tecnológicas básicas, como (1) utilización de exceso de aguas residuales para mayor imbibición; (2) aprovechamiento del calor residual para el enfriamiento térmico; (3) utilización del bagazo en exceso para pellets; y (4) modificación de la unidad de cogeneración para generación de energía eléctrica (Birru et al., 2016). Para la diversificación de la agroindustria azucarera están involucrados múltiples actores con diferentes objetivos, estrategias y percepciones. Desde los inicios de esta actividad, en lo que fue el Virreinato de la Nueva España, se han empleado indistintamente los términos diversificación, reconversión, reingeniería, reestructuración, producciones colaterales y otros para definir a los procesos, estrategias, políticas, tendencias y alternativas que tengan como fin generar nuevas producciones de la tradicional agroindustria azucarera, obteniendo derivados de los subproductos

de mayor valor agregado y acceso a diversos mercados; es decir, una agroindustria o biorefinería de la caña de azúcar multipropósito y multiproductiva. En este sentido, bagazo, melazas, torta de filtro o cachaza, cenizas de calderas, paja y cogollo, gases de combustión, vinazas y aguas residuales son productos colaterales a la producción azucarera y constituyen los *subproductos* de esta agroindustria. En cuanto a la melaza y etanol son coproductos de la producción de sacarosa y se denominan *derivados* de la caña de azúcar, definidos como bienes obtenidos industrialmente a partir de los subproductos y coproductos de la agroindustria azucarera (Gálvez, 1990). Esto se deriva del hecho de que desde sus inicios la agroindustria azucarera mexicana se organizó sobre la base de un modelo integrado “verticalmente”, en el sentido de que la hacienda (explotación agraria) agrupaba a las áreas agrícolas productoras de los insumos básicos para la fabricación de azúcar y otros derivados, tales como aguardiente, panocha, piloncillo y mieles, en tanto que las instalaciones fabriles (ingenios o trapiches) absorbían la totalidad de la producción cañera generada por una gran cantidad de pequeños y medianos productores agrícolas y no existían empresas que utilizaran subproductos de la agroindustria azucarera, a excepción del aguardiente (Sanchez-Santiró, 2006).

De acuerdo con Crespo *et al.* (1988), la primera información precisa de la utilización de bagazo como subproducto en amplia escala como combustible data de 1827, a raíz de la necesidad de aprovisionamiento de combustible y la sobreexplotación de los montes cercanos al ingenio para proveer leña. Los subproductos resultantes del proceso de trapiche (bagacillo, cenizas y el tlazol) eran empleados en el campo, ya que al abrir terrenos vírgenes al cultivo se procedía a eliminar la selva mediana y la maleza. En terrenos ya cultivados, la plantación se iniciaba con la quema de rastrojos sobrantes del ciclo anterior que no habían sido empleados como forraje, y las cenizas resultantes se esparcían a manera de abono al trapiche. Las cenizas provenientes de la quema de bagazo en la hornalla mezclada con estiércol completaban el abono del terreno. Las socas y resocas (rebrotos de la planta de caña) eran empleadas para alimentación de ganado. A finales del siglo XIX, la Revolución Industrial sustituyó la tecnología simple de los primitivos trapiches por plantas industriales de alta complejidad, ingenios modernos, centrales o el nuevo ingenio mecanizado, con todos los cambios tecnológicos, desde la entrada de la caña al batey, hasta el envase del producto final. Esta época marcó el desarrollo concreto de la moderni-

zación del aparato productivo de las haciendas azucareras de México y se dio en cuatro periodos para la generación de valor a partir de hornos abastecidos con leña, bagazo, carbón mineral y, posteriormente, petróleo. Cada uno de estos periodos estaría caracterizado por la incorporación de nueva maquinaria en la industria. El primero sería el de la aplicación del vapor y centrífugas a la producción de mascabado; el segundo, la adaptación de serpentines para calentar hornillas; el tercero, la introducción de motores y aparatos de vacío; y, finalmente, el nuevo sistema de molienda (Pucci, 2001).

En 1924, *The International Society of Sugar Cane Technologists* (ISSCT) se estableció como una asociación de científicos, tecnólogos, instituciones y compañías relacionadas con el avance tecnológico de la industria de la caña de azúcar y sus coproductos. En las primeras etapas de la diversificación, las materias primas utilizadas eran los residuos industriales y los de la cosecha; luego fueron los productos intermedios del proceso azucarero y en la segunda etapa (segunda mitad del siglo XX), propiamente el azúcar, que generó opciones productivas. Con la creación de plantas industriales de importancia, el inicio del desarrollo de los derivados inició en la década de 1930, y empezaron a realizarse esfuerzos tecnológicos significativos para hacer de los residuos de la fabricación de azúcar una fuente de materias primas competitiva para las industrias de pulpa y papel, fermentaciones y tableros (Paturau, 1969). El estudio de las reacciones químicas y las propiedades de la sacarosa, tales como la materia prima (sucroquímica), iniciaron en 1943 al organizarse *The Sugar Research Foundation*. A pesar de que la molécula de sacarosa se ha estudiado exhaustivamente desde principios del siglo XX, realizándose infinidad de investigaciones y obteniéndose numerosos productos a escala de laboratorio, el desarrollo industrial de sus derivados ha sido poco, registrando un desarrollo potencial a principios del siglo XXI (Höfer, 2015). A estos antecedentes se agrega la situación geopolítica del país de Cuba y la creación del Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar (ICIDCA) en 1963, cuyo objetivo es brindar el soporte científico al desarrollo de las tecnologías que permitan el aprovechamiento integral y diversificado de la caña de azúcar. El concepto de diversificación en la industria azucarera ha ido evolucionando, desde producciones con tecnologías simples hasta las más recientes, basadas en la química sintética, la biotecnología y en los procesos de obtención de nuevos materiales (Almazan, 1998). En 1974 se estableció en México la creación de

un organismo regional azucarero, el Grupo de Países Latinoamericanos y del Caribe Exportadores de Azúcar, GEPLACEA, con 23 miembros, el cual alcanzó una considerable importancia en el mundo azucarero por sus acciones en entrenamiento e investigación, así como en la difusión de trabajos y estudios sobre la misma a nivel mundial en el campo de los derivados de la caña de azúcar (Cerro, 2006). De acuerdo con Rivera de Castillo (1980), los subproductos de la industria azucarera comienzan a tener importancia en los países productores en el siglo XX, debido a la crisis energética, el precio del petróleo y sus derivados. Se establecen diversos centros de investigación en caña de azúcar en los cinco continentes, se desarrolla el *Know How* de los usos de los subproductos de la industria azucarera, se organizan congresos de diversificación, generan patentes, publicaciones científicas y libros sobre los derivados de la caña a nivel mundial (Figura 1).

Los trabajos de Aguilar-Rivera (2010; 2012; 2013; 2014a; 2014b; 2014c) han demostrado el desarrollo agroindustrial, estudios de potenciación, propiedades fisicoquímicas y disponibilidad de subproductos, así como los factores limitantes hacia la transición a una biorefinería y utilización sostenible de los subproductos, tales como materia prima en lugar de residuos a tratar. Sin embargo, pocos estudios se han focalizado en evaluar cómo este potencial podría lograr transformar un ingenio azucarero convencional, donde el producto principal es el azúcar para alimento, en una planta diversificada eficiente que contribuya a reducir el consumo de energía fósil y alcanzar la competitividad. Anteriormente, los usos más generalizados que se



Figura 1. Publicaciones básicas de la diversificación de la agroindustria azucarera.

daban al bagazo y residuos de cosecha eran como combustible, a las melazas exclusivamente en la fabricación de aguardiente y como alimentación al ganado. Sin embargo, el término diversificación es el más empleado en la literatura científica como “Keyword” y parte del “*Know How*” para definir producciones colaterales o secundarias de la materia prima: caña de azúcar, diferentes a la sacarosa y a la reconversión industrial, para aquellas transformaciones en el sector fabril que tengan como fin la minimización y el uso de subproductos y residuos en otras producciones, a la par de las tradicionales, que genere una rentabilidad económica y la creación de ventajas competitivas. Sin embargo, los factores que han restringido o fomentado la diversificación de la industria azucarera (precios del azúcar y petróleo, tecnología, materias primas, costos de producción, impacto ambiental, etcétera), se han traslapado cíclicamente a través de la historia del edulcorante.

Desde una perspectiva más amplia, en relación con los factores determinantes de la diversificación del sector, el mercado no se limita al azúcar sino que existen los productos secundarios tradicionales

derivados del jugo de la caña, tales como vinaza, alcohol y aminoácidos. Adicionalmente, los productos derivados de la fibra de la caña representan insumos para aminoácidos, alimento animal, papel, combustible, detergentes, aceites lubricantes y pinturas. Son mercados a los que se ha dado poca importancia hasta la fecha y donde hay oportunidades no explotadas. A lo anterior se suma el mercado de los productos energéticos, conformados por la cogeneración de energía eléctrica, etanol, biodiesel y gas sintético. Esta área de oportunidad se puede calificar como totalmente no explotada en términos económicos por la industria, por razones diversas, ya sea por las regulaciones limitativas en torno a la generación de la energía, por la ausencia de una visión estratégica hacia el sector, o por las visiones empresariales poco emprendedoras (Mertens, 2008). Se trata de combinar el aprovechamiento de la caña y la utilización de los subproductos de la agroindustria azucarera. La diversificación equivale al uso integral de la caña de azúcar, la optimización del uso de los subproductos de la fabricación de azúcar y el uso del azúcar en sí como materias primas para su transformación en otros productos

valiosos desde el punto de vista de su repercusión económica y social, como etanol (99.6° G. L.), para mezclarlo con gasolina, biodiesel, cogeneración de energía, productos orgánicos o rústicos en su apariencia (panela en trozo, pulverizado, azúcar mascabado, azúcar saborizada, entre otros). También equivale al uso óptimo de la tierra dedicada a este cultivo; por ejemplo, mediante la introducción de cultivos intercalados o en rotación. En ningún caso se debe entender que la diversificación significa la sustitución de la caña de azúcar por otros cultivos (Silalertruksa *et al.*, 2015; Sabatier *et al.*, 2015; Lora *et al.*, 2014a; 2014b; Zamora *et al.*, 2013; de Jong *et al.*, 2012). La agroindustria azucarera puede ser el instrumento decisivo en el desarrollo industrial y agrícola de los países productores en las décadas por venir y, por lo mismo, con la diversificación se satisfacen renglones de consumo vital de las industrias de alimentación, farmacéutica, papelería y productos químicos (Cuadro 1).

A pesar de las ventajas de tipo económico, social y ambiental que ocasionaría el aprovechamiento de los residuos de la industrialización de la caña de azúcar y de que existe un marco legal estructurado sobre bases históricas y coordinado con lo realizado en otros países productores de caña, y que en varias universidades y centros de investigación no corresponden aún con el nivel de utilización en las regiones cañeras. Los desafíos económicos de la agroindustria azucarera se focalizan en dos frentes. En primer lugar, la inestabilidad de los precios del azúcar en el mercado mundial y la competencia con diversos edulcorantes de alta intensidad. En segundo lugar, la diversificación de la estructura productiva del monocultivo de caña de azúcar y de los subproductos del ingenio (bagazo, melaza, vinaza, lodo de filtros y

cenizas de caldera), como opción para mejorar la productividad y, en definitiva, la competitividad regional, utilizando los equipos existentes, infraestructura y la creciente especialización, consecuencia de la posible demanda que tendrán los derivados de la caña en el mundo en los que se han propuesto esquemas de diversificación que van desde el menor hasta el mayor valor agregado en una biorefinería. Por lo tanto, los proyectos de diversificación deben partir del conocimiento científico de los coproductos, subproductos y derivados, del balance energético y de materiales en los ingenios azucareros y de los mercados de derivados de la caña de azúcar, en la premisa de la complejidad y en la necesidad de explorar y entender un tejido de relaciones complejas para establecer alternativas productivas en los ingenios azucareros y empresas derivadas al incorporar variables agroindustriales, de forma integradora y no individual bajo el concepto de biorefinería. Existen otros modelos de diversificación de la agroindustria azucarera mundial que se encuentran ampliamente documentados y probados (Eggleston y Lima, 2015), mismos que han planteado que la producción de derivados de la caña es una opción que debe considerarse, en especial en el contexto actual en que ha disminuido drásticamente la productividad del negocio que sirve como soporte principal de la monoproducción de azúcar y a que en México se requieren en promedio 9.1 t de caña, equivalentes a 0.133 hectáreas cosechadas (con un valor extremo de 12.16 y 0.186 respectivamente) para producir una tonelada de azúcar base estándar (Figura 2) y para la diversificación, una productividad sostenible y competitiva de materia prima y, por lo tanto, de

Cuadro 1. Derivados de la agroindustria azucarera.

Material	Producción comercial
Residuos de cosecha, bagazo y médula (Subproductos)	Energía y vapor, pulpa y papel, tableros de partículas, fibras y cemento cartón, furfural y derivados, alfa-celulosa, bagazo hidrolizado y pre-digerido, carboximetil celulosa y derivados, productos moldeados, Syngas (CO+H ₂), ligninas sulfonadas, fenoles, carbón activado, etanol de segunda generación, azúcares fermentables, xilosa, xilitol, hongos comestibles, alimento animal, compostas, materiales compuestos (composites), pellets, lignina, biogás, BioOil, entre otros.
Melazas y sacarosa (Coproductos)	Etanol combustible y alcohóquímica, alcoholes de diverso peso molecular, ron y aguardiente, acetona, butanol, levadura para el consumo humano y panadería, autolizados de levadura, torula, invertasa, melaza de alta proteína, alfa-amilasa, <i>Azotobacter</i> , <i>Rhizobium</i> , CO ₂ , biopesticidas, L-lisina, levadura hidrolizada. Giberelinas, goma xantana, concentrado de proteínas, glucomananos, betagluconos, <i>Beauveria bassiana</i> , penicilinas, <i>Trichoderma</i> , <i>Azospirillum</i> , dextranasa, celulasa, inoculante láctico, citocinina, fitohormonas, ferridextrano, glucosa, sorbitol, ácidos (acético, jasmónico, cítrico, indolacético, glutámico, succínico, itacónico, adípico, aspártico, levulínico, láctico), sucroquímica, bioplásticos, 5-hidroximetil furfural, glutamato monosódico, entre otros.
Cachaza (lodo de filtros) (Subproducto)	Compostas, alimento pecuario, ceras, fitosteroles, entre otros.

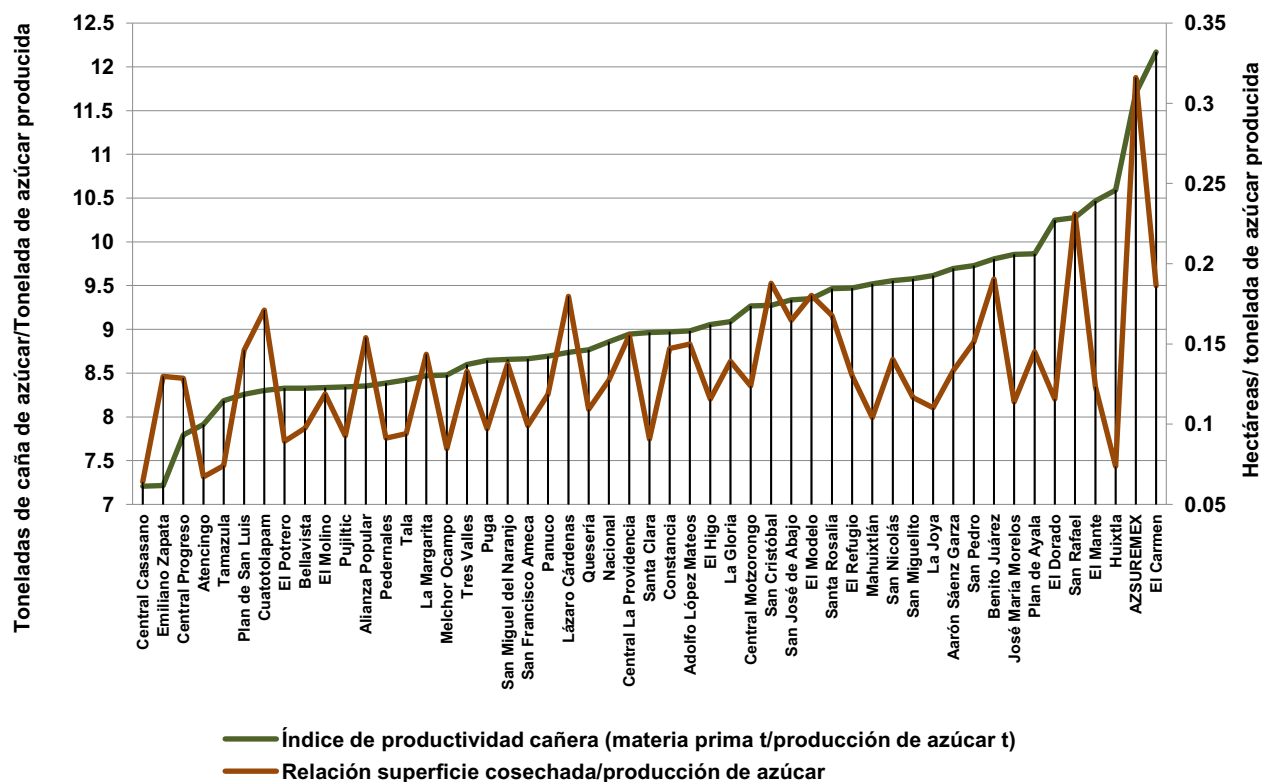


Figura 2. Productividad de la agroindustria azucarera (CONADESUC, 2016).

subproductos es una condición indispensable.

De acuerdo con Cimoli (2005) e Imbs y Wacziarg (2003), dentro de este paradigma tecno-económico la diversificación de la agroindustria azucarera nacional presenta una ruptura en el proceso que va de la especialización mono productiva (caña y sacarosa) a la diversificación productiva (en campo, fábrica y mercados). Los empresarios no pueden apropiarse de todos los aspectos que generan valor registrados en la literatura científica, patentes y desarrollos tecnológicos de países líderes, debido a que invierten poco en la experimentación e investigación necesaria para descubrir nuevas oportunidades de diferenciación durante la creación de un nuevo producto derivado de la caña de azúcar vía la imitación y, en consecuencia, el proceso de diversificación productiva y el desarro-

llo del sector se estancan al no transitar a la generación de conocimiento propio después de la adaptación y no determina la dirección del desarrollo económico y social de la zonas cañeras que se espera hasta el día de hoy. La literatura reciente sobre la diversificación o biorefinerías de la caña de azúcar se refiere a bioprocesos, bioproductos y bioeconomía, conceptos enmarcados en la llamada Revolución "6BIO": bioazúcar, bioelectricidad, biocombustibles, bioproductos, bioagua y biofertilizante, por razones de sostenibilidad. Esta situación cambió la perspectiva de la caña de azúcar: permitió a este cultivo alcanzar una dimensión nueva, superior, y generar un ciclo de nuevas empresas, derivadas de productos tradicionales y nuevos (Olivério et al., 2010). El procesamiento de jugo o melaza en etanol es el primer paso hacia una biorefinería de caña de azúcar (Gheewala et al., 2016), aunque una mejor inversión estratégica con los avances en tecnología sería el aumento de la producción de electricidad con nuevos sistemas de cogeneración, procesos de primera y segunda generación de etanol; a la par de la producción de azúcar, esto tendría el impacto positivo de la diversificación, lo que representa, entre otros factores, que la biorefinería de la caña de azúcar puede aumentar las rentabilidad con un atractivo ecológico (Albarelli et al., 2014). Diversos autores (Martínez-Guido et al., 2016; Cristóbal et al., 2016; de Souza Dias et al., 2015; Ahmed et al., 2014) establecen que la nueva fábrica integrada de caña de azúcar o biorefinería con las más avanzadas innovaciones se está llevando a cabo, considerando las jerarquías tecnológicas de primera, segunda y tercera generaciones en bioelectricidad, bioetanol y producción de biodiesel integrado. Sindhu et al. (2016) y Santos et al. (2016) analizaron los últimos avances en investigación básica, desarrollo tecnológico e innovación (*I+D+i*) sobre la bioconversión de residuos de la cosecha de caña

de azúcar y bagazo para productos de valor agregado. También, la sostenibilidad está incorporada en el concepto de la fábrica, resultando en una solución actualizada para un diseño óptimo para la máxima eficiencia y sostenibilidad. De acuerdo con Sarker *et al.* (2016), los sistemas fisicoquímicos y convencionales de conversión de los subproductos cañeros son de capital intensivo, pero no respetuosos con el ambiente. En contraste, los tratamientos biológicos son ecológicos, pero extremadamente lentos. Todavía existen importantes desafíos económicos que deben ser abordados, tales como los microorganismos genéticamente modificados, mejoras en procesos de clonación y secuenciación de genes, y rendimientos a gran escala, entre otros. Al analizar la literatura clásica y reciente sobre el tema se establece que los productos de mayor valor añadido procedentes de la caña de azúcar incluyen biocombustibles, enzimas, ácidos orgánicos y productos de base biológica, donde la nano-biotecnología e ingeniería genética podrían ser tendencias futuras a procesos y productos mejorados. Por lo tanto, ante los avances en *I+D+i* y el desarrollo histórico de los usos de los subproductos de caña de azúcar en derivados es necesario planear varias preguntas: ¿qué caminos tiene la agroindustria azucarera para ser competitiva?, ¿de qué manera podemos incrementar el uso del azúcar, coproductos y subproductos del proceso para la obtención de derivados?, ¿cómo dar a estos un valor añadido?, ¿cuáles son entonces las posibilidades de convertir el azúcar, coproductos y subproductos en derivados?, ¿en productos con valor agregado?

CONCLUSIONES

Los estudios actuales, y especialmente para el caso de México, apuntan hacia la urgente necesidad de diversificar el sector y aprovechar los grandes avances que ya se tienen.

LITERATURA CITADA

Aguilar-Rivera N. 2012. Paradigma de la diversificación de la agroindustria azucarera de México. *Convergencia* 19: 187-213.

Aguilar-Rivera N. 2013. La industrialización de los derivados de la caña de azúcar en México. *Quipu, Revista Latinoamericana de Historia de las Ciencias y la Tecnología* 15: 237-270.

Aguilar-Rivera N. 2014a. Reconversión de la cadena agroindustrial de la caña de azúcar en Veracruz México. *Nova Scientia* 6: 125-161.

Aguilar-Rivera N. 2014b. Índice de diversificación de la agroindustria azucarera en México. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo* 11: 441-462.

Aguilar-Rivera N. 2014c. Gestión de factores limitantes para la diversificación de la agroindustria azucarera. *Revista Venezolana de Gerencia* 19: 66-91.

Aguilar-Rivera N., Herrera-Solano A., Enríquez-Ruvalcaba V., Rodríguez-Lagunes D.A., Castillo-Moran A. 2014. Multidisciplinary Approaches for Analysis of Socio-Economic and Ecological Constraints for Diversification Projects and Sugarcane Biorefineries. *In: P. Gorawala, S. Mandhatri (Eds.). Sugarcane: Production, Consumption and Agricultural Management Systems*. pp. 193-236.

Aguilar Rivera N. 2010. La caña de azúcar y sus derivados en la Huasteca San Luis Potosí México. *Diálogos Revista Electrónica de Historia* 11: 81-110.

Ahmed T., Souad A., Tijani B. 2014. Energetic byproducts of sugar industry. *In: Proceedings of the 2014 International Conference on Composite Materials and Renewable Energy Applications (ICCMREA)*. pp. 1-6. doi: 10.1109/ICCMREA.2014.6843787

Albarelli J.Q., Ensinas A.V., Silva M. A. 2014. Product diversification to enhance economic viability of second generation ethanol production in Brazil: The case of the sugar and ethanol joint production. *Chemical Engineering Research and Design* 92: 1470-1481.

Almazan O.O. 1998. The sugar cane, its by-products and co-products. AMAS 1998. Food and Agricultural Research Council, Réduit, Mauritius, p. XIII-XXV. *In: http://www.gov.mu/portal/sites/ncb/moa/farc/amas98/keynote.pdf*.

Bhatnagar A., Kesari K.K. Shurpali N. 2016. Multidisciplinary approaches to handling wastes in sugar industries. *Water, Air and Soil Pollution* 227: 11. doi:10.1007/s11270-015-2705-y

Birru E., Erlich C., Herrera I., Martin A., Feychting S., Vitez M., Abdulhadi E.B., Larsson A., Onoszko E., Hallersbo M., Weilenmann L., Puskoriute L. 2016. A Comparison of Various Technological Options for Improving Energy and Water Use Efficiency in a Traditional Sugar Mill. *Sustainability* 8: 1227. doi:10.3390/su8121227

Cerro J.A. 2006. Acuerdos especiales. GEPLACEA y la integración Latinoamericana *In: XIV International Economic History Congress, Helsinki, 2006, Session 109*. 13 p.

Cimoli M., Ferraz J.C., Primi A. 2005. Science and technology policies in open economies: the case of Latin America and the Caribbean (Vol. 165). CEPAL - SERIE Desarrollo productivo United Nations Publications. Santiago de Chile. 57 p.

Crespo H. 1988. Historia del azúcar en México. Fondo de Cultura Económica. 2 Tomos. 2da edición México D.F. 1029 p.

Cristóbal J., Matos C.T., Aurambout J.P., Manfredi S., Kavalov B. 2016. Environmental sustainability assessment of bioeconomy value chains. *Biomass and Bioenergy* 89: 159-171.

CONADESUCA. 2016. Infocaña. <http://www.gob.mx/conadesuca>

Deerr N., Brooks A. 1940. The evolution of the sugar cane mill. *Transactions of the Newcomen Society* 21: 1-9.

de Jong E., Higson A., Walsh P., Wellisch M. 2012. Bio-based chemicals value added products from biorefineries. IEA Bioenergy, Task42 Biorefinery. 36 p. <http://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2013/10/Task-42-Biobased-Chemicals-value-added-products-from-biorefineries.pdf>

de Souza Dias M.O., Maciel Filho R., Mantelatto P.E., Cavalett O., Rossell C.E.V., Bonomi A., Leal M.R.L.V. 2015. Sugarcane processing for ethanol and sugar in Brazil. *Environmental Development* 15: 35-51.

Eggleston, G., Lima, I. 2015. Sustainability issues and opportunities in the sugar and sugar-bioprocess industries. *Sustainability* 7: 12209-12235.

- Gálvez L. 1990. La industria de los derivados de la caña de azúcar, ICIDCA/MINAZ / Editorial Científico Técnica. La Habana, Cuba. 576 p.
- Gheewala S.H., Bonnet S., Silalertruksa T. 2016. Environmental sustainability assessment of sugarcane bioenergy. *In*: I. O'Hara, S. Mundree (Eds.). Sugarcane-Based Biofuels and Bioproducts pp. 363-378. DOI: 10.1002/9781118719862.ch14
- Höfer R. 2015. Sugar-and Starch-Based Biorefineries. Industrial Biorefineries and White Biotechnology. *In*: A. Pandey, R. Höfer, M. Taherzadeh, M. Nampoothiri, C. Larroche, C. (Eds.). Industrial biorefineries and white biotechnology. Elsevier. ISBN: 978-0-444-63453-5. pp. 157-236.
- Imbs J., Wacziarg R. 2003. Stages of diversification. *American Economic Review* 93: 63-86.
- Lora E.E.S., Rocha M.H., Palacio J.C.E., Venturini O.J., Renó M.L.G., del Olmo O.A. 2014a. The sugar and alcohol industry in the biofuels and cogeneration era: a paradigm change (Part I). *Zucker Ind. (Sugar Ind.)* 139: 28-36.
- Lora E.E.S., Rocha M.H., Escobar J.C.P., Venturini O.J., Renó M.L.G., Almazán O.O. 2014b. The sugar and alcohol industry in the biofuels and cogeneration era: a paradigm change (Part II). *Zucker Ind. (Sugar Ind.)* 139: 97-104.
- Martínez-Guido S.I., González-Campos J. B., Ponce-Ortega J.M., Nápoles-Rivera F., El-Halwagi M.M. 2016. Optimal reconfiguration of a sugar cane industry to yield an integrated biorefinery. *Clean Technologies and Environmental Policy* 18: 553-562.
- Mertens L. 2008. Hacia el trabajo decente en el sector del azúcar, México Documento de trabajo núm. 259 Oficina Internacional del Trabajo Ginebra Suiza. 83 pp. http://natlex.ilo.ch/wcmsp5/groups/public/---ed_dialogue/---sector/documents/publication/wcms_160869.pdf
- Mintz S.W. 1996. Dulzura y poder, el lugar del azúcar en la historia moderna. Siglo XXI editores México D.F. 299 p.
- Olivério J.L., Carmo V.B., Gurgel M.A. 2010. The DSM-Dedini sustainable mill: a new concept in designing complete sugarcane mills. *In*: Proc. Int. Soc. Sugar Cane Technol. 27: 1-34.
- Paturau J.M. 1969. By-products of the Cane Sugar Industry an Introduction to Their Industrial Utilization. Elsevier Science Publishers B. V. Amsterdam, Netherlands, 274 p.
- Pucci R. 2001. La revolución industrial azucarera en Cuba, Brasil y Argentina. *Tecnología y cambio social (ca. 1870-1930). América Latina en la Historia Económica* 8: 123-149.
- Rivera de Castillo A. 1980. Subproductos y derivados de la industria azucarera, Ciencia y Sociedad, Asociación de Tecnólogos Azucareros. 5: 225-241. <https://repositoriobiblioteca.intec.edu.do/handle/123456789/369>
- Sabatier D., Martiné J.F., Chiroleu F., Roussel C., Letourmy P., Antwerpen R., Benoit G., Ney B. 2015. Optimization of sugarcane farming as a multipurpose crop for energy and food production. *GCB Bioenergy* 7: 40-56.
- Sánchez-Santiró E. 2006. Evolución productiva de la agroindustria azucarera de Morelos durante el siglo XIX: una propuesta de periodización. *América Latina en la Historia Económica* 26: 109-127.
- Santos V.E.N., Ely R.N., Szklo A.S., Magrini A. 2016. Chemicals, electricity and fuels from biorefineries processing Brazil's sugarcane bagasse: Production recipes and minimum selling prices. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 53: 1443-1458.
- Sarker T.C., Azam S.M.G.G., Bonanomi G. 2016. Recent Advances in Sugarcane Industry Solid By-Products Valorization. *Waste and Biomass Valorization* 8: 1-26. doi: 10.1007/s12649-016-9665-3
- Silalertruksa T., Gheewala S.H., Pongpat P. 2015. Sustainability assessment of sugarcane biorefinery and molasses ethanol production in Thailand using eco-efficiency indicator. *Applied Energy* 160: 603-609.
- Sindhu R., Gnansounou E., Binod P., Pandey A. 2016. Bioconversion of sugarcane crop residue for value added products-An overview. *Renewable Energy* 98: 203-215.
- von Wobeser G. 1990. La hacienda azucarera en la época colonial. *Historia Mexicana* 39: 1063-1067.
- Zamora M.M., Suárez E.G., Garriga L.M., Castro E. 2013. Revamping strategy of diversified industry of sugar cane for combined production of bioetanol and co-product. *Revista Facultad de Ingeniería* 66: 189-198.



CADENA DE VALOR DE LA DIVERSIFICACIÓN DE LA AGROINDUSTRIA DE LA CAÑA DE AZÚCAR EN MÉXICO

VALUE CHAIN OF THE DIVERSIFICATION OF THE SUGAR CANE AGROINDUSTRY IN MÉXICO

Aguilar-Rivera, N.*

Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias. Universidad Veracruzana. Carretera Peñuela Amatlán de los Reyes km 1. Amatlán de los Reyes, Veracruz México. C. P. 94945.

*Autor de correspondencia: naguilar@uv.mx

RESUMEN

En México, la caña de azúcar (*Saccharum* spp.), sus productos y subproductos representan una importante actividad económica para la población. La agroindustria azucarera nacional es compleja y los indicadores convencionales empleados para la toma de decisiones hasta la fecha no han logrado determinar cuáles son los puntos críticos del sistema cañero en la transición de ingenios azucareros a biorefinerías y la diversificación en zonas de abasto cañero, ingenios, trapiches y destilerías como estrategia de competitividad y sostenibilidad. En este trabajo se analizan, desde un punto de vista multidisciplinario, los factores limitantes que deben considerarse para el establecimiento exitoso de un programa nacional de reconversión y diversificación en la cadena de valor de la agroindustria azucarera y las opciones productivas que pueden contribuir a incrementar ingresos y rentabilidad a la producción cañera.

Palabras clave: sostenibilidad, competitividad, diversificación.

ABSTRACT

In México, sugar cane (*Saccharum* spp.), its products and byproducts, represent an important economic activity for the population. The national sugar cane agroindustry is complex, and the conventional indicators used for decision making up to date have not managed to determine what are the critical points of the sugar system in the transition from sugar factories to biorefineries and the diversification of cane supply zones, sugar factories, mills and distilleries, as strategy for competitiveness and sustainability. In this study, the limiting factors are analyzed that should be considered for the successful establishment of a national reconversion and diversification program in the sugar agroindustry value chain, as well as the productive options that may contribute to increase income and profitability of sugar cane production.

Keywords: sustainability, competitiveness, diversification.

INTRODUCCIÓN

En la producción de azúcar en México, a lo largo de varias décadas, se ha concebido al ingenio azucarero como un polo de desarrollo regional, alrededor del cual se ordenan las actividades productivas, comerciales y de servicios. Actualmente, la diversificación productiva industrial de la caña de azúcar se reduce a la obtención de azúcar morena o estándar (crudo), blanca o refinada en su mayoría, y mínimamente

te mascabado, etanol, compostas y panela (piloncillo); y al incremento de la superficie cosechada (Figuras 1 y 2), por lo que ha surgido la necesidad de valorar y evaluar el nivel de productividad, competitividad y de reconversión de la agroindustria de la caña de azúcar y el uso de los subproductos (melaza, bagazo, cachaza, cenizas y vinazas) para la supervivencia de esta actividad productiva que históricamente no ha tenido una planificación económica regional, con base en la capacidad de

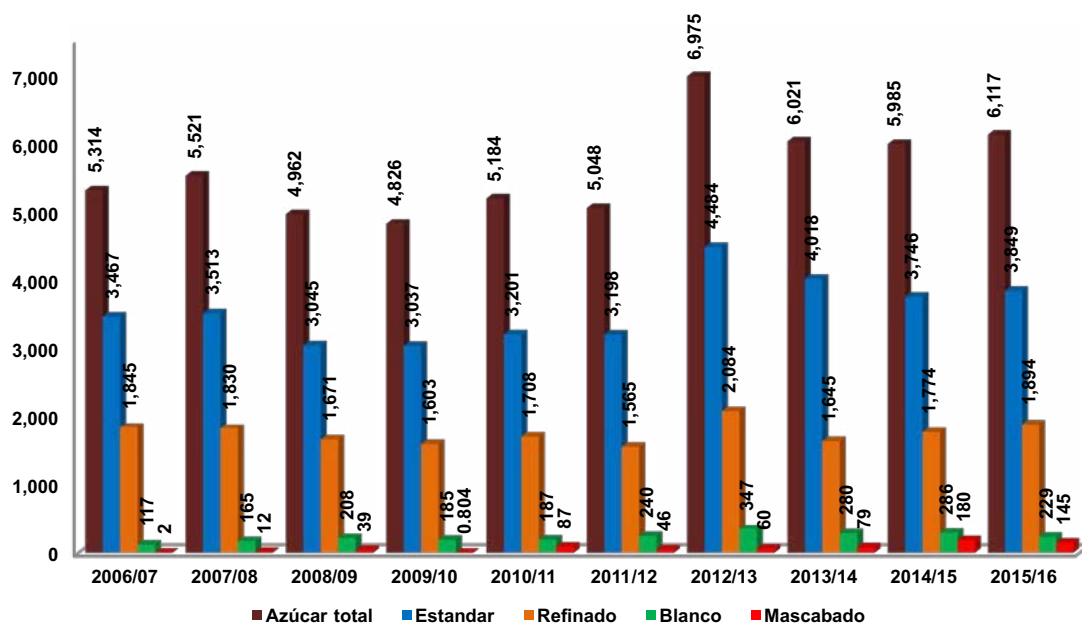


Figura 1. Producción de azúcar en México (miles de toneladas) (con datos de CONADESUCA, 2016).

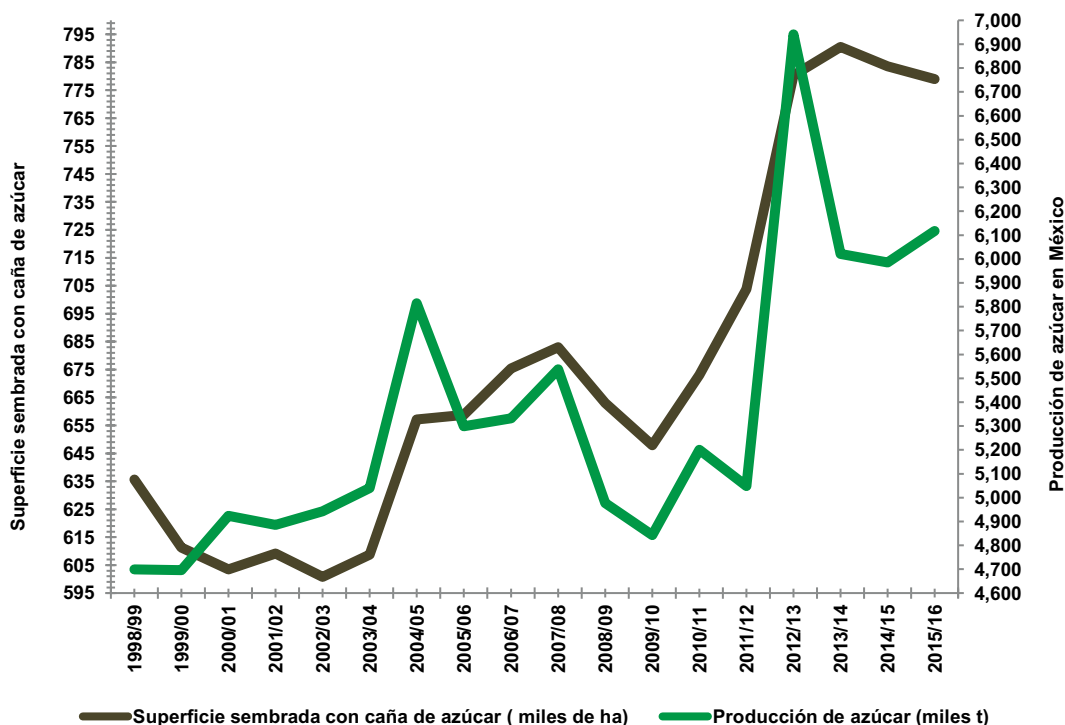


Figura 2. Superficie cañera y producción de azúcar (con datos de CONADESUCA, 2016).

los territorios (aptitud edafoclimática al cultivo de caña de azúcar, infraestructura y políticas públicas) para tener una productividad incrementada en relación con el consumo del azúcar a una tasa similar al crecimiento de la población. Por lo tanto, el desarrollo de proyectos competitivos de diversificación (azúcar, biocombustibles, energía, alimentos pecuarios, químicos, abonos orgánicos) requiere necesariamente una productividad sostenible de caña de azúcar (Figura 3).

En este sentido, los ingenios azucareros en México se encuentran entre las empresas más antiguas de la rama de producción de alimentos y los subproductos son recursos no aprovechados de manera eficiente. En su operación se mezclan aspectos de negociación laboral, cultura productiva, legislación azucarera y énfasis de inversión principalmente en tecnología azucarera, que han complicado el tema de la diversificación productiva. Históricamente, numerosos trabajos (Aguilar-Rivera, 2013; Sánchez-Santiró, 2001; Crespo, 1988) han reportado que las factorías azucareras han realizado acciones para transformar la capacidad productiva, la calidad, dinámica de innovación, diversificación productiva, buenas prácticas de manufactura, métodos de trabajo, gestión del factor humano y minimización de costos. Actualmente, el caso particular del etanol de melazas, mundialmente industrializado como biocombustible, en México es un producto que no ha alcanzado un nivel de sostenibilidad y competitividad debido a diversos factores y, al contrario, tiende a perder rentabilidad puesto

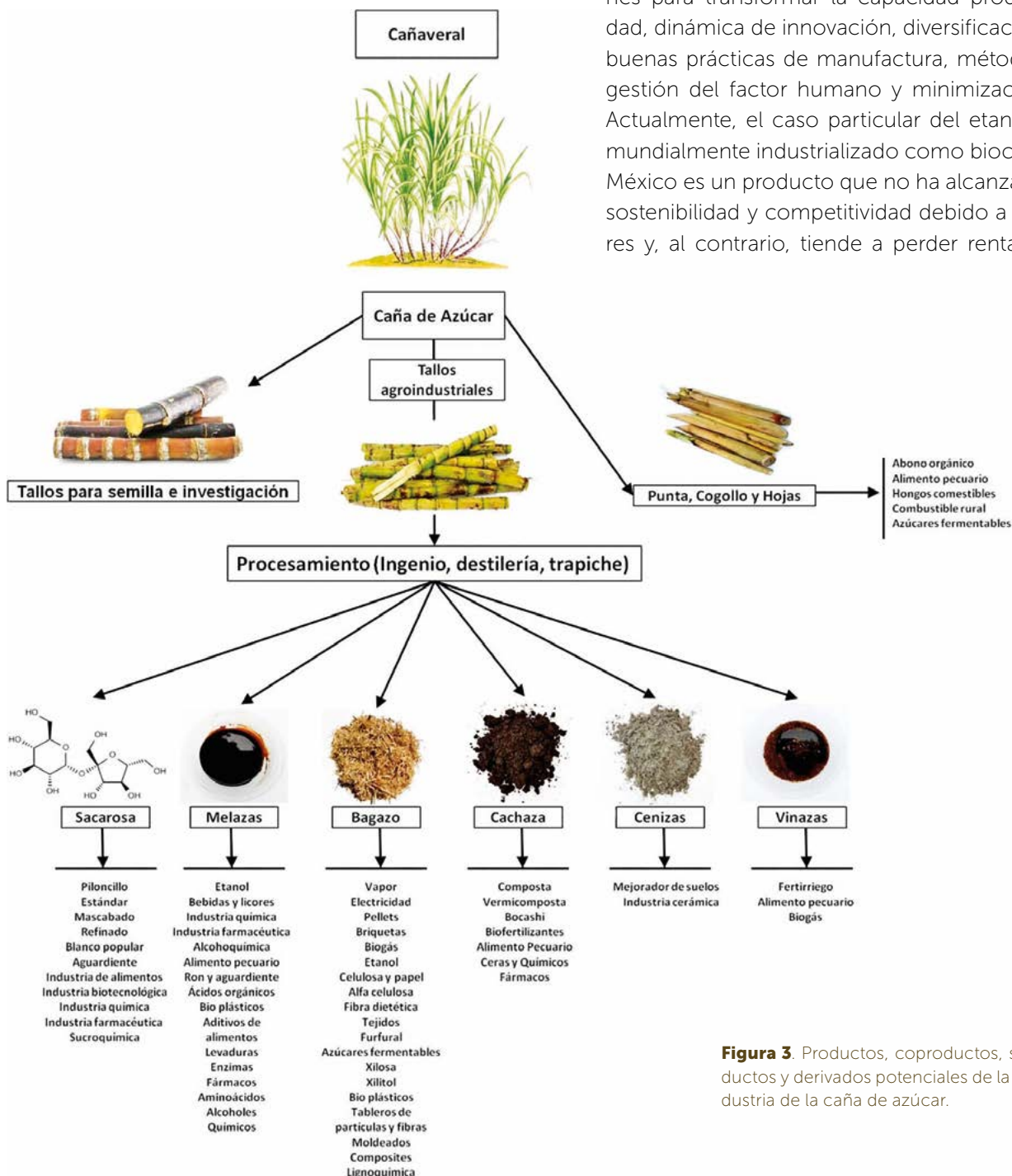


Figura 3. Productos, coproductos, subproductos y derivados potenciales de la agroindustria de la caña de azúcar.

que la materia prima principal, la melaza, se destina a otros usos (García et al., 2016) (Figuras 4 y 5).

Diversificación de la agroindustria azucarera

Derivado de esta situación se deduce que para la agroindustria azucarera existen problemas de conceptualización y medida de la diversificación que hacen difícil contrastar la hipótesis de su relación con los resultados de la empresa (ingenios azucareros, trapiches y destilerías). La utilización de distintos indicadores simples (rendimientos y factores de productividad) conduce a resultados diversos, y la forma en que los investigadores han tratado tradicionalmente este tema (paradigma tecno-económico) es limitada y solo han logrado proporcionar una visión

incompleta y potencial del proceso de diversificación al explicar sus beneficios solo a través de la explotación de economías de alcance, ignorando la contribución de la diversificación relacionada a la ventaja competitiva en el largo plazo. Una gran mayoría de los estudios efectuados (Solomon, 2016) concluyen y generalizan que una diversificación en negocios relacionados con el original (uso de subproductos en el ingenio azucarero o de la caña misma o los residuos de cosecha en el campo cañero) permitiría obtener mejores resultados. En cambio, otros concluyen que es la diversificación no relacionada la que está asociada a mejores resultados empresariales (venta de subproductos). El desarrollar modelos para evaluar la diversificación a escala regional pueden servir como

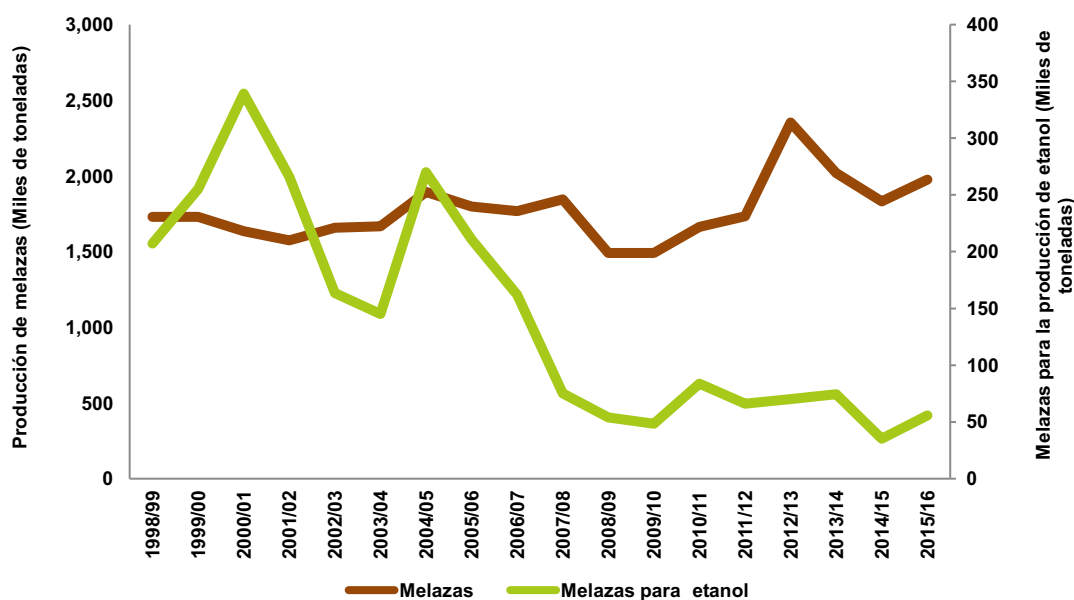


Figura 4. Melazas para la producción de etanol (con datos de CONADESUCA, 2016).

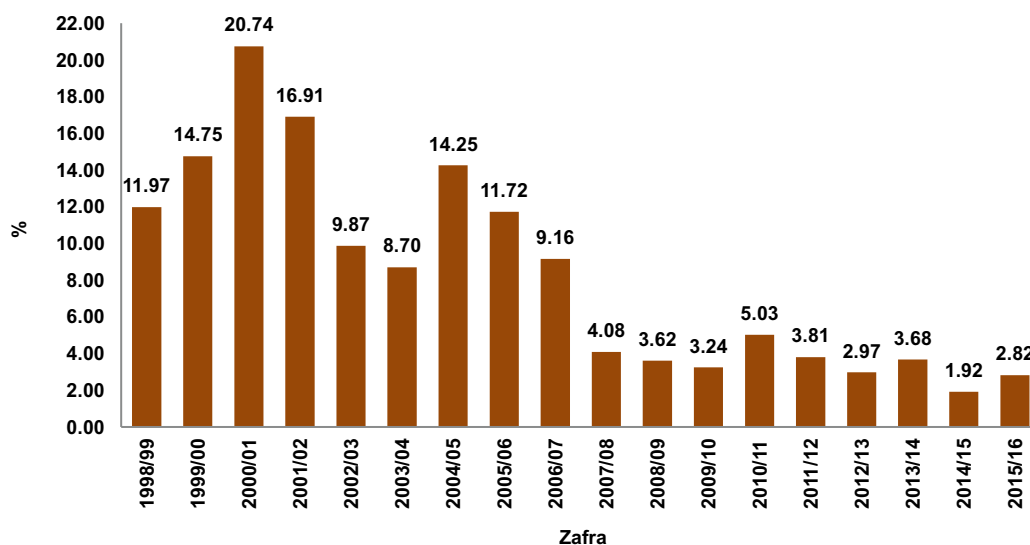


Figura 5. Melazas para la producción de etanol (%) (CONADESUCA, 2016).

una herramienta de planificación y evaluación del riesgo para ayudar a decidir cuándo, dónde y cómo estos sistemas pueden contribuir al desarrollo del sector cañero (Bezuidenhout y Baier, 2011). Sin embargo, la capacidad para diversificar la industria azucarera nacional está limitada a la imitación de ventajas comparativas, debido a que todos los ingenios azucareros, en semejantes condiciones de tecnología, recursos, precios y capacidades, adquieren una única materia prima heterogénea en calidad y cantidad. Por lo tanto, estas empresas presentan semejanza en términos de calidad, mercados, productos finales y clientes con beneficios a corto plazo. En este caso, los subproductos son empleados por el mismo ingenio para generar energía, vapor y compostas como forma incipiente de diversificación relacionada (Eggleson y Lima, 2015). En este sentido, de acuerdo con Arango (2008), el establecer proyectos de diversificación de mayor alcance en una región o una planta industrial podría

tener repercusiones relacionadas con la satisfacción de la demanda de azúcar y una variación significativa de su precio en el mercado, debido a la competencia por la materia prima. Así, el cultivo de caña y su producción están determinados por la rentabilidad del azúcar como su principal producto y, a la vez, la producción de caña determina en gran medida el nivel de satisfacción de la demanda. Un aumento en la rentabilidad del azúcar hace mucho más atractiva la siembra de caña y, por lo tanto, se incrementa la superficie sembrada y, en consecuencia, aumenta la producción de azúcar, y cuando ésta supera a la demanda, los inventarios se incrementan y disminuye el precio, lo que afecta la rentabilidad. Si a este modelo económico se agrega la producción de algún otro derivado, por ejemplo, etanol, la caña producida va a ser destinada tanto a la producción de azúcar como éste, siendo la rentabilidad y el inventario de los dos productos los que definan la repartición de caña para ambas industrias

(ingenio y destilería autónoma) y la variación de la superficie sembrada. Así, ambos mercados interactúan unidos por un elemento en común, que es la producción de caña de azúcar. Si la rentabilidad del etanol aumenta se hace menos atractivo producir azúcar, lo que se refleja en una disminución de su inventario; consecuentemente, disminuirá su oferta en el mercado y aumentará su precio. Esto incrementará la superficie con caña de azúcar, lo que aumentará la cantidad de caña destinada a la producción del etanol. Por lo tanto, se incrementa la producción y oferta de éste, lo que influye de manera negativa en su precio y rentabilidad, reactivando el ciclo con un aumento del interés por producir azúcar, caso contrario a lo que sucede actualmente en México (Figuras 6 y 7).

En relación con la capacidad de diversificación de la agroindustria azucarera nacional, el trabajo de Aguilar-Rivera (2014) determinó que 112 municipios (49.8 %) ubicados en

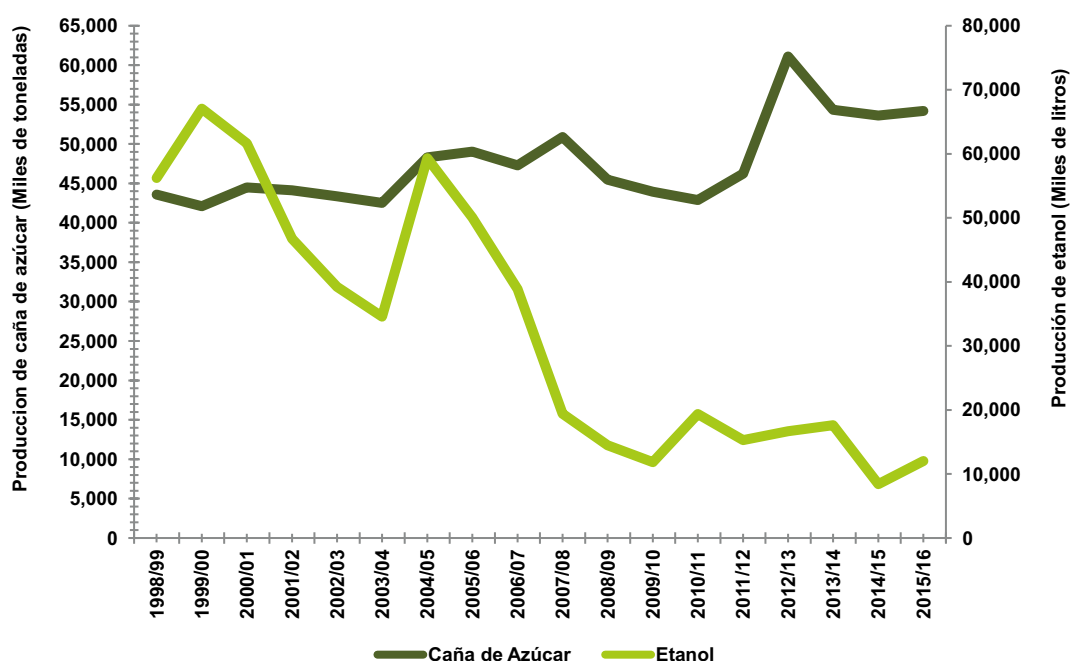


Figura 6. Producción de materia prima y producción de etanol (con datos de CONADESUCA, 2016).

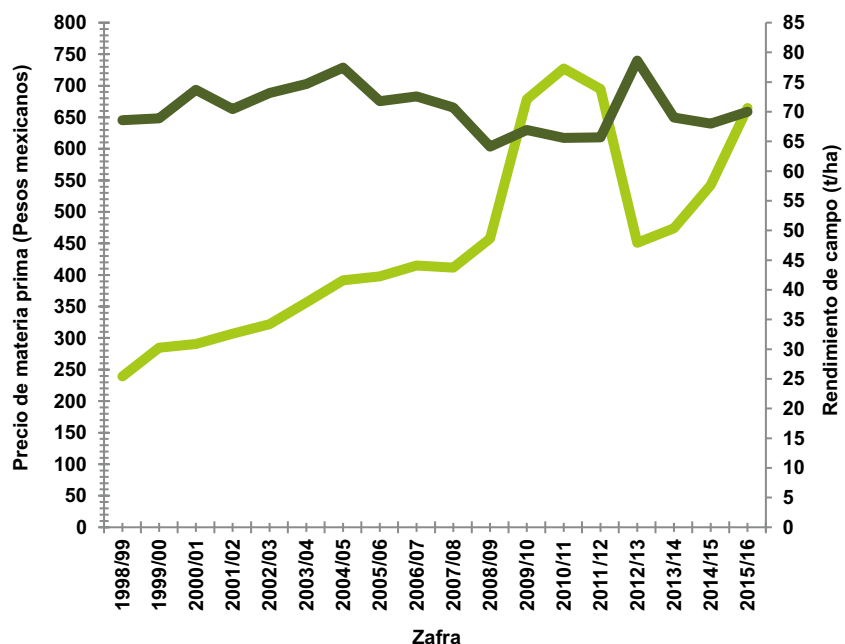


Figura 7. Precio de la materia y rendimiento de campo (con datos de CONADESUCA, 2016).

Sinaloa (2), Nayarit (3), Oaxaca (3), Tamaulipas (4), Chiapas (8), Colima (7), Puebla (12), Michoacán (13), Morelos (15), Jalisco (21) y Veracruz (24) registran recursos socioeconómicos, ambientales, capacidades productivas y experiencia para proyectos (cultivos intercalados y rotación, trapiche, alimento pecuario, abonos) en la unidad productiva cañera y cuentan con productores receptivos a la innovación para incrementar la productividad promedio de caña (65 t ha^{-1}) para otros proyectos, y así minimizar los factores limitantes abióticos y bióticos, institucionales, de productividad, sostenibilidad y competitividad. El resto de los municipios (115) (50.2 %) requieren acciones institucionales y tecnológicas específicas y diferenciadas para aumentar en primer lugar la productividad actual y para futuros proyectos de reconversión o diversificación (Figura 8).

En este sentido, las propuestas acerca de los elementos para alcanzar la competitividad (productividad, diversificación, innovaciones, gestión) en la agroindustria azucarera nacional aun presentan muchas interrogantes. Esto significa que a nivel regional se requieren instrumentos teóricos y prácticos que permitan reconocer y analizar las condiciones sobre las cuales el análisis, desarrollo y transformación espacial de las regiones cañeras podían llevarse a cabo, sin el convencional paradigma centrado solo en el análisis económico tradicional (economía

ambiental), con el objetivo de obtener e integrar nuevos conocimientos, características e investigación de sus interrelaciones espaciales y su predicción como modelo temporal-espacial de la realidad azucarera. Por lo tanto, el sector agroindustrial azucarero necesita un proyecto de reordenamiento e integración, tanto en la cuestión tecnológica y ambiental sustentado en la diversificación de la producción, administración ambiental y empresarial, como en su análisis histórico, geográfico y socioeconómico para la creación de proyectos locales o regionales en el ámbito rural (Martínez-Guido et al., 2016). Entre las metodologías existentes se encuentra el Análisis de Ciclo de Vida (LCA) (Figura 9).

El LCA (siglas en inglés) examina cada uno de los procesos productivos inherentes a lo largo del ciclo de vida de la agroindustria de la caña de azúcar, evaluando así múltiples categorías de impacto, tales como el cambio climático, disminución de la capa de ozono, acidificación y eutrofización, actividad humana, ecotoxicidad, fertilidad del suelo, agotamiento de recursos bióticos y abióticos, cantidad potencial de productos, coproductos, subproductos y uso de insumos y productividad en los cuales se considera la producción, explotación, procesamiento y transformación de caña de azúcar, así como la comercialización de los subproductos (Hun et al., 2016). Milford (2005) concluyó que

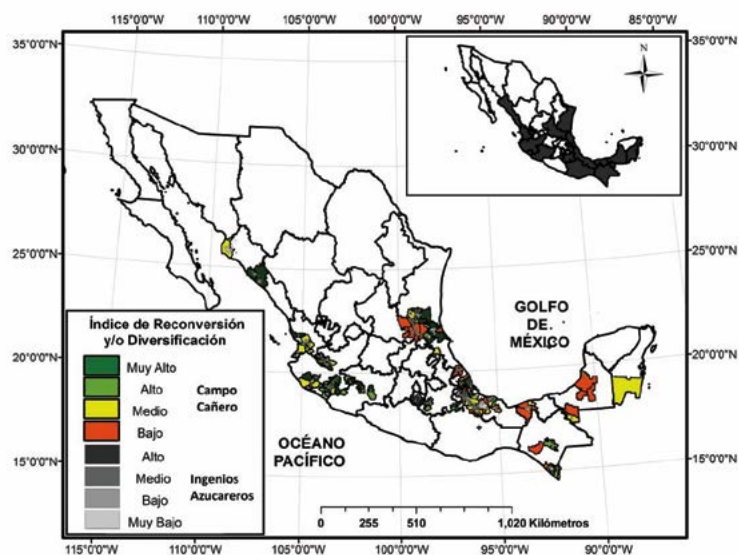


Figura 8. Capacidad de reconversión de municipios productores de caña de azúcar e ingenios azucareros en México.

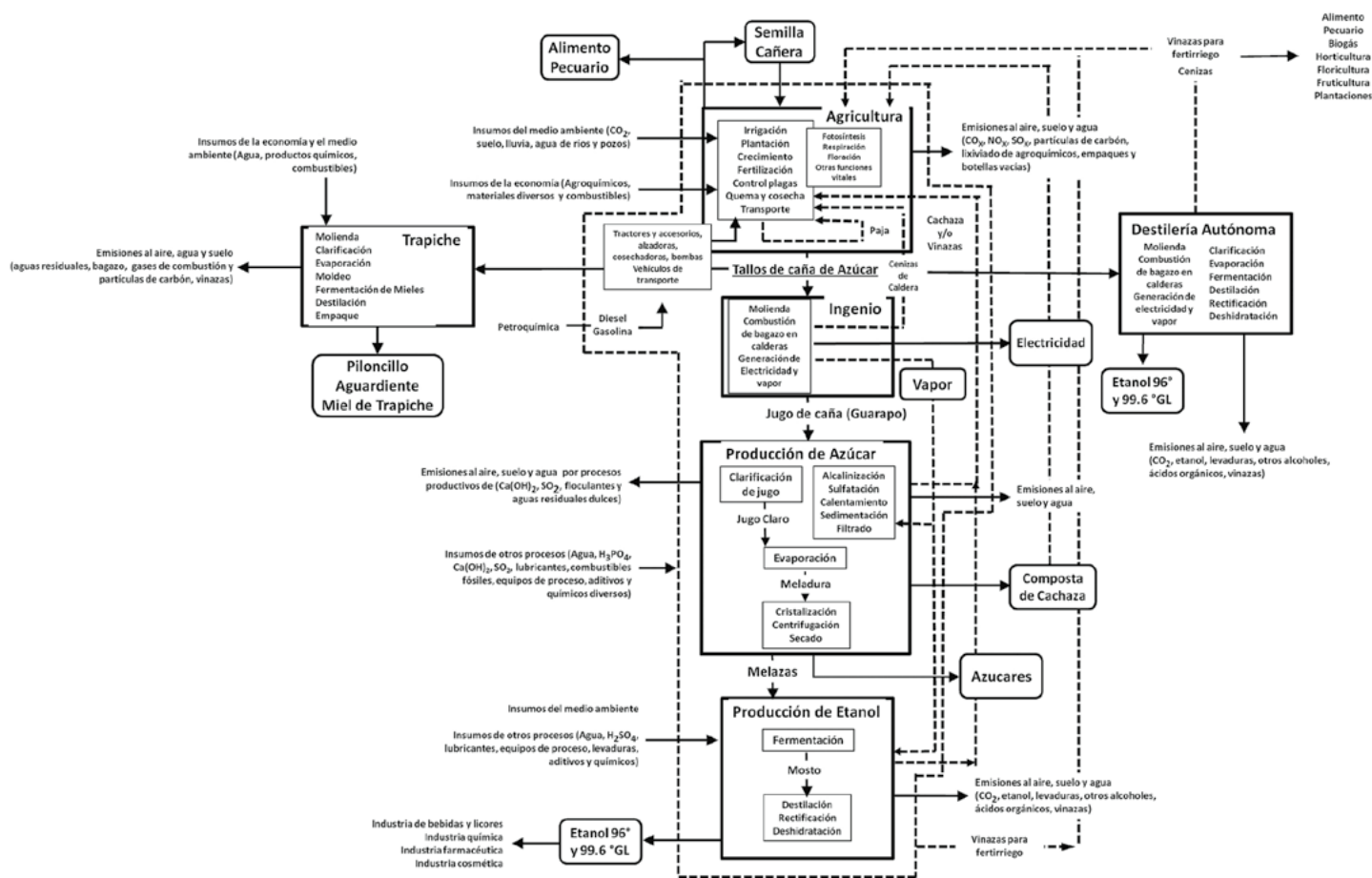


Figura 9. Cadena de valor, integración material y energética para la agroindustria de la caña de azúcar dentro de la perspectiva del LCA (Adaptado de Amores et al., 2013).

para la diversificación productiva exitosa es necesario considerar varios factores adicionales (Figura 10).

Algunas acciones que en el corto plazo podrían iniciar el camino hacia la diversificación del sector y la transición paulatina a la biorefinería de acuerdo con Brambila-Paz et al. (2013) son los productos de bagazo excedente de los ingenios, tales como el pelletizado y la obtención de briquetas, hongos comestibles, alimentos pecuarios y compostas. Desarrollo de políticas públicas eficaces e incluyentes sobre diversificación y biorefinerías basadas en el consenso de académicos especialistas, industriales e inversionistas. Todos los ingenios, destilerías y trapiches deberán implementar la producción de abonos, biofertilizantes, y vincularse con diversas ramas agrícolas. Eliminación paulatina de la quema para ser vinculada la paja como combustible para cogeneración eléctrica para la red pública y alimento animal. La creación de un Instituto de Investigación en la Biorefinería de la Caña de Azúcar con la participación de académicos con enfoque

interdisciplinario, cuyo financiamiento sea por empresarios, sector público y productores de caña puede ser una valiosa opción. De igual forma, reactivar el Programa Nacional de Etanol, revitalizando destilerías en inge-



Figura 10. Factores limitantes de la diversificación y reconversión productiva de la agroindustria de la caña de azúcar.

nios, implementación de metodologías y técnicas para la producción más limpia (P+L), análisis de ciclo de vida (LCA), huella de carbono, agua y emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), facilitará a las plantas de azúcar, piloncillo etanol y energía eléctrica certificarse internacionalmente y ser competitivos. Las regiones cañeras e ingenios azucareros tienen la capacidad técnica, ventajas comparativas y recursos para diversificarse. La revalorización de la caña de azúcar y subproductos a nivel regional es el propósito de cualquier programa de diversificación de las zonas cañeras y este debe promover la transformación productiva y el desarrollo sostenible en la agroindustria de la caña de azúcar mediante la articulación de la investigación, educación y capacitación del sector productivo, el diagnóstico del impacto ambiental y la búsqueda de soluciones a los problemas de contaminación a través del desarrollo o reingeniería de procesos en ciclo cerrado y el uso de los subproductos para la producción de derivados.

CONCLUSIONES

Es necesaria una revisión de los esquemas de financiamiento, comercialización, organización y administración para adecuarlos a la nueva realidad y los retos que enfrenta el cultivo y la industrialización de la caña de azúcar al hacerlos más dinámicos, operativos y eficaces.

LITERATURA CITADA

- Aguilar-Rivera N. 2013. La industrialización de los derivados de la caña de azúcar en México. Quipu, Revista Latinoamericana de Historia de las Ciencias y la Tecnología 15: 237-270.
- Aguilar-Rivera N. 2014. Índice de diversificación de la agroindustria azucarera en México. Agricultura, Sociedad y Desarrollo 11: 441-462.
- Amores M.J., Mele F.D., Jiménez L., Castells F. 2013. Life cycle assessment of fuel ethanol from sugarcane in Argentina. The International Journal of Life Cycle Assessment 18: 1344-1357.
- Arango S. 2008. Incidencias económicas del etanol como biocombustible en Colombia sobre los derivados de la caña de azúcar. Una aproximación con dinámica de sistemas. Revista Avances en Sistemas e Informática 5: 69-75.
- Bezuidenhout C.N., Baier T.J.A. 2011. An evaluation of the literature on integrated sugarcane production systems: A scientometrical approach. Outlook on Agriculture 40: 79-88.
- Brambila-Paz J.D.J., Martínez-Damián M.Á., Rojas-Rojas M.M., Pérez-Cerecedo V. 2013. La bioeconomía, las biorefinerías y las opciones reales: el caso del bioetanol y el azúcar. Agrociencia 47: 281-292.
- CONADESUCA (2016). Infocaña. <http://www.siiba.conadesuca.gob.mx/infocana/>
- Crespo H. 1988. Historia del azúcar en México. Fondo de Cultura Económica 2 Tomos 2da. Edición. México, D. F. 1029 p.
- Eggleston G., Lima I. 2015. Sustainability issues and opportunities in the sugar and sugar-bioproduct industries. Sustainability 7: 12209-12235.
- García C.A., Manzini F., Islas J.M. 2016. Sustainability assessment of ethanol production from two crops in Mexico. Renewable and Sustainable Energy Reviews. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032116306864>
- Hun A.L.N., Mele F.D., Pérez G.A. 2016. A comparative life cycle assessment of the sugarcane value chain in the province of Tucumán (Argentina) considering different technology levels. The International Journal of Life Cycle Assessment 22: 1-14.
- Martínez-Guido S.I., González-Campos J.B., Ponce-Ortega J.M., Nápoles-Rivera F., El-Halwagi M.M. 2016. Optimal reconfiguration of a sugar cane industry to yield an integrated biorefinery. Clean Technologies and Environmental Policy. 18: 553-562.
- Milford B. 2005. RE-engineering sugar industries-a view from Australia. In: Proc. ISSCT 25: 458-464.
- Sánchez-Santiró E. 2001. Azúcar y poder. Editorial Praxis. Cuernavaca, México. 331 p.
- Solomon S. 2016. Sugarcane Production and Development of Sugar Industry in India. Sugar Tech. 18: 1-15.



VENTAJA COMPARATIVA Y COMPETITIVA DE LA PRODUCCIÓN DE PANELA EN LA REGIÓN DE HUATUSCO, VERACRUZ, MÉXICO

COMPARATIVE AND COMPETITIVE ADVANTAGE OF RAW CANE SUGAR PRODUCTION IN THE REGION OF HUATUSCO, VERACRUZ, MÉXICO

Galicia-Romero, M.¹; Hernández-Cázares, A.S.^{1*}; Omaña-Silvestre, J.M.²; Velasco-Velasco, J.¹; Debernardi de la Vequia, H.¹; Hidalgo-Contreras, J.V.¹

¹Colegio de Postgraduados Campus Córdoba. Carretera Federal Córdoba-Veracruz km 348, Amatlan de los Reyes, Veracruz, México. C. P. 94946. ²Colegio de Postgraduados Campus Montecillo. Carretera México-Texcoco km 36.5, Montecillo, Texcoco, Estado de México. C. P. 56230.

***Autor de correspondencia:** aleyse@colpos.mx

RESUMEN

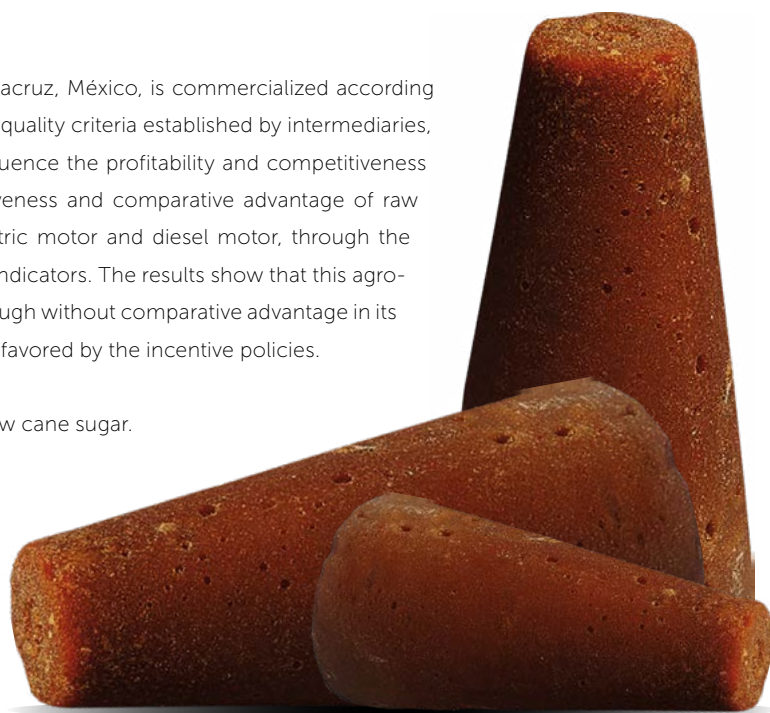
La panela en la región de Huatusco, Veracruz, México se comercializa de acuerdo con el precio de venta de origen, el cual se determina según los criterios de calidad establecidos por los intermediarios, reduciendo su valor de manera significativa, aspecto que parece incidir en la rentabilidad y competitividad de esta agroindustria. En el presente estudio se analizó la competitividad y ventaja comparativa del sistema de producción de panela bajo las tecnologías de motor eléctrico y motor diésel mediante la metodología de la Matriz de Análisis de Política (MAP) y sus indicadores. Los resultados mostraron que esta actividad agroindustrial es competitiva a nivel nacional, pero sin ventaja comparativa en sus dos tecnologías, lo que implica que esta agroindustria se ve favorecida por las políticas de incentivos.

Palabras clave: agroindustria, competitividad, rentabilidad, panela.

ABSTRACT

Raw cane sugar production in the Huatusco region, Veracruz, México, is commercialized according to the original sales price, which is determined based on quality criteria established by intermediaries, reducing its value significantly; this aspect seems to influence the profitability and competitiveness of this agroindustry. This study analyzes the competitiveness and comparative advantage of raw cane sugar production under the technologies of electric motor and diesel motor, through the methodology of the Policy Analysis Matrix (PAM) and its indicators. The results show that this agro-industrial activity is competitive at the national level, although without comparative advantage in its two technologies, which implies that this agroindustry is favored by the incentive policies.

Keywords: agroindustry, competitiveness, profitability, raw cane sugar.



INTRODUCCIÓN

La caña de azúcar (*Saccharum* spp.) es un cultivo importante en la cadena alimentaria e insumo para la industria azucarera. Su importancia económica radica en que es una especie altamente productiva, eficiente en el uso de insumos y recursos (Gómez-Merino y Senties-Herrera, 2015). Su proceso agroindustrial genera productos con valor agregado, tales como el azúcar no centrifugada, denominación técnica usada por la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación (FAO), que la define como un producto sólido, obtenido del jugo de caña deshidratado por métodos tradicionales de evaporación hasta una humedad menor o igual a 3 % (FAO, 1994). El jugo de caña deshidratado, que se consume tradicionalmente como un edulcorante en los segmentos socioeconómicos medio y bajo, en forma de panela, también conocida como piloncillo, panela, o panocha, y como insumo en algunas agroindustrias, tales como las destiladoras, refresqueras, dulceras, entre otras. El proceso agroindustrial de la elaboración de panela en la región de Huatusco, Veracruz, México se realiza en pequeñas factorías en el medio rural denominadas "trapiches". En estas agroindustrias los procesos y operaciones unitarios relacionados con la producción de panela son empíricos y artesanales, operando con base en la experiencia generacional y familiar. Tradicionalmente se requiere un gran número de operarios, predominando la mano de obra masculina. Las operaciones unitarias más importantes de este proceso son la molienda y la concentración del jugo de caña de azúcar. Para la molienda, como maquinaria principal se requiere un molino denominado "trapiche", compuesto de tres o más mazas cilíndricas dispuestas en forma horizontal, accionado por energía mecánica, mediante generadores de potencia movidos por motores de combustión interna (diésel) o motores eléctricos. La concentración del jugo de caña de azúcar depende de la temperatura de punteo, ya que esto incide directamente en la textura final de la panela. De acuerdo con las cifras de la FAOSTAT (2016), en 2013, 25 países en el mundo producían panela, situando en primer lugar a la India, con una participación en la producción mundial (44.6 %), seguido de Colombia (17.5 %) y Myanmar (11.6 %). México ocupa el décimo lugar, con 0.57 % de la producción mundial de este edulcorante. En cuanto al consumo mundial de panela, Colombia se ubica en el primer lugar (24.51 kg per cápita), seguido de Myanmar (14.77 kg) y Panamá (5.41 kg). En México es de 0.32 kg (FAOSTAT, 2016). Veracruz, México, es uno de los principales productores de caña de

azúcar, aporta dos de cada cinco toneladas de caña que se producen, participa con 34.6 % del valor económico nacional de sacarosa e integra actividades agrícolas de siembra, cosecha y transporte de caña de azúcar para la producción industrial y para trapiches paneleros, y cuanta además con 22 ingenios azucareros de 51 a nivel nacional (CONADESUCA, 2016), amén de 506 trapiches paneleros distribuidos en 22 municipios. En los últimos años, la agroindustria panelera ha sido una de las más afectadas por el abaratamiento del producto, aspecto que parece incidir en el bajo nivel de competitividad y rentabilidad de esta actividad, agravada por la falta de capital de trabajo, ineficiente proceso de producción, nulo control de calidad e inocuidad de la panela, y falta de estrategias comerciales para el mercado nacional y de exportación. Lo anterior coincide con lo establecido por Baca *et al.* (2003), quienes consideran que la actividad panelera está en riesgo por su bajo nivel tecnológico, productivo y limitadas vías de comercialización, así como por problemas relativos a la calidad de la panela. Ante la ausencia de estudios que demuestren con cifras reales lo anterior, se analizó la ventaja comparativa y competitiva del sistema de producción de panela de la región de Huatusco, Veracruz, en sus dos tecnologías, motor eléctrico (ME) y motor diésel (MD), mediante la Matriz de Análisis de Política (MAP).

MATERIALES Y MÉTODOS

La presente investigación se realizó en el municipio de Huatusco, Veracruz, México, (19° 09' N y 96° 58' O), a una altitud media de 1344 m, con una superficie territorial de 212.21 km², temperatura media anual de 19.1 °C y precipitación de 1,825.5 mm.

Recolección de información

La información se obtuvo de la base de datos de trapiches proporcionada por el Consejo Veracruzano del Piloncillo A.C. y al realizar su geolocalización se ubicaron 39 trapiches y solo 56 % se encontraron en operación, de los cuales 64 % opera con tecnología de motor eléctrico (ME) y 36 % con tecnología de motor a diésel (MD). Para el estudio se consideró una muestra representativa de 30 % de los trapiches en operación para cada tecnología. Lo anterior se debió principalmente a las limitaciones propias de estos trapiches y a la disposición de tiempo de los productores. Para la obtención de la información se elaboró un cuestionario estructurado del sistema de producción de panela, se aplicó directamente a los productores y trabajadores de los trapiches durante la zafra 2014-2015 y la información se cotejó

con los proveedores de la región y de zonas aledañas, de acuerdo con la metodología de entrevistas propuesta por Trejo y Morales (2009).

Análisis de la ventaja competitiva y comparativa de la panela

El análisis de la ventaja competitiva y comparativa de la panela se realizó utilizando la Matriz de Análisis de Política (MAP) (Monke y Pearson, 1989). La MAP es la estructura de una matriz de doble entrada que contabiliza por un lado los rubros de ingresos, costos y ganancias, y por otro los precios privados (precios de mercado actuales) y precios económicos (precios de eficiencia o precios sombra; precios que recibirían y pagarían los productos ante la apertura comercial completa, y si se eliminaran las distorsiones de mercado causadas por políticas sectorial y macroeconómicas), con base en la información obtenida directamente en las diferentes etapas de la cadena productiva.

Para los costos de producción a precios privados se consideraron los precios del mercado nacional y para los de producción a precios económicos se utilizaron los de paridad de las importaciones de los insumos comerciables (materia prima, empaque y combustible). Tomado como punto de partida el precio CIF (Costo, seguro y flete) de origen, considerando la tasa de interés interbancaria de equilibrio (TIIE) a 91 días, 7 %, y el tipo interbancario de oferta de Londres (LIBOR) a tres meses, 1.77 %, y el promedio de enero-diciembre 2014 para el tipo de cambio, utilizando como base el año 2010. Los ingresos para la evaluación privada se obtuvieron de multiplicar las toneladas de panelas elaboradas durante el periodo evaluado por su respectivo precio de venta al productor en el mercado nacional. Para la evaluación económica de los ingresos, estos se multiplicaron por el precio de paridad de importación, utilizando como referencia el precio del producto importado puesto en México, procedente de Los Ángeles, California, EEUU.

La ganancia se obtuvo mediante la diferencia de los ingresos totales y los costos de producción, tanto a precios privados como económicos. Los efectos de política se obtuvieron de las transferencias (diferencia) entre los precios privados y su correspondiente a los económicos. Para determinar la situación económica actual de esta agroindustria se calcularon los coeficientes de protección, según lo indica Monke y Pearson (1989). Mediante la relación de estos indicadores se determinó la ventaja comparativa y competitiva de la producción de

panela ante el comercio internacional y la eliminación de subsidios.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Ingresos totales

La determinación de los presupuestos privados durante la zafra 2014-2015 permitió calcular el costo total, el ingreso neto y las ganancias de sistema de producción de panela. Los ingresos totales a precios privados fueron inferiores entre 42 % y 35 %, respecto a los económicos para las tecnologías ME y MD, respectivamente. La diferencia originada por el precio de venta se debió a que el precio nacional promedio de panela puesta en trapiche para el periodo evaluado fue 50 %, menor comparado con el económico paritario de exportación ponderado desde Huatusco, Veracruz, hasta Los Ángeles, California, EEUU. La diferencia de los ingresos se debió principalmente al tipo de cambio nominal del peso mexicano respecto al dólar estadounidense, el cual fue de \$13.30 para 2014, considerando como base 2010, con una subvaluación de 10 % (BANXICO, 2015). Esto indicó que ante una apertura comercial de panela, los productores recibirían mayores ingresos. Sin embargo, esto implicaría mayores gastos de producción (Vázquez y Reyes, 2013). Los trapiches que operaron bajo el sistema de producción con tecnología MD obtuvieron mayores ingresos que los que operan bajo el sistema de producción con tecnología ME (Cuadro 1).

Costos de producción

Los costos de producción desglosados porcentualmente indicaron que los insumos comerciables representan los costos de producción más elevados, siendo 16 % menor en los precios privados respecto a los económicos. En términos privados los sistemas de producción con tecnología MD y ME invierten entre 71 % y 72 % de los costos totales en insumos comerciables (Cuadro 1). El gasto mayor se generó por la materia prima (caña de azúcar), ya que para obtener una tonelada de panela se requieren en promedio 10 toneladas de caña de azúcar, la cual para el periodo evaluado tuvo un precio nacional promedio entre \$380.00 y \$400.00, y uno de paridad de importación de \$1,259.59 por tonelada. Dentro de los factores internos los precios privados fueron 13 % superiores a los económicos, lo cual representó entre 22 % y 24 % de los costos totales para ME y MD, respectivamente, mientras que para los económicos la inversión representó entre 10 % y 11 %. En referencia a este concepto el costo más elevado se reflejó en las labores manuales; es decir, en la mano de obra directa

empleada durante el proceso de producción, el cual se realiza de manera artesanal, predominando la mano de obra familiar (Moctezuma, 2006), al igual que en regiones de Colombia, Brasil y Guatemala (FAO, 2004). Los precios privados en este rubro resultaron ser mayores que los económicos al no contar con cotización internacional. Respecto a los precios económicos en ambas tecnologías, 87 % de los costos totales se destina a los insumos comerciables. Los gastos de venta son iguales para los privados y los económicos, ya que son gastos administrativos y fletes nacionales que no tienen cotización internacional, pero se consideró en ambos casos, ya que representan entre 5 % y 6 % de los costos totales. Finalmente, los costos por insumos indirectamente comerciables representaron el costo por hora de recuperación de capital de la maquinaria y equipo (trapiche, batidora, juego de pailas e implementos, hornalla, tractor y vehículo), los cuales son similares entre precios privados y económicos, ya que la maquinaria y el equipo utilizados no son comercializados internacionalmente.

Ganancias

La agroindustria panelera solo permite obtener ganancias a precios privados. Los trapiches que operan bajo el sistema de producción con tecnología MD tuvieron 10 % de rendimiento superior a los que están bajo el sistema de producción con tecnología ME, los cuales obtuvieron ganancias mayores (34 %) durante la zafra (Cuadro 1). Lo anterior demuestra que la agroindustria panelera a nivel nacional es competitiva para ambas tecnologías por el nivel de ingreso. García (2015) registró que los trapiches de la región de estudio presentan baja competitividad, lo cual se refleja en que las ganancias obtenidas solo sirven para pagar los costos de operación y que las inversiones para mejorar las condiciones operativas en el trapiche son mínimas. A pesar de ello, la mayoría de los productores se mantienen en la actividad por tradición familiar al no encontrar fuentes alternas de empleo (Baquero y Vera, 2012). La ganancia económica negativa demuestra que la agroindustria panelera de la región de Huatusco, Veracruz, no es competitiva a nivel internacional; es decir, la exportación de panela no es rentable para los productores por el precio de paridad de importación pagado por la materia prima, la cual es tres veces más cara que a precios privados (Cuadro 1).

Efectos de política

Los efectos de política para esta actividad son negativos en ambas tecnologías (Cuadro 1), lo que implica que los paneleros pierden ingresos debido a que existen barreras de calidad por parte de los intermediarios, los cuales manipulan los precios, produciendo distorsiones tanto en el mercado nacional como para el de exportación. Los costos de producción tienen una transferencia positiva, lo que indica que la producción de panela es una actividad protegida por los subsidios implícitos en las políticas públicas de los insumos comerciables, los indirectamente comerciables y factores internos. Para los insumos comerciables, la mayor transferencia positiva se generó en los trapiches que operan bajo la tecnología MD, esto debido principalmente al subsidio del diésel.

Indicadores de ventaja comparativa y competitiva

Relación de Costo Privado o Competitividad (RCP). Los resultados obtenidos en el RCP muestran que la actividad panelera utilizando ambas tecnologías es redituable para los productores, al obtener ganancias, pagar el valor de mercado de

Cuadro 1. Ingresos, costos, ganancias y efectos de política de la agroindustria panelera en la región de Huatusco, Veracruz, México, durante la zafra 2014-2015.

Concepto		Precios privados		Precios económicos		Efectos de política	
		Promedio ME	Promedio MD	Promedio ME	Promedio MD	Promedio ME	Promedio MD
Ingresos totales		\$2,339,222	\$3,154,778	\$4,023,750	\$4,828,500	-\$1,684,528	-\$1,673,722
Costos totales de Producción	Insumos comerciables	\$1,462,238	\$1,843,728	\$4,073,760	\$4,924,130	-\$2,611,522	-\$3,080,403
	Insumos indirectamente comerciables	\$4,075	\$3,225	\$5,861	\$4,504	-\$1,786	-\$1,279
	Gastos de venta	\$91,134	\$158,599	\$91,134	\$158,599	\$0	\$0
	Factores internos	\$491,703	\$564,555	\$495,546	\$566,943	-\$3,842	-\$2,387
Ganancias		\$290,072	\$584,671	-\$642,550	-\$825,676	\$932,623	\$1,405,759

ME: Trapiches que operan con tecnología motor eléctrico. MD: Trapiches que operan con tecnología motor diésel.

los factores internos, incluyendo el retorno del capital y la mano de obra, determinando que esta agroindustria es competitiva a nivel nacional. Los trapiches que operan bajo la tecnología MD fueron los más rentables y competitivos, obteniendo un RCP de 0.62 (Cuadro 2).

Relación de costo de los Recursos Internos o Ventaja Comparativa (RCR). La producción de panela del país no tiene ventaja comparativa para ambos tipos de tecnología, lo que indica que no se generan divisas por venta al exterior, ya que los productores no utilizan eficientemente los recursos internos, siendo los trapiches que operan con tecnología ME los menos ineficientes, con una RCR promedio de -19.07 (Cuadro 2). Es decir, la producción de panela es redituable pero no eficiente, ya que es favorecida por las políticas de incentivos a la producción, pero que de desaparecer estas no sería capaz de soportar la competencia externa. González-Estrada y Orrantia-Bustos (2006) y González-Estrada y Sánchez-Ramos (2008) muestran que a través de una política agrícola integral es más eficiente promover la agricultura y su competitividad. A diferencia de los subsidios y aranceles proteccionistas; la intensificación sustentable y la productividad sí promueven y desarrollan las ventajas comparativas. En este sentido, González-Estrada y Alfares-Valera (2010) mencionan que si en lugar de proteger y subsidiar a la agroindustria se pretendiera verdaderamente desarrollarla dentro de los marcos actuales, sería imprescindible impulsar sus ventajas comparativas con ciencia y tecnología.

Coeficientes de protección

Coeficiente de Protección Nominal de Producto (CPNP). La venta de panela es una actividad desprotegida para ambas tecnologías (ME y MD), ya que el precio recibido por el productor representa entre 56 % y 62 % del precio que pueden recibir ante una situación de apertura comercial, lo que implica que los produc-

tores pagan entre 44 % y 38 % de impuesto de forma indirecta por efecto de política (Cuadro 2).

Coeficiente de Protección Nominal de Insumos Comerciables (CPNI). Los insumos comerciables están protegidos para ambas tecnologías, es decir, el precio promedio pagado por los insumos comerciables representa entre 35 % y 37 % de lo que pagarían los productores en caso de una apertura comercial para ME y MD, respectivamente (Cuadro 2).

Coeficiente de Protección Efectiva (CPE). El CPE no tuvo efecto en la producción de panela, ya que el valor agregado privado y el económico fueron negativos (Cuadro 2).

Relaciones de subsidios

Subsidio Social al Productor (SSP). Ante una apertura comercial de la panela, los productores requerirán de un apoyo promedio de 22 % a 26 % para ME y MD, respectivamente, y así puedan mantener su nivel actual de ingresos (Cuadro 2).

Subsidio Equivalente al Productor (SEP). Los productores que operan sus trapiches bajo la tecnología MD son los más eficientes al percibir en promedio 42 % de los ingresos totales a precios privados (Cuadro 2).

Subsidio a la Ganancia del Productor (SGP): no tuvo efecto en la producción de panela, ya que tanto la ganancia privada como la económica fueron negativas (Cuadro 2).

Valor Agregado a precios privados y económicos

Precios privados. El valor agregado promedio fue superior para el sistema de producción con tecnología MD durante la zafra 2014-2015, que permitió pagar 39 % de la remuneración a la mano de obra, 15 % de la

Cuadro 2. Indicadores de competitividad, de ventaja comparativa y efectos de política de los sistemas de producción de panela, en la región de Huatusco, Veracruz, México.

Sistema de producción	RCP	RCR	CPNP	CPNI		CPE	SSP	ESP	SGP
				a	b				
ME	0.69	-19.07	0.56	0.35	0.68	C.I.	0.22	0.38	C.I.
MD	0.62	-5.35	0.62	0.37	0.97	C.I.	0.26	0.42	C.I.

ME: Trapiches que operan con tecnología motor eléctrico. MD: Trapiches que operan con tecnología motor diésel. a: Insumos comerciables, b: Insumos Indirectamente comerciables, C.I.: Carece de interpretación; tanto el valor agregado privado como el económico deben ser positivos. RCP: Relación de Costo Privado o Competitividad, RCR: Relación de costo de los Recursos Internos o Ventaja Comparativa, CPNP: Coeficiente de Protección Nominal de Producto, CPNI: Coeficiente de Protección Nominal de Insumos Comerciables, CPE: Coeficiente de Protección Efectiva, SSP: Subsidio Social al Productor, SEP: Subsidio Equivalente al Productor, SGP: Subsidio a la Ganancia del Productor.

remuneración a la tierra y agua, 34 % de la remuneración al capital, 7 % de la administración y servicios, y 5 % de los gastos de venta. Los trapiches que operan bajo la tecnología ME solo obtuvieron un ingreso total que fue utilizado para pagar 41 % de la remuneración a la mano de obra, 20 % de la remuneración a la tierra y agua, 31 % de la remuneración al capital, 4 % de la administración y servicios y 4 % de los gastos de venta.

Precios económicos. El valor agregado económico resultó negativo, lo que indica que con los ingresos obtenidos los productores no son capaces de solventar la remuneración de la mano de obra, tierra, agua, capital, administración y servicios y gastos de venta; además, en caso de exportar el producto no se generarán divisas.

CONCLUSIONES

Los indicadores RCP y RCR muestran que la producción de panela de la región de estudio es una actividad productiva que se ve favorecido por las políticas de subsidios a la producción (CPNI); sin embargo, al desaparecer estos apoyos la actividad no será capaz de soportar la competencia externa. Por lo tanto, la agroindustria panelera en sus dos tecnologías, ME y MD, es una actividad competitiva, pero sin ventaja comparativa, es decir, se utilizan más divisas en la producción de panela de lo que vale. La agroindustria panelera es una actividad desprotegida al tener un impuesto implícito indirecto en el precio interno del producto, ocasionando de esta manera que el precio de venta de la panela se mantenga bajo; a la vez, esta agroindustria está protegida por los subsidios implícitos en los insumos comerciables, principalmente en la electricidad, el diésel y la caña de azúcar. Comparando las tecnologías de producción de la agroindustria panelera, el sistema de producción MD es el más eficiente y rentable, ya que de 100 % de los ingresos percibidos, 81 % es destinado a cubrir costos de producción, generando ganancias de 19 % durante la zafra 2014-2015. Con este estudio se observó que la contribución hacia el interior del propio sector se reflejó en la remuneración a la mano de obra (labores manuales y mecanizadas), que aporta entre 41 % y 39 % del valor agregado promedio para el sistema de producción con tecnología ME y MD, respectivamente, lo que nos demuestra que la agroindustria panelera es una actividad productiva generadora de empleos en la región de estudio y zonas aledañas, que contribuye a mejorar la economía familiar.

LITERATURA CITADA

- Baca M., Pacheco A., Quintero P., Piza P. J., Fabián C. 2003. El sistema agroindustrial localizado de piloncillo en la huasteca potosina. *Revista Análisis del Medio Rural Latinoamericano* 41: 137-156.
- BANXICO. 2015. Serie de tipo de cambio nominal de 2000 a 2007. Banco de México. Versión electrónica: <http://www.banxico.org.mx/divulgacion/divulgacion.html>. (Consultada en línea Julio, 2015). México.
- Baquero D.J., Vera P.C. 2012. Rentabilidad de la producción de panela artesanal en el sitio Agua Fría del Cantón Junín. Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López. Ingeniería en Administración de empresas. Calceta, Ecuador. pp: 32-56.
- CONEDASUCAR. 2016. Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar. <http://www.gob.mx/conadesuca> (Consultada en diciembre, 2016).
- FAO. 1994. Definition and Classification of Commodities, 3. Sugar Crops and Sweeteners and Derived Products. Food and Agriculture organization of the United Nations. Rome, Italy. <http://www.panelamonitor.org/media/docrepro/document/files/definition-and-classification-of-commodities-sugars-fao.pdf> (Consultada en línea junio, 2014).
- FAO. 2004. Calidad y competitividad de la agroindustria rural de América Latina y El Caribe: Uso eficiente y sostenible de la energía. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. México. 32 p.
- FAOSTAT. 2016. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC> (Consultada en diciembre, 2016).
- García B.R. 2015. Competitividad de la agroindustria rural del piloncillo en la región de Huatusco, Veracruz. Colegio de Postgraduados. Campus Córdoba. Amatlán de los Reyes Veracruz, México. pp: 31-46.
- Gómez-Merino F.C., Senties-Herrera H.E. 2015. Manual para la identificación varietal de caña de azúcar. Colegio de Postgraduados. México. 40 p.
- González-Estrada A. y Alfares-Varela M. 2010. Competitividad y ventajas comparativas de la producción de maíz en México. *Revista Mexicana de Economía Agrícola y de los Recursos Naturales* 1: 376-391.
- González-Estrada A., Sánchez-Ramos Y. 2008. Ineficiencia de las transferencias del estado a la agricultura Mexicana. *Revista Mexicana de Economía Agrícola y de los Recursos Naturales* 1: 7-26.
- González-Estrada A., Orrantia-Bustos M.A. 2006. Los subsidios agrícolas de México. *Agricultura Técnica en México* 32: 323-331.
- Moctezuma P. 2006. Los teenek productores de piloncillo de San José Peketzén, Tancanhuitz: la construcción de una identidad étnica en la huasteca potosina. *Relaciones. Estudios de Historia y Sociedad* 27: 153-182.
- Monke E.A. and Scott R.P. 1989. The policy analysis matrix for agricultural development. Cornell University Press. Ithaca, NY, USA. 279 p.
- Trejo T.B.I. y Morales F.F.J. 2009. Manual para la elaboración de una encuesta rural. Colegio de Postgraduados. México. 95 p.
- Vázquez E. A. y Reyes M. A. 2013. Fundamentos sobre la competitividad para el desarrollo en el sector primario. *Tlatemóni* 14: 1-29.

EVALUACIÓN DE LA CALIDAD E INOCUIDAD DE LA PANELA DE VERACRUZ, MÉXICO

EVALUATION OF THE QUALITY AND INNOCUOUSNESS OF RAW CANE SUGAR IN VERACRUZ, MÉXICO

Galicia-Romero, M.¹; Hernández-Cázares, A.S.^{1*}; Debernardi de la Vequia, H.¹; Velasco-Velasco, J.¹; Hidalgo-Contreras, J.V.¹

¹Colegio de Postgraduados, Campus Córdoba. Carreterra Federal Córdoba-Veracruz km 348, Amatlan de los Reyes, Veracruz, México. C. P. 94946.

*Autor de correspondencia: aleyse@colpos.mx

RESUMEN

La panela de la región de Huatusco, Veracruz, México, es un producto alimenticio comercializado al precio de venta del mercado, según aspectos sensoriales de apariencia, tales como el color y la dureza, los cuales son establecidos por los intermediarios ante la falta de una norma de calidad nacional que regule el precio. La presente investigación analizó los requisitos mínimos de calidad (°Brix, pH, humedad, azúcares reductores directos y totales, dureza y color), y los parámetros de inocuidad en la panela de la región de estudio (coliformes totales, mohos y levaduras y la determinación de presencia de *Salmonella* spp. y *Escherichia coli*). Los resultados obtenidos mostraron que la panela analizada es un alimento de calidad apto para consumo humano y que puede competir con los mercados de Colombia y Nicaragua.

Palabras clave: panela, piloncillo, mascabado, alimento.

ABSTRACT

Raw cane sugar from the region of Huatusco, Veracruz, México, is a dietary product commercialized at the market sales price, based on sensory aspects of appearance, such as color and hardness, which are established by the intermediaries, in face of the lack of a national standard of quality to regulate the price. This research analyzed the minimum requirements of quality (°Brix, pH, moisture, direct and total reducing sugars, hardness and color), and the parameters of innocuousness in raw cane sugar of the study region (total coliforms, mold and yeasts, and the determination of the presence of *Salmonella* spp. and *Escherichia coli*). The results obtained showed that raw sugar cane analyzed is a food of quality apt for human consumption and which can compete with the markets of Colombia and Nicaragua.

Keywords: raw cane sugar, unrefined brown sugar, muscavado, food.



Agroproductividad: Vol. 10, Núm. 11, noviembre. 2017. pp: 35-40.

Recibido: mayo, 2017. **Aceptado:** octubre, 2017.

MATERIALES Y MÉTODOS

La presente investigación se llevó a cabo en el Laboratorio de Ciencia de los alimentos del Colegio de Postgraduados Campus Córdoba. La toma de muestras de panela se realizó en trapiches del municipio de Huatusco, Veracruz, ubicado en la región central del estado de Veracruz (19° 09' N y 96° 58' O). La altitud promedio es de 1344 m, con una superficie territorial de 212.21 km², temperatura media anual de 19.1 °C y precipitación de 1,825.5 mm. La investigación se realizó en tres fases; la primera consistió en seleccionar los trapiches a monitorear, utilizando la base de datos del Consejo Veracruzano del Piloncillo A.C.; de ahí se tomó una muestra representativa de 30 % de los trapiches en operación, dadas las limitaciones propias de los trapiches y a la disposición de tiempo de los productores. La segunda fase consistió en la recolección de muestras de panela al momento de su elaboración con un periodo de almacenamiento no mayor a 15 días. El 71% de las muestras recolectadas fue de panelas tipo vela y el 29 % restante de panelas tipo pirinola (cónica). La tercera fase consistió en el análisis fisicoquímico de calidad e inocuidad. El contenido de sólidos solubles se determinó con base en la Norma Mexicana NMX-F-274-1984; el pH se determinó conforme a lo establecido en la norma NMX-F-317-S-1978n y con base en la NOM-086-SSA1-1994 se determinaron los ARD y ART. El color se evaluó conforme a la escala colorimétrica CIEL*a*b*, utilizando el colorímetro Hunter Lab Mini Scan Ez modelo 1250. Los datos obtenidos se expresaron en términos de croma (c*) y Hue (H*), utilizando las siguientes ecuaciones: $c^* = (a^{*2} + b^{*2})^{1/2}$ y $H^* = \arctang(b^*/a^*)$. La dureza en

INTRODUCCIÓN

La panela es el azúcar sólido moldeado extraído de la caña de azúcar (*Saccharum* spp.) mediante métodos tradicionales sin centrifugación (FAO, 1994), obtenido a través de la evaporación y concentración del jugo de la caña. La Norma Técnica Colombiana (2009) la define como un producto sólido de cualquier forma y presentación proveniente de la evaporación de jugo de caña de azúcar sin centrifugar que contiene microcristales anhedrales no visibles al ojo humano, manteniendo sus elementos constitutivos como sacarosa, glucosa y minerales, no provenientes de la reconstitución de sus elementos. García *et al.* (2007) consideran a la panela como un alimento, al estar compuesta por varios grupos de nutrientes esenciales, carbohidratos, minerales, proteínas, vitaminas y agua. Se elabora en pequeñas agroindustrias llamadas "trapiches" que por su origen en la época colonial e historia a lo largo de los años no evolucionaron en tecnología y procesos estandarizados, extendiendo la percepción del consumidor de adquirir productos de baja calidad (García, 2015). Se consume tradicionalmente como un edulcorante en los segmentos socioeconómicos medio y bajo, y como insumo en el proceso de la industrialización de alimentos, como conservas, destiladoras, refresqueras, dulceras, entre otras. En México, los problemas principales radican en la producción y comercialización de panela, que se afecta por el precio, debido a sus fluctuaciones durante la zafra (Cortés *et al.*, 2013), además de la falta de normas nacionales de elaboración, estandarización de procesos y composición química final. Lo anterior ha impactado a la región de Huatusco, Veracruz, México, dejando a esta agroindustria con probabilidades de cerrar por la falta de calidad e inocuidad. La panela en esta región se comercializa de acuerdo con criterios de calidad que han establecido los intermediarios, quienes definen aspectos sensoriales, tales como la apariencia del color y dureza para asignar el precio de comercialización. Se han tipificado tres grupos: 1) Panela de primera o amarilla, de color café claro, consistencia firme y no quebradiza; 2) Panela de segunda o comercial, de color café oscuro, pardo o marrón, consistencia firme y no quebradiza; y 3) Panela de tercera o negra, de color negro con consistencia lo más firme posible y no quebradiza. La panela de primera gana la remuneración de la zafra, mientras que una panela de segunda o tercera puede perder de \$0.30 a \$0.80 centavos en promedio por kilogramo. No obstante, esta caracterización de calidad deja de lado la inocuidad, atributo considerado como requisito básico para el consumo humano, e implica la ausencia de contaminantes, adulterantes, toxinas y cualquier otra sustancia que pueda ser nociva para la salud, o bien, niveles inocuos o aceptables de los mismos (Morón y Dárdano, 2001). Huatusco representa una región productora principal de panela en Veracruz; en ella, la elaboración y comercialización de panela es la segunda actividad económica (COVECA, 2007). La presente investigación analizó la calidad (sólidos solubles °Brix-, pH, humedad, azúcares reductores directos -ARD-, azúcares reductores totales -ART-, dureza y color como requisitos mínimos) y en cuanto a la inocuidad en panela (coliformes totales, mohos y levaduras y la determinación de presencia o ausencia de *Salmonella* ssp. y *Escherichia coli*) elaborada en cinco localidades diferentes del municipio de Huatusco, Veracruz, México.

términos de consistencia se determinó con un Texturometro Shimadzu EZ-5 de 500 N, utilizando un aditamento de punzón de 5 mm a una velocidad de desplazamiento de 90 mm min⁻¹ y un diámetro de corte de 47 mm. La inocuidad se analizó mediante la cuantificación de coliformes totales, mohos y levaduras, y la determinación de presencia de *Salmonella* ssp. y *Escherichia coli*, con base en la Norma Oficial Mexicana NOM-114-SSA1-1994 y NOM-113-SSA1-1994, respectivamente. Los mohos y levaduras se determinaron de acuerdo con lo establecido en la NOM-111-SSA1-1994. El análisis estadístico se realizó a partir de resultados de un diseño completamente al azar de siete trapiches (n=7) ubicados en cinco localidades de Huatusco, Veracruz. Se realizó una comparación de medias a través del método de Tukey-Kramer, con un nivel de significancia del 5 % ($\alpha=0.05$), mediante el paquete estadístico SAS versión 9.3 (SAS, 2012). Las variables experimentales se determinaron con base en los componentes fisicoquímicos y microbiológicos de las muestras de panela.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Evaluación de calidad

El Cuadro 1 presenta la comparación de medias de los atributos de calidad de la panela evaluada de siete trapiches de cinco localidades durante la zafra 2014-2015. El mayor contenido de sólidos solubles lo tuvieron las panelas del trapiche uno, presentando diferencias significativas ($p<0.05$) respecto a los demás trapiches (Cuadro 1). Quezada (2007) estipula que una buena panela debe tener una concentración de 90 a 92 °Brix, mientras la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (CORPOICA, 1999) indica que la concentración debe estar entre 88-94 °Brix. Las panelas analizadas no registraron valores semejantes; sin embargo, no existe una norma nacional o internacional que establezca el contenido de sólidos solubles que deben contener las panelas para consumo humano, por lo cual no se puede determinar si dicha concentración es adecuada. Es necesario tomar en cuenta que valores altos de °Bx indican un mayor contenido de azúcares y mejor calidad del producto y menor contenido de humedad (Andrade, 2008). Los valores de pH registrados (Cuadro 1) son similares a los reportados por Quezada (2007), quien menciona que para tener una panela de calidad con color natural y dureza óptima, el pH debe ser cercano a 5.7. El valor promedio de pH para todas las muestras fue de 5.34. Valores ácidos ayudan a la conservación de los alimentos, ya que se inhibe el crecimiento bacteriano (Chavarrías, 2013). La humedad promedio de las panelas analizadas fue de 8.7

% (Cuadro 1) en comparación con la Norma Obligatoria Nicaragüense (2011) para panela, y panela granulada que en el apartado cinco para consumo humano debe registrar 10% de humedad fracción en masa como valor máximo, mientras que el Anteproyecto de la Norma de Codex para panela CL 2011/25-CS (2012) y la Norma Técnica Colombiana (2009) estipulan un valor máximo en humedad de 9 % fracción en masa. García (2015) reporta un contenido de humedad de 6.8 % en panelas evaluadas de la misma región de estudio. En cuanto a los resultados de ARD se detectaron dos grupos de significancia estadística ($p<0.05$), siendo los de mayor contenido el conformado por los trapiches cinco, seis y siete (Cuadro 1). La Norma Obligatoria Nicaragüense (2011), la Norma Técnica Colombiana (2009) y el Anteproyecto de la Norma de Codex para panela (2012) establecen como valor mínimo 5.5 % de ARD fracción en masa. De las muestras analizadas, 86 % cumplió con lo establecido en esta normativa. Fernández (2003) menciona que ARD de más de 10 % producen panelas defectuosas, mientras que con 4 % se generan panelas con buen color y textura. Comparando los resultados, 100% de los trapiches se ubicaron dentro de este rango. Cuando el jugo de caña tiene pH muy bajo se pueden producir ARD, los cuales modifican la consistencia final del producto e impiden la cristalización de la miel, además de contribuir con las altas temperaturas durante el proceso, a desencadenar la reacción de Maillard, responsable del color y olor característicos (Fernández, 2003).

Los resultados de ART obtenidos concuerdan con lo reportado por García (2015), quien menciona un valor promedio de 59.24 % en muestra de panelas analizadas de la misma región de estudio. De acuerdo con Solís *et al.* (2006), los valores de ART en muestras de panela presentan rangos de 71 % a 82.6%, valores superiores a los obtenidos en la presente investigación. Para el atributo de dureza los resultados obtenidos mostraron que el trapiche cinco es el que produce las panelas de mejor consistencia, mostrando diferencia significativa ($p<0.05$) respecto a los demás (Cuadro 1). En términos de consistencia la dureza de la panela describe la calidad del producto y debe ser tal que al intentar romperla no se parta o desmorone, o que al chocar entre ellas el sonido sea de masa sólida y compacta y sin burbujas de aire (Solís *et al.*, 2006).

De acuerdo con la tipificación de color, 29 % de los trapiches elaboran panela de primera (trapiches dos y seis); 57 %, panela de segunda (trapiches unos, tres, cuatro y

Cuadro 1. Comparación de medias de los factores de calidad de siete trapiches de la región de Huatusco, Veracruz, México, Zafra 2014-2015.

Trapiche	°Brix	pH	Humedad	ARD	ART	Dureza	Color	
			(%)	(%)	(%)	N/g	Croma	Hue
1	82.38a	5.30abc	7.74cd	5.07b	62.10ab	882.38c	21.98ab	1.27a
2	81.22ab	5.37abc	6.70d	5.29b	63.88ab	1225.83bc	23.49ab	1.30a
3	81.25a	5.55a	7.30d	5.37b	64.03ab	1110.64c	19.68ab	1.13b
4	74.63c	5.47a	8.81bc	5.11b	60.02b	2928.63b	20.09ab	1.12b
5	79.40abc	5.47a	10.16ab	6.30a	69.93a	7148.25a	20.29ab	1.16ab
6	75.88bc	5.15bc	9.76ab	6.22a	69.01a	861.33c	25.27a	1.21ab
7	75.24bc	5.05c	10.44a	6.11a	70.10a	522.34c	15.80b	1.23ab
Media	78.57±3.2	5.34±18	8.70±1.48	5.64±0.54	65.58±4.07	2097±2360.09	20.94±3.04	1.20±0.69

Medias con letras distintas en sentido vertical son significativamente diferentes ($p < 0.05$).

cinco); y 14 %, panela de tercera (trapiche siete). En el Cuadro 2 se aprecia la clasificación de calidad de la panela para la región de estudio y el color del sistema CIE $L^*a^*b^*$ correspondiente. Asikin *et al.* (2015) reportaron valores Hue de 1.26, los cuales se asemejan a los obtenidos en este estudio. Asimismo, coinciden con los datos obtenidos por García (2015), quien reportó valores promedio de 21.44 para croma y 1.24 para Hue. En el espacio de color estos valores siguen la tendencia del rojizo, concentrándose en los marrones (Asikin *et al.*, 2015). Sin embargo, la panela puede presentar diferentes colores, según la zona panelera, o por efecto de la incorporación o no de clarificantes, sean sustancias químicas o naturales (Quezada, 2007), o bien, por el proceso constante de calentamiento y secado-solidificación (temperaturas bajas) (Asikin *et al.*, 2015) y por la humedad, ya que a medida que aumenta la absorción de humedad la panela cambia de color (Mosquera *et al.*, 2007). Panelas de color café oscuro pueden ser utilizadas en la confitería o en bebidas; las café claro pueden emplearse como ingredientes en la elaboración de recetas, y las marrón oscuro se pueden emplear en la elaboración de productos de panadería y galletas (Asikin *et al.*, 2013).

En Colombia el color de la panela se determina según la gama de colores del abanico colorimétrico (Figu-

ra 1), el cual está numerado en placas del 1 a 23, y de menos a mayor grado de intensidad, mostrando colores blanquecinos que corresponden a productos obtenidos a base de sustancias químicas (hidrosulfito de sodio) o naturales y productos muy oscuros que no han recibido ningún tratamiento de limpieza física. Bajo esta clasificación se considera que la placa entre el 5 y 10 son colores aceptables para la panela; no obstante, aquellas con colores que se ajusten a las placas 7 y 8 son las más comunes (Quezada, 2007). Comparando visualmente las muestras analizadas con dicho abanico colorimétrico se asume que la de primera se localiza entre los colores aceptables, ajustándose a los números 7 al 10; la de segunda se ajusta a 13 y 14; y la de tercera a los números 20 en adelante. Lo anterior demuestra que, pese

a la falta de un identificador de color estandarizado, en la región de estudio la clasificación colorimétrica de panela se realiza de manera adecuada.

Evaluación de inocuidad

La evaluación microbiológica de coliformes totales demostró que cinco de los siete trapiches analizados exhibieron de 1 a 9 UFC/g (Cuadro 3). Al no existir una norma nacional e internacional que determine el límite permisible de estos microorganismos se realizó la comparación con la producción de azúcar en la NMX-F-084-2003, la cual

Cuadro 2. Clasificación de la panela conforme a su color.

Clasificación de la panela	Panela	Color CIE $L^*a^*b^*$
Panela de primera o amarilla		
Panela de segunda o comercial		
Panela de tercera o negra		

Fuente: Elaboración propia.

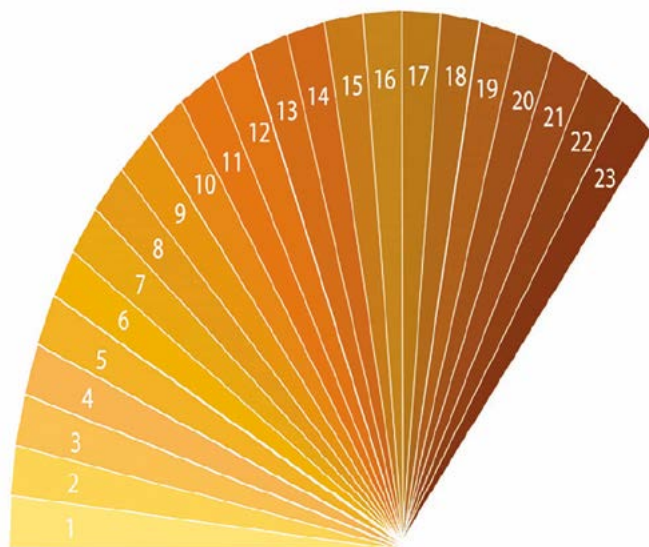


Figura 1. Comparación de color de la panela en el abanico colorimétrico.

establece como límite máximo 20 UFC/g. Observamos que 100 % de los trapiches se encuentran dentro de este límite. Sin embargo, la presencia de coliformes totales indica prácticas sanitarias inadecuadas en la elaboración de panela, nula higiene en el equipo o durante el almacenamiento (NOM-113-SSA1-1994).

El conteo microbiano de mohos y levaduras en los siete trapiches mostró presencia de (¿?) durante el almacenamiento, UFC/g menores a los establecidos en la Norma Técnica Colombiana (2009), cuyo valor máximo es de 150 UFC/g, aunque Morató (2011) menciona que la presencia de estos microorganismos en la panela causa malos olores, sabores, decoloración de la superficie, y su presencia se nota de manera visual, principalmente si la panela ha estado almacenada en condiciones de humedad y temperatura inadecuadas. De acuerdo con NOM-111-SSA1-1994, la presencia de mohos y levaduras indica prácticas higiénicas inadecuadas durante la elaboración y almacenamiento de la panela, así como el uso de materia prima contaminada. No se detectaron colonias de *Salmonella* ni desarrollo de *E. coli* por gramo de panela analizada (Cuadro 3).

CONCLUSIONES

En términos generales los parámetros de calidad evaluados en la panela de la región de estudio coinciden con los establecidos en la Norma Técnica Obligatoria Nicaragüense y la Norma Técnica Colombiana;

además, se apega a los requisitos de calidad para panela sólida establecidos en el anteproyecto de la Norma Codex para Panela, lo que indica que es un producto alimenticio con características para la exportación. La evaluación microbiológica de la panela evaluada sustenta que este alimento es apto para consumo humano, al estar libre de microorganismos patógenos que puedan causar infecciones o intoxicaciones por su consumo, sin embargo, la presencia de coliformes totales implica falta o escaso manejo de prácticas de higiene durante el proceso de elaboración y almacenamiento del producto, lo cual constituye un aspecto de mejora que debe atenderse. A falta de normatividad nacional o internacional que establezca los requisitos mínimos de calidad e inocuidad se hace difícil caracterizar la calidad de la panela evaluada y se evidencia falta de estandarización del proceso.

LITERATURA CITADA

- Andrade M. 2008. Evaluación de la funcionalidad de panelas artesanales como antioxidante y fuente de minerales. Universidad Simón Bolívar. Sartenejes, Venezuela. pp: 31-46.
- Asikin Y., Kamiya A., Mizu M., Takara K., Takami H., Wada K. 2013. Changes in the physicochemical characteristics, including flavour components and Maillard reaction product, of non-centrifugal cane Brown sugar during storage. Food Chemistry 149: 170-177.
- Asikin Y., Hirose N., Tamaki H., Ito S., Oku H., Wada K. 2015. Effects of different drying-solidification processes on physical properties, volatile fraction, and antioxidant activity of non-centrifugal cane brow sugar. Food Science and Technology 66: 340-347.
- Chavarriás M. 2013. El pH de los alimentos y la seguridad alimentaria. Eroski Consumer. Madrid España. pp: 1-6.
- CORPOICA. 1999. La tecnología del cultivo de caña panelera. Programa de Región Agrícola. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria. Florencia, Colombia. 19 p.
- FAO. 1994. Definition and classification of commodities, 3. Sugar crops and sweeteners and derived products. Organización

Cuadro 3. Comparación de medias de Coliformes totales, mohos y levaduras, y presencia o ausencia de *Salmonella* spp. y *E. coli* en panelas de la región de Huatusco, Veracruz.

Trapiche	CT	MO	LE	Salmonella spp.	E. coli
	UFC/g				
1	1 b	11 ab	2 b	-	-
2	0 b	5 ab	2 b	-	-
3	1 b	5 ab	4 b	-	-
4	1 b	4 b	4 b	-	-
5	9 a	47 a	21 ab	-	-
6	2 b	35 a	51 a	-	-
7	0 b	0 b	27 ab	-	-

Medias con literales distintas en sentido vertical son estadísticamente significativas ($p < 0.05$).

- de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Roma, Italia. <http://www.panelamonitor.org/media/docrepo/document/files/definition-and-classification-of-commodities-sugars-fao.pdf> (Consultada en línea, enero 2015).
- Fernández L. N. 2003. Estudio para la implementación de una planta de producción de panela (tesis de maestría). Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería. Escuela de mecánica Industrial. Guatemala. 119 p.
- García B., Albarracín C., Toscano A., Santana N., Insuasty O. 2007. Guía tecnológica para el manejo integral del sistema productivo de caña panelera. CORPOICA Colombia. 72 p.
- García B.R. 2015. Competitividad de la agroindustria rural del piloncillo en la región de Huatusco, Veracruz (tesis de maestría en Ciencias). Colegio de Postgraduados. Campus Córdoba. Amatlán de los Reyes Veracruz, México. pp: 47-61.
- Morató G. 2011. Erosky Consumer. <http://www.consumer.es/seguridad-alimentaria/ciencia-y-tecnologia/2011/07/11/201726.php>. (Consultada en línea Marzo, 2015).
- Morón C., Dárdano C. 2001. Importación del Códex Alimentarius en la seguridad alimentaria y el comercio de alimentos. Santo Domingo. República Dominicana. 120 pp.
- Mosquera S. A., Carrera E. J., Villada H. S. 2007. Variables que afectan la calidad de la panela procesada en el departamento del Cauca. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Cauca Colombia. 5: 17-27.
- Norma Mexicana NMX-F-084-2003. Industria Azucarera. Especificaciones. Azúcar (sacarosa). <http://www.colpos.mx/bancodenormas/nmexicanas/NMX-F-084-2003.pdf>.
- Norma Mexicana NMX-F-274-1984. Determinación de grados Brix en muestras de meladura; masas cocidas; mieles "A" y "B" de refinación y miel fina. <http://www.colpos.mx/bancodenormas/nmexicanas/NMX-F-274-1984.pdf>
- Norma Mexicana NMX-F-317-S-1978. Determinación de pH en alimentos. <http://www.colpos.mx/bancodenormas/nmexicanas/NMX-F-317-S-1978.pdf>
- Norma Obligatoria Nicaragüense. 2011. NTON. 03 098-11. Panela (tapa dulce) y panela granulada (Dulce granulada). Compendio de normas técnicas que aplican al procesamiento del dulce de panela. pp: 8-18 <https://www.yumpu.com/es/document/view/43531647/compendio-de-normas-tacnicas-para-procesar-dulce-pymerural/3>.
- Norma Oficial Mexicana NOM-086-SSA1-1994, Bienes y servicios. Alimentos y bebidas no alcohólicas con modificaciones en su composición. Especificaciones nutrimentales. <http://anprac.org.mx/CIDFiles/4/NOM086.pdf>
- Norma Oficial Mexicana NOM-111-SSA1-1994, Bienes y servicios. Método para la cuenta de mohos y levaduras en alimentos. <http://ss.puebla.gob.mx/index.php/tramites-para-negocios/item/2017-bienes-y-servicios-metodo-para-la-cuenta-de-mohos-y-levaduras-en-alimentos>
- Norma Oficial Mexicana NOM-113-SSA1-1994, Bienes y servicios. Método para la cuenta de microorganismos Coliformes Totales en placa. <http://www.ss.pue.gob.mx/index.php/ss-puebla/item/2019-bienes-y-servicios-metodo-para-la-cuenta-de-microorganismos-coliformes-totales-en-placa>.
- Norma Oficial Mexicana NOM-114-SSA1-1994, Bienes y servicios. Método para la determinación de Salmonella en alimentos. <http://contraloria.bcs.gob.mx/wp-content/uploads/Norma-Oficial-Mexicana-NOM-114-SSA1-1994.pdf>
- Solís J., Pérez F., Orozco I., Flores J., Ramírez E., Hernández A., Aguilar B. 2006. Descripción de un proceso tecnificado para la elaboración de piloncillo a partir de caña de azúcar. e-Gnosis 4: 1-8.
- Quezada M.W.F. 2007. Guía técnica de agroindustria panelera. Edit. Creadores gráficos Ibarra. Ecuador. pp: 43-49.
- Cortes, D., Díaz, A., y Del Ángel, O. 2013. Análisis del sector agroindustrial piloncillero en la región de Huatusco-Fortín, Veracruz. Ciencias Agropecuarias 1: 13-20.
- Norma Técnica Colombiana. 2009. NTC 1311 Productos Agrícolas. Panela. Incontec Internacional. Bogotá, Colombia. 10 p.
- COVECA. Comisión Veracruzana de Comercialización Agropecuaria. 2007. Monografía del piloncillo. Veracruz. México. 11 p.
- Anteproyecto de la Norma de Codex para Panela CL 2011/25-CS. 2012. <https://www.yumpu.com/es/document/view/33782704/cx-5-102-cl-2011-25-cs-enero-2012-a-puntos-de-cclacorg>. 6 p.



INNOVACIONES EN EL TRAPICHE PANELERO: LA PRODUCCIÓN DE PANELA GRANULADA

INNOVATIONS IN THE RAW CANE SUGAR MILL: PRODUCTION OF GRANULATED RAW CANE SUGAR

Morales-Ramos, V.¹; Osorio-Mirón, A.²; Rodríguez-Campos, J.^{3*}

¹Colegio de Postgraduados Campus Córdoba. Carretera Federal Córdoba-Veracruz km 348, Congregación Manuel León, Amatlán de los Reyes, Veracruz, México. C. P. 94946. ²Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Veracruzana. Región Córdoba-Orizaba. Prolongación de Avenida Oriente 6 No. 1009, Col. Rafael Alvarado, Orizaba, Veracruz, México. C. P. 94340. ³Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco. Av. Normalistas No. 800, Col. Colinas de la Normal, Guadalajara, Jalisco, México. C.P. 44270.

*Autor de correspondencia: jarodriguez@ciatej.mx

RESUMEN

Entrar en algunos trapiches de la Huasteca Potosina (México) es como regresarse en el tiempo y ser testigos del uso de tracción animal para mover molinos y extraer el jugo de la caña de azúcar (*Saccharum* spp.). Ver cómo ese jugo es concentrado en pailas (contenedores) a cielo abierto y en el momento correcto, retirar la paila del fuego para batir la meladura con palas de madera, hasta obtener la panela granulada. En el otro extremo, en algunos trapiches en Huatusco, Veracruz, México se emplean molinos con motor eléctrico, pailas de acero inoxidable, y se siguen recomendaciones de Buenas Prácticas de Manufactura para elaborar panela granulada. En ambos casos los retos de innovación y eficiencia en procesos son significativos entre ellos; aumentar el porcentaje de recuperación de sacarosa de la caña, cambiar el sistema de evaporación a cielo abierto, así como asegurar inocuidad del producto y estandarizar la calidad.

Palabras clave: panela granulada, azúcar no centrifugado, caña de azúcar, piloncillo.

ABSTRACT

Entering some sugar mills in the Huasteca Potosina region (México) is like going back in time and being witness to the use of animal traction to move mills and extract the sugar cane juice (*Saccharum* spp.). Watching how this juice is concentrated into pailas (containers) outdoors and at the right time, withdrawing the paila from the fire to beat the cane syrup with wooden spatulas, until obtaining the granulated raw cane sugar. On the other hand, in some mills in the Huatusco, Veracruz, México, electric motor grinders are used, stainless steel pailas, and recommendations are followed of Good Manufacture Practices to elaborate granulated raw cane sugar. In both cases, the challenges of innovation and efficiency in processes are significant, among them: increasing the percentage of recuperation of sugar cane sucrose, changing the outdoor evaporation system, as well as ensuring innocuousness of the product and standardizing the quality.

Keywords: granulated raw cane sugar, non-centrifuged sugar, sugar cane, unrefined brown sugar.

INTRODUCCIÓN

También conocida como azúcar no centrifugada, la panela es el producto obtenido de la deshidratación del guarapo o jugo de la caña de azúcar (*Saccharum* spp.). El proceso de elaboración se desarrolla en pequeñas factorías rurales denominadas "trapiches". La producción de panela en México ha existido desde la época colonial, por lo que se considera una agroindustria tradicional que ha cambiado muy poco. El cambio más notable es la sustitución de los molinos de madera o de piedra de dos mazas verticales movidos por tracción animal, por molinos metálicos de tres mazas verticales, movidos por tracción animal (Figura 1 A) o por molinos de tres mazas horizontales movidos por motores de combustión interna o eléctricos (Figura 1 B). Los primeros están generalizados en los trapiches de la Huasteca Potosina (México), donde laboran generalmente el dueño y familiares cercanos (tres personas). En este tipo de trapiches se elabora panela en forma de conos truncados mediante el uso de moldes de barro o madera de mango (*Mangifera indica*), y también panela granulada mediante un batido manual en la misma paila de cocimiento. Los segundos se han generalizado en los trapiches de la Región Montañosa de Veracruz y en Quintana Roo, México. En ellos participan "cuadrillas" de cinco a 20 personas y general-

mente elaboran panela en forma de cono truncado con diferentes pesos (250-300 g), panela pirinola, y actualmente empiezan a producir de forma mecánica la panela granulada (Figura 2).

A diferencia del azúcar blanca que contiene principalmente sacarosa (Romo *et al.*, 2004), la panela granulada contiene además glucosa, fructosa, minerales, grasas, compuestos proteicos y vitaminas (Cuadro 1, Figura 3), que dan un color de café claro a oscuro, dependiendo del nivel de eliminación de impurezas (cachaza) durante el cocimiento del guarapo (Guerra y Mujica, 2010).

En cuanto a las características de calidad para la panela granulada, no existe en México normativa al respecto, aunque hay una Comisión del Codex Alimentarius (Programa conjunto FAO/OMS) trabajando en el proyecto de norma CL 2015/19-CS para este producto (Codex Alimentarius Commission, 2015), donde se recomienda un color claro y uniforme, con el mayor porcentaje posible de sacarosa (menor porcentaje posible de azúcares reductores), contenido de humedad de 2.5 % a 5.0 %, pH tendiente al neutro, tamaño de partícula fina y uniforme, libre de material insoluble y materias extrañas, libre de patógenos y otros contaminantes, olor y sabor agradables y característicos (libre de sabores y olores desagradables o extraños).

Proceso productivo

Las etapas básicas en un trapiche panelero son la recepción de la caña de azúcar, la molienda y extracción del

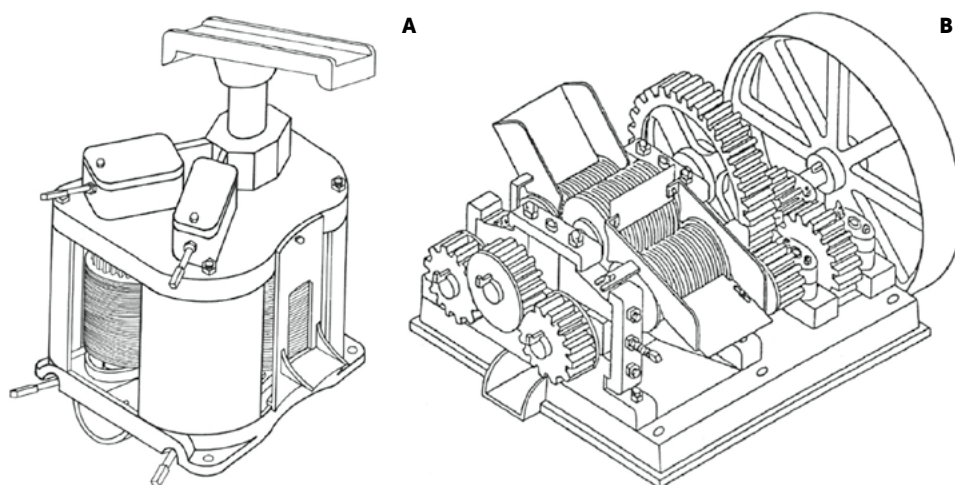


Figura 1. A: Molino vertical de tres mazas. B: Molino horizontal de tres mazas.



Figura 2. Presentaciones comunes de la panela en México.

guarapo, concentración del jugo y enfriamiento o solidificación de la masa cocida. En cada una de estas etapas existen desafíos de innovación tecnológica y uso eficiente de la energía. Durante la extracción, la caña pasa entera una sola vez por el molino, quedando con una cantidad considerable de jugo residual (aproximadamente 50 % de humedad en el bagazo). El bagazo se pone a secar al sol y luego se quema en la hornilla para generar el calor necesario que evapore el agua del jugo en una tina de cocimiento a cielo abierto (Prada *et al.*, 2015), aunque el reto más importante está en garantizar la inocuidad del producto (Castellanos *et al.*, 2010). De 2000 a la fecha la agroindustria panelera en México ha comenzado a introducir mecanismos que ayudan a clarificar el jugo, tales como cribas, filtros y decantadores. Asimismo, se inició el cambio de lámina negra en el sistema de evaporación por acero inoxidable grado alimenticio, garantizando la obtención de un producto libre de partículas de óxido de hierro, en seguimiento a las recomendaciones de la Guía de Buenas Prácticas de Manufactura para la Panela (Saltarén y Rivera, 2011; Codex Alimentarius Commission, 2006). A continuación se describe el proceso de producción de panela granulada que se lleva en el trapiche del Colegio de Postgraduados Campus Córdoba (Figura 4).

Cosecha de caña

La caña se cosecha cuando ha alcanzado su madurez tecnológica (Figura 5); esto es, cuando presenta una concentración de sólidos solubles entre 20 y 22 °Brix. Se recomienda fertilizar a las cañas paneleras con menos nitrógeno que a las cañas para ingenio, pues se ha observado que a mayor cantidad de este elemento aumenta también la cantidad

Cuadro 1. Composición de la panela granulada.

Grupo	Compuesto	Contenido en 100 g
Carbohidratos (g)	Sacarosa	84.0
	Fructuosa	4.8
	Glucosa	6.1
Minerales (mg)	Potasio	128.0
	Calcio	150.0
	Magnesio	50.8
	Fósforo	3.2
	Hierro	50.8
	Zinc	1.5
	Flúor	0.2
	Cobre	1.0
Vitaminas (mg)	A	1.0
	B1	5.0
	B2	1.5
	C	3.0
	D2	1.0
	E	1.0
Proteínas (mg)		670
Grasa (%)		0.2
Energía (calorías)		362.0
Humedad (%)		2.4

Fuente: Análisis de Laboratorio del Instituto Costarricense de Investigación y Enseñanza en Nutrición y Salud (INCIENSA), No. Registro M-23968 May 30, 1994.

de azúcares reductores (por ejemplo, glucosa y fructosa) en la meladura. Cuando estos se encuentran en más de 15 % se afecta la estabilidad del producto final, generando panela con menor vida de anaquel.

La cosecha de caña consiste en cortar el tallo y separarlo de hojas, inflorescencia y uno o dos entrenudos de la parte superior. Con los tallos se forman bultos (rollos) con un peso de 20 a 40 kg. Para una buena elaboración de la panela el corte de la caña se debe realizar en verde (sin quema) (Figura 5).

Recepción de caña

La caña es abastecida a los trapiches en camiones (Figura 6 A y B) que se pesan para llevar un control de la cantidad de caña procesada. Esto es importante para obtener los rendimientos (kg de panela por 100 kg de caña), que no deben ser menores a 10 %.

Molienda

La caña pasa a una mesa de alimentación (Figura 7A) donde se introduce al molino de forma manual, aunque en algunos casos se cuenta con un transportador para alimentarlo. La molienda consiste en la extracción del jugo (guarapo) mediante la compresión de la caña entre cilindros llamados "mazas". De esta operación se obtiene como coproducto la parte fibrosa de la caña (Figura 7B), el bagazo (fibra más jugo residual), el cual se seca al sol para utilizarlo como combustible.

Después de obtener el guarapo por prensado de las cañas en el molino, pasa a una serie de filtros y decantadores donde es clarificado mediante la adición de lechada de cal Ca(OH)_2 para neutralizar el pH e inducir la precipitación de impurezas (clarificación).



Figura 3. Panela granulada.

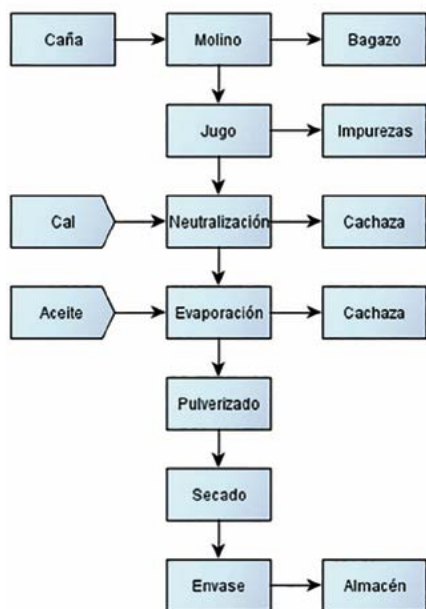


Figura 4. Diagrama del proceso de elaboración de panela granulada en el trapiche establecido en el Colegio de Postgraduados Campus Córdoba.

Clarificación

La clarificación es una de las operaciones más importantes si se quiere obtener panela de buena calidad en cuanto a impurezas y color (Quezada *et al.*, 2016). Esta operación de limpieza de los jugos consiste en retirar todas aquellas impurezas gruesas y de carácter no nutricional que se pueden separar de los jugos por medios físicos, como la filtración, decantación (precipitación) y flotación (diferencia de densidades), así como por medios térmicos.

Decantación en frío

En el Colegio de Postgraduados Campus Córdoba se han desarrollado dos decantadores manufacturados en acero inoxidable de forma rectangular con fondo en V



Figura 5. Corte de caña de azúcar en verde.



Figura 6. A: Transporte de caña. B: Recepción de caña en el batey.



Figura 7. A: Molienda en molino de 20 pulgadas. B: Bagaço seco para hornilla.

(Figura 8 A y B), cuyas dimensiones dependen de la capacidad de molienda que se tenga.

Decantador 1. Al salir el jugo del molino pasa por una criba para separar las impurezas más gruesas, como bagazo, hojas, etcétera. Esta es parte de un sistema de decantación natural que se logra por efecto de la gravedad. Este dispositivo retiene por precipitación una importante proporción de los sólidos contenidos en el jugo de caña, tales como las partículas de suelo. Simultáneamente, por diferencia de densidad se logran separar las partículas livianas como el bagacillo, impureza flotante que se debe retirar varias veces al día durante la molienda. En el decantador 2 el jugo es tomado de la parte central del 1 y es transportado por gravedad al 2. En este tanque continúa la separación de impurezas pesadas y livianas, y es aquí cuando se agrega lechada de cal, la cual cumple dos funciones en el proceso: regular el pH del jugo e inducir la precipitación de impurezas.

Control de pH

El guarapo presenta un pH que va de 4.5 a 5.5, dependiendo de la madurez fisiológica de las cañas. Para neutralizar parcialmente este pH (llevarlo a un valor cercano a 6.0) se utiliza lechada de cal. Con el control

del pH se logra reducir la inversión de sacarosa, proceso mediante el cual este azúcar cristizable se desdobra generando fructuosa y glucosa, que son azúcares reductores e incristalizables. La cal usada debe ser grado alimenticio para que no contamine la panela con sustancias indeseables y la cantidad adicionada es importante, pues el sobre encalado de los jugos deriva en la formación de panela con colores oscuros de poca aceptación en el mercado. Por el contrario, una deficiente adición de lechada de cal favorece el incremento de azúcares reductores en el producto final, lo que estimula su contaminación por hongos y reduce la vida de anaquel. El pH óptimo de los jugos para panela granulada es de 5.8 (García *et al.*, 1997). El jugo neutralizado es enviado al primer tanque del sistema de evaporación (tanque recibidor).

Tratamiento térmico

El jugo en el primer tanque del sistema de evaporación recibe un tratamiento térmico de 85 °C a 90 °C y posteriormente es pasado a un tanque clarificador (corta venda). El jugo no debe hervir en el clarificador, ya que si hierve se mezclará con el sobrenadante que se separa por el efecto de la temperatura y la cal. Esta nata de impurezas (cachaza) es eliminada por diferencia de densidad mediante un utensilio de-

nominado bomba (palo de madera con un recipiente en uno de sus extremos), el cual puede estar perforado o no. La adecuada separación de cachaza garantiza un producto de color más claro. La cachaza puede utilizarse en la producción de aguardiente como alimento para la engorda de cerdos o abono para el suelo, mezclando las cenizas que se obtienen de la combustión del bagazo en la hornilla.

Evaporación y concentración

La evaporación del guarapo se realiza a presión atmosférica y a fuego directo, alcanzando temperaturas que varían de 60 °C a 120 °C. La evaporación y concentración consisten en eliminar la mayor cantidad de agua del jugo y elevar el contenido de sacarosa en el mismo de 20 % a 90 % (85-89 °Brix). La manera como se lleva a cabo este proceso incide directamente en la calidad final del producto granulada. En la última tina, o tanque tachero del evaporador, se adiciona aceite vegetal para evitar que la meladura se incruste en las paredes de la tina y se queme el producto en el fondo.

Pulverizado

Una vez obtenida la meladura a punto de panela y una temperatura de 100 °C a 110 °C se envía a un pulverizador (Figura 9) para el granulada. El tiempo de batido o pulverizado varía

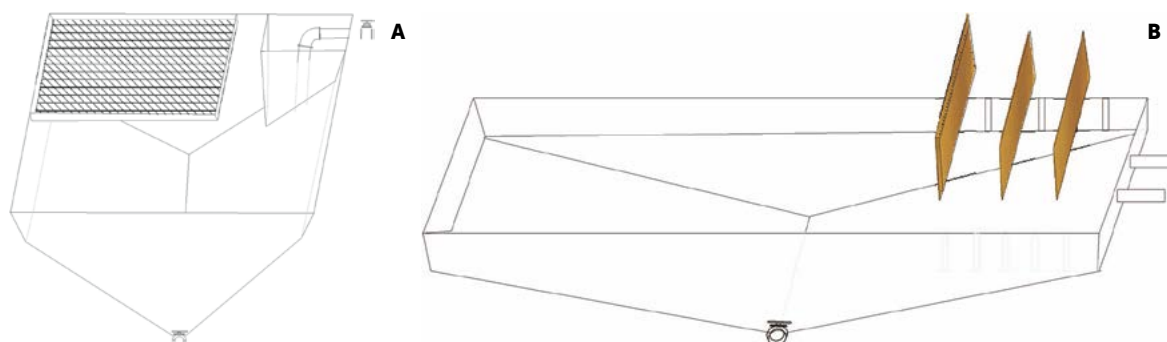


Figura 8. A: Decantador Tipo 1. B: Decantador Tipo 2.



Figura 9. Batidora para granulado.

de 15 a 25 minutos. Esta etapa del proceso persigue el enfriamiento de la meladura a alrededor de 50 °C y la formación de partículas sólidas solubles, que se generan en dos tamaños (finos y gruesos). Esta etapa incluye un tamizado del producto granulado, donde se regula la cantidad de finos y gruesos que se desea producir.

Secado

En algunos trapiches el producto pulverizado pasa a un secador rotatorio hecho de acero inoxidable donde reduce su humedad hasta 2.5 %. El secador tiene una longitud de ocho metros y puede funcionar con aire caliente o frío sin humedad.

Envasado

Después del secado se deja enfriar el polvo granulado hasta igualar la temperatura ambiente, recomendándose en este caso el uso de cuartos especiales para el envasa-

do, provistos de un sistema de refrigeración, que mantenga la humedad del aire en niveles de 30 %. Enfriado el producto granulado se pasa a la envasadora adecuada (Figura 10), según las presentaciones deseadas.

Almacenamiento

La panela granulada es un producto altamente higroscópico, lo cual significa que absorbe o pierde humedad por su exposición al ambiente, y depende de las condiciones climáticas del medio y de la composición del producto. La panela granulada es propensa a sufrir alteraciones cuando presenta altas concentraciones de azúcares reductores, bajos contenidos de sacarosa y alta humedad. A medida que aumenta la absorción de humedad, la panela granulada se apelmaza, cambia de color, aumentan los azúcares reductores y disminuye el contenido de sacarosa. Estas condiciones son óptimas para la contaminación por microorganismos, especialmente hongos. Si la panela granulada posee entre 7 % y 10% de humedad es necesario consumirla con rapidez o transportarla a un clima más seco, ya que en estas condiciones un almacenamiento prolongado deteriora su calidad. Para conservar la panela granulada en almacenamiento es necesario tener en cuenta las siguientes precauciones: Debe envasarse o empacarse en recipientes herméticamente cerrados. Las paredes y los pisos del almacén deben ser lo más aislantes posible para evitar el intercambio ambiental del interior con el exterior. Los recipientes con panela granulada no deben estar en contacto directo con el piso, ni con las paredes del almacén para evitar el enfriamiento y calentamiento por contacto.



Figura 10. Envasado mecánico y manual de la panela granulada.

Comercialización

A diferencia de la panela comercial en forma de cono truncado que se utiliza para consumo directo (doméstico) e industrial (en la producción de alcohol), la panela granulada se destina principalmente para el consumo humano, ya sea en uso directo o como ingrediente en la preparación de bebidas y otros alimentos, por lo que es muy importante garantizar la calidad e inocuidad del producto. La heterogeneidad en el tamaño, forma y color (Figura 11) de la partícula disponible en el mercado nacional hace complejo conformar un lote de volumen aceptable y de calidad homogénea para satisfacer la demanda de este producto natural.

CONCLUSIONES

La panela granulada es un producto que puede tener gran demanda en una sociedad cada vez más consiente del beneficio de consumir productos naturales, con bajo nivel de procesamiento. Sin embargo, la agroindustria de los trapiches en México requiere la implementación de innovaciones tecnológicas que la hagan más eficiente y que aseguren la producción de panela granulada inocua y de una calidad estandarizada, principalmente en los parámetros de color y tamaño de partícula.

LITERATURA CITADA

- Castellanos D.O.F., Torres P.L.M., Flores M.D.H. 2010. Agenda Prospectiva de Investigación y Desarrollo Tecnológico para la Cadena Productiva de la Panela y su Agroindustria en Colombia. Bogotá: Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. 258 p.
- Codex Alimentarius Commission. 2006. Buenas Prácticas de Manufactura (BPM) de la panela como industria de alimentos. Roma, Italia. Accesible en: <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/010/a1525s/a1525s06.pdf>.
- Codex Alimentarius Commission. 2015. Proyecto de Norma para el Jugo de Caña de Azúcar Deshidratado No Centrifugado (Normas Alimentarias No. CL 2015/19-CS). Roma, Italia. Accesible en: ftp://ftp.fao.org/codex/Circular_Letters/CxCL2015/cl15_19s.pdf.
- Guerra M.J., Mujica M.V. 2010. Physical and chemical properties of granulated cane sugar "panelas". *Ciência e Tecnologia de Alimentos* 30: 250-257.
- Prada F.L.E., García B.H.R., Chaves G.A. 2015. Efecto de las variables de evaporación: presión y flujo calórico en la calidad de la panela. *CORPOICA Ciencia y Tecnología Agropecuaria*. 16: 7-23.
- Quezada M.W., Gallardo I., Torres M. 2016. El color en la calidad de los edulcorantes de la agroindustria panelera. *Afinidad* 73: 26-30.
- Romo P.A.Y., Jiménez G.A.X., García B.H.R. 2004. Caracterización nutricional de la panela granulada. *CORPOICA Revista de Innovación y Cambio Tecnológico* 4: 34-42.
- Salterén L., Rivera C.E.F. 2011. Guía de Buenas Prácticas de Manufactura para Trapiches Paneleros. Bogotá, Colombia: Casa de Libros Editores. 172 p.



Figura 11. Heterogeneidad de color y tamaño de partícula en panela granulada.

PAPEL ARTESANAL DE PAJA DE CAÑA DE AZÚCAR (*Saccharum* spp.)

ARTISANAL PAPER FROM SUGAR CANE (*Saccharum* spp.) STRAW

Salgado-García, S.¹; Córdova-Sánchez, S.^{2*}; Turrado-Saucedo, J.³; Saucedo-Corona, A.R.³;
Fuentes-Martínez, J.G.³; García-Estrada, Y.¹; López-Velázquez, L.Y.¹; García-Alcocer, S.K.²; García-Alcocer, N.K.²

¹Colegio de Postgraduados Campus Tabasco. Grupo MASCAÑA. Periférico Carlos A. Molina km 3.5, H. Cárdenas, Tabasco, México. C. P. 86500. ²División Académica de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Popular de la Chontalpa. Cuerpo Académico de Química Verde y Desarrollo Sostenible (CA-QVyDS). H. Cárdenas, Tabasco, México. C. P. 86500. ³Departamento de Madera, Celulosa y Papel/CUCEI. Universidad de Guadalajara. Zapopan, Jalisco, México. C. P. 45200.

*Autor de correspondencia: sacorsa_1976@hotmail.com

RESUMEN

El papel es uno de los materiales indispensable para el funcionamiento de muchas actividades humanas, tales como salud, educación, alimentación, entre otras. Debido a esto, el objetivo del presente trabajo fue elaborar papel artesanal a partir de fibra celulósica extraída de paja de caña de azúcar (*Saccharum* spp.). Las fibras se extrajeron por medio de sosa y artesanal. Por cada 1000 g de paja se obtuvieron 365 g de pulpa de celulosa que se transformaron en 70 ± 3 hojas de papel artesanal, con un tamaño de hoja cercano al tamaño carta, con peso promedio de 9.5 g. La fibra de celulosa permite formar hojas con un promedio 8.4 g de grosor, no requieren someterse a evaluaciones de propiedades, ya que estas hojas son un arte, y la belleza final depende de la creatividad de los artesanos.

Palabras clave: subproducto, diversificación, hoja, fibra, celulosa.

ABSTRACT

Paper is one of the essential materials for the functioning of many human activities, such as health, education, diet, among others. Due to this, the objective of this study was to elaborate artisanal paper from cellulose fiber extracted from sugar cane (*Saccharum* spp.) straw. The fibers were extracted with caustic soda and artisanal methods. For every 1000 g of straw, 365 g of cellulose pulp were obtained, which were transformed into 70 ± 3 leaves of artisanal paper with a leaf size close to letter size, with average weight of 9.5 g. The cellulose fiber allows forming leaves with an average of 8.4 g of thickness, which do not need to be subjected to evaluations of their properties, since these leaves are art and the final beauty depends on the creativity of artisans.

Keywords: byproduct, diversification, leaf, fiber, cellulose.

INTRODUCCIÓN

México

tiene un consumo aparente de papel de siete millones de toneladas y su capacidad instalada es de 5.8 millones. Para satisfacer este consumo se tiene que importar celulosa de otros países. En 2015 utilizó 5.2 millones de t de fibra de residuos de papel y el resto de fibra virgen. Una alternativa de producción de pulpa para satisfacer esta demanda industrial es continuar la búsqueda de materiales fibrosos no maderables (Molina y Monreal, 2004; CNICP, 2011). La paja se define como los residuos de cosecha en verde de la caña de azúcar (*Saccharum* spp.), que comprende hojas secas y puntas, y es un residuo benéfico cuando se usa correctamente; por ejemplo, incorporación al suelo, alimentación de ganado bovino u ovino, producción de etanol, y quema en caldera para generación de electricidad (Salgado-García *et al.*, 2014) y pulpa de celulosa (García-Estrada, 2015). México es el séptimo productor mundial de azúcar y en la zafra 2015-2016 la superficie cosechada fue de 778,930 ha (CAÑEROS, 2014), con un rendimiento de paja seca de 18 t ha⁻¹ (Salgado-García *et al.*, 2014). La producción potencial de paja de caña es de 14, 020,740 t anuales, de las cuales 50 % podrían ser utilizadas para la producción de papel comercial, artesanal o ambos y así mejorar los ingresos económicos de los productores por su venta. En la literatura mundial la información sobre el uso de paja de caña de azúcar para extraer celulosa para elaborar papel es escasa. Algunos resultados indican su uso potencial (Costa *et al.*, 2013; Szczerbowski *et al.*, 2014). La celulosa es un homopolisacárido natural que consta de unidades de D-glucosa, enlazadas por uniones de 1,4'- β -D-glicosídicos (Maya y Sabu, 2008). En cereales, el uso de la paja para producir papel de embalaje fue liderado por Alemania hasta 1973 (Boguslawski y Debruck, 1983). Sin embargo, en la actualidad se requiere

generar más información sobre el potencial de la paja de caña para elaborar papel artesanal. Por ello, el objetivo fue elaborar papel artesanal a partir de la fibra celulósica extraída de la paja de la caña de azúcar.

MATERIALES Y MÉTODOS

Obtención de la paja de caña

Las pacas de paja utilizadas en este experimento provinieron de una plantación de caña de azúcar (*Saccharum* spp.) cultivada con la variedad MEX 79-431 del poblado C31, que pertenece al área de abastecimiento de caña del Ingenio Presidente Benito Juárez en Tabasco, México (Figura 1). La paja de las pacas se llevó al Colegio de Postgraduados Campus Tabasco, donde recibió dos procesos.

Método artesanal. La paja se picó en una picadora de forraje con malla de 4 mm. A la postre esta muestra se secó en una estufa de aire forzado a 65 °C por 24 h. Posteriormente, este material se molió (molino Wiley) con un tamiz de 4 mm. La pulpa de celulosa se extrajo con el método a la sosa, en el laboratorio Central del Campus Tabasco (García-Estrada, 2015). En un litro de agua, 300 g de hidróxido de sodio (sosa cáustica comercial), se colocó la paja en una olla de peltre de 10 L, se adicionó la solución de hidróxido de sodio, se aforó la olla con agua, se colocó al fuego, y con una pala de madera se movió el material para homogeneizar la cocción. Una vez que se observó la primera burbuja se dejó calentar por 20 min a 90 °C y posteriormente se reposó por 30 minutos para enfriar y lavar con agua corriente, después se enjuagó cinco veces y la muestra se desfibró manualmente.



Figura 1. A: Paja de caña. B: Generación de paja con la cosecha mecanizada. C: Vista de los paquetes de fibras y material parenquimatoso de la paja. D: Largo de fibras de celulosa.

Método a la sosa. El tamaño de la fibra corresponde al picado que hace la cortadora de caña al momento de la cosecha en verde. La fibra de celulosa se extrajo con el método a la sosa en el Departamento de Madera, Celulosa y Papel de la Universidad de Guadalajara, que consistió en tomar una muestra de 678.5 g de paja seca; se preparó una solución de NaOH al 30 % (peso/volumen). Ambos componentes se colocaron en un digestor enchaquetado y aforó a 10 L. Se inició el proceso de cocción hasta los 160 °C a presión de 115 pci. Una vez alcanzados estos valores, la corriente de calor se disminuyó y procedió a dejar una hora a una temperatura y presión constante. Posteriormente se retiró el licor negro del digestor y enseguida se retiró la materia prima. La pasta se colocó en un recipiente plano con malla No. 200, donde se extrajeron los haces de fibras que no se había separado, lavándose seguidamente con agua corriente a chorro para eliminar cualquier resto químico (Figura 2).

Elaboración de papel artesanal con pulpa de celulosa.

Se preparó una solución de agua-pulpa de celulosa, para lo cual se mezclaron 770 mL de agua purificada con 80 g de celulosa seca provenientes de dos métodos de extracción a la sosa y artesanal, y se agitó separadamente; se dejó reposar por 24 h. Terminado este tiempo se eliminó el exceso de agua. La celulosa hidratada y 500 mL de agua purificada se licuaron. Una vez que se obtuvo la mezcla se diluyó en 5 L de agua contenida en una tina de plástico y agitó para homogenizar la mezcla. Se sumergió el bastidor lateralmente en un ángulo de 45° aproximadamente; se extrajo el bastidor, cuidando que sea lo más horizontalmente para que la pulpa se distribuya uniformemente, sin permitir acumulaciones en deter-

minadas zonas, y se dejó drenar el agua sobre la misma tina. El bastidor con la pasta se colocó boca abajo sobre el fieltro. Con una esponja se retiró el exceso de agua; inmediatamente, se realizó el despliegue del bastidor pasando el dedo por la orilla interna. Se colocó un fieltro sobre la hoja húmeda y repitió el proceso para formar otras hojas. Las hojas se secaron al aire libre. Por último, el despegue de la hoja formada se hizo cuando esta empezó a despegar de las orillas por sí sola (Hernández, 2008) (Figura 3) (García, 2015).

Elaboración de papel artesanal con fibra de celulosa.

Parte de la fibra de celulosa fue secada con presión manual para retirar exceso de agua. La formación de la hoja es similar al anterior proceso, únicamente que se utiliza una tina con 5 L de agua, la cual se mezcla homogéneamente y en seguida se introduce el bastidor (Figura 4). El resto es similar y se repite hasta lograr el número de hojas deseadas; por último, las hojas se someten a prensado para eliminar restos de humedad y esperar que sequen. Para este ensayo se elaboraron tres hojas con fibra de celulosa natural, fibra de celulosa, más aditivo (trementina al 0.5 % con respecto a la fibra base seca diluida en 100 mL de alcohol, fibra de celulosa con pétalos de flores, fibra de celulosa mezclado con papel reciclado donde el porcentaje puede ser variado).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Papel artesanal con pulpa de celulosa

Por cada 1000 g de paja se recuperaron 365 g de fibra de celulosa y formaron 70 ± 3 hojas de papel artesanal. El tamaño de las hojas de papel fue muy cercano al tamaño carta, con un peso promedio de 9.5 g, respectivamente (Cuadro 1).



Figura 2. Proceso de elaboración de fibras de celulosa. A: Llenado del digestor con paja, NaOH y agua. B: Paso de la fibra en la pila holandesa. C: Desfibrilado de la paja a los 15 min. D: Calidad de la fibra de celulosa.



Figura 3. Proceso de elaboración de papel artesanal con fibra de celulosa blanqueada. A: Pulpa de celulosa hidratada. B: Formación de hoja. C: Eliminación de exceso de humedad. D: Hoja de papel húmeda.



Figura 4. Proceso de elaboración del papel artesanal con fibra de celulosa. A: Disolución de la fibra de celulosa en agua. B: Extracción del bastidor con la hoja formada. C: Separación del soporte del bastidor. D: Colocación de la hoja sobre la hoja de tela.

La Figura 5 muestra la fibra de celulosa, pulpa de celulosa, y hojas elaboradas con la pulpa de celulosa obtenida por el método a la sosa y por el método artesanal.

Con fines de aprovechar los residuos de paja es posible realizar extracciones de fibra de celulosa con el método artesanal, eliminando el procedimiento de blanqueo, puesto que los tonos de las fibras en el papel artesanal son deseables.

Papel artesanal con fibra de celulosa

En la cocción al 30% de NaOH se obtuvo una pasta de buena consistencia y con 10 % de rechazo fue necesario pasar por la pila holandesa durante 15 minutos con el fin de obtener una pulpa mejor y formar hojas con 8.4 g de grueso promedio. Las hojas de papel artesanal no requieren ser sometidas a evaluación de propiedades, ya que estas son un arte y la belleza final depende de la creatividad de los artesanos. La Figura 6 muestra las hojas elaboradas a partir de la fibra de celulosa. Estas conservan su color natural. Las de papel artesanal natural tienen un costo de \$10.00 MX (USD\$0.5).

Las hojas de papel artesanal pueden ser usadas como piezas de arte al incluir flores e insectos como mariposas, cuyo precio en el mercado artesanal puede ser mayor a \$150.00 cada pieza (USD\$7.50), lienzos para pinturas, forros de libretas, agendas, diarios y cuadros cuyo precio puede ser mayor a USD\$75.00 (Figura 7). También la fibra de celulosa con aditivos puede ser usada para elaborar recipientes biodegradables (Figura 7); para ello, solo debe recubrirse el molde deseado con la fibra de celulosa. En Europa

Cuadro 1. Algunas características de las hojas de papel elaboradas con pulpa de celulosa extraída por los métodos a la sosa y artesanal.

Hoja a la Sosa	Tamaño (cm)	Peso (g)	Grosor (mm)
1	21.5×28	7.9	0.83
2	21.5×28	7.7	0.6
3	21.3×27.5	10.9	0.65
4	19×27	7.9	0.82
5	21.4×28	7.7	0.66
Media	24.32	8.42	0.71
dS	0.45	1.38	0.1
Hoja Artesanal	Tamaño (cm)	Peso (g)	Grosor (mm)
1	22×27.5	13.5	1.1
2	21.5×28	8.5	0.77
3	21.5×27.5	9.7	0.78
4	21×27.5	6.5	0.51
Media	24.56	9.55	0.79
dS	0.11	2.94	0.24

la tendencia a usar vasos y platos elaborados con celulosa por ser biodegradables tiene alta demanda y otro uso pueden ser los recipientes para contener los productos orgánicos.

CONCLUSIONES

El método a la sosa y artesanal fueron similares en la cantidad de fibra de celulosa recuperada y su rendimiento fue similar con 39.5 %. Con el método artesanal se extrajo menor cantidad de celulosa en comparación

con el de la sosa, ya que este último superó al primero en 6.96 % de rendimiento. Sin embargo, no debe desecharse el método artesanal ya que resulta más económico. Con la celulosa extraída por ambos métodos fue posible elaborar papel. El peso y grosor de las hojas fue mayor con el método casero, lo cual se puede atribuir a la mayor dureza de la celulosa determinada al tacto y



Figura 5. Materiales celulósicos. A: Fibra de celulosa. B: Pulpa de celulosa. C: Hoja de papel artesanal elaborado con pulpa de celulosa extraída con el método a la sosa. D: Hoja de papel artesanal elaborado con pulpa de celulosa extraída con el método artesanal.



Figura 6. Hojas de papel elaboradas con fibra de celulosa. A: Fibra de celulosa natural. B: Fibra de celulosa más aditivo. C: Fibra de celulosa con pétalos de flores; y D: Fibra de celulosa mezclado con papel reciclado.



Figura 7. Usos alternativos del papel artesanal. A: Hoja con pétalos y mariposas. B: Pintura en papel. C: Forros de agendas. D: Elaboración de cuadros artísticos. E: Elaboración de recipientes.

por la saturación de la solución agua-pasta de celulosa. Las hojas de papel artesanal no requieren ser sometidas a evaluaciones de propiedades, ya que estas son un arte y la belleza final depende de la creatividad de los artesanos.

AGRADECIMIENTOS

Al grupo MASCAÑA-LPI-2: AESS del Colegio de Postgraduados Campus Tabasco, México por el apoyo económico y las facilidades para realizar el presente trabajo en el Laboratorio Central y al Departamento de Madera, Celulosa y Papel/ CUCEI de la Universidad de Guadalajara, México.

LITERATURA CITADA

- Boguslawski E., Debruck J. 1983. La paja y la fertilidad de los suelos. Editorial Continental. México. 90 p.
- CAÑEROS. 2014. Unión nacional de cañeros, A.C.-CNPR. Estadísticas de la Agroindustria de la Caña de Azúcar 2004-2013. Consolidado nacional e Ingenio Benito Juárez. Consultado el 7 de Julio de 2014 en http://www.caneros.org.mx/site_caneros/estadisticas/nacional.pdf
- CNICP. 2011. Programa de desarrollo sustentable de la Industria 2011-2016. México, D.F. Cámara Nacional de la Industria de la Celulosa y el Papel, A.C. 13 p.
- Costa S.M., Mazzola P.G., Silva J.C.A.R., Pahlc R., Pessoa A.Jr., Costa, S.A. 2013. El uso de paja de la caña de azúcar como fuente de fibra de celulosa para la producción de textiles. Cultivos y Productos Industriales 42: 189-194.
- García-Estrada Y. 2015. Elaboración de papel artesanal de paja de caña de azúcar. Tesis profesional de Licenciatura en Químico Farmacéutico Biólogo. Universidad Popular de la Chontalpa. H. Cárdenas, Tabasco, México. 50 p.
- Hernández O.M. 2008. Elaboración y caracterización del papel artesanal de la corona del fruto de dos variedades de piña *Ananas comosus* (L.) Merr. Tesis Profesional. Universidad Autónoma Chapingo. México. 118 p.
- Molina M., Monreal, S. 2004. Papel de madera. Una reflexión sobre la productividad y uso del papel en México. Consultado el 5 de Julio de 2014 en: <http://www.mexicoforestal.gob.mx/nota.php?id=16>
- Salgado-García S., Aranda-Ibañez E., Castelán-Estrada M., Ortiz-Laurel H., Palma-López D.J., Córdova-Sánchez S. 2014. Qué hacer con la paja de la cosecha mecanizada de la caña de azúcar. Agroproductividad 7: 5-10.
- Szczerbowski C., Pitarelob A.P., Zandoná A. Jr., Ramos L.P. 2014. Sugarcane biomass for biorefineries: Comparative composition of carbohydrate and non-carbohydrate components of bagasse and Straw. Carbohydrate Polymers 114: 95-101.
- Maya J., Sabu T. 2008. Biofibres and biocomposites. Carbohydrate Polymers 71: 343-364.

MÉTODOS PARA EXTRAER CELULOSA DE LA PAJA DE CAÑA DE AZÚCAR (*Saccharum* spp.)

METHODS USED TO EXTRACT CELLULOSE FROM SUGAR CANE (*Saccharum* spp.) STRAW

García-Estrada, Y.¹; Salgado-García, S.^{2*}; Bolio-López, G.I.¹; Córdova-Sánchez, S.¹; Lagunes-Espinoza, L.C.²; Falconi-Calderón, R.³; Veleza, L.⁴

¹División Académica de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Popular de la Chontalpa. Cuerpo Académico de Química Verde y Desarrollo Sostenible (CA-QVyDS). H. Cárdenas, Tabasco, México. C. P. 86500. ²Colegio de Postgraduados Campus Tabasco. Grupo MASCAÑA-CP. Peri-férico Carlos A. Molina km 3.5. H. Cárdenas, Tabasco, México. C. P. 86500. ³Universidad Juárez Autónoma de Tabasco-Cunduacán, DACB. Carretera Cunduacán-Jalpa km 1, Col. La Esmeralda, Cunduacán, Tabasco, México. C. P. 86690. ⁴CINVESTAV IPN Unidad-Mérida. Antigua carretera a Progreso Km 6, Cordemex, Mérida, Yucatán, México. C. P. 97310.

*Autor de correspondencia: salgados@colpos.mx

RESUMEN

Los objetivos del trabajo fueron establecer un proceso artesanal para la extracción de celulosa de la paja de caña de azúcar (*Saccharum* spp.) cosechada en verde, de forma mecánica, y caracterizar su calidad. Se utilizó el método a la sosa y el artesanal, y en este último se utilizaron reactivos de uso industrial. La extracción de fibra de celulosa fue similar en ambos métodos. En el conocido como a la sosa se extrajo la mayor cantidad de pulpa de celulosa (10.02 g) y tuvo un rendimiento de celulosa superior a 6.96 % en comparación con el artesanal. La celulosa extraída de la paja de caña por ambos métodos fue pura, según análisis del FTIR. La cristalinidad de la celulosa de paja fue de 74.78 % a la sosa y 64.24 % con el artesanal, según la técnica de XRD. El tamaño promedio de cristales de la celulosa de paja fue similar en ambos métodos de extracción y es del tipo alfa-celulosa, que puede ser usada para diversos materiales en las industrias farmacéutica y alimenticia.

Palabras clave: fibras no maderables, alfa-celulosa, subproducto, blanqueo.

ABSTRACT

The objectives of the study were to establish an artisanal process for the extraction of cellulose from sugar cane straw (*Saccharum* spp.) harvested green, mechanically, and to characterize its quality. The caustic soda method and the artisanal method were used, and industrial reagents were used in the latter. The extraction of cellulose fiber was similar in both cases. The highest amount of cellulose pulp (10.02 g) was extracted with the caustic soda method and it had a cellulose yield higher than 6.96 % compared to the artisanal method. The cellulose extracted from the cane straw was 74.78 % with the caustic soda method and 64.24 % with the artisanal method, based on the XRD technique. The average size of crystals from the straw cellulose was similar with both extraction methods, and it is of the alpha-cellulose type, which can be used for various materials in the pharmaceutical and dietary industries.

Keywords: non-timber fibers, alpha-cellulose, byproduct, blanching.

INTRODUCCIÓN

Todas las metodologías para obtener pasta de celulosa para papel se basan en la separación de las fibras. Existen dos procesos principales: el método alcalino y el método del sulfito (Chávez y Domine, 2013); el proceso sulfito para la fabricación de pasta de celulosa con el tiempo ha sido sustituido por método kraft, que usa hidróxido de sodio (NaOH) y sulfuro de sodio (Na₂S) en digestores a presión. En este proceso el hidróxido de sodio degrada la lignina y el sulfuro de sodio acelera las reacciones de cocción, y decrece la degradación de la celulosa causada por el hidróxido de sodio. En el método alcalino o sosa no se utilizan los digestores, pero utilizan reactivos de alta pureza que resultan caros. Dado que la cosecha de caña de azúcar genera 14, 020,740 t año⁻¹ de paja y representa una fuente potencial de celulosa para la industria, es necesario buscar métodos que permitan reducir los costos de su extracción. Los objetivos del trabajo fueron establecer un proceso artesanal para la extracción de celulosa de la paja de caña de azúcar cosechada en verde y mecánicamente, y caracterizar su calidad.

MATERIALES Y MÉTODOS

Obtención de la paja de caña. La paja utilizada en este experimento provino de una plantación de caña de azúcar (*Saccharum* spp.) cultivada con la variedad MEX 79-431, que pertenece al área de abastecimiento del Ingenio Presidente Benito Juárez en Tabasco, México. La paja se llevó al Colegio de Postgraduados Campus Tabasco, donde se molió y picó en una picadora de forraje con malla de 4 mm. Posteriormente esta muestra se secó en una estufa de

aire forzado a 65 °C por 24 h. El diseño experimental utilizado fue completamente al azar, donde los tratamientos fueron dos métodos de extracción de celulosa y el proceso se realizó con 10 repeticiones.

Variables de estudio

Método a la sosa (Cazaurang et al., 1990)

Extracción de la fibra de celulosa. 40 g de paja fueron tratados con hidróxido de sodio (NaOH, Meyer) al 10 % para eliminar ceras, pectinas y resinas. La cocción se realizó en un vaso precipitado de 1000 mL y se colocó en una plancha caliente. Una vez que se observó la primera burbuja se dejó calentar por 10 min a 90 °C, y posteriormente se dejó en reposo por 20 minutos para enfriar y lavar con agua corriente; después se enjuagó con agua purificada (pH 7) para posteriormente desfibrar manualmente. En seguida se secó en una estufa de aire forzado a 65 °C y se dejó reposar 12 h. Todo el proceso se realizó por duplicado para contar con suficiente fibra de celulosa para la etapa posterior.

Blanqueo. 20 g de fibra de celulosa se sometieron a una hidrólisis ácida con H₂SO₄ JT Barker al 0.4 %. Una vez que hirvió la solución se procedió a contar 1 h; terminado el tiempo de reacción se dejó reposar 10 minutos para enfriar y se lavó con agua purificada hasta llegar a un pH de 7. Luego se llevó a cabo una cloración con NaClO₂ al 3.5 %. En seguida se realizó en baño María en una plancha a 95 °C. Posteriormente se realizaron lavados con agua purificada hasta llegar a un pH neutro, una extracción alcalina con NaOH al 20 % con agitación constante en un agitador magnético por 1 h, seguido de lavados con agua purificada, hasta llegar a un pH de 7 y un blanqueo con NaClO₂ al 0.5 % homogeneizando la muestra con un agitador magnético en un lapso de una hora. Se realizaron lavados hasta un pH neutro e inmediatamente se desmenuzó y colocó en charolas de fondo plano. La mezcla se dejó reposar por 24 h al ambiente y luego se realizó un secado en estufa de aire forzado a 65 °C por 24 h. Por último, se registró el peso seco de la muestra obtenida (g).

Método artesanal. Los pasos uno y dos del método a la sosa se repitieron utilizando reactivos grado industrial y agua corriente, a lo que se llamó proceso artesanal, ya que estos reactivos pueden ser adquiridos localmente y son de bajo costo.

Contenido de celulosa. Se refiere a la cantidad de pulpa de celulosa extraída de las muestras de paja.

Rendimiento de fibra de celulosa. Se refiere al porcentaje de fibra recuperada después de la extracción con hidróxido de sodio y para su cálculo se utilizó la siguiente ecuación Ec. (1):

$$\text{Rendimiento de fibra de celulosa \%} = (X / P)100$$

Donde X es la cantidad de fibra de celulosa (g), y P=80 g de paja seca, ya que se duplicó este procedimiento.

Rendimiento de pulpa de celulosa. Se refiere al porcentaje de pulpa de celulosa recuperada después del blanqueo; para su cálculo se utilizó la siguiente ecuación Ec. (2):

$$\text{Rendimiento celulosa (\%)} = (C / Z)100$$

Donde C es la cantidad de pulpa de celulosa extraída (g), y Z=20 g de fibra de celulosa.

Caracterización de la pulpa de celulosa. Se evaluó a través de tres parámetros:

Pureza. La caracterización química de las muestras de paja y celulosa se realizó en la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco-Unidad Cunduacán, utilizando la técnica de espectroscopía de infrarrojo con transformada de Fourier (Coates, 2000). Se empleó un Espectrómetro de infrarrojo FTIR Nicolet Magna Protegé 460 en el modo de transmisión, con una resolución de 4 cm^{-1} y 100 barrido.

Cristalinidad. La determinación de la cristalinidad se realizó en el laboratorio central del CINVESTAV, IPN Unidad-Mérida, usando la técnica de difracción de rayos-X método de absorbancia, utilizando un equipo Bruker 08 Advance espectro de $\text{CuK}\alpha$ ($\alpha=1.54 \text{ \AA}$). El porcentaje de cristalinidad de las muestras de paja y de la celulosa obtenida se calculó por el modelo desarrollado por Segal *et al.* (1959). Ec. (3):

$$X_c\% = 100[1 - (I_1 / I_2)]$$

Donde $X_c\%$ es el porcentaje de cristalinidad, I_1 es la intensidad del pico mínimo e I_2 es la intensidad máxima del pico cristalino, respectivamente. El tamaño del cris-

tal se calculó usando la ecuación de Scherrer (Cullity, 1978). Ec. (4):

$$t = 0.9\lambda / \beta \cos \theta$$

Donde t es el tamaño de cristal, λ es la longitud de onda de la radiación utilizada (λ_{Cu}), β es el ancho a la altura media del pico de difracción de la muestra, θ es la posición del pico de difracción y 0.9 es el factor de forma del cristal.

Para las variables fibra de celulosa, rendimiento fibra de celulosa, pulpa de celulosa y rendimiento de pulpa de celulosa se realizó el análisis de varianza con el diseño completamente al azar y la prueba de comparación múltiple de medias de Tukey (con $\alpha=0.05$), usando el paquete SAS versión 9.3.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Fibra de celulosa. La extracción de la paja por los dos métodos no presentó diferencia significativa (Cuadro 1). La media de fibra de celulosa fue 31.6 g y 3.9 % de coeficiente de variación (CV) de que indica buena precisión en la determinación de este parámetro; por lo tanto, la calidad del NaOH no afectó la cantidad de fibra de celulosa ni el rendimiento. La media de recuperación de la fibra de celulosa con ambos métodos fue de 39.5 %. Lo anterior indica que por cada tonelada de paja se obtienen 395 kg de fibra de celulosa, la cual podría usarse para elaborar diversos tipos de papel.

Pulpa de celulosa. Se observó diferencia significativa entre los dos métodos para extraer celulosa (Cuadro 1). Con el método a la sosa se obtuvo la mayor cantidad de pulpa de celulosa, 1.39 g más en comparación con el método artesanal. Una posible explicación a este he-

Cuadro 1. Fibra y pulpa de celulosa extraída de la paja de *Saccharum* spp., a través de dos métodos.

Método de extracción	Fibra de celulosa (g)	Rendimiento fibra de celulosa (%)	Pulpa de celulosa (g)	Rendimiento de pulpa de celulosa (%)
A la sosa	31.79 a [¥]	39.74 a	10.02 a	50.12 a
Artesanal	31.46 a	39.33 a	8.63 b	43.16 b
Media (g):	31.6	39.5	9.3	46.6
CV (%)	3.9	3.9	4.2	4.2
Prob. F	0.53 NS	0.53 NS	0.0001**	0.0001**
DMS	1.12	1.4	0.35	1.79

[¥] Medias con letras distintas dentro de la columna son estadísticamente diferentes (Tukey; $P \leq 0.05$). NS=No significativo.

** Altamente significativo.

cho fue el menor ataque del ácido sulfúrico e hidróxido de sodio grado reactivo del método a la sosa, cuya pulpa de celulosa se caracterizó por su color blanco y consistencia suave (Figura 1). Con el método artesanal el proceso de blanqueo obtuvo una pulpa de celulosa de color amarillo y de consistencia dura al tacto. El método a la sosa superó en rendimiento al método artesanal en 6.96 % (Cuadro 1).

La caracterización de la pulpa de celulosa se realizó a través de tres parámetros: la pureza, cristalinidad y tamaño de cristal.

Pureza. En el análisis de los interferogramas IR (Figura 2 y 3) se registraron diferencias entre el espectro de infrarrojo de las muestras de paja y la pulpa de celulosa de la variedad Mex 79-431. En la Figura 2 la celulosa muestra un pico de 3450 cm^{-1} , el cual se debió a las vibraciones de estiramiento características de los enlaces O-H presentes en la celulosa, hemicelulosa y lignina, tal como lo señalan Moran *et al.* (2008). La intensidad de la banda 2890 cm^{-1} es atribuida a los enlaces C-H, pertenecientes a alquílicos y alifáticos presentes en celulosa, hemicelulosa y lignina (Moran *et al.*, 2008). El pico de 1730 cm^{-1} se relaciona con los enlaces C=O de cetona (pectinas y gomas) presentes en la hemicelulosa, corroborando lo observado por Popescu *et al.* (2010), mientras el pico de 1610 cm^{-1} es asignado al enlace C=C de las vibraciones de estiramiento de los anillos aromáticos de la lignina (Moran *et al.*, 2008; Coates, 2000). El pico 1420 cm^{-1} corresponde a vibraciones de enlace C-H del CH_2 . La banda 1090 cm^{-1} es atribuida a las vibraciones de flexión de los enlaces C-H de los anillos aromáticos (Coates, 2000) y, por último, la banda a 899 cm^{-1} correspondió al enlace C-H de los grupos aromáticos de la lignina (Morán *et al.*, 2008). Lo anterior reafirma la idea de que la paja de caña contiene celulosa, hemicelulosa y lignina (Szczerbowski *et al.*, 2014). La Figura 3 muestra el espectro de infrarrojo de la muestra de pulpa de celulosa

extraída por el método a la sosa. Se observa una banda a 3480 cm^{-1} , la cual es debida a las vibraciones de estiramiento características de los enlaces O-H presentes en la celulosa (Morán *et al.*, 2008; Coates, 2000). La intensidad del pico 2890 cm^{-1} es atribuida a los enlaces H-C-H presentes en la celulosa (Morán *et al.*, 2008). No se observó la banda a 1730 cm^{-1} correspondiente a grupos C=O presentes en hemicelulosas y lignina, ya que fueron eliminadas con el tratamiento, obteniendo celulosa más pura.

El pico 1670 cm^{-1} se relaciona con los enlaces O-H del agua adsorbida a la fibra en la celulosa (Moran *et al.*, 2008), mientras el pico 1380 cm^{-1} es asignado al enlace C-H de vibraciones de flexión presentes en la celulosa. El pico observado de 1060 cm^{-1} es atribuido a las vibraciones de flexión de los enlaces C-O-C presentes en la celulosa (Coates, 2000) y, finalmente, el pico 895 cm^{-1} corresponde a las vibraciones de deformación de C-H, presentes en celulosa, y corrobora lo reportado por Popescu *et al.* (2010). Este análisis permite concluir que la celulosa extraída de la paja de caña es pura y de similar pureza a la extraída del bagazo de caña (López-Martínez *et al.*, 2016).

Cristalinidad. Los difractogramas de la muestra de paja y celulosa extraída con el método a la sosa y artesanal se muestran en la Figura 4. Los picos cercanos a $2\theta=22.3^\circ$ es de celulosa, así como los picos a $2\theta=12.6^\circ$, 20.6° y 35.3° de la celulosa extraída con el método artesanal, son picos característicos correspondientes a la estructura de la celulosa (Visakh y Thomas, 2010; Isogai *et al.*, 1989).

La cristalinidad de la celulosa de la paja de caña (PA) fue de 56.07 %, similar a 56.4 % de cristalinidad de la

paja de trigo reportada por Tomás (2009) y mayor a 41 % del bagazo de caña reportado por López-Martínez *et al.* (2016). El tamaño promedio de los cristales de celulosa fue de 2.7 nm (27 Å), como se observa en el Cuadro 2. La cristalinidad de la celulosa fue

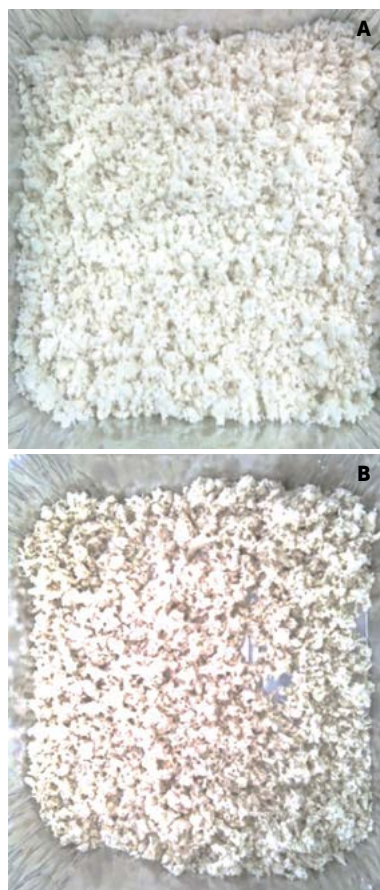


Figura 1. Detalles de la celulosa extraída de la paja de *Saccharum* spp. A: Celulosa con método a la sosa. B: Celulosa con método artesanal.



Figura 2. Interferograma de la muestra de paja, donde los picos muestran los componentes de celulosa, hemicelulosa y lignina.

74.78 % extraída con el método a la sosa y 64.24 % por el artesanal (Cuadro 3). Lo anterior indica que los métodos de extracción son apropiados para eliminar la hemicelulosa y la lignina. La cristalinidad de la celulosa de paja es mayor al observado en la celulosa hidrolizada proveniente del Ramio (*Boehmeria nivea*), la cual posee una fracción cristalina de entre 60 % a 70 % (Gauthier *et al.*, 1998) y 55 % de cristalinidad para la celulosa extraída del bagazo (López-Martínez *et al.*, 2016). La naturaleza cristalina de los cristales no solo está influenciada por la conformación de las cadenas, sino también por el empaquetamiento de las cadenas adyacentes. Los cristales son cadenas de celulosa pura con arreglos de las cadenas de glucosa que difieren a los de la celulosa (Lu y Hsieh, 2010). Las muestras de celulosa presentaron un patrón correspondiente a celulosa tipo I, comúnmente encontrada en las fibras vegetales naturales (Isogai *et al.*, 1989), específicamente celulosa tipo I β estable con cristales monoclinicos. Este tipo de celulosa puede ser usada para diversos materiales en las industrias farmacéutica y alimenticia.

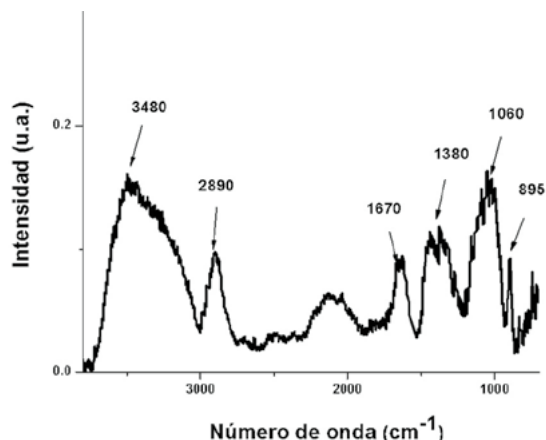


Figura 3. Interferograma de la muestra de pulpa de celulosa, donde los picos indican el contenido de celulosa.

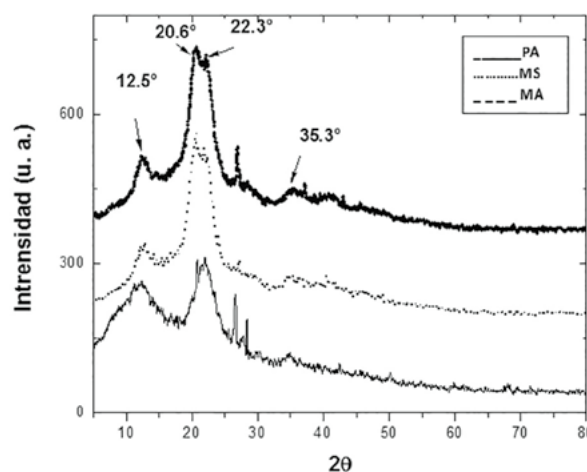


Figura 4. Difractogramas de las muestras de paja de caña (PA), pulpa de celulosa extraída con el método a la sosa (MS), pulpa de celulosa extraída con el método artesanal (MA).

Tamaño de cristal. El tamaño promedio de cristales de la celulosa fue similar con ambos métodos de extracción (Cuadro 3), con una media de 2.2 nm (22 Å). Esto

Cuadro 2. Características de la paja de *Saccharum* spp.

Características	Valores
FWHM (°)¥	3.086
2-Theta (°)	21.96
Área cristalina(°)	357
Área total (°)	636.7
Porcentaje de cristalinidad	56.07 %
Tamaño de cristales	27 Å o 2.7 nm

¥ Ancho a la altura media del pico de difracción de la muestra de paja.

Cuadro 3. Características de la pulpa de celulosa extraída de la paja de *Saccharum* spp.

Características	Pulpa de celulosa método a la sosa	Pulpa de celulosa método artesanal
FWHM (°)¥	3.726	3.82
2-Theta(°)	20.6	20.66
Área cristalina(°)	629	637
Área total(°)	841.1	991.5
Porcentaje de cristalinidad	74.78 %	64.24
Tamaño de cristales	22 Å o 2.2 nm	22 Å o 2.2 nm

¥ Ancho a la altura media del pico de difracción de las muestras de celulosa.

indica que se reduce el tamaño del cristal de celulosa al extraerla, lo cual coincide con lo observado por Hernández (2014) al reportar que los cristales de celulosa pueden aumentar o disminuir por el efecto de los factores que afectan la cristalinidad (fuente, método de extracción y tratamientos posteriores a su extracción).

CONCLUSIONES

Con ambos métodos (a la sosa y artesanal) se extrajo igual cantidad de fibra de celulosa de la paja de caña, con un rendimiento de 39.5%. El blanqueo con el método artesanal extrajo menor cantidad de celulosa en comparación del método a la sosa. A pesar del rendimiento menos eficiente, el método artesanal debe conservarse, ya que resulta más económico por los reactivos de uso industrial. La celulosa se caracteriza por su pureza, cristalinidad y tamaño de granulo, lo que refleja su potencial para elaborar biomateriales.

AGRADECIMIENTOS

Al grupo MASCAÑA del Colegio de Postgraduados Campus Tabasco por el apoyo económico y las facilidades para realizar el presente trabajo en el Laboratorio Central.

LITERATURA CITADA

- Unión Nacional de Cañeros, A.C.-CNPR 2016. Estadísticas de la Agroindustria de la Caña de Azúcar 2004-2013. Consolidado Nacional e Ingenio Benito Juárez. Consultado el 11 de Noviembre de 2016 en: http://www.caneros.org.mx/site_caneros/estadisticas/nacional.pdf
- Cazaurang M., Peraza S. y Cruz R. 1990. Dissolving grade pulps from henequen fiber. *Cellulose Chemistry and Technology*. 24: 629-638.
- Coates J. John Wiley&Sons Ltd, Chicester 2000. Interpretation of infrared spectra, a practical approach. *Encyclopedia of Analytical Chemistry*. R. A. Meyers (Ed.). pp. 10815-10837.
- Cortez V., V. A. 2010. Comparación de pretratamientos en residuos forestales para la producción de bioetanol de segunda generación: hidrólisis ácida y líquidos iónicos. Tesis de MC, Universidad de Chile. Santiago de Chile. 122 p.
- Costa S.M., Mazzola P.G., Silva J.C.A.R., Pahlc R., Pessoa, A.Jr. y Costa S. A. 2013. El uso de paja de la caña de azúcar como fuente de fibra de celulosa para la producción de textiles. *Cultivos y Productos Industriales*. 42: 189-194.
- Cullity B.D. 1978. Elements of X-Ray Diffraction, second edition, Addison- Wesley, New York. Falta Gauthier et al 1988.
- Hernández C.B.I. (2014). Obtención y caracterización físicoquímica de celulosa a partir del fruto de la especie *Ceiba pentandra* (L.) Gaertn kapok. Tesis profesional. Universidad Popular de la Chontalpa. México.
- Isogai A., Makoto U., Kato T., Uryu T. y Atalla R. 1989. Solid-State CO/MAS 13Cnmr Study of Cellulose Polymorphs. *Macromolecules*. 22: 3168-3172.
- León-Martínez T.S., Dopico-Ramírez D., Triana-Hernández O. y Medina-Estévez M. 2013. Paja de la caña de azúcar. Sus usos en la actualidad ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar. 47: 13-22.
- López-Martínez A., Bolio-López G.I., Veleza L., Solórzano V.M., Acosta T.G., Hernández V.M.M, Salgado G.S. y Córdova S.S. 2016. Obtención de celulosa a partir de bagazo de caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.): Aislamiento y caracterización. *Agroproductividad*. 9(7):1-12.
- Lu P., Hsieh Y.L. 2010. Preparation and properties of cellulose nanocrystals: Rods, spheres, and network. *Carbohydrate Polymers*. 82: 329-336.
- Maya J., Sabu T. 2008. Biofibres and biocomposites *In: Carbohydrates polymers* 71: 343-364.
- Morán J.I., Vera A., Cyran V.P., Vázquez A. 2008. Extraction of cellulose and preparation of nanocellulose from sisal fibers. *Cellulose*. 15: 149-159.
- Popescu C.M., Popescu M.C., Vasile C. 2010. Structural changes in biodegraded lime Wood. *Carbohydrate Polymers journal*. 79: 362-372.
- Salgado-García S., Aranda-Ibañez E.M, Castelán-Estrada M., Ortiz-Laurel H., Palma-López D.J., Córdova-Sánchez S. 2014. Qué hacer con la paja de la cosecha mecanizada de la caña de azúcar. *Agroproductividad*. 7: 5-10.
- Segal L., Creely J., Martin A., Conrad C. 1959. An empirical method for estimating the degree of crystallinity of native cellulose using the X-ray diffractometer, *Textile Research J*. 786-794.
- Szczerbowski C., Pitarelob A.P., Zandoná A.Jr., Ramos L.P. 2014. Sugarcane biomass for biorefineries: Comparative composition of carbohydrate and non-carbohydrate components of bagasse and Straw. *Carbohydrate Polymers*. 114: 95-101.
- Visakh P. M., Thomas S. 2010. Preparation of Bionanomaterials and their Polymer Nanocomposites from Waste and Biomass. *Waste Biomass*. 1: 121-134.



PLANTA PILOTO PARA OBTENCIÓN DE CELULOSA DE RESIDUOS DE CAÑA DE AZÚCAR (*Saccharum* spp.) Y ELABORACIÓN DE RECIPIENTES BIODEGRADABLES

PILOT PLANT USED TO OBTAIN CELLULOSE FROM SUGAR CANE RESIDUES (*Saccharum* spp.) AND ELABORATE BIODEGRADABLE CONTAINERS

Ross-Alcudia, R.E.¹; Bolio-López, G.I.^{1*}; Veleza, L.²; Azamar-Barrios, J.A.²; Hernández-Villegas, M.M.¹,
Pérez-Romero, J.¹; Pérez-Romero, C.A.¹; Correa-Durán, M.S.¹; Córdova-Sánchez, S.¹

¹Universidad Popular de la Chontalpa, Carretera Cárdenas-Huimanguillo km 2, Cárdenas, Tabasco, México. C. P. 86500 Cuerpo Académico Química Verde y Desarrollo Sostenible (CA-QVDS),

²CINVESTAV-Mérida, Física Aplicada, Carretera Antigua a Progreso km 6, Cordemex, Mérida, Yucatán, México. C. P. 97310.

*Autor de correspondencia: bgloriaivette@gmail.com; gloriaivette.bolio@upch.edu

RESUMEN

Este estudio permitió evidenciar que es posible obtener celulosa a mayor escala (planta piloto) a partir de residuos agroindustriales de caña de azúcar (*Saccharum* spp.), alcanzando 50 % de rendimiento de fibra pretratada, el cual mediante tratamiento químico de hidrólisis ácida y blanqueado se obtiene un rendimiento de 34 % de celulosa final. El análisis de los difractogramas de rayos-X reveló que la cristalinidad de la celulosa obtenida fue de 69 %, con tamaño promedio de cristales de 2.3 nm, mientras que la de la paja de caña (sin tratamiento) tuvo un valor menor (46 %), con tamaño promedio del cristal de 2.6 nm, menor al de la celulosa obtenida con el tratamiento. La mayor cristalinidad de la celulosa fue atribuida a la manera eficiente de disolución de las regiones amorfas (lignina y hemicelulosas), confirmada con los interferogramas de espectroscopia de infrarrojo (FTIR). Estos resultados, aunados a la elaboración de prototipos, mostraron que la paja de caña de azúcar es una fuente de celulosa con gran potencial para la elaboración de recipientes biodegradables.

Palabras clave: paja de caña, subproductos, diversificación.

ABSTRACT

This study allowed making evident that it is possible to obtain cellulose at a larger scale (pilot plant) from agro-industrial sugar cane (*Saccharum* spp.) residues, reaching 50 % of yield from pre-treated fiber, which, through chemical acid hydrolysis and bleaching treatment obtained a final yield of 34 % cellulose. The analysis of X-ray diffractograms revealed that the crystallinity of the cellulose obtained was 69 %, with average crystal size of 2.3 nm, while the crystallinity of the cane straw (without treatment) had a lower value (46 %), with average crystal size of 2.6 nm, lower than that of the cellulose obtained with the treatment. The higher crystallinity of the cellulose was attributed to the efficient way of dissolution of amorphous regions (lignin and hemicelluloses), confirmed with the interferograms from Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR). These results, in addition to the elaboration of prototypes, showed that sugar cane straw is a source of cellulose with great potential for the elaboration of biodegradable recipients.

Keywords: sugar cane straw, byproducts, diversification.

Agroproductividad: Vol. 10, Núm. 11, noviembre. 2017. pp: 60-65.

Recibido: mayo, 2017. **Aceptado:** octubre, 2017.

INTRODUCCIÓN

Según datos de la SAGARPA (2016), la producción de caña de azúcar (*Saccharum* spp.) en México es de 54.1 millones de toneladas, que lo ubica como el sexto productor mundial de este cultivo. Los principales estados productores son Veracruz, Jalisco y San Luis Potosí, quienes aportan alrededor de la mitad del volumen nacional. En Tabasco, la producción de la caña de azúcar es una de las actividades principales de la economía; se cultivan alrededor de 27,668 hectáreas (IEA, 2011). Según datos oficiales, por cada hectárea cultivada se produce un promedio de 75 toneladas de caña de azúcar, generando 9 t de paja y 29.25 t de bagazo, haciendo un promedio de 38.25 t de residuos agroindustriales. De acuerdo con estas cifras se calcula que solo en Tabasco se producen más de 1 millón de residuos de esta agroindustria. Uno de los grandes problemas ambientales actualmente en nuestro medio es la alta generación de residuos agroindustriales, los cuales son quemados o se quedan en las plantaciones sin ningún tratamiento, contribuyendo al deterioro del ecosistema (Íñiguez *et al.*, 2001). Al quemarse, estos residuos generan cenizas que son diseminadas por el aire en un radio de hasta de 8 km, llegando a las ciudades y contaminando el ambiente; otra consecuencia de la quema, aunada a la mecanización utilizada para aumentar la productividad de los suelos, tiene por consecuencia la reducción de la materia orgánica del suelo, el incremento de la erosión y la disminución de la densidad de poblaciones microbianas benéficas para los cultivos (Ruiz, 1999; Domínguez *et al.*, 2010). Actualmente, amén de las premisas para la diversificación de la industria cañera, las normativas basadas fundamentalmente en el reciclado y reutilización de materiales ofrecen una ventana de oportunidad para el aprovechamiento del cultivo, contribuyendo a la sostenibilidad de la economía azucarera, ya que en el caso de estos residuos adquieren especial interés por cuanto supondría un beneficio ecológico al eliminar la fuente de contaminación, al tiempo que tendrían un valor agregado que no ha sido considerado hasta ahora. Los residuos vegetales de la caña de azúcar se encuentran constituidos por fibras celulósicas. La celulosa es el compuesto de mayor abundancia en la naturaleza. Se estima que por cada tonelada de materia prima se obtienen 170 kilogramos de celulosa, de tal manera que de una hectárea de caña se producirán 12.75 t de celulosa, por lo que estos desechos constituyen, por sí mismos, una fuente de productos valiosos de interés comercial y de investigación, que pueden ser aprovechados para diversos usos y aplicaciones. Uno

de los métodos más utilizados para la obtención de celulosa a partir de soft wood es el tratamiento químico, procedimiento que involucra una hidrólisis ácida suave, cloración, extracción alcalina y blanqueamiento. El Laboratorio de Materiales Poliméricos de la Universidad Popular de la Chontalpa (UPCH) ha obtenido celulosa a partir de paja y bagazo de caña a nivel de laboratorio, con un rendimiento en peso (base seca) de 33 % y 48 %, respectivamente. Este biopolímero se ha utilizado en trabajos de investigación como fuente para obtención de nanocelulosa para ser usada como refuerzo en materiales compuestos, así como para la elaboración de papel artesanal. El objetivo de este trabajo fue establecer las bases para la implementación de una planta piloto con la capacidad de procesar 5.0 kg de paja de caña por lote y obtener valores de 30 % de celulosa en base seca para la transformación y elaboración en recipientes biodegradables desechables.

MATERIALES Y MÉTODOS

El material biológico utilizado (paja de caña) fue proporcionado por el productor cañero del Poblado Plutarco Elías Calles (C-14), ubicado en Cárdenas, Tabasco, México. El clima de esta zona es cálido y húmedo, con temperatura media anual de 26 °C y precipitación media anual de 2,163 mm, con una altitud de 11 m (Salgado *et al.*, 2011). La paja se recibió en las instalaciones de la Universidad Popular de la Chontalpa durante los meses de febrero y marzo de 2016. Esta paja viene con un exceso de humedad; se almacenó en bolsas de polietileno con peso aproximado de 2 kg, realizando un secado solar a temperatura ambiente (Figura 1A). Posteriormente, el material fue seleccionado (Figura 1B), ya que la paja en los contenedores viene mezclada con residuos de caña (varas y puntas), otras especies vegetales e insectos, para así almacenar el material vegetal limpio y seco en bolsas de polietileno. El siguiente paso fue el proceso de picado. Esta actividad se realizó con ayuda de una picadora a gasolina Marca Gorsa Mod. 1800, con motor de 5 HP de potencia (Figura 1C). Una vez picada, la paja se empaquetó nuevamente en bolsas de polietileno y se selló con cinta adhesiva para evitar la humedad ambiental, almacenándose para su posterior uso.

Obtención de la celulosa: Pretratamiento

La paja de caña seca y picada (5 kg) fue colocada en un tanque de pretratamiento en 100 L de solución de NaOH al 10 % durante dos días (Figura 2A). La metodología de pretratamiento realizada por Bolio *et al.* (2011)



Figura 1. Procesamiento de paja de caña de azúcar para obtención de celulosa. A: Secado. B: Seleccionado. C: picado.

fue adaptada para la muestra de paja de caña, con el fin de eliminar ceras, pectinas y resinas presentes en la fibra.

Al segundo día se procedió a lavar la fibra con agua corriente hasta obtener un pH neutro (Figura 2B). Al finalizar los lavados la fibra se secó a temperatura ambiente y a la sombra durante dos días (Figura 2C). Posteriormente, se procedió a hacer un prototipo de recipiente con fibra pretratada, húmeda y pH neutro, utilizando un molde de plástico y prensándolo con un peso de

cemento de 800 g (Figura 2D), dejando el prototipo en la cámara de secado a 60 °C durante 48 h (Figura 2E).

Tratamiento: Hidrólisis ácida

Una vez seca la fibra pretratada se colocó dentro de un reactor de 50 L que contenía una solución de H_2SO_4 al 0.4 % (Figura 3A), con el fin de remover las regiones amorfas de la celulosa. Posteriormente, la mezcla se sometió a ebullición durante una hora. Transcurrido el tiempo se procedió a lavar la fibra hasta obtener un pH de 7.0.



Figura 2. Pretratamiento de la fibra de paja de caña de azúcar en las instalaciones de la Universidad popular de la Chontalpa (UPCH).

Cloración

La fibra obtenida de la hidrólisis ácida se colocó nuevamente en el reactor durante 10 minutos, con una solución de $NaClO$ al 3.5 %, previamente calentada a 40 °C (Figura 3B). Concluido el tiempo, la fibra se lavó hasta obtener un pH neutro. Durante este proceso de cloración se degrada la lignina y reduce el tamaño de las cadenas de celulosa.

Extracción alcalina

La fibra obtenida de la cloración fue colocada en el reactor durante una hora con solución $NaOH$ 20 % (Figura 3C). Terminado el tiempo, la fibra se lavó hasta obtener un pH de 7.0.

Blanqueo

La fibra obtenida anteriormente se colocó de nuevo en el reactor en una solución de $NaClO$ 0.5 % durante una hora (Figura 3D). Posteriormente, la fibra se lavó hasta obtener un pH neutro y se dejó secar a



Figura 3. Tratamiento de la paja de *Saccharum* spp. para obtención de material celulósico usado en la elaboración de recipientes biodegradables. A: Hidrólisis ácida. B: Cloración. C: Extracción alcalina. D: Blanqueo. E: Secado solar. F: Secado en cámara. G: Prototipos de recipientes de celulosa.

temperatura ambiente y a la sombra durante dos días (Figura 3E). Adicionalmente se dejó un día en la cámara de secado a 60 °C (Figura 3F). Los recipientes de celulosa (Figura 3G) fueron hechos con la fibra húmeda y pH neutro al término del tratamiento, utilizando un molde de plástico y un peso de cemento; los prototipos se dejaron en la cámara de secado a 60 °C durante 72 h.

Métodos de caracterización: Espectroscopía de infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR)

La caracterización química de las muestras de paja de caña y celulosa obtenida se llevó a cabo, utilizando la técnica de espectroscopia de infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR), con un Espectrómetro de Infrarrojo (FTIR Nicolet Magna Protegé 460) en el modo absorbancia, con una resolución de 4

cm⁻¹ y 100 barridos. Las pastillas para manejo con el FTIR se prepararon con 1 mg de muestra de celulosa en 100 mg de KBr.

Difracción de Rayos-X (XRD)

La determinación de la cristalinidad ($X_c\%$) fue basada en el análisis de los espectros de difracción de rayos-X, método de polvos (PXRD), obtenidos con un equipo "Siemens D 5000 Difractometer", espectro de $\text{CuK}\alpha$ ($\alpha=1.5418 \text{ \AA}$ y de energía 8.047 keV). El porcentaje de cristalinidad ($X_c\%$) de las muestras de celulosa fue calculada con la ecuación (1) por el método desarrollado por Segal *et al.* (1959):

$$X_c(\%) = 100 \left[1 - \frac{I_1}{I_2} \right] \quad \text{ec. 1}$$

Donde: I_1 es la intensidad del pico mínimo y I_2 es la intensidad máxima del pico cristalino, respectivamente.

El tamaño del cristal (t) fue calculado con la ecuación (2), propuesta por Scherrer (Cullity, 1978):

$$t = 0.9\lambda / B \cos \theta \quad \text{ec. 2}$$

Donde: λ es la longitud de onda de la radiación utilizada (λ_{Cu}), B es el ancho

a la altura media del pico de difracción de la muestra, θ es la posición del pico de difracción y 0.9 es el factor de forma del cristal.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El rendimiento de la celulosa pretratada fue de 50 % a partir de la paja de caña, obteniendo un rendimiento de 34 % de celulosa final. Este valor es menor al 48 % registrado del bagazo de caña reportado por López-Martínez *et al.* (2016), debido probablemente a que la hoja tiene menor cantidad de fibra, que el tallo de la caña de azúcar y también, menor al 46 % de celulosa obtenida de *Heliconia latispatha* (García Fajardo, 2015), pero mayor a 27 % obtenido de residuos de *Musa* spp. (Canché *et al.*, 2005).

La Figura 4 muestra el espectro de FTIR de las muestras de paja de caña y celulosa obtenida. La paja de caña muestra algunas bandas características, debido a los anillos aromáticos de la lignina, presentes en la estructura básica (Liu *et al.*, 2008). Por ejemplo, el pico a 1720 cm^{-1}

es relacionado con los enlaces C-O del grupo carboxilo de los anillos aromáticos en la fibra de paja de caña sin procesar (Figura 4A). Sin embargo, en la banda de 1720 cm^{-1} no está presente en la celulosa blanqueada e hidrolizada (Figura 4B), indicando que la lignina fue exitosamente removida durante el proceso. Por otra parte, se observa que los picos en el rango $700\text{--}900\text{ cm}^{-1}$, correspondientes a grupos C-H de hidrógenos aromáticos de la lignina también, disminuyeron su intensidad, corroborando la remoción de la mayor cantidad de lignina de la fibra tratada (celulosa) (Morán *et al.*, 2008). Además, en la muestra de celulosa obtenida, la banda de 3740 cm^{-1} (atribuida a los grupos OH) presenta una mayor intensidad que puede ser asociada al incremento de grupos hidroxilos libres. La cristalinidad para la muestra de celulosa obtenida de paja de caña (ec. 1) fue de 69 % (Figura 5B), incrementándose con respecto al 46 % correspondiente a la muestra de paja de caña (sin procesar) (Figura 5A) por el blanqueamiento y la hidrólisis, debido a la remoción de componentes de bajo peso molecular y fases amorfas, respectivamente. La celulosa muestra

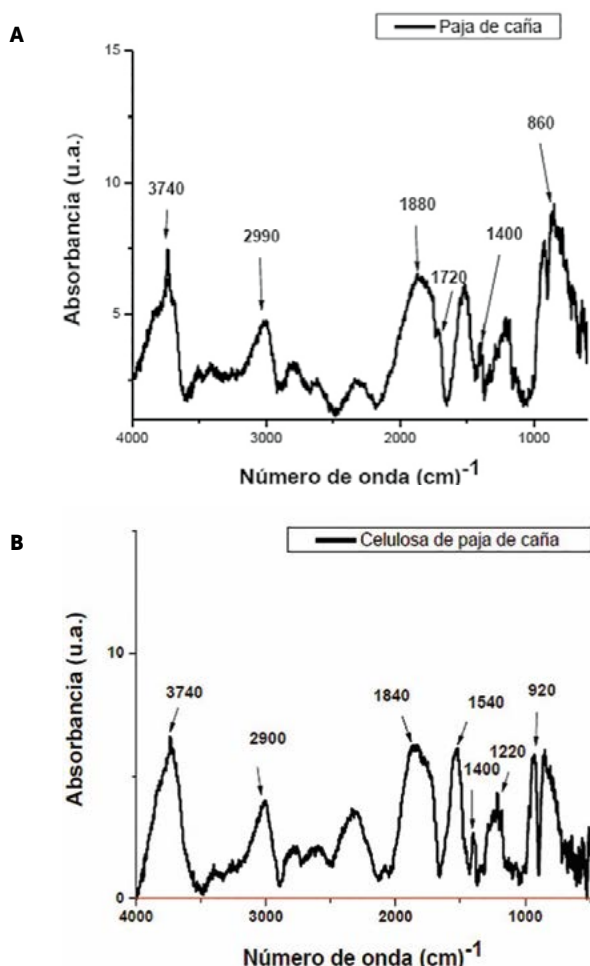


Figura 4. Interferogramas FTIR de muestras de paja de *Saccharum* spp. y celulosa obtenida. A: Paja de caña. B: Celulosa de paja de caña.

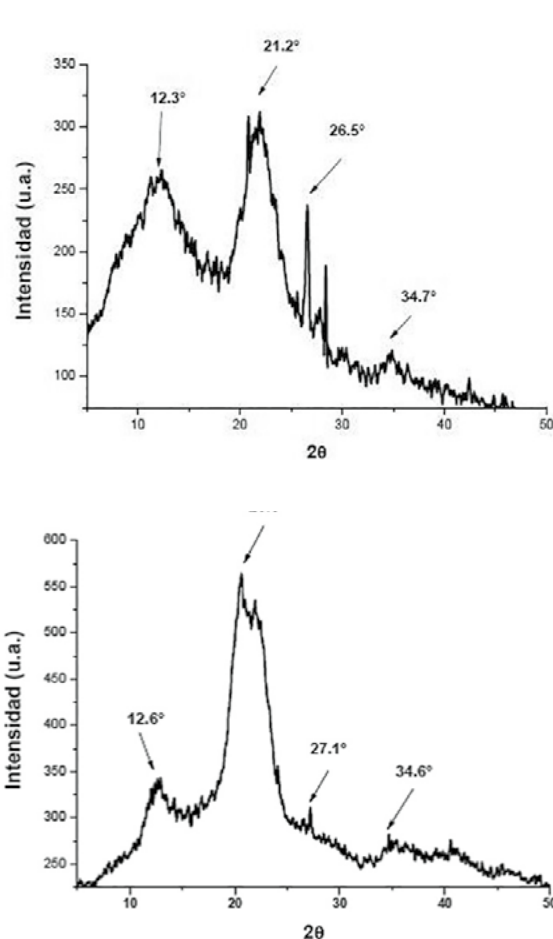


Figura 5. Difractogramas XRD: A) Paja de caña, B) Celulosa de paja de caña.

mayor cristalinidad por las condiciones ácidas de obtención. Sin embargo, ninguna muestra presentó 100 % de cristalinidad, debido a los defectos de superficie y la fase amorfa. Como lo reporta Driemeier *et al.* (2011), la cristalinidad de la celulosa es modificada durante los procesos de blanqueamiento e hidrólisis. El proceso de blanqueamiento puede promover la remoción de la lignina y las hemicelulosas, lo cual no solo disminuye el contenido de fase amorfa, sino que también promueve la disminución del tamaño de cadena.

El tamaño promedio de los cristales (ec. 2) de la celulosa obtenida de paja caña fue de 2.3 nm y los de la muestra de paja de caña sin procesar fue de 2.6 nm. El tamaño de cristal en la celulosa extraída de la paja de caña de azúcar fue menor a la observada para el fruto de la ceiba (2.7 nm) (Hernández, 2014). La reducción del tamaño de cristal de la celulosa, puede deberse a la fuente, al método de extracción y a tratamientos posteriores a su extracción. De acuerdo con varios autores (Alexander, 1969; Cullity, 1978), los cristales de celulosa poseen una forma monoclinica.

CONCLUSIONES

Este estudio demostró la posibilidad de obtener celulosa de buena calidad a nivel planta piloto a partir de desechos agroindustriales de paja de caña de azúcar, aplicando un tratamiento químico de hidrólisis ácida y blanqueamiento a las fibras de celulosa, corroborado con el análisis de infrarrojo realizado a la paja de caña y a la celulosa obtenida, donde se observa un decremento principalmente en la intensidad de los picos correspondientes a los grupos funcionales de los anillos aromáti-

cos de la lignina, indicando que esta fue en mayor proporción removida con los procedimientos químicos aplicados. El rendimiento de celulosa fue de 34 %. El análisis de los difractogramas rayos-X reveló que la cristalinidad de la celulosa obtenida fue de 64 %, con un tamaño promedio de los cristales de 2.3 nm. La cristalinidad de la fibra de paja de caña (sin tratamiento) tuvo un valor menor (46 %), con un tamaño promedio del cristal de 2.6 nm. Estos resultados, aunados a la elaboración de prototipos de contenedores, permiten evidenciar que los residuos agroindustriales (paja) son fuente de celulosa con alto potencial para elaborar recipientes biodegradables.

AGRADECIMIENTOS

Los análisis de difracción de rayos-X fueron realizados en el Laboratorio Nacional de Nano y Biomateriales (Financiado por Fomix-Yucatán y Conacyt), CINVESTAV-IPN. Unidad-Mérida. Agradecemos a la PhD. Patricia Quintana por el acceso a LANNBIO y al M.S. Daniel Aguilar Treviño por su soporte técnico en la obtención de los difractogramas.

LITERATURA CITADA

- Alexander L.E. 1969. X-Ray diffraction methods in polymer science. John Wiley and Sons, New York, USA. 582 p.
- Bolio-López G.I., Valadez A., Veleza L. 2011. Whiskers de celulosa a partir de residuos agroindustriales de banano: obtención y caracterización. *Revista Mexicana de Ingeniería Química* 10: 291-299.
- Canché G., de los Santos J.M., Andrade S., Gómez R. 2005. Production of cellulose from banana plant agricultural waste. *Información Tecnológica* 16: 83-88.
- Cullity B.D. 1978. Elements of X-Ray Diffraction. 2nd edition. Addison-Wesley, New York, USA. 554 p.
- Domínguez J., Aira M., Gómez-Brandón M. 2010. Vermicomposting: earthworms enhance the work of microbes. En: H. Insam, I. Franke-Whittle, M. Goberna (Eds). *Microbes at work: from wastes to resources*. Springer, Berlin, Germany. pp: 93-114.
- Driemeier C., Pimenta M.T.B., Rocha G.J.M. 2011. Evolution of cellulose crystals during prehydrolysis and soda delignification of sugarcane lignocellulose. *Cellulose* 18: 1509-1519.
- García-Fajardo N. A. 2015. Obtención y caracterización fisicoquímica de celulosa a partir del tallo de la planta *Heliconia latispatha* Benth ("platanillos") por el método Cazaurang modificado. Tesis de Licenciatura. División de Ciencias Básicas e Ingenierías. Universidad Popular de la Chontalpa. Cárdenas, tabasco, México. 52 p.
- Hernández-Córdova B.I. 2014. Obtención y caracterización fisicoquímica de celulosa a partir del fruto de la especie *Ceiba pentandra* (L.) Gaertn (KAPOK). Tesis de Licenciatura. División de Ciencias Básicas e Ingenierías. Universidad Popular de la Chontalpa. Cárdenas, tabasco, México. 52 p.
- Indicadores Estatales Agronómicos (IEA), 2011. Subsecretaría de Fomento a los Agronegocios. SAGARPA. 6 p.
- Iñiguez-Covarrubias G., Sandra E., Lange-Roger M.R. 2001. Utilization of byproducts from the tequila industry: part 1: agave bagasse as a raw material for animal feeding and fiberboard production. *Bioresource Technology* 77: 25-32.
- Liu Q., Wang S., Zheng Y., Luo Z., Cen K.. 2008. Mechanism study of wood lignin pyrolysis by using TG-FTIR analysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 82: 170-177.
- López-Martínez A., Bolio-López G.I., Veleza G.I., Solórzano-Valencia M., Acosta-Tejada G., Hernández-Villegas M.M., Salgado-García S., Córdova-Sánchez S. 2016. Obtención de celulosa a partir de bagazo de caña de azúcar (*Saccharum* spp.) *Agroproductividad* 9: 41-45.
- Morán J.I., V. A. Álvarez, V. P. Cyas, A. Vázquez. 2008. Extraction of cellulose and preparation of nanocellulose from sisal fibers. *Cellulose* 15:149-159.
- Ruiz R.O. 1999. Agroecología: un enfoque para la producción sustentable de alimentos agrícolas industriales. *Revista TecnoAgro* 5: 5-6.
- Salgado-García S., Palma-López D.J., Zavala-Cruz J., Lagunes-Espinoza L.C., Castelán-Estrada M., Ortiz-García C.F., Juárez-López J.F., Ruiz-Rosado O., Armida-Alcudia L., Rincón-Ramírez J.A., Córdova-Sánchez S. 2011. Un programa de fertilización sustentable para el Ingenio "Presidente Benito Juárez" en Tabasco, México. *Avances en Investigación Agropecuaria* 15: 45-65.

MANEJO POR CORTE DE CAÑA DE AZÚCAR (*Saccharum* spp.) PARA PRODUCCIÓN DE FORRAJE, COMO ENSILAJE

MANAGEMENT BY CUTTING OF SUGAR CANE (*Saccharum* spp.) FOR FODDER PRODUCTION AS ENSILAGE

Ortiz-Laurel, H.^{1*}; Rosas-Calleja, D.¹; Debernardi de la Vequia, H.¹; Rössel-Kipping, D.²

¹Colegio de Postgraduados Campus Córdoba. Carretera Córdoba-Veracruz km 348, Amatlán de los reyes, Veracruz, México. C.P. 94946. ²Colegio de Postgraduados Campus San Luis Potosí. Iturbide No. 76, Salinas Hidalgo, San Luis Potosí, México. C.P. 94946.

*Autor de correspondencia: hlaurel@colpos.mx

RESUMEN

Este estudio exploró la viabilidad técnica de elaborar ensilaje a partir de la biomasa del rebrote de caña de azúcar (*Saccharum* spp.) compactada en pacas y colocadas en bolsas selladas herméticamente para provocar una fermentación anaeróbica. El rebrote de la caña, fue cortado con una edad de desarrollo de tres meses desde la cosecha, con un rango de materia seca de 15 % a 20 %, con la cual se elaboraron pacas de 360×460×900 mm, con densidad de compactación de 100-128 kg m³⁻¹. Las pacas se colocaron en bolsas de plástico se sellaron y almacenaron bajo techo, midiéndose la temperatura al interior cada 10 días por dos meses. La temperatura interna de las pacas aumentó de 30 °C al inicio, hasta 35 °C, para disminuir a un mínimo de 29 °C en la mitad del periodo y volver a aumentar, y sostenerse en 35 °C hasta su apertura. Después del almacenamiento todas las pacas experimentaron una fermentación satisfactoria, consiguiéndose un ensilaje adecuado.

Palabras clave: proceso tecnológico, fermentación anaeróbica, empaçado, biomasa, alimento para ganado.

ABSTRACT

This study explored the technical viability of elaborating ensilage from sugar cane (*Saccharum* spp.) regrowth biomass, compacted into bundles and placed in hermetically sealed bags to provoke anaerobic fermentation. The sugar cane regrowth was cut at a development age of three months since harvest, with a range of dry matter from 15 % to 20 %, with which 360×460×900 mm bundles were made, with compaction density of 100-128 kg m³⁻¹. The bundles were placed in plastic bags, sealed and stored under a roof, and the temperature inside was measured every 10 days for two months. The internal temperature of the bundles increased from 30 °C at the beginning, to 35 °C, to drop to a minimum of 29 °C in the middle of the period and increase again and remain at 35 °C until their opening. After storage, all the bundles experienced satisfactory fermentation, attaining with this adequate ensilage.

Keywords: technological process, anaerobic fermentation, packaging, biomass, food for livestock.

Agroproductividad: Vol. 10, Núm. 11, noviembre. 2017. pp: 66-69.

Recibido: mayo, 2017. **Aceptado:** octubre, 2017.



INTRODUCCIÓN

La producción ganadera es una actividad de gran impacto económico en México, la cual se sustenta sobre la carne, productos lácteos y otros derivados. México produce cada año, 1.88 millones de toneladas de carne de bovino (FIRA, 2015), 11 mil 400 millones de litros de leche y 1 millón 30 mil toneladas de derivados y fermentos lácteos (SAGARPA, 2015). En la producción ganadera, los insumos alimenticios representan un porcentaje significativo que puede afectar la rentabilidad; y para no afectarla se deben cuidar los costos de producción y la calidad final de los productos. Respecto a los insumos alimenticios para bovinos, es importante implementar técnicas que incrementen la producción de biomasa forrajera, explorar mayor variedad de productos vegetales, así como aprovechar cultivos alternativos y subproductos que mediante procesos sencillos puedan transformarse en forrajes nutritivos y aceptados por los animales (Ali *et al.*, 2015; Corrêa *et al.*, 2003; Suliman *et al.*, 2013). En esta última situación la técnica seleccionada está vinculada a la calidad inicial del material, por lo que, para sustentar esa premisa se debe cortar rápido, reducir a niveles aceptables su contenido de humedad, compactar el material y conservar la masa vegetal con seguridad, y esté disponible en periodos de escasez (Suksombat y Junpanicharoen, 2005). Tradicionalmente, el cultivo de la caña de azúcar (*Saccharum* spp.) se ha enfocado exclusivamente a la producción de azúcar, condicionada irremediablemente por su nombre y al uso de sus subproductos; de estos últimos, escasamente el productor cañero recibe algún beneficio. La utilización de la caña como producto forrajero se concentra en los residuos de post-cosecha (McKenzie y Griffiths, 2007; Karbhari *et al.*, 2007; Heuzé *et al.*, 2015) y en la disponibilidad de un cultivo de bajo estándar para la obtención rentable de

azúcar (siniestrada, inundada, daño excesivo por plagas y remanente por exceso de producción o de difícil acceso) (Figura 1). Lo anterior tiene lugar durante los seis meses de cosecha (diciembre-mayo) y es exclusivo de las zonas cañeras, lo cual genera sobre oferta y bajos precios (Kung y Stanley, 1982; Ortiz-Laurel *et al.*, 2010). En dichos casos, para su aprovechamiento se requiere de técnicas de conversión, insumos y manejo que aseguren uniformidad de la calidad alimenticia, además de su rentabilidad (Aranda-Ibañez *et al.*, 2012; Marcondes *et al.*, 2012).

Dado su carácter forrajero actual, el ganado es realmente alimentado con biomasa de caña de azúcar de segunda categoría; hecho que se contrapone con el objetivo de mejorar la rentabilidad de los productos ganaderos. La caña de azúcar es un pasto perene; sin embargo, no se cultiva como tal, por lo que se tiene escasa información respecto a su producción intensiva como forraje de corte durante, lo que conlleva a desconocer su manejo, potencial productivo, procesamiento, conservación para ensilaje e impacto económico. Pareciera ser que es más conveniente esperar 12 meses para cosechar el cultivo, que el ingenio lo procese para obtener azúcar y esperar para recibir un único ingreso. Con base en lo anterior, se evaluó el proceso de corte periódico de la biomasa joven de caña de azúcar, su compactado mecánico e inclusión en bolsas de plástico, para fomentar una fermentación anaeróbica, con el fin de conservarla y acentuar sus cualidades alimenticias. Lo anterior permitirá generar metodologías para su manejo como forraje de corte y ampliar la oferta de productos forrajeros en temporadas de alta demanda.



Figura 1. Algunos tipos de presentaciones de la caña de azúcar (*Saccharum* spp.) como alimento para el ganado. a: Comercio de tallos enteros picados. b: "Puntas" de caña. c: Caña picada y fermentada. d: Residuos de cosecha de caña de azúcar.

MATERIALES Y MÉTODOS

Los principios empleados para manejar el ensilaje convencional de conservación del cultivo; también aplican a materiales vegetales compactados en pacas, siempre y cuando se encuentren contenidas en receptáculos, las cuales se aíslan de las condiciones ambientales externas. El éxito de este proceso depende de mantener una condición lo más cercana a un sellado hermético durante el periodo establecido de su almacenamiento (Kung y Stanley, 1982; Marcondes *et al.*, 2012). La colocación de las pacas individuales en bolsas de polietileno facilita la preservación y mantienen un ambiente adecuado hasta el momento de requerirse cada pequeña unidad de ensilaje. También se reduce la cantidad de biomasa expuesta al deterioro, debido a un sellado deficiente debido a daño de la envoltura; y facilita su comercialización al disponer de unidades individuales portátiles (Alonso *et al.*, 2005; De Pádua *et al.*, 2014; Sá-Neto *et al.*, 2012).

Corte, empacado y embolsado de material vegetal

El rebrote de caña de azúcar en una etapa de crecimiento de tres meses desde la cosecha, con contenido de materia seca (ms) de entre 15 % y 20 %, fue cortado de forma manual e introducido en una máquina empacadora. Bajo las condiciones generales de manejo del cultivo de caña, con separación entre surcos de 1.20 m y de soca 2, se obtuvieron pacas de 45 kg a 50 kg por cada 20 m lineales de rebrote de la planta. El grupo de pacas mantuvo una configuración cúbica alargada, de tamaños equivalentes (360×460×900 mm), con ajuste de la máquina para una densidad de compactación promedio de 114 kg m^{-3} (Figura 2). Cada paca fue introducida en una bolsa de plástico, procurando seguir un procedimiento estricto de expulsión de aire y una vez cubiertas se procedió a sellar cualquier infiltración de aire (Figura 3). Básicamente, lo que se pretende es provocar un proceso de fermentación anaeróbica de los azúcares de la caña, con el propósito de resaltar la calidad alimenticia de la biomasa vegetal (Sá-Neto *et al.*, 2012).



Figura 2. Corte de biomasa de *Saccharum* spp. para forraje. a: Rebrote de caña de azúcar de tres meses. b: Corte del rebrote. c: Compactado en pacas con máquina.

La temperatura en la masa vegetal en el ensilaje es una medida de fermentación satisfactoria. Así, un ensilaje que se calienta rápidamente (38 °C) se considera que se encuentra en proceso una fermentación adecuada (De Pádua *et al.*, 2014; Mthiyane *et al.*, 2001).

Las pacas fueron almacenadas bajo techo y sin contacto con el suelo. Se estimó un periodo de almacenamiento de dos meses, tiempo suficiente para permitir una fermentación adecuada, por lo que para monitorear el proceso se midió la temperatura en su interior cada 10 días. Durante este tiempo de conservación, la temperatura de las pacas registró un aumento constante, iniciando en 30 °C, seguido de 35 °C, para posteriormente disminuir a 29 °C a mitad del periodo y aumentar finalmente a 35°C en la siguiente fecha de lectura y sostenerse ahí hasta la apertura de las pacas. Pasado el periodo de conservación, las pacas fueron abiertas y sin excepción todas tuvieron concentración de efluente en diferentes cantidades.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El uso exitoso de caña completa en “verde” como forraje, y procesada en ensilaje, depende de realizar el corte en una etapa temprana de desarrollo, que puede ser de tres meses después de la cosecha, tanto de soca como de soca 2, al mismo tiempo que se prepara para un empacado seguro, cuidando que el secado sea adecuado

(deshidratado en condiciones ambientales) para alcanzar un contenido de materia seca de 25 % a 30 %. Proyectando este ritmo de corte en las condiciones actuales supone realizar tres cortes de tallos jóvenes en el transcurso del año, estimando 425 pacas por hectárea de rebrote joven de caña, cortado a los tres meses de edad después de la cosecha. La promoción de un producto alternativo para nutrir al ganado puede generar un precedente significativo, tanto para la producción específica de ensilaje de caña-pasto, aún no totalmente explorada, como el de abrir un nicho de mercado.

CONCLUSIONES

Es posible obtener una fermentación aceptable en una paca compactada elaborada con material vegetal joven de caña de azúcar, envuelta en una bolsa de polietileno con un contenido de materia seca de entre 15 % y 20 %, y existe la tecnología e insumos necesarios para su realización exitosa.

LITERATURA CITADA

Ali H.A.M., Abubakr O.I., Sulieman Y.R. 2015. Evaluation and improvement of the nutritive value of sugar cane tops fed as sole diet to goats or supplemented with groundnut cake or sorghum grain. *J. Nat. Resour. Environ. Stud.* 3: 29-35.

Alonso J.M., Romero E.R., Scandaliaris J. 2005. Cosecha en verde de caña de azúcar y aprovechamiento de sus residuos: La visión del sector productivo y las acciones de la EEAOC. *Avance Agroindustrial, EEAOC* 26: 22-28.

Aranda-Ibañez E.M., Ramos-Juárez J.A., Salgado-García S., Mendoza-Martínez, G.D. 2012. Caña de Azúcar en la Alimentación Bovina. *Colegio de Postgraduados, Campus Tabasco*. 26 p.

De Pádua F.T., Fontes C.A.A., Almeida J.C.C., Deminici B.B., Carlos L.A., Neto O.C., De Oliveira V.C. 2014. Fermentation characteristics of silage of sugar cane treated with calcium oxide, *Lactobacillus buchneri* and their associations. *American Journal of Plant Science* 5: 636-646.



Figura 3. Elaboración de ensilaje de biomasa cañera en pacas envueltas en bolsas. a: paca arropada con bolsa. b: pacas en almacenamiento. c: apertura de pacas. d: estado del ensilaje.

FIRA. 2015. Panorama Agroalimentario: Carne de bovino 2015. FIRA-Dirección de Investigación y Evaluación Económica y Sectorial. México.

Heuzé V., Tran G., Archimède H., Lebas F. 2015. Sugarcane tops. *Feedipedia.org*. A programme by INRA, CIRAD, AFZ and FAO. <http://www.feedipedia.org/node/558> Last updated on October 26, 2016.

Karbhari, P.S., Balakrishnan V., Murugan M. 2007. Substitutional feeding value of ensiled sugarcane tops and its effect in crossbred Heifer's/cow's reproductive performance. *Asian Journal of Animal and Veterinary Advances* 2: 21-26.

Kung L., Stanley R.W. 1982. Effect of stage of maturity on the nutritive value of whole-plant sugarcane preserved as silage. *Journal of Animal Science* 54: 689-696.

Marcondes M.I., Pies Gionbelli M., Leite de Andrade F., Vergara Vergara R.A., Eder da Silva, T., Galindo Burgos, E.M. 2012. Additives for sugar cane silage. *Proceedings of the XVI International Silage Conference*. K. Kuoppala, M. Rinne y A. Vanhatalo (Eds). Hämeenlinna, Finland. 432-433.

Mckenzie J., Griffiths C. 2007. Cane tops as cattle feeder. *Primefacts* 314. New South Wales, Department of Primary Industries. Australia.

Mthiyane D.M.N, Nsahlai I.V., Bonsi M.L.K. 2001. The nutritional composition, fermentation characteristics, in sacco degradation and fungal pathogen dynamics of sugarcane tops ensiled with broiler litter with or without water. *Animal Feed Science Technology* 94: 171-185.

Ortiz-Laurel H., Rössel-Kipping D., Rosas-Calleja D. 2010. Viabilidad de la elaboración de ensilaje de residuos de caña de azúcar en pacas. *Memorias del XIX Congreso Nacional de Ingeniería Agrícola*. 8-10 de Septiembre, Coahuila, México. 11 p.

SAGARPA. 2015. Panorama de la Lechería en México. SAGARPA-SIAP. México.

Sá-Neto A., Wosniak Bispo A., Junges D., Zopollatto M., Pratti Daniel J.L., Nussio L.G. 2012. Sugarcane silage replacing corn silage in lactating dairy cows rations. *Proceedings of the XVI International Silage Conference*. K. Kuoppala, M. Rinne and A. Vanhatalo (Eds). Hämeenlinna, Finland. pp. 486-487.

Corrêa C.E.S., Pereira M.N., Oliveira S.G., Ramos M.H. 2003. Performance of Holstein cows fed sugarcane or corn silages of different grain textures. *Scientia Agricola* 60: 621-629.

Suksombat W., Junpanicharoen P. 2005. Feeding of sugar cane silage to dairy cattle during the dry season. *Asian-Aust. Journal of Animal Science* 18: 1125-1129.

Suliman A.I.A., Baiomy A.A., Awad-Allah M.A.A. 2013. Productive performance of growing lambs fed silages of sugar cane tops, sugar beet leaves and green maize stems. *Egyptian Journal of Animal Productio* 50: 59-67.

CAÑA DE AZÚCAR (*Saccharum* spp.) EN LA ALIMENTACIÓN DE RUMIANTES: EXPERIENCIAS GENERADAS CON CAÑAS FORRAJERAS

SUGAR CANE (*Saccharum* spp.) IN RUMINANTS' DIET: EXPERIENCES GENERATED WITH FODDER CANES

Salazar-Ortiz, J.¹; Trejo-Téllez, L.I.²; Valdez-Balero, A.³; Senties-Herrera, H.E.²; Rosas-Rodríguez, M.¹; Gallegos-Sánchez, J.²; Crosby-Galván, M.M.²; Gómez-Merino, F.C.^{1*}

¹Colegio de Postgraduados Campus Córdoba. Carretera Federal Córdoba-Veracruz km 348. Amatlán de los Reyes, Veracruz. C.P. 94946. ²Colegio de Postgraduados Campus Montecillo. Carretera Federal México-Texcoco km 36.5, Montecillo, Estado de México. ³Colegio de Postgraduados Campus Tabasco. Periférico Carlos A. Molina km 3.5 Carretera Cárdenas-Huimanguillo, H. Cárdenas, Tabasco, México. C.P. 86500.

*Autor de correspondencia: fernandg@colpos.mx

RESUMEN

El potencial de la caña de azúcar (*Saccharum* spp.) como forraje para alimentar ganado bovino y ovino en el trópico se sustenta en ventajas comparativas con otros cultivos, incluyendo su alta producción de biomasa, amplio rango de adaptación agroecológica, suelos pobres en nutrientes, resistencia a sequías prolongadas y mantenimiento de su valor nutritivo durante periodos considerables. Algunas de las características que se buscan en las variedades forrajeras de caña de azúcar son alta relación hoja/tallo, elevado rendimiento de materia seca, fibra por hectárea, y disponibilidad durante la época seca y de vientos del norte. La caña y los residuos agroindustriales que de ella derivan poseen pared celular, alta concentración de sacarosa y otros azúcares solubles que pueden ser aprovechados por los rumiantes. Dado que los contenidos de proteínas y minerales de la caña suelen ser bajos, se recomienda completar la dieta a base de esta, con otras fuentes, incluyendo granos energéticos y proteicos, subproductos agroindustriales y minerales. En este artículo se comparan las características nutritivas de cuatro variedades de caña de azúcar, dos forrajeras: COLPOSCTMEX 05-003 y COLPOSCTMEX 05-264, y dos variedades usadas por la industria (Mex 69-290 y Mex 79-431). Las forrajeras COLPOSCTMEX 05-003 y COLPOSCTMEX 05-264 mostraron características bromatológicas muy similares a las comerciales Mex 69-290 y Mex 79-431, y producen mayor cantidad de follaje debido a su alta relación hoja/tallo.

Palabras clave: poaceae, variedades forrajeras, diversificación, producción animal.

ABSTRACT

The potential of sugar cane (*Saccharum* spp.) as fodder to feed bovine and ovine livestock in the tropics is sustained by comparative advantages with other crops, including its high biomass production, broad range of agroecological adaptation, nutrient-poor soils, resistance to prolonged droughts, and maintenance of its nutritional value during considerable periods. Some of the characteristics that are sought in the fodder varieties of sugar cane are high leaf/stem

Agroproductividad: Vol. 10, Núm. 11, noviembre. 2017. pp: 70-75.

Recibido: mayo, 2017. **Aceptado:** octubre, 2017.

relation, high yield of dry matter, fiber per hectare, availability during the dry season and the north winds. Sugar cane and agro-industrial residues that derive from it have cell walls, high concentration of sucrose and other soluble sugars that may be used by ruminants. Given that the protein and mineral contents of sugar cane tend to be low, it is recommended to complement the diet based on it with other sources, including energetic grains and protein, agro-industrial byproducts and minerals. In this article, the nutritional characteristics of four varieties of sugar cane are compared, two for fodder: COLPOSCTMEX 05-003 and COLPOSCTMEX 05-264; and two varieties used by the industry (Mex 69-290 and Mex 79-431). The fodder varieties COLPOSCTMEX 05-003 and COLPOSCTMEX 05-264 showed very similar bromatological characteristics to the commercial Mex 69-290 and Mex 79-431, and they produce a higher quantity of fodder due to their high leaf/stem relationship.

Keywords: Poaceae, fodder varieties, diversification, animal production.

INTRODUCCIÓN

La caña de azúcar (*Saccharum* spp.) es un cultivo de gran

importancia en la provisión de alimentos y de insumos para la industria del azúcar y la cogeneración de bioenergías. Su alta productividad, eficiencia en el uso de insumos y recursos para la producción en campo, así como su facilidad para ser procesada de manera local y generar productos con valor agregado, la convierten en un cultivo de gran importancia económica (Moore *et al.*, 2014; Gómez-Merino y Senties-Herrera, 2015). Se cultiva principalmente para la producción de azúcar de mesa o sacarosa, y en las últimas décadas se ha dado importancia a su diversificación mediante la producción de alcohol y la cogeneración de energía. En diversas zonas alrededor del mundo, donde este cultivo convive con la ganadería, se han generado tecnologías para aprovechar la planta por su fuente de fibra y energía en la alimentación animal. En este contexto la caña de azúcar representa una alternativa para la alimentación de rumiantes (Urdaneta, 2005), además, por ser un cultivo perenne, su persistencia está asociada, al igual que la de otras especies, al manejo que se le haga, y es posible mantenerla hasta por cerca de 10 años en producción (FIRA, 2007). De especial importancia resulta la caña de azúcar para la alimentación animal durante las épocas de seca y durante los vientos del norte en la vertiente del Golfo de México, pues mientras los pastizales tienden a disminuir su productividad debido a la escasez de lluvias o a las bajas temperaturas, la caña de azúcar mantiene su crecimiento y productividad (Figura 1). Aunque anteriormente solo se recomendaba la utilización de hojas, puntas (cogollos), bagazo y melazas para la alimentación animal, actualmente se busca un mayor aprovechamiento de la planta como alimento, incluyendo hojas, puntas, pajas (residuos de cosecha en campo) y subproductos de fá-

brica, tales como mieles finales, bagazo, cachaza y vinaza, entre otros (Juárez-Lagunes *et al.*, 2009).

En la alimentación del ganado la caña de azúcar puede ser aprovechada principalmente durante la época de sequía o bajas temperaturas, cuando disminuye la disponibilidad de los pastizales (Urdaneta, 2005). Debido a que el principal enfoque de la producción de esta planta es la obtención de azúcar, se cuenta con escasa información respecto a las variedades utilizadas con fines forrajeros y de los rendimientos obtenidos en México. Sin embargo, entre otros autores, López *et al.* (2003), Espinosa *et al.* (2007), Aranda *et al.* (2009) y Aguirre *et al.* (2010) han hecho importantes aportes sobre la caracterización de variedades de caña de azúcar con potencial forrajero para las condiciones de México. Este trabajo tiene la finalidad de revisar y analizar el potencial forrajero de la caña de azúcar y evaluar la calidad nutricional en la alimentación de rumiantes de dos variedades caracterizadas como forrajeras en los procesos de selección del Colegio de Postgraduados: COLPOSCTMEX 05-003 y



Figura 1. Caña de azúcar (*Saccharum* spp.) destinada a la producción de forraje en comparación con un pastizal de pasto estrella (*Cynodon plectostachius*) en época de escasa precipitación pluvial en la vertiente del Golfo de México.

COLPOSCTMEX 05-264, en comparación con dos variedades comerciales establecidas para su uso industrial en la zona: Mex 69-290 y Mex 79-431.

La caña de azúcar como forraje

Las bondades de la caña de azúcar en la alimentación animal están en razón de su elevada capacidad de producción de biomasa o materia verde y seca, la alta cantidad de energía contenida por unidad de área en corte por año, y la reconocida capacidad de mantener su potencial energético durante periodos secos prolongados. La característica más importante es su alto contenido de azúcares solubles (aproximadamente 18 °Brix) y fibra (48 % en promedio), aunque es pobre en proteína (menos de 5 % en promedio) y minerales, y casi ausente de grasas y almidones. Para aumentar el contenido de nitrógeno que permita una mayor síntesis de proteínas en el tracto digestivo de los animales alimentados con caña de azúcar, se sugiere adicionar desde 5 g a 10 g de urea por cada kilogramo de caña fresca o mezclarse con una fuente de proteína común (Bustamante-Guerrero, 2004). El elevado contenido de azúcar y reducido contenido de almidón de la caña limita la digestibilidad de la fibra (50 % a 68 %), por lo que no se recomienda su utilización como única fuente de forraje en la alimentación del ganado ni en grandes cantidades (no más de 50 % de la dieta en base seca) en la formulación de raciones alimenticias (Meraz-Echaverría y Urrutia-Morales, 2006; Urdaneta, 2005). La caña de azúcar se ha empleado tradicionalmente en la alimentación animal en fresco como caña picada y proporcionándose en comederos *ad libitum* (Figura 1). También se ha utilizado el bagazo de los trapiches,

complementado con el cogollo (punta de caña) para alimentar rumiantes, principalmente bovinos y ovinos. Otra modalidad es el ensilaje, de caña hidrolizada, mezclada con vinazas, bagazo, o en forma fermentada (saccharina) (Chaves-Solera, 2008). En pastoreo, la producción de forraje generado por la caña de azúcar de 3 a 9 meses de edad podría aumentar la capacidad de carga a más de 10 animales por hectárea durante todo el año (Rincón-Castillo, 2005). Se estima que con la producción de una hectárea de caña de azúcar es posible producir hasta 2,000 kg de carne (Torres-Moreira, 2006). Si bien los rendimientos pueden variar de acuerdo con el cultivar de caña, el clima y la edad de la planta, se puede establecer que con surcos de 100 m de longitud es posible producir 1500 kg de caña integral y la cosecha de cada surco se hace cada cinco días, con un rendimiento de 300 kg por día. Lotes con 36 surcos de 100 m cada uno puede producir 54 t de caña de azúcar integral (picada y ofrecida en su totalidad: hojas, tallos, paja y puntas) (Torres-Moreira, 2009). Para ganado estabulado, con la cosecha de 300 kg diarios de caña de azúcar integral se pueden alimentar 15 animales por día, a razón de 20 kg de consumo diario por animal, más los otros componentes de la dieta, incluyendo urea, oleaginosas, cereales, subproductos industriales y sales minerales. Las proporciones de estos últimos en las dietas dependerán del metabolismo y las necesidades del animal a alimentar. De esta forma la producción de un lote alcanza para alimentar 15 animales de 400 kg de peso promedio durante 180 días. Para ganado semiestabulado, con la producción de 300 kg de caña de azúcar integral, se pueden alimentar 25 animales por día, durante 180 días, con un consumo diario de 12 kg por animal, complementado con forraje de pastizales o especies (Fabaceae) altas en proteína (antes leguminosas). Para alimentar ganado durante la época de secas, en surcos de 100 m que pueden producir 1500 kg de caña, se estarían cosechando cada dos días, con un rendimiento diario de 750 kg. Esta producción alcanzaría para alimentar 30 animales, con un consumo de 25 kg diarios por animal más el consumo que logren de pasto, fabáceas o algún otro complemento alimenticio (Torres-Moreira, 2009). En ovinos Pelibuey, hembras y machos alimentados con una ración a base de alimento comercial de engorda y forraje picado de caña de azúcar ofrecido *ad libitum*, la ganancia de peso promedio durante la engorda para las hembras y machos alcanzó 180 gramos por día, con periodos de engorda de 169 y 140, respectivamente y un peso al sacrificio de 45 kg (Noriega-Loyo, 2017). La caña de azúcar picada y ofrecida *ad libitum* como complemento al alimento comercial de engorda es recomendable, dado que puede proporcionarse durante todo el periodo de engorda de los ovinos.

Selección y evaluación de variedades forrajeras

En la selección de variedades de caña de azúcar para su uso en alimentación animal es importante considerar que estas tengan alta productividad de biomasa verde, alto contenido energético y de fibra, y que sean de fácil cosecha (Pate *et al.*, 2002). Urdaneta (2010) considera que para la selección de cañas forrajeras, además de tomar en cuenta su capacidad de resistencia a plagas y enfermedades, y su productividad y calidad nutritiva debe asegurarse que la variedad tenga periodos vegetativos cortos, alta precocidad, alto poder de germinación y rebrote, alto amacollamiento, amplia distancia entre nudos, baja dureza (alta blandura), ausencia de tricomas

(ahuate o pelusa), alta relación hoja/tallo, bajo deshoje y buen espigamiento, borde de la hoja no aserrada y persistencia al corte. En todo caso, el proceso de selección debe apegarse al protocolo descrito por IMPA (1983). En Tabasco, México, López *et al.* (2003) evaluaron la calidad nutricional de ocho variedades de caña de azúcar con potencial forrajero: Mex 83-510, Q 107, B 70-405, RD 75-11, Mex 69-290, CP 75-1632, Mex 83-482 y CO 1230, y concluyeron que la variedad Mex 83-482 mostró la mejor cualidad forrajera, pues tuvo mayor cantidad de cogollo y su digestibilidad a las 12 h fue mayor al 50 % en caña integral y tallos. En Nayarit, Espinosa *et al.* (2007) llevaron a cabo una caracterización agronómica de siete variedades de caña de azúcar con fines forrajeros: M 99, Mex 69-290, Mex 54-81, L 60-14, Mex 57-473, Brasileña Verde y Mex 69-420, y encontraron que las variedades M 99, Mex 69-290, Mex 57-473, Brasileña Verde y Mex 69-420 presentaron las mejores características. Aguirre *et al.* (2010) realizaron una caracterización nutrimental y evaluación de la variedad Mex 69-290 en dietas para ovinos, y reportaron 98 % de materia seca, 96 % de materia orgánica, 1.5 % de proteína, 44.8 % de fibra detergente neutro (FDN) y 35.3 % de fibra detergente ácido (FDA), 6.3 de lignina, 9.5 % de hemicelulosa y 28 % de celulosa. En el Campus Córdoba se está generando tecnología para el uso de variedades

de caña de azúcar en la alimentación de ganado ovino y bovino (Figura 2).

Con el fin de complementar estudios sobre la utilización de cañas forrajeras en la alimentación de ganado, procedente del Campo Experimental Regional (CER) Campus Tabasco, de la generación 2005 proveniente del Centro de Investigación y Desarrollo de la Caña de Azúcar (CIDCA), el Campus Córdoba introdujo a sus terrenos experimentales dos variedades con potencial forrajero, COLPOSCTMEX 05-003 y COLPOSCTMEX 05-264, en la Fase de Adaptabilidad (Figura 3).

Los componentes morfológicos o botánicos de la caña varían con la edad de la planta; por ejemplo, a mayor edad se incrementan los tallos con respecto a las hojas, así como la concentración de azúcares totales en el jugo, de sacarosa y de lignina en la planta (Preston, 1977). En otras Poaceas (antes gramineas), a medida que aumenta la edad de la planta disminuye la digestibilidad de la materia orgánica (DMO). En cambio, en la caña, a medida que aumenta la edad de la planta se incrementa la DMO, debido a mayor acumulación de azúcares solubles (Pate *et al.*, 2002), pero el contenido de proteína y extracto etéreo se reduce (Urdaneta, 2010). Si se considera la biomasa de la caña de azúcar en base seca, la planta completa está constituida por un 5 % a 8 % de ceniza, 1-2 % de extracto etéreo, 1-5 % de proteína total, 50-60 % de fibra detergente neutro, 40 % de fibra detergente ácido, 6-7 % de lignina, 10-20 % de hemicelulosa y 25 % a 40 % de celulosa (López *et al.*, 2003; Aguirre *et al.*, 2010; Urdaneta, 2010). En general, la digestibilidad puede oscilar



Figura 2. Alimentación de bovinos y ovinos semiestabulados, con variedades forrajeras de caña de azúcar. La totalidad de la planta es picada, y se ofrece *ad libitum*.



Figura 3. Variedades de caña de azúcar destinadas a la producción de forraje en Campus Córdoba: COLPOSCTMEX 05-003 (izquierda) y COLPOSCTMEX 05-264 (derecha). Inicialmente las variedades fueron seleccionadas como cañas forrajeras en Campus Tabasco.

entre 65 % en la materia seca y 75 % en la orgánica (Aguirre *et al.*, 2010). El Cuadro 1 muestra los resultados del análisis bromatológico de cuatro variedades de caña de azúcar usadas para alimentación animal.

Las variedades COLPOSCTMEX 05-003 y COLPOSCTMEX 05-264 producen más de 20 % de cogollo, su producción de paja es superior a 26 % y los tallos son más suaves para ser picados en las máquinas de aspas y ser consumidos por el ganado. En comparación, las variedades Mex 69-290 y Mex 79-431 producen más de 70 % de tallo y cerca de 16 % de cogollo o puntas. En términos agronómicos, la composición morfológica para su uso en la alimentación del ganado es mejor en las primeras. De acuerdo con lo descrito, los valores del análisis bromatológico de las variedades de caña que se usan para alimentación animal en Campus Córdoba se encuentran en los rangos normales y, por lo tanto, su uso como forraje es recomendable. Sin embargo, es necesario destacar que existe diferencia entre ellas. En el grupo de cañas seleccionadas como forrajeras (las dos COLPOSCTMex), solo el porcentaje de extracto etéreo fue mayor que en las variedades Mex 69-290 y Mex 79-431. Si bien la materia seca, cenizas, proteína total, FDN y FDA fueron muy parecidas entre ambos grupos de variedades, los valores en las de uso industrial fueron mayores en promedio en todos los casos. En las pruebas de palatabilidad, ambos grupos de variedades muestran buena aceptación tanto por ovinos como por bovinos. Los estudios que actualmente se están conduciendo permitirán determinar otros indicadores de calidad, tales como la productividad por hectárea, cortes por año y digestibilidad

Cuadro 1. Composición porcentual de las características nutricionales de cuatro variedades de caña de azúcar (*Saccharum* spp.) para alimentación de bovinos y ovinos.

Variedad	Materia seca	Cenizas	Proteína total	FDN	FDA	Extracto etéreo
COLPOSCTMex 05-003	92	4.2	4.0	58	43	1.2
COLPOSCTMex 05-264	90	4.5	3.2	55	46	1.0
Mex 69-290	93	4.2	4.2	64	47	0.6
Mex 79-431	93	4.6	3.8	62	48	0.5

de cada variedad, que generen mayores rendimientos para la ganadería establecida en la zona. Para dar continuidad a la generación de nuevas variedades forrajeras es necesario implementar un ambicioso programa de selección para forraje, en paralelo a la selección para sacarosa que actualmente se lleva a cabo (Senties-Herrera *et al.*, 2016), considerando los indicadores descritos por Pate *et al.* (2002) y Urdaneta (2010), así como la metodología del IMPA (1983). Como se ha establecido, la caña de azúcar es un cultivo con amplias posibilidades de diversificación productiva (Gómez-Merino *et al.*, 2015) y la producción de forrajes y otros productos para la alimentación animal es una de ellas.

CONCLUSIONES

La caña de azúcar es un cultivo con gran potencial para la diversificación productiva, incluyendo su capacidad para producir forraje y otros productos útiles en la alimentación animal. Se puede utilizar tanto para alimentar ganado estabulado como semiestabulado y pastoreo, en combinación con otros complementos alimenticios que incluyen alimentos balanceados, granos de cereales (maíz, sorgo) y oleaginosas (soya y otras fabáceas), subproductos agroindustriales (melaza, cáscara de naranja, paja de arroz) y minerales (formulaciones comerciales). En los periodos de escasez de forraje, la

caña de azúcar integral es una alternativa para sostener la producción pecuaria en las zonas tropicales. La cantidad a utilizar generalmente depende de la disponibilidad de pasto y tamaño de los animales. El uso de caña de azúcar como forraje puede estar en función de lo prolongado que sea el periodo de escasez de otras fuentes; por tanto, su necesidad está relacionada con la demanda. Las variedades forrajeras COLPOSCTMEX 05-003 y COLPOSCTMEX 05-264 con que cuenta el Colegio de Postgraduados Campus Córdoba muestran características bromatológicas muy similares a las variedades comerciales Mex 69-290 y Mex 79-431 usadas para complementar la alimentación del ganado, por lo que su uso es recomendable, dado que pueden producir mayor cantidad de follaje debido a su alta relación hoja/tallo.

LITERATURA CITADA

- Aguirre J., Magaña R., Martínez S., Gómez A., Ramírez J.C., Barajas R., Plascencia A., Bárcena R., García D.E. 2010. Caracterización nutricional y uso de la caña de azúcar y residuos transformados en dietas para ovinos. *Zootecnia Tropical* 28: 489-497.
- Aranda E.M., Mendoza G.D., Ramos J.A., Salgado S., Vitti A.C. 2009. Selectividad de caña de azúcar en bovinos. *Avances En Investigación Agropecuaria* 13: 21-26.
- Bustamante-Guerrero J.J. 2004. Estrategias de alimentación para la ganadería bovina en Nayarit. INIFAP. Centro de Investigación Regional del Pacífico Centro. Tepic, Nayarit.

- Chaves-Solera M. 2008. Uso de la caña de azúcar como forraje. *Ventana Lechera* 10: 45-51.
- Espinosa M.M., Aguirre A., Stuart R., Ramos A., Rodríguez M.A., Rubio C. 2007. Características agronómicas de siete variedades de caña de azúcar con fines forrajeros en el centro del estado mexicano de Nayarit. *Revista Computadorizada de Producción Porcina* 14: 70-74.
- FIRA. 2007. Caña de Azúcar. Ingenio Tres Valles. Análisis de Rentabilidad. http://www.fira.gob.mx/Nd/CANA_DE_AZUCAR_Ingenio_Tres_Valles_-_Rentabilidad_2005-2006_Costos_2007-2008.pdf
- Gómez-Merino F.C., Trejo-Téllez L.I., Senties-Herrera H.E., Pérez-Sato J.A., Salazar-Ortiz J. 2015. La Caña de Azúcar Ofrece más que Azúcar: Oportunidades de Diversificación. *Agroentorno* 166: 24-25.
- Gómez-Merino, F.C., H.E. Senties-Herrera. 2015. Manual para la identificación varietal de caña de azúcar. Colegio de Postgraduados. 40 p.
- IMPA. 1983. Programa de variedades. Objetivos, importancia y metodología experimental. Instituto para el Mejoramiento de la Producción de Azúcar. México. 63 p.
- Juárez-Lagunes F., Vilaboa-Arroniz J., Díaz-Rivera P. 2009. La caña de azúcar (*Saccharum officinarum*): Una alternativa para la sustitución de maíz (*Zea mays*) en la alimentación de bovinos de engorda. <http://www.engormix.com/ganaderia-carne/articulos/cana-azucar-saccharum-officinarum-t27953.htm>
- López I., Aranda E.M., Ramos J.A., Mendoza G.D. 2003. Evaluación nutricional de ocho variedades de caña de azúcar con potencial forrajero. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola* 37: 381-386.
- Meraz-Echavarría O.O., Urrutia-Morales J. 2006. Uso de la caña de azúcar en la alimentación de bovinos de doble propósito. INIFAP. Centro de Investigación Regional del Noreste. Matehuala, San Luis Potosí.
- Moore P.H., Paterson A.H., Tew T. 2014. Sugarcane: the crop, the plant and domestication. In: P. H. Moore and F. C. Botha (Eds.). *Sugarcane: Physiology, Biochemistry and Functional Biology*. John Wiley, New York, NY, USA. pp. 1-17. doi: 10.1002/9781118771280.ch1.
- Noriega-Loyo J. 2017. Determinación del efecto del polimorfismo del gen leptina en el desarrollo corporal-calidad de la canal de corderos Pelibuey. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. 109 p.
- Pate F.M., Alvarez J., Phillips J.D., Eiland B.R. 2002. Sugarcane as a cattle feed: Production and Utilization. Bulletin 844. University of Florida Extension. <http://corn.agronomy.wisc.edu/Crops/SugarCane.pdf>
- Preston T.R. 1977. Nutritive value of sugarcane for ruminants. *Tropical Animal Production* 2: 125-145.
- Rincón-Castillo A. 2005. Evaluación agronómica y nutricional de variedades de caña de azúcar con potencial forrajero en el Piedemonte Llanero. *Revista CORPOICA* 6: 60-68.
- Senties-Herrera H.E., Gómez-Merino F.C., Loyo-Joachin, 2016. El mejoramiento genético de la caña de azúcar (*Saccharum* spp.) en México: Una historia de éxito con nuevos desafíos. *Agroproductividad* 9: 8-13.
- Torres-Moreira J.A. 2006. Uso de la caña de azúcar como parte de la ración para engorde de ganado bovino, estabulado y semiestabulado. In: *Memorias del XVI Congreso de la Asociación de Técnicos Azucareros de Costa Rica*. Heredia, Costa Rica. pp. 865-869.
- Torres-Moreira J.A. 2009. Manejo de la caña de azúcar para forraje en la producción de carne bovina. http://www.corfoga.org/images/public/documentos/pdf/manejo_cana_azucar_produccion_carne.pdf
- Urdaneta J. 2005. La caña de azúcar: una opción para el ganadero. *Sitio Argentino de Producción Animal* 1-5.
- Urdaneta J. 2010. ¿Por qué caña forrajera en la alimentación del bovino? In: *Memoria del XV Congreso Venezolano de Producción e Industria Animal* 2010. Tarabana, Venezuela. http://www.avpa.ula.ve/congresos/xv_congreso/xvcongreso_memorias/



COLOR DEL TEJIDO ADIPOSEO DE TORETES FINALIZADOS CON ENSILADO DE CAÑA DE AZÚCAR (*Saccharum* spp.)

COLOR OF THE FAT TISSUE OF YOUNG BEEF BULLS FINISHED WITH SUGAR CANE (*Saccharum* spp.) ENSILAGE

Caro-Hernández, J.M.¹; Ramos-Juarez, J.A.¹; Hernández-Mendo, O.²; Aranda-Ibáñez, E.M.^{1*}

¹Colegio de Postgraduados Campus Tabasco. Periférico Carlos A. Molina km 3.5 carretera Cárdenas-Huimanguillo, Cárdenas, Tabasco, México. C. P. 86500. ²Campus Montecillo, carretera México-Texcoco km 36.5, Montecillo, Texcoco, Estado de México. C.P. 56230.

*Autor de correspondencia: earanda@colpos.mx

RESUMEN

Se evaluó el efecto de la suplementación con ensilado de caña de azúcar (*Saccharum* spp.) y niveles de enzima fibrolítica en el comportamiento productivo y pigmentación de la grasa en canales de toretes en pastoreo. Se utilizaron 40 toretes con peso vivo inicial de 408.28 ± 7.79 kg distribuidos en cuatro tratamientos y 10 repeticiones en un diseño completamente al azar durante 90 d. Los tratamientos estudiados fueron: T1=solo pastoreo, T2=T1+ensilado de caña (EC), T3=T1+EC+15 g de Fibrozyme®, T4=T1+EC+30 g de Fibrozyme®. Se evaluó digestibilidad del pasto y EC, consumo, ganancia diaria de peso (GDP) y a los 90 d se sacrificaron los animales para evaluar la pigmentación de la grasa en la canal por colorimetría. El ensilado de caña a 25 d de almacenamiento presentó 15.5 % de PC y 46 % de degradación; el pasto tuvo 6.3 % de PC y 42.8 de degradación. Alto porcentaje de amarillamiento en la grasa de la canal se observó en toretes que permanecieron en pastoreo (T1). T2 registró menor porcentaje de pigmentación (46.0a, 24.3d, 31.9c y 39.6b para T1, T2 T3 y T4, respectivamente). Se observaron diferencias en el sitio de muestreo, siendo 2 % menos pigmentada el área de la escápula que el área del lomo anterior. Se concluye que la adición de 15 g de Fibrozyme® aumentó la ganancia diaria de peso. La suplementación de ensilaje de caña de azúcar disminuye el color amarillo de la grasa de los animales en pastoreo.

Palabras clave: ensilaje, *Cynodon plectostachyus*, carotenos, colorimetría, grasa amarilla, enzimas fibrolíticas.

ABSTRACT

The effect of supplementing with sugar cane (*Saccharum* spp.) ensilage and levels of fibrolytic enzyme on the productive behavior and fat pigmentation in young beef bull carcasses was evaluated. Forty (40) young beef bulls were used with initial live weight of 408.28 ± 7.79 kg, distributed into four treatments and 10 repetitions in a completely random design for 90 d. The treatments studied were: T1=Only grazing, T2=T1+cane ensilage (EC), T3=T1+EC+15 g of Fibrozyme®, T4=T1+EC+30 g of Fibrozyme®. The digestibility of the grass and EC, consumption, daily weight gain (DWG), were evaluated, and after 90 d the animals were sacrificed to evaluate the pigmentation of the fat on the carcass through colorimetry. The sugar cane ensilage after 25 d of storage presented 15.5 % of PC, and 46 % of degradation, the grass had 6.3 % of PC and 42.8 of degradation. A high percentage of yellowing on the carcass fat was observed in young beef bulls that remained grazing (T1). T2 recorded a lower percentage of pigmentation (46.0a, 24.3d, 31.9c and 39.6b for T1, T2 T3 and T4, respectively). Differences were observed in the place of sampling, with 2 % less pigmentation in the scapula area than in the anterior back area. It is concluded that the addition of 15 g of Fibrozyme® increased the daily weight gain. Supplementation with sugar cane ensilage decreases the yellow color of fat from grazing animals.

Keywords: ensilage, *Cynodon plectostachyus*, carotenes, colorimetry, yellow fat, fibrolytic enzymes.

Agroproductividad: Vol. 10, Núm. 11, noviembre. 2017. pp: 76-80.

Recibido: mayo, 2017. **Aceptado:** octubre, 2017.

INTRODUCCIÓN

El tejido adiposo de bovinos en pastoreo presenta pigmentación amarilla debida a los carotenos presentes en los pastos verdes. Lo anterior provoca rechazo del consumidor y genera pérdidas económicas para el ganadero (Mora *et al.*, 2001). Para reducir parcialmente la pigmentación amarilla de la grasa en la canal de los bovinos se finalizan en corrales de engorda a base de concentrados, por periodos de 30 a 90 días (Hidiroglou *et al.*, 1987); sin embargo, la rentabilidad económica disminuye por el costo de los concentrados comerciales. La caña de azúcar (*Saccharum* spp.) contiene baja concentración de carotenoides al momento de su cosecha (Duke y Atchley, 1984) y cuando se conserva mediante el proceso de ensilado se elimina casi en su totalidad la presencia de estos pigmentos. Las enzimas fibrolíticas rompen las estructuras de la pared celular (Aranda *et al.*, 2004) e incrementar la digestibilidad del ensilado de caña de azúcar y obtener un mayor consumo. El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de la suplementación con ensilado de caña de azúcar con diferentes niveles de enzima fibrolítica en el comportamiento productivo y pigmentación de la grasa en canales de toretes en pastoreo.

MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo se realizó en Macuspana, Tabasco, México, ubicado en la región tropical húmeda (17° 43' 08" N y 92° 23' 08" O), y 7 m de altitud. Se utilizaron 40 toretes con encastes de Brahman, suizo y beefmaster, con peso vivo inicial de 408.28 ± 7.79 kg distribuidos en cuatro tratamientos y 10 repeticiones en un diseño completamente al azar durante 90 d. Los tratamientos (T) estudiados fueron: T1=Sólo pastoreo, T2=T1+ensilado de caña (EC), T3=T1+EC+15 g de Fibrozyme®, T4=T1+EC+30 g de Fibrozyme®. Se mezcló 87.7 % de caña de azúcar madura molida con 10 % de maíz molido, 1.5 % urea, 0.5 % sales minerales y 0.3 % sulfato de amonio se fermentó en bolsas de 40 kg durante 25 d y se ofreció *ad libitum*. De acuerdo con el tratamiento, El Fibrozyme® se mezcló con 1 kg de ensilado, antes de proporcionar todo el suplemento. Los animales se encerraron en corrales individuales para medir el consumo del ensilado y después salían a pastorear en praderas de pasto estrella (*Cynodon plestostachyus*). Se midió el contenido de materia seca (MS), proteína cruda (PC) (AOAC, 2012), fibra detergente neutro (FDN) y ácido (FDA) (Van Soest *et al.*, 1991), degradación *in situ* de la materia seca (DIMS) (Ørskov

et al., 1980) con incubación a 48 h en el pasto y ensilado. El consumo de pasto de medió de acuerdo con Geerken *et al.* (1987), el consumo del ensilado por diferencia de lo ofrecido menos lo rechazados, la ganancia diaria de peso (GDP) con pesajes cada 28 días. Los animales se sacrificaron en el rastro frigorífico TIF de la Unión Ganadera Regional de Tabasco (UGRT) para medir el grado de pigmentación de la grasa de las canales. Para tener un patrón de la coloración amarilla de grasa de la canal se muestrearon canales en el rastro el frigorífico de animales de 3, 4 y máximo cinco años de edad que estuvieron solo en pastoreo sin suplementos, y de animales en pastoreo suplementados con concentrado comercial. Con base en estas observaciones, la canal de los animales de más de cinco años de edad se tomó como patrón del color amarillo de la grasa, representando 100 % de la pigmentación amarilla. La toma de muestra de la grasa en la canal de los animales se obtuvo del área de la escápula y el lomo anterior. Todas las muestras se manejaron por triplicado.

Se midió el grado de pigmentación con un colorímetro portátil, marca Hunterlab, modelo Miniscan XE plus LAV 45/0. El equipo proporcionó los resultados en la escala CIE $L^* a^* b^*$ (Manual MiniScan® XE Plus User's Guide, 2005), con un patrón de observación de 10° y una intensidad de luz de D65 (Luz solar de atardecer), sugerido por las recomendaciones de la Comisión Internacional de Iluminación (CIE). Los valores que emite la escala CIE $L^* a^* b^*$ son: Eje L^* (luminosidad), donde 0 es negro, 100 es blanco, eje a^* (rojo-verde), donde los valores positivos fueron rojos; los negativos verde y 0 fue el neutro, eje b^* (amarillo-azul) donde: los valores positivos son amarillos, los negativos azules y 0 el neutro. Para el análisis del color de la grasa se le dio mayor importancia al valor emitido por el equipo con la variable b^* (amarillo-azul).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los valores altos de PC del ensilado están relacionados con la adición de urea (Cuadro 1). Batista *et al.* (2001) reportó valores de 8 % al agregar 0.5% de urea a la caña de azúcar, Monroy *et al.* (2006) reportó de 14% PC en la caña fermentada al agregar 1.5% de urea. Los valores de FDN y FDA del silo (Cuadro 1) son similares a lo reportado por Elías y Lezcano (1993) en caña fermentada (59.9 y 41.63 %, respectivamente); Cárdenas *et al.* (2006) encontró valores de FDN de 76.8 %, en caña fermentada durante 60 días, valor superior al re-

portado en esta investigación. El contenido de PC del pasto estrella fue bajo y los valores de FDN y FDA altos (Cuadro 1), lo cual está relacionado con la época climática. La DIMS del ensilado de caña fue mayor al del pasto (Cuadro 1); al respecto, Muñoz y González (1998) mencionan que la digestibilidad de la materia seca de la caña de azúcar es mayor que la de los pastos tropicales, debido a la presencia de carbohidratos solubles de fácil fermentación.

En relación con el consumo de silo, la enzima fibrolítica no tuvo efecto, pero sí para el consumo de pasto, ya que el mayor consumo de pasto se observó en el tratamiento donde se le adicionaron 15 g del Fibrozyme® (Cuadro 2).

En relación con la GDP, los animales suplementados con 15 g de Fibrozyme® tuvieron las mayores ganancias correlacionadas con el mayor consumo de MS. El efecto de la adición de enzimas fibrolíticas se manifestó posiblemente por mayor degradación de la fibra de la caña y del pasto, el cual fue de calidad regular. Resultados similares fueron encontrados por Gómez-Vázquez *et al.*, (2011) quien reportó ganancias de peso de 634 g animal⁻¹ día⁻¹ al adicionar 15 g de enzima fibrolítica, en una dieta basada en caña de azúcar. Cano *et al.* (2003) reportaron ganancias de peso de 600 g animal⁻¹ día⁻¹ en toretes de 240 kg de peso vivo alimentados con una dieta que contenía 70 % de caña de azúcar y 15 g de enzimas fibrolíticas. En relación con el color de la grasa de la canal, el color amarillo de referencia

Cuadro 1. Valor nutritivo del ensilado de *Saccharum* spp. y pasto estrella (*Cynodon plectostachyus*).

Componente (%)	Ensilado	Pasto estrella
Proteína cruda	15.5	6.3
Fibra detergente neutro	59.5	75.2
Fibra detergente ácido	31.4	39.4
Degradación <i>in situ</i> de la materia seca	46.83	42.8

de animales en pastoreo con cinco años de edad representó 100 % de pigmentación con base en el valor emitido por el colorímetro (variable *b**). Los valores de pigmentación (Cuadro 3) fueron diferentes entre tratamientos ($p \leq 0.05$), donde el T1 (solo pastoreo) presentó los niveles más altos de pigmentación amarilla ($P \leq 0.05$). El T2 que implicó la suplementación con ensilado de caña de azúcar presentó los valores más bajos de *b** que se relacionan con menor nivel de color amarillo de la grasa en la canal. Los tratamientos que incluyeron enzimas (T3 y T4) presentaron porcentajes superiores ($p \leq 0.05$) a los animales que se sometieron al ensilado de caña más pastoreo (T2), aunque los animales que recibieron enzimas presentaron porcentajes de pigmentación muy aproximados a los observados en animales finalizados con concentrados; esto podría estar asociado a que al adicionar las enzimas en los tratamientos T3 y T4 se elevó

la digestibilidad y consumo de forraje y, por consiguiente, el consumo de β -carotenos presentes en pasto estrella. Los animales que se mantuvieron en los tratamientos T2 y T3 mantuvieron porcenta-

jes bajos de pigmentación amarilla y los animales sometidos al T4 presentaron un incremento de 3 % en pigmentación amarilla, superior a los animales alimentados con concentrado, pero sin llegar al porcentaje observado en animales en pastoreo (46 %). Al evaluar la pigmentación amarilla del tejido adiposo de bovinos, Barrón *et al.* (2006) registraron que el color de la grasa subcutánea de los bovinos, independientemente del sitio de muestreo, se relacionó positivamente con la concentración de carotenoides, aunque la concentración de carotenos dependió del sitio de muestreo. En este trabajo se observaron diferencias entre sitio de muestreo, ya que muestras procedentes de la paleta resultaron 2 % menores en el nivel de pigmentación en relación con los muestreos en el área del lomo. Torre y Caja (2000) mencionaron que la fermentación ocurrida durante el proceso del ensilaje disminuye de 40 % a 60 % la cantidad

Cuadro 2. Degradación, consumo y ganancia de peso de los toretes en pastoreo.

Indicador	T1	T2	T3	T4	EE
Consumo de pasto (kg de MS)	11.09 ^b	9.96 ^c	12.40 ^a	10.81 ^b	0.30
Consumo de EC (kg de MS)	0	9.6 ^a	9.62 ^a	8.94 ^b	0.14
Consumo total (kg de MS)	11.09 ^c	19.56 ^b	22.02 ^a	19.75 ^b	0.29
Peso inicial (kg)	423.0	395.3	418.6	396.2	7.79
Peso final (kg)	459.4	438.8	481.7	451.8	
Ganancia peso (kg animal ⁻¹ d ⁻¹)	0.405 ^b	0.484 ^b	0.702 ^a	0.618 ^{ab}	0.06

Medias con diferente literal en la misma hilera indican diferencias estadísticas significativas (Tukey; $p \leq 0.05$). T1=Sólo pastoreo, T2=T1+ensilado de caña (EC), T3=T1+EC+15 g de Fibrozyme®, T4=T1+EC+30 g de Fibrozyme®.

de β -carotenos, relacionándose con una menor pigmentación del tejido adiposo. Duke y Atchley (1984) reportaron valores mínimos (0.1 mg) de β -carotenos en caña de azúcar, señalando que en la maduración la caña contribuye a eliminar casi en su totalidad el contenido de β -carotenos y que durante el proceso de ensilado los carotenos se eliminan en su totalidad. Estos datos refuerzan los resultados presentados en los tratamientos T2, T3, y T4, donde la pigmentación fue menor a la adquirida por animales sometidos a la alimentación total en pastoreo.

El ensilado de caña de azúcar presenta un efecto positivo sobre el color de la grasa al momento del sacrificio de los animales, siendo esta de mejor apariencia que incluso los animales alimentados con concentrados, probando que sí disminuye el grado de pigmentación en la grasa de la canal en animales alimentados con pastos, eliminando el problema de grasa amarilla que estos suelen presentar. En este estudio se confirmó que el método utilizado para la lectura de pigmentación amarilla representa una técnica eficaz y de fácil empleo a nivel rastro con la que se puede clasificar el

porcentaje de pigmentación que presenta una canal mediante la colorimetría.

CONCLUSIONES

La adición de 15 g de Fibrozyme® incrementa la ganancia diaria de peso. La suplementación de ensilado de caña de azúcar disminuye el color amarillo de la grasa de los animales en pastoreo.

LITERATURA CITADA

- AOAC. 2012. Official Methods of Analysis. 19th Ed. Off. Agric.Chem; Washington, D.C., U.S.A.
- Aranda E.M., Ruiz P., Mendoza G.D., Marcoff C.F., J.A. Ramo, J.A., Elías A. 2004. Cambios en la digestión de tres variedades de caña de azúcar y sus fracciones de fibra. Revista Cubana de Ciencia Agrícola 38: 137-144
- Barrón G.S., Mora I.O., Castaño M.V., Shimada M.A. 2006. La pigmentación amarilla del tejido adiposo de bovinos finalizados en pastoreo y su relación con su concentración de carotenoides y el perfil de ácidos grasos. Técnica Pecuaria México 44: 231-240.
- Batista A.J., Ferrari J.E., Braun G. 2001. Valor nutritivo da silagem de cana de açúcar tratada com uréia e acrecida de rolo de milho. Pesquisa Agropecuária Brasileira 36: 1169-1174.
- Cano A.L., Aranda I.E., Mendoza M.G., Pérez P.P., Ramos, J.A. 2003. Comportamiento de toretes en pastos tropicales

Cuadro 3. Efecto del EC sobre el color de la grasa de la canal de animales en pastoreo.

Tratamientos	Valores de b* Paleta	Pigmentación (%)	Valores de b* Lomo	Pigmentación (%)	Color de grasa
Caña (90 días)+Pastoreo (3 años)	5.536	23.610			
Concentrado (70 días)+Pastoreo (3 años)	8.563	36.520			
Pastoreo (>5 años) Patrón de referencia	23.447	100			
T1	10.389 ^a	44.308 ^a	10.876 ^a	46.385 ^a	
T2	5.281 ^c	22.523 ^d	5.748 ^c	24.515 ^d	
T3	7.064 ^{bc}	30.127 ^c	7.591 ^{bc}	32.375 ^c	
T4	8.820 ^{ab}	37.616 ^b	9.352 ^{ab}	39.886 ^b	
EE	0.89	3.64	0.74	2.95	

Medias con diferente literal en la misma hilera indican diferencias estadísticas significativas (Tukey; $P \leq 0.05$). T1=Sólo pastoreo, T2=T1+ensilado de caña (EC), T3=T1+EC+15 g de Fibrozyme®, T4=T1+EC+30 g de Fibrozyme®.



- suplementados con caña de azúcar y enzimas fibrolíticas. *Técnica Pecuaria México* 41: 153-164.
- Cárdenas J.R., Aranda E.M., Hernández D., Lagunes L.C., Ramos J.A., Salgado S. 2008. Obtainment of a feed fermented in solid state from return bagasse pith, rice polishing and inocula. Its use in animal feeding. *Cuban Journal of Agricultural Science* 42: 167-170.
- Duke J.A., Atchley A.A. 1984. Proximate analysis. In: Christie B.R. (Ed.). *The handbook of plant science in agriculture*. CRC Press, Boca Raton, FL, USA.
- Elías A., Lezcano O. 1993. Efecto de la fuente de N y algunos factores de crecimiento en la población de levaduras que se establecen en la producción de saccharina. *Revista Cubana de Ciencias Agrícolas* 27: 227-233.
- Geerken C.M., Calzadilla D., González R. 1987. Aplicación de la técnica de dos marcadores para medir el consumo de pasto y la digestibilidad de la ración de vacas en pastoreo suplementadas con concentrado. *Pastos y Forrajes* 10: 266-273.
- Gómez-Vázquez A., Mendoza G.D., Aranda E., Pérez J., Hernandez A., Pinos-Rodríguez, J.M. 2011. Influence of fibrolytic enzymes on growth performance and digestion in steers grazing stargrass and supplemented with fermented sugarcane. *Journal of Applied Animal Research* 39: 77-79.
- Hidiroglou N., McDowell L.D., Jonson D.D. 1987. Effect of diet on performance, lipid composition of subcutaneous adipose and liver tissue of beef cattle. *Meat Science* 20: 195-200.
- Manual MiniScan XE plus. 2005. User guide version 2.4. ISO 9001: 2000 A60-1010-352.
- Monroy J.M., Aranda E., Mendoza G., Ramos J.A., Herrera J., Cobos M., Izquierdo F. 2006. Elaboration and conservation of Saccharina from integral sugarcane, with the addition of molasses and rice poder. *Cuban Journal of Agricultural Science* 40: 155-160.
- Mora O., Romano J., González E., Ruíz F., Shimada A. 2001. Low cleavage activity of 15,15'-dioxygenase to convert β -carotene to retinal in cattle compared with goats, is associated with the yellow pigmentation of adipose tissue. *International Journal for Vitamin and Nutrition Ressearch* 70: 199-205.
- Muñoz E., González R. 1998. Caña de azúcar para estimular el consumo a voluntad de alimentos voluminosos en vacas. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola* 31: 33-40.
- Ørskov E.R., Deb-Hovell F.D., Mould. F. 1980. The use of the nylon bag technique for the evaluation of feedstuffs. *Tropical Animal Production* 5:195-213.
- Torre C., Caja G. 2000. Utilización de aditivos en rumiantes: vitaminas y aminoácidos protegidos. XIV Curso de especialización. *Avances de nutrición y alimentación animal*. FEDNA. Barcelona, España. 34 p.
- Van Soest P.J., Robertson J., Lewis B. 1991. Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition. *Journal of Dairy Science* 74: 3583-3597.



EFICIENCIA EN EL USO DE COMBUSTIBLE PARA LA PRODUCCIÓN DE CAÑA DE AZÚCAR (*Saccharum* spp.) EN LA REGIÓN GOLFO DE MÉXICO

EFFICIENCY IN THE USE OF FUEL FOR SUGAR CANE (*Saccharum* spp.) PRODUCTION IN THE GULF OF MEXICO REGION

Debernardi de la Vequia, H.*; Ortiz-Laurel, H.; Rosas-Calleja, D.

Colegio de Postgraduados Campus Córdoba. Carretera Córdoba-Veracruz km 348, Congregación Manuel León, Amatlán de los Reyes, Veracruz, México. C. P. 94946.

*Autor de correspondencia: debernardi@colpos.mx

RESUMEN

La cantidad de combustible diesel utilizado en los procesos productivos de la caña de azúcar (*Saccharum* spp.) impacta significativamente en los costos de producción del cultivo. En este estudio se comparó la cantidad de diesel consumido en producir, cosechar y transportar caña de azúcar en 14 ingenios azucareros de la región Golfo durante la zafra 2014-2015. Los tractores y alzadoras consumieron un promedio de 316 g kW h^{-1} , mientras que las unidades de transporte de tallos tipo "torton" tuvieron un rendimiento de 2551 g km^{-1} . El Ingenio Central Progreso fue el mayor consumidor de diesel, con 196.3 L ha^{-1} , mientras que el menor fue El San Pedro con 36.9 L ha^{-1} . Respecto al rendimiento promedio de caña, el diesel utilizado por Central Progreso fue de 3.4 L t^{-1} de caña, mientras que San Pedro consumió 0.62 L t^{-1} , representando 18.2 %. Respecto al traslado de la caña, el consumo promedio en los 14 ingenios fue de 2.5 L km^{-1} , mientras que en alce de caña se consumieron 0.4 L t^{-1} . La cantidad de diesel consumido fue significativo y se debe a la obsolescencia y escaso mantenimiento de las unidades automotores en campo y de transporte, labores inadecuadas y excesivas al carecer de tecnologías más eficientes, y con las que se promuevan prácticas agrícolas innovadoras y sustentables en la producción del cultivo.

Palabras clave: innovación, eficiencia por uso de combustible, costos de producción, transporte, labores culturales.

ABSTRACT

The amount of diesel fuel used in sugar cane (*Saccharum* spp.) productive processes impacts significantly the production costs of the crop. In this study the amount of diesel consumed in the production, harvest and transport of sugar cane by 14 sugar factories in the Gulf region during the 2014-2015 sugar harvest was compared. The tractors and cane loader machines consumed an average of 316 g kW h^{-1} , while the "torton" type transport units had a yield of 2551 g km^{-1} . The sugar factory, Central Progreso, had the highest diesel consumption with 196.3 L ha^{-1} , while El San Pedro had the lowest with 36.9 L ha^{-1} . Regarding the average cane yield, the diesel used by Central Progreso was 3.4 L t^{-1} of cane, while San Pedro consumed 0.62 L t^{-1} , representing 18.2 %. With regard to cane transport, the average consumption in the 14 sugar factories was 2.5 L km^{-1} , while 0.4 L t^{-1} was consumed in cane lifting. The amount of diesel consumed was significant and is due to the obsolescence and scarce maintenance of the automotive units in the field and for transport, inadequate farming tasks, and excessive because they lack more efficient technologies, and with which innovating and sustainable practices in the crop production can be promoted.

Keywords: innovation, efficiency from fuel use, production costs, transport, farming tasks.

INTRODUCCIÓN

La cantidad de combustible utilizado en las operaciones mecanizadas para la producción de caña de azúcar; desde la preparación de suelos, siembra, aplicación de agroquímicos, cosecha y transporte, está influenciada significativamente por cuatro factores: las condiciones mecánicas y de logística operativas de los automotores utilizados en campo y de transporte, empleados tanto en la preparación del suelo como en la cosecha del cultivo; la variabilidad en el trayecto a recorrer para trasladar la caña cosechada del campo al ingenio; el tamaño de los predios cañeros; y la presencia de piedras en el campo, tanto en cantidad como en tamaño. La zona productiva de caña de azúcar de la región Golfo la integran 18 ingenios azucareros, que en conjunto suman una superficie de 320 279 ha, la cual representa 41 % del nacional, donde 75 % de los predios tienen una superficie de cuatro hectáreas o menos. Durante la zafra 2014-2015 se molieron 18 475 005 t de caña de azúcar, de las cuales 7.14 % se cosechó mecánicamente, dando lugar a un rendimiento promedio de 57.7 t ha^{-1} , inferior a la media nacional (CONADESUCA, 2015). Igualmente, se dispone de un parque vehicular automotor para transporte de 4002, entre camiones para cargar de entre 10 y 25 t, y tracto-camiones para arrastre de remolques para carga de hasta 35 t. En automotores de campo se dispone de 1277 tractores agrícolas de diferentes capacidades, principalmente para labores agrícolas, 884 cargadoras de caña y 61 cosechadoras autopropulsadas (Mejía-Saenz *et al.*, 2010). En América Latina y Sudáfrica el consumo promedio de diesel por camiones del tipo "torton" es de 2.5 km L^{-1} , que transformados a potencia efectiva corresponden a 0.345 L kWh^{-1} . Este consumo específico es representativo en unidades con excelentes condiciones mecánicas del motor y transmisión (Grisso *et al.*, 2007). Respecto al traslado de los tallos del campo hacia el Ingenio se pueden enumerar por deficiencias de que adolecen una alta proporción del parque vehicular, tales como las unidades con muchos años de servicio, contaminantes, con escaso mantenimiento en sus componentes de transmisión y motriz, además de la importancia de la distancia de acarreo de la caña desde el campo hacia el ingenio (Chetthamrongchai *et al.*, 2001; De Faria y Da Silva, 2015). En esta región la longitud del trayecto promedio a recorrer es de alrededor de 32 km, donde esas unidades pueden alcanzar velocidades de 40 a 70 km h^{-1} y, para finalizar, examinar la importante aportación del grupo de alzadoras de caña al flujo de la carga hacia las factorías, lo cual repercute en su eficien-

cia, consumo de combustible y afectaciones grupales al costo de producción del cultivo (Dines *et al.*, 2012; Scheidl *et al.*, 2015). Lo anterior abre la oportunidad de proponer estrategias de optimización de la eficiencia de uso, reducir derroches, disminuir los costos de producción y centrar nuevos objetivos hacia una industria más eco-compatible. Por todo lo anterior, el objetivo de este trabajo fue determinar la cantidad de combustible diesel utilizado por los diferentes entes implicados para realizar las labores de campo, cosecha y traslado de caña de azúcar, dentro de las superficies productivas que abastecen a las diferentes factorías azucareras de la Región Golfo de México y su relación con la productividad del cultivo.

MATERIALES Y MÉTODOS

En este estudio se aplicaron cuestionarios para la recolecta de información sobre el carácter productivo del cultivo de caña de azúcar en 14 factorías de azúcar de la Región Golfo de México, asociadas a registros sobre el consumo de combustible diesel por las unidades automotores que se utilizan en diferentes labores agrícolas, así como en la cosecha del cultivo en ciclos planta y resoca (Debernardi de la Vequia *et al.*, 2016). Es conveniente aclarar que en el trabajo no se consideró a las cosechadoras autopropulsadas, debido a la escasa e inconsistente información obtenida. Para los cuestionarios se fijaron entrevistas aleatorias con productores, personal técnico de los Ingenios cooperantes y operadores de las unidades de transporte, incluyendo todos los aspectos posibles del estado de la mecanización en labores de campo y cosecha de la caña, además de su traslado al ingenio, donde el parámetro principal fue el registro de la cantidad de combustible utilizado (Ahmed y Alam-Eldin, 2015). Las labores mecanizadas de campo fueron: destrucción y arranque de cepa, aradura, subsoleo, rastreo-paso 1, rastreo-paso 2, surcado, cultivo-1-plantilla, cultivo D-F (despacho-fertilización), (Figura 1 A-B). Igualmente, se registraron datos sobre las funciones operativas y de consumo de combustible de las alzadoras de caña (Figura 1 C-D) y de los camiones de transporte.

Los productores de caña de azúcar, arrendadores de maquinaria agrícola y transportistas entrevistados están afiliados a los ingenios: San Miguelito, El Carmen, Central Progreso, La Providencia, Central Motzorongo, Constancia, La Margarita, El Refugio, Tres Valles, Potrero, San Pedro, La Gloria, El Modelo y Mahuixtlán (Figura 2).



Figura 1. Automotores agrícolas con equipos para realizar labores culturales al cultivo de la caña de azúcar.

En la misma Figura 2 se muestran las coordenadas de la ubicación geoespacial de la región Golfo productora de caña de azúcar.

Para el acarreo de caña desde el campo hacia el Ingenio el registro del consumo de combustible se contabilizó con base en camiones tipo "torton" o de doble eje trasero tipo tándem, con una capacidad promedio de carga de 20 a 25 toneladas y cuyo consumo promedio de diesel registrado fue de $2.5 \text{ km} \cdot \text{L}^{-1}$ (Figura 3).

Es importante señalar que no se consideró en el estudio el tipo y calidad de los caminos, así como de la topografía sobre las que se sitúan las superficies cultivadas que abastecen a cada factoría, ya que el propósito del estudio fue ofrecer un primer panorama del estatus sobre el consumo de diésel y, con base en los resultados, ofrecer rutas de seguimiento que coadyuven a una producción rentable y sustentable de la caña

ra. La factoría con mayor consumo de combustible diesel en realizar esas dos labores fue el Ingenio Central Progreso con 3.40 L t^{-1} de caña molida y el de menor consumo fue Ingenio El Modelo con 0.54 L t^{-1} . Destaca para Ingenio Central Progreso que 15 % de la superficie en producción es irrigada, y muestra orografía más accidentada y pedregosidad (de mediana a alta) en 77 % de los terrenos. Estos últimos factores en conjunto colapsan el rendimiento operativo de la factoría a 1 ha día^{-1} , e igualmente contribuyen a registrar menores rendimientos de producción respecto a la media nacio-

nal (56.51 t ha^{-1} , zafra 2014/2015). El Ingenio El Modelo dispone de riego en 95 % de su superficie productiva, una orografía tipo planicie con superficies cañeras ligeramente mayores a la media nacional y cuyos terrenos presentan escasa o nula pedregosidad. Lo anterior le confiere rendimientos operativos promedio de 4 ha día^{-1} , que asociado a sus altos rendimientos de producción (82.95 t ha^{-1} , zafra 2014/2015), le confieren

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las labores de campo generalizadas y más importantes son el cultivo y el despacho o labor combinada (dos labores de cultivo+fertilización). Estas se realizan de forma mecánica en 75 % de la superficie de la región para el ciclo soca. En la Figura 4 se sintetiza el consumo de combustible con base en caña molida para realizar esas labores por cada factoría azuca-



Figura 2. Ingenios azucareros de la Región Golfo consultados para este estudio.



Figura 3. Configuraciones básicas de los camiones de carga tipo "torton".

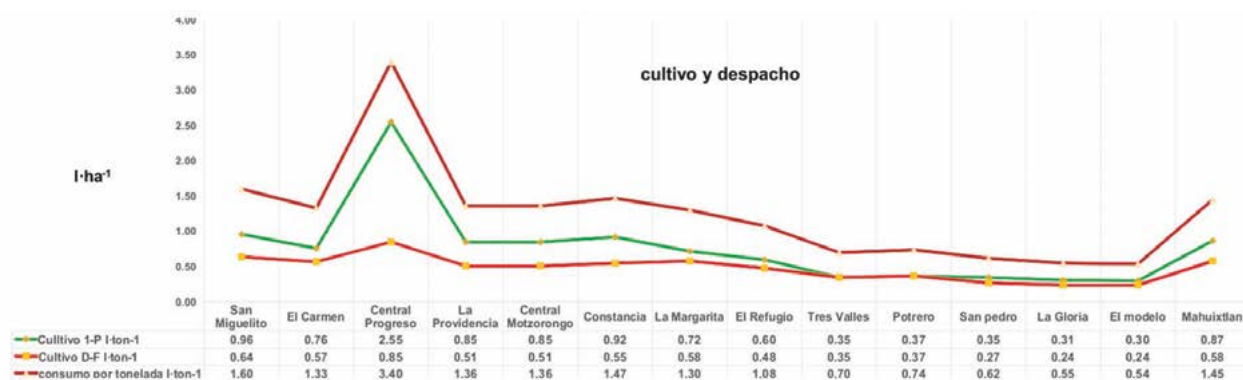


Figura 4. Consumo de combustible para las labores de cultivo y despacho en socas en la región Golfo.

destacada eficiencia en el uso de combustible.

Otro aspecto a destacar es el tamaño de los equipos de campo y no exactamente vinculados con la potencia de los tractores, ya que un alto porcentaje de los que operan

en la región Golfo son de 71 kW [95 hp] y con un consumo promedio de diesel de 12.2 L h⁻¹, evaluado dentro del área cañera del Ingenio Central Progreso. Por las características de su enclave se registran pérdidas operativas de alrededor de 20 %, lo que eleva el consumo de combus-

tible para las labores culturales mecanizadas a 122 L ha⁻¹, lo que resulta en 2.2 L t⁻¹ de caña molida para cada labor. La Figura 5 muestra un comportamiento similar respecto a la cantidad de diésel utilizado para labores agrícolas que lo indicado en la Figura 4, aunque en este caso las

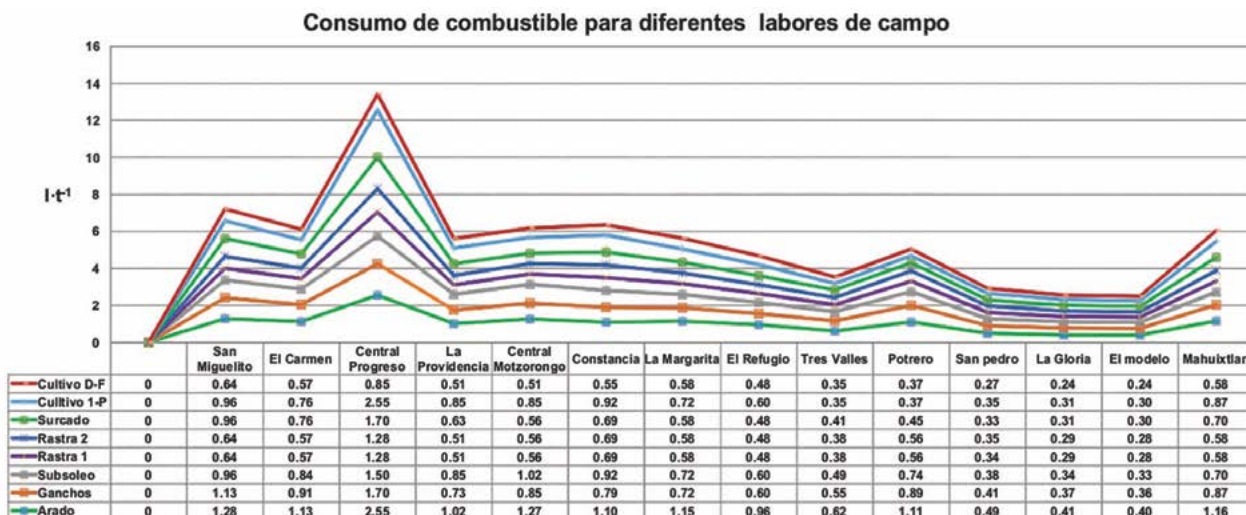


Figura 5. Consumo de combustible para la siembra de plantillas.

cantidades son mayores puesto que se refieren a siembras nuevas (superficies que se incorporan al proceso productivo de caña) y de reemplazo (renovación de cañaverales), es decir, que ambos entran al grupo de ciclo planta. Aquí, es conveniente señalar que el tamaño de la superficie sembrada para esta variable obedece a políticas productivas de cada ingenio asociadas a la capacidad de molienda de la factoría y a los niveles de productividad en campo (Vilailucka *et al.*, 2016). En la contabilización se observa que el mayor consumo de combustible fue para Ingenio Central Progreso con 13.4 L t^{-1} de caña molida, mientras que el menor consumidor de diesel fue Ingenio El Modelo con 2.5 L t^{-1} de caña molida.

En el cálculo anterior se incluyen todas las labores culturales que se realizan en la producción del cultivo (algunas se duplican) con equipo acoplado al tractor agrícola. Así que, analizando la información de los cuestionarios se desprende que un alto porcentaje, tanto de tractores como de alzadoras empleadas, se encuentra con un grado avanzado de obsolescencia, por lo que el consumo promedio de diesel fue de 316 g kW-h^{-1} . Es importante señalar que un alto porcentaje de las máquinas alzadoras son en realidad tractores agrícolas modificados para realizar exclusivamente la tarea de carga (Mejía Saenz *et al.*, 2010), por lo que su eficiencia productiva dependerá mucho del diseño de los mecanismos para ejecutar la tarea de carga, de la facilidad de su movilidad en el campo, y de la rapidez de actuación del operador, que combinados tendrán un efecto sobre la eficiencia del uso de combustible (Inderbitzin y Beattie, 2012).

La Figura 6 muestra la cantidad de diesel consumido por las máquinas alzadoras de caña, y del transporte de los tallos. Se observa que la factoría con el mayor consumo conjunto fue el Ingenio El Carmen con 3.34 L t^{-1} de caña molida, mientras que el menor consumidor fue Ingenio San Pedro con 2.07 L t^{-1} . Un aspecto importante a destacar es la distancia a recorrer dentro de las zonas de abasto hacia los Ingenios, ya que en el Ingenio El Carmen el trayecto a recorrer promedio es de 65.0 km , mientras que para el Ingenio San Pedro la distancia promedio es de 32.5 km . En las alzadoras de caña con una edad hasta de cinco años el consumo promedio de diesel contabilizado es de 236 g kW-h . En la región de estudio este grupo representó 25% del total de estos equipos; el resto presenta graves signos de envejecimiento debido a un mantenimiento básico a sus unidades de transmisión y motriz,

en parte a su descapitalización, ya que para ser rentable debiera asignárseles una cuota de 300 t día^{-1} por frente de corte cuando en la realidad solo se llega a 160 t día^{-1} , así que para este grupo en general el consumo promedio de diesel es superior a los 316 g kW-h^{-1} . Aunque no se realizó una evaluación integral de la influencia del tamaño de los predios cañeros sobre el consumo de combustible de los automotores agrícolas es conveniente señalar que si el terreno además de pequeño es de configuración irregular, con pendientes y con suelos pobres, son factores asociados a la baja productividad, por lo que es de suponer que los rendimientos serán bajos y se agrava el problema de un consumo alto de combustible por tonelada producida (Helenice de Oliveira *et al.*, 2015; Vilailucka *et al.*, 2016). El caso representativo es el Ingenio El Carmen, donde el tamaño promedio de los predios es de 3.5 ha y con gradientes promedio que oscilan desde 3% a 15% .

CONCLUSIONES

El Ingenio Central Progreso fue el mayor consumidor diesel en realizar las labores agrícolas mecanizadas en ciclo planta con 13.7 L t^{-1} de caña molida, mientras que el menor fue Ingenio El Modelo, con 2.49 L t^{-1} .

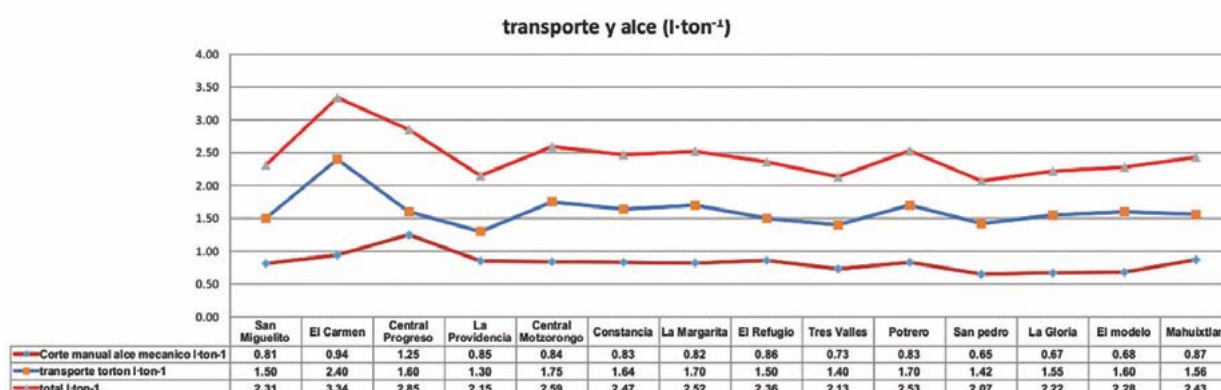


Figura 6. Consumo de diesel durante el transporte y de las alzadoras de caña.

En el ciclo de soca el consumo de combustible mostró tendencias similares; el valor más alto fue para Ingenio Central Progreso con 3.40 L t^{-1} . Cuando el Ingenio El Modelo cuantificó el menor consumo con 0.54 L t^{-1} respecto al alce mecánico de la caña, la cantidad promedio de diesel utilizado fue de 0.6 L t^{-1} de caña molida. Finalmente, el rendimiento en consumo de diesel por los camiones "tipo torton" fue de 2.5 km L^{-1} , considerando un consumo óptimo de 0.5 L t^{-1} de caña molida en el recorrido de trayectos no mayores a 25 km. La factoría que cuantificó el mayor consumo en transportar la caña cosechada fue Ingenio El Carmen con 3.34 L t^{-1} , mientras que Ingenio San Pedro fue el que registró el menor consumo, con 2.07 L t^{-1} de caña transportada.

LITERATURA CITADA

- Ahmed A.E., Alam-Eldin A.O.M. 2015. An assessment of mechanical vs manual harvesting of the sugarcane in Sudan-The case of Sennar Sugar Factory. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences* 14(2): 160-166.
- Braunbeck O.A., Albrecht Neto E. 2014. Transport logistics of raw material and waste of sugarcane. *In: Sugarcane bioethanol: R&D for Productivity and Sustainability*. Barbosa Cortez L.A. (Coord). Ed. Blucher. São Paulo, Brazil. pp. 487-504.
- Chetthamrongchai P., Auansakul A., Supawan D. 2001. Assessing the transportation problems of the sugar cane industry in Thailand. *Transport and Communications Bulletin for Asia and the Pacific* No. 70. 31-40.
- CONADESUCA. 2015. Informe Estadístico del Sector Agroindustrial de la Caña de Azúcar. Zafra 2008/09 – 2014/15. SAGARPA. México. 548 p.
- Debernardi de la Vequia H., Ortiz Laurel H., Rosas Calleja D. 2016. Energía disponible a partir de biomasa de residuos de caña de azúcar (*Saccharum ssp*). *Agroproductividad* 9: 68-73.
- De Faria L.F.F., Da Silva J.E.A.R. 2015. Effects of maintenance management procedures in sugarcane mechanic harvesting system equipment. *Eng. Agríc., Jaboticabal* 35: 1187-1197.
- Dines G., Rae S.M., Henderson C. 2012. Sugarcane harvest and transport management: a proven whole-of-systems approach that delivers least cost and maximum productivity. *Proceedings of the Australian Society of Sugar Cane Technology* 34: 1-9.
- Grisso R.D., Perumpral J.V., Zoz F.M. 2007. Spreadsheet for matching tractors and drawn implements. *Applied Engineering in Agriculture* 23: 259-265.
- de Oliveira Florentino H., Vaz Pato M., Jones D., Cantane D.R. 2015. Production and Management of Sugarcane Biomass. *In: Process Optimization. Biomass Production and Uses*. Jacob-Lopes E., Queiroz Zepka L. (Eds.). Ed. InTech. Rijeka, Croatia. pp. 12-28.
- Mejía Saenz E., Rivera Alvarado J.C., Oviedo Navarro E., Debernardi de la Vequia H., Tiscareño López M. 2010. Estudio de caracterización de zonas potenciales de mecanización en las zonas de abasto cañeras. COLPOS-SIAP. SAGARPA. 154 p.
- Murray T.J., Meyer E. 1984. The effect of transmission options on the performance of tractors hauling sugarcane. *Proceedings of the South African Sugar Technologists' Association* 58: 219-222.
- Inderbitzin M., Beattie R. 2012. Improving the harvesting and transport of whole crop harvested sugar cane. *Proceedings of the Australian Society of Sugar Cane Technology* 34: 1-11.
- Scheidt H.A., Simon A.T., Pacagnella A.C.J., Pereira Salgado A.J. 2015. Environmental impacts of mechanization in Brazil's sugar and ethanol industry: the cutting, loading, and transportation process case. *Environmental Progress and Sustainable Energy Sustainability* 34: 1748-1755.
- Vilailucka P., Sethanana K., Moonsria K. 2016. Simulation of sugar cane harvesting and transportation in Nakhon Sawan, Thailand. *Proceedings of the 4th. IIAE International Conference on Industrial Application Engineering. The Institute of Industrial Applications Engineers. Japan.* pp. 514-519.



INTERPRETACIÓN DEL ANÁLISIS DE SUELOS CAÑEROS BASADO EN LAS RELACIONES ENTRE PROPIEDADES Y ELEMENTOS

INTERPRETATION OF SUGAR CANE SOIL ANALYSIS BASED ON RELATIONS BETWEEN PROPERTIES AND ELEMENTS

Guerrero-Peña, A.¹; de la Cruz-Pons, A.¹; Velasco-Velasco, J.^{2*}

¹Colegio de Postgraduados Campus Tabasco. Periférico Carlos A. Molinas s/n, H. Cárdenas, Tabasco, México. C. P. 86500. ²Colegio de Postgraduados Campus Córdoba. Carretera Córdoba-Veracruz km 348, Congregación Manuel León, Amatlán de los Reyes, Veracruz, México. C.P. 94946.

*Autor de correspondencia: joel42ts@colpos.mx

RESUMEN

La caña de azúcar (*Saccharum* spp.) es uno de los cultivos de mayor importancia en las regiones tropicales y subtropicales del mundo. Su relevancia es económica, social y cultural en las regiones donde se cultiva y se le considera como un agroecosistema que tiende a reducir la fertilidad de los suelos debido al manejo agronómico. Los programas de manejo y mejoramiento de los suelos están basados en un diagnóstico de la fertilidad mediante análisis físico, químico y biológico de laboratorio, para lo cual son necesarias bases y herramientas para la interpretación de los estudios realizados. Se analizó un grupo de muestras de suelos del Ingenio Cañero Presidente Benito Juárez en Tabasco, México; los cuales fueron interpretados mediante una nueva alternativa basadas en las relaciones entre elementos y propiedades. Destacó en esta propuesta el uso de la relación entre la materia orgánica (MO) y la fracción mineral conformada por arcilla+limo, la cual fue más sensible para detectar problemas con la MO en los suelos.

Palabras clave: caña de azúcar, fertilidad de suelos, textura, materia orgánica.

ABSTRACT

Sugar cane (*Saccharum* spp.) is one of the most important crops in tropical and subtropical regions of the world. Its relevance is economic, social and cultural in the regions where it is grown, and it is considered an agroecosystem that tends to reduce the fertility of the soils due to agronomic management. Management programs and for soil improvement are based on a diagnosis of fertility through the physical, chemical and biological laboratory analysis, for which the bases and tools for the interpretation of studies carried out are necessary. A group of soil samples was analyzed from the sugar factory, Presidente Benito Juárez, in Tabasco, México; which were interpreted through a new alternative based on the relations between elements and properties. In this proposal the use of the relation between organic matter (OM) and the mineral fraction made up of clay+loam stood out, which was more sensitive to detect problems with the OM in the soils.

Keywords: sugar cane, soil fertility, texture, organic matter.

INTRODUCCIÓN

La caña de azúcar (*Saccharum* spp.) (Poaceae) (Flores, 2001) se adapta a climas tropicales y subtropicales, no tolera heladas y el crecimiento se detiene a temperaturas menores a 12 °C (FAOSTAT, 2016). Es un cultivo que se adapta a suelos con pH entre 6.0 a 7.5 (Porta *et al.*, 2003) donde los problemas nutrimentales se tienen en los valores extremos (Salas, 2001). El manual del Instituto para el Mejoramiento de la Producción de Azúcar (IMPA, 1964) indica que el límite de desarrollo de la caña está entre los pH de 6-0 a 8.0, con mejores resultados alrededor de la neutralidad práctica (6.5-7.5). El análisis de suelos es una herramienta útil para identificar problemas de nutrición y de apoyo para las diferentes metodologías utilizadas para hacer recomendaciones de fertilización. Entre sus ventajas se destaca que es un método rápido y de bajo costo que permite ser utilizado ampliamente por agricultores y empresas. Debido a que la caña de azúcar tiene un largo período reproductivo y máximos ciclos de crecimiento, el cultivo tiene grandes requerimientos nutrimentales, por lo que en algunas zonas cañeras aplican grandes cantidades de fertilizantes para reducir las deficiencias. Los programas de manejo y mejoramiento de los suelos están basados en un diagnóstico de la fertilidad (física, química y biológica), para lo cual es necesario contar con bases y herramientas para la interpretación de los estudios realizados.

El análisis de suelos está basado en la teoría de que existe un "nivel crítico" en relación con el procedimiento analítico utilizado y a la respuesta del cultivo cuando se aplica un determinado nutrimento, y cuando su nivel es inferior o superior al nivel crítico el crecimiento de la planta se afectará en forma negativa o positiva, según dicha concentración. Con el análisis de suelos se pretende determinar el grado de suficiencia o deficiencia de los nutrientes del suelo, así como las condiciones adversas que pueden perjudicar a los cultivos, tales como la acidez excesiva, salinidad y toxicidad de algunos elementos (Salas, 2001). El grado de potencial productivo de un suelo está determinado por sus características químicas, físicas y biológicas. Las deficiencias de micronutrientes suelen presentarse como consecuencia de la pobreza natural del suelo o ser inducidas por condiciones adversas relacionadas con la acidez o la alcalinidad, el contenido de materia orgánica, sequía, exceso de humedad y desbalances nutrimentales, debido a manejos inadecuados de los fertilizantes y enmiendas (Quintero, 2008). Debido a que la nutrición

mineral de las plantas está indisolublemente unida al suelo sobre el cual ellas crecen, el diagnóstico nutricional es una herramienta que sirve para conocer el estado que guardan las características químicas, biológicas y físicas de los suelos cultivados, además de facilitar la toma de decisiones en la planificación de estrategias de inversión a mediano y largo plazo. El objetivo del presente trabajo fue proponer una alternativa para la interpretación de los análisis de suelos basadas en las relaciones entre las propiedades del suelo con los elementos químicos, tomando en consideración datos experimentales obtenidos de la zona de abasto del Ingenio Benito Juárez de Tabasco, México.

MATERIALES Y METODOS

El área de muestreo se ubicó en la zona de abastecimiento de caña de azúcar del Ingenio Presidente Benito Juárez (IPBJ), (17° 56' y 18° 24' N, y 93° 17' y 94° 08' O) y 11 m de altitud, y comprende parte de los municipios de Cárdenas y Huimanguillo, Tabasco. El clima es cálido húmedo con abundantes lluvias en verano (Am), la temperatura media anual es de 26 °C y la precipitación media anual de 2163 mm. Está situada sobre la provincia fisiográfica Llanura Costera del Golfo Sur (INEGI, 2005; Salgado-García *et al.*, 2009).

Muestreo de Suelos. Los muestreos fueron realizados en zig-zag en forma aleatoria a 0-30 cm, obteniendo muestras compuestas a partir de 15 submuestras por muestra compuesta de aproximadamente 1 kg. En total se obtuvieron 105 para la realización de los análisis de fertilidad. El análisis de suelo para estimar su fertilidad se realizó con base en las metodologías descritas en el Cuadro 1.

La interpretación fue realizada con la norma citada y diagramas de caja y bigote (Pérez, 2016), el índice basado en la relación MO/arcilla+limo y la relación entre propiedades y elementos.

Índice basado en la relación MO/arcilla+limo

Basado en la metodología propuesta por Quiroga y Bono (2012), este índice tiene un rango de valores de 2 a 12, aproximadamente; valores inferiores a 4.5-5.0 son considerados bajos, y los superiores como altos. Uno bajo indicaría que el suelo ha perdido MO en relación con el limo+arcilla que tiene; por lo tanto, ese suelo tendría poca MO joven, lábil o fácilmente mineralizable. En contraposición, un suelo con un índice alto tendría un contenido de MO alto en relación al limo+arcilla que posee.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos son importantes porque definen la fertilidad de los suelos y su productividad debido a que interactúan con los elementos que se encuentran en estado natural. A continuación

son presentados los resultados del análisis de suelos mediante diagramas de caja y bigote, además de la descripción e interpretación de los datos de cada propiedad o elemento medido, así como de los indicadores y relaciones derivadas. Las relaciones derivadas de los suelos cultivados con caña de azúcar del Ingenio Presidente Benito Juárez (IPBJ) fueron: MO/arcilla+limo, MO/Nt, Arcilla/CIC, Al/pH, Arcilla/HCC, Arcilla/PMP.

En el caso de pH los valores registrados evidenciaron que 32.69 % de los suelos tienen problemas de acidez por presentar valores inferiores al intervalo de tolerancia, lo cual afecta los rendimientos. Al reducirse la disponibilidad de nutrimentos, tales como el fósforo, puede presentarse toxicidad por aluminio. El pH de los suelos cañeros estudiados (Figura 1A) presenta valores en el intervalo de 4.06 a 6.56, con un valor promedio de 4.94. Con base en la NOM-021-SEMARNAT-2000 (SEMARNAT, 2002), los suelos son clasificados de fuertemente ácidos a moderadamente ácidos. De acuerdo con Porta et al. (2003), el valor de pH óptimo para caña de azúcar está en el intervalo de 6.0 a 7.5, que corresponden a modera-

Cuadro 1. Métodos para el análisis de suelo establecidos en la NOM-021-SEMARNAT-2000 (SEMARNAT, 2002).

Parámetro	Método	Fundamento
pH	AS-02	Actividad del ion H ⁺ del suelo, medido en agua a una relación 1:2.5.
Carbono orgánico	AS-07	Oxidación del C orgánico del suelo con permanganato de potasio.
Nitrógeno total	AS-25	Es un índice de las reservas orgánicas de nitrógeno en el suelo.
Fósforo	AS-11	Determina el fósforo disponible en el suelo.
Potasio	AS-12	Saturación de los sitios de intercambio con acetato de amonio 1N pH 7 y cuantificación con espectrofotometría de emisión.
CIC	AS-12	Saturación de los sitios de intercambio con acetato de amonio 1N pH 7.

damente ácido y ligeramente alcalino, respectivamente. Portal (2003) establece una tolerancia de pH de 4.5 a 8.5, en el cual la caña de azúcar puede tener rendimientos satisfactorios. Por lo anterior, se puede establecer que 89 % de suelos cañeros estudiados registró valores de pH menores al promedio óptimo, 10.57 % está en el intervalo óptimo y 32.69 % con valores de pH menores al límite de tolerancia. En la mayoría de los suelos cañeros estudiados los valores de pH fueron bajos. Por ello, se estableció un programa de aplicación de enmiendas de cal para reducir la acidez.

Materia orgánica (MO) y relación MO/arcilla+limo. La MO de los suelos cañeros estudiados presenta valores inferiores al óptimo (39.05 %) de las muestras analizadas. La relación MO/arcilla-limo indica pobreza en todos los suelos. La MO de los suelos cañeros estudiados presenta valores en el intervalo de 1.61 a 7.19, con un valor promedio de 4.38. Con base en la NOM-021-SEMARNAT-2000 (SEMARNAT, 2002), los suelos presentan niveles de MO de medio a muy alto (5.0 % a 7.19 %) (Figura 1B).

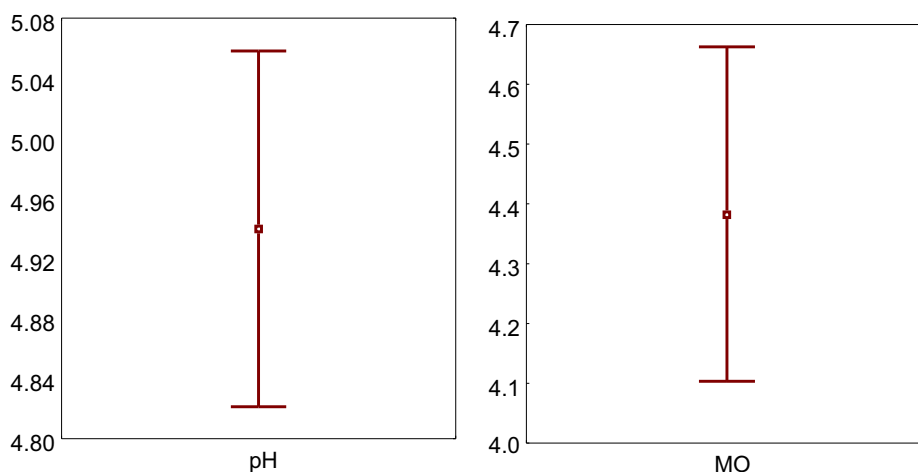


Figura 1. A: Diagramas de caja y bigote del análisis de pH, y materia orgánica (MO %) de suelos del Ingenio Presidente Benito Juárez, Tabasco, México.

Relación MO/arcilla+limo. En este trabajo se propuso por primera vez como una alternativa más sensible para indicar la fertilidad de los suelos cañeros utilizar un índice basado en la relación MO/arcilla-limo (Quiroga y Bono, 2012). En el caso de los suelos cañeros estudiados se presentan valores de la relación MO/arcilla-limo en el intervalo de 0.02 a 0.22. Estos valores indican bajo contenido de MO en relación con la arcilla+limo. Además, el contenido de MO lábil o fácilmente mineralizable es muy bajo, con la consecuencia de que no se

tendrá aporte de N a partir de la MO. Los valores bajos de MO pueden ser debido a la quema y requema de residuos durante la zafra (Carrillo, 2008). Por lo anterior se debe realizar una estrategia para incorporar residuos de la caña de azúcar, evitando retirarla de estos terrenos y aportar MO desde otras fuentes, hasta que se logre un nivel óptimo (relación MO/arcilla+limo >4.5).

Nitrógeno total (Nt). Solo 5.7 % de los suelos cañeros estudiados tienen un contenido de Nt igual al límite crítico de 0.25 % de Nt. En 94.3 % de las muestras analizadas el valor fue inferior al límite crítico con base en lo indicado en la NOM-021-SEMARNAT-2000 (SEMARNAT, 2002). En la Figura 2 A se presentan los datos de Nt. Los contenidos de Nt fueron en promedio valores medios, con un intervalo de 0.07 % a 0.25 % de Nt, considerados como valores muy bajos y muy altos, respectivamente, con base en lo establecido en la NOM-021-SEMARNAT-2000 (SEMARNAT, 2002). El valor crítico de 0.25 % de Nt garantiza que después de la mineralización se obtengan valores de N inorgánico (Ni) en forma asimilable, del orden de 40-60 mg por kg de suelo, cantidad que permitiría abastecer de este nutriente a las plantas de caña. Los resultados de Nt en los suelos cañeros estudiados correspondieron con los datos obtenidos de la relación MO/arcilla-limo. Con base en el modelo de balances nutrimentales, la demanda de este nutriente por el cultivo es mayor que el suministro de N por el suelo, por lo cual debe establecerse un programa de fertilización nitrogenada.

Fósforo Olsen (P-Olsen). Los suelos cañeros estudiados tienen niveles de iguales a superiores al límite crítico en

20 % de las muestras analizadas. El P-Olsen osciló en un intervalo de 2.22 mg kg⁻¹ a 47.97 mg kg⁻¹, considerados bajo y alto, respectivamente (Figura 2B). El P es un elemento que de manera natural se encuentra en concentraciones bajas o medias; su suministro depende básicamente de los aportes que realiza la MO. Suelos con acidez condicionan la mineralización de la MO por la baja actividad microbiana, razón por la que resulta lógico encontrar valores como los señalados en el presente estudio.

Potasio (K). Los contenidos de potasio registrados en los suelos de las parcelas cultivadas con caña de azúcar en el IPBJ (Figura 3) indicaron que son en su mayoría clasificados como muy bajos (0.27 cmol₍₊₎ kg⁻¹) y se encuentra un rango de muy bajo con 0.05 cmol₍₊₎ kg⁻¹ hasta alto, con concentraciones de 0.92 cmol₍₊₎ kg⁻¹. Del total de las muestras tomadas en las parcelas, solo 16.19 % presentaron contenidos altos, mientras que 83.81 % restante presentó contenidos catalogados como muy bajos, por lo que estos suelos tienen deficiencia de potasio disponible para ser absorbido por el cultivo.

Capacidad de intercambio catiónico (CIC). La CIC es una variable muy importante en la fertilidad de los suelos, ya que determina la transferencia y retención de cargas electrónicas de los elementos nutrientes y su fijación en la estructura del suelo para estar disponibles y ser absorbidos por el cultivo. La Figura 4 muestra que los suelos estudiados registraron valores de 1.95 a 42.79 cmol₍₊₎ kg⁻¹, con un valor medio de 4.38 cmol₍₊₎ kg⁻¹. Con base en la NOM-021-SEMARNAT-2000 (SEMARNAT, 2002), este valor es clasificado como muy bajo.

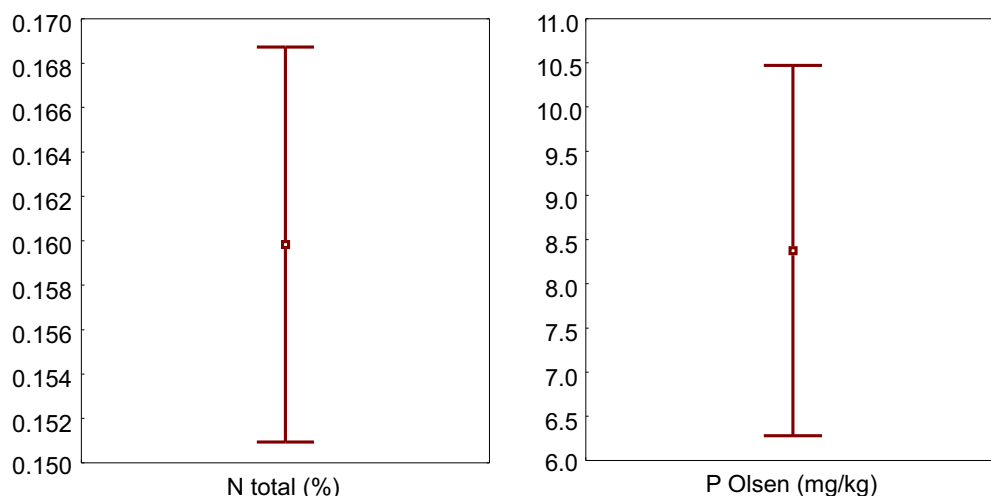


Figura 2. Diagramas de caja y bigote del análisis del Nitrógeno total (A), y del P-Olsen de los suelos (B) del Ingenio Presidente Benito Juárez, Tabasco, México.

Relaciones entre propiedades y elementos del suelo

La arcilla del suelo interviene en el intercambio de iones, contracción y expansión de los suelos, retención de humedad, estructura del suelo y complejo arcillo-húmico. Por ello, en este trabajo se propone el uso de la arcilla para modelar otras propiedades del suelo. La Figura 4 muestra la influencia que tiene el contenido de arcilla en la capacidad de intercambio

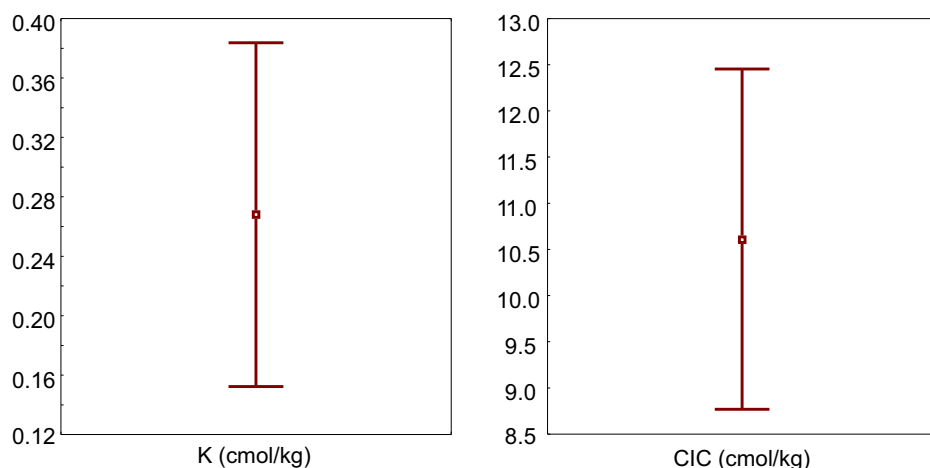


Figura 3. A: Diagramas de caja y bigote del análisis de potasio (K), y de capacidad de intercambio catiónico (CIC) de suelos del Ingenio Presidente Benito Juárez, Tabasco, México.

cambio catiónico es de alta a muy alta (NOM-021-SEMARNAT-2000; SEMARNAT, 2002). Los altos contenidos de arcilla no siempre son indicadores de una alta CIC, la cual depende en gran parte de la mineralogía de arcilla; las del tipo de las caolinitas (relación Si:Al 1:1) tienden a mostrar baja CIC, contrario a las del tipo de las motmorillonitas (relación Si:Al 2:1) que muestran más alta CIC.

Arcilla-CIC. En general, en los suelos estudiados, al realizar la correlación entre arcilla-CIC, se

encontró una relación directamente proporcional con una R^2 de 0.947 y fue posible obtener un modelo de estimación de la CIC a partir de los contenidos de arcilla.

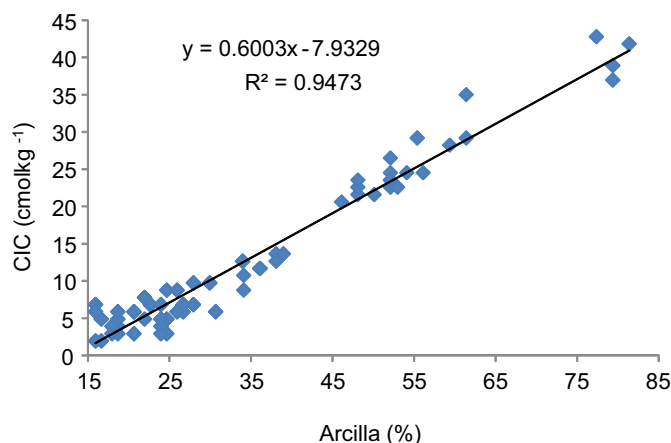


Figura 4. Gráfica de regresión Arcilla-CIC de los suelos del Ingenio Presidente Benito Juárez, Tabasco, México.

Arcilla-Humedad a capacidad de campo (HCC).

La correlación entre las variables arcilla-HCC muestra una correlación alta (R^2 de 0.947 (Figura 5)). En los suelos con contenidos de arcilla de entre 18 % y 45 %, la HCC es menor que en aquellos en los que osciló entre 50 % y 90 %. Se tiene un comportamiento similar de las partículas de arcilla al correlacionarlas con la CIC y la HCC, siendo esta directamente proporcional; es decir, a mayor contenido de arcilla en los suelos retienen mejor las cargas de nutrientes y la humedad en el suelo.

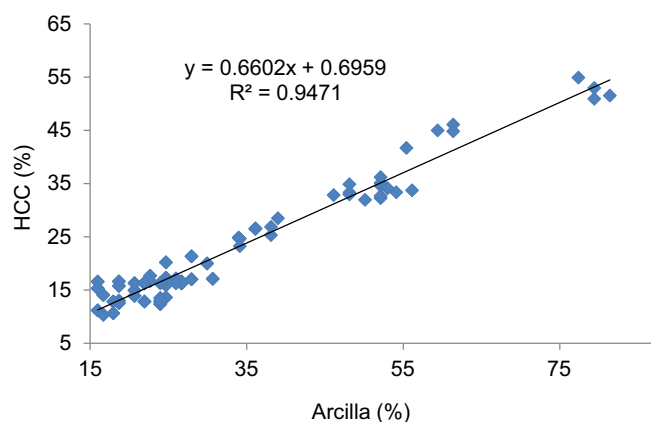


Figura 5. Regresión Arcilla-HCC de los suelos del Ingenio Presidente Benito Juárez, Tabasco, México.

catiónico (CIC), la cual es directamente proporcional. En suelos con contenidos de arcilla de entre 15 % y 40 % se tienen de muy baja a media CIC; cuando el contenido de arcilla es de 50 % a 80 % de arcilla, la capacidad de inter-

CONCLUSIONES

Se demostraron correlaciones altas entre la arcilla y las propiedades del suelo relativas a la CIC y HCC. Con base en el modelo de balances nutrimentales, la demanda de nutrientes por el cultivo es mayor que el suministro de N, P y K por el suelo, por lo cual debe establecerse un programa de fertilización con N, P y K. De acuerdo con la Norma Oficial Mexicana, los contenidos de materia orgánica (MO) registrados son altos, pero no es un indicador de la calidad de la MO. El índice basado entre la relación MO/arcilla+limo es más sensible para identificar el grado de fertilidad del suelo en sus propiedades físicas y químicas. La propuesta es útil para interpretar análisis de suelos y obtener modelos de estimación entre propiedades y elementos. Su aplicación es exitosa en suelos de una misma unidad o región con manejo agrícola similar, como la caña de azúcar, además de que se puede verificar indirectamente la calidad de los análisis realizados. En general, los suelos cañeros

presentan baja fertilidad consecuencia del manejo de los residuos y pérdida de la MO.

LITERATURA CITADA

- Carrillo Á.E., Vera E.J., Alamilla M.J.C., Obrador O.J.J., Aceves N.E. 2008. Cómo aumentar el rendimiento de la caña de azúcar en Campeche. Colegio de Postgraduados. 101 p.
- FAOSTAT. 2016. Crop Water Information: Sugarcane. http://www.fao.org/nr/water/cropinfo_sugarcane.html. Consulta: 21/12/2016.
- Flores C. S. 2001. Las variedades de caña de azúcar en México. Editorial Trillas. México. 322 p.
- IMPA.1964. Manual de campo en caña de azúcar. Serie Divulgación Técnica IMPA. Libro No. 24. Instituto para el Mejoramiento de la Producción de Azúcar. Córdoba, Veracruz, México. 469 p.
- INEGI. 2005. Cuaderno estadístico municipal. Cárdenas, Tabasco. Editorial INEGI. Gobierno del Estado. H. Ayuntamiento Constitucional de Cárdenas. Aguascalientes, Ags., México. 32 p.
- Pérez M. 2016. Control de calidad. Técnicas de análisis. Alfaomega Grupo Editor, S. A. de C. V. México. México, D. F. 408 p.
- Porta J., López-Acevedo M., Roquero C. 2003. Edafología para la agricultura y el ambiente. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España. 960 p.
- Quiroga A. y Bono A. 2012. Manual de fertilidad y evaluación de suelos. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. La Pampa, Argentina.
- Quintero D.R. 2008. Efectos de la aplicación de elementos menores en caña de azúcar en suelos del valle del río Cauca. Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia. (Cenicaña).
- Salas C.R.E. 2001. Manejo de suelos y fertilización de caña de azúcar. MEMORIA: Fertilidad de suelos y manejo de la nutrición de cultivos en Costa Rica. Universidad de Costa Rica. pp. 109-116
- Salgado-García S., Palma-López D.J., Zavala-Cruz J., Lagunes-Espinoza L.C., Castelán-Estrada M., Ortiz-García C.F., Juárez-López J.F., Ruiz R.O., Armida A. L., Rincón-Ramírez J.A. 2009. Sistema integrado para recomendar dosis de fertilizantes en caña de azúcar (SIRCF): Ingenio Presidente Benito Juárez. Colegio de Postgraduados Campus Tabasco. H. Cárdenas, Tabasco, México. 81 p.
- SEMARNAT. 2002. NOM-021-RECNAT-2000-. Norma oficial mexicana NOM-021-RECNAT-2000 que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreos y análisis. Diario Oficial de la Nación. México, D.F. 73 p.



FASES EXPERIMENTALES EN EL MEJORAMIENTO GENÉTICO DE LA CAÑA DE AZÚCAR (*Saccharum* spp.) EN MÉXICO

EXPERIMENTAL PHASES IN THE GENETIC IMPROVEMENT OF SUGARCANE (*Saccharum* spp.) IN MEXICO

Senties-Herrera, H.E.^{1,2}; Valdez-Balero, A.³; Loyo-Joachin, R.²; Gómez-Merino, F.C.^{4*}

¹Colegio de Postgraduados Campus Montecillo. Carretera México-Texcoco km 36.5 Montecillo, Texcoco, Estado de México, México. C. P. 56230. ²Centro de Investigación, Innovación y Transferencia Agrícola Tangamanga, A. C. Carretera Cosamaloapan-Tuxtepec km 99. Rancho San Rafael, Tangamanga, Cosamaloapan de Carpio, Veracruz, México. C. P. 95420. ³Colegio de Postgraduados Campus Tabasco. Periférico Carlos A. Molina km 3.5 H. Cárdenas, Tabasco, México. C. P. 86500. ⁴Colegio de Postgraduados Campus Córdoba. Carretera Córdoba-Veracruz km 348. Congregación Manuel León, Amatlán de los Reyes, Veracruz, México. C. P. 94946.

*Autor de correspondencia: fernandg@colpos.mx

RESUMEN

El programa de mejoramiento de la caña de azúcar (*Saccharum* spp.) consiste en la evaluación y selección de variedades, y comprende una serie de fases o etapas donde se evalúan características agronómicas, industriales, botánicas y de adaptación, de acuerdo con la fase y edad del cultivo en que se aprecian mejor, y sea más factible su estudio. Las características botánicas se utilizan fundamentalmente para fines de identificación varietal, mientras que las agronómicas, industriales y de adaptación para seleccionar variedades en función de su productividad. Se describen las fases de evaluación, que para la generación de una nueva variedad de caña de azúcar, puede tomar 14 años o más, además, se analizan los avances del programa mexicano de mejoramiento de caña de azúcar y se establecen algunas recomendaciones generales para el logro de mejores resultados.

Palabras clave: Poaceae, Saccharinae, Hibridación, Fuzz, selección.

ABSTRACT

The sugarcane (*Saccharum* spp.) breeding program consists in the evaluation and selection of varieties, and covers a series of phases or stages where agronomic, industrial, botanical and adaptation characteristics are evaluated, according to the phase and age of the crop where they are best observed, and where their study is most feasible. The botanical characteristics are used fundamentally for purposes of variety identification, while the agronomic, industrial and adaptation ones for the selection of varieties in function of their productivity. The evaluation phases are described, which for the generation of a new variety of sugarcane can take 14 years or more; in addition, advances in the Mexican sugarcane breeding program are analyzed and some general recommendations to achieve better results are established.

Keywords: Poaceae, Saccharinae, hybridization, Fuzz, selection.

INTRODUCCIÓN

En México, el programa de mejoramiento genético inicia en la Estación de Hibridación, dentro del Centro de Investigación y Desarrollo de la Caña de Azúcar (CIDCA), ubicado en Tuxtla Chico, Chiapas, México (14° 57' N y 90° 10' O), a una altitud de 366 m. La ubicación geográfica de este sitio reúne las condiciones ambientales necesarias para llevar a cabo este proceso. La hibridación se realiza anualmente durante los meses de octubre a diciembre (periodo durante el cual las variedades florecen en forma natural) dando lugar a los cruzamientos que son de dos tipos: los biparentales (apareamiento de dos individuos de sexo diferente (Figura 1 A) y policruzamientos (apareamiento de tres o más individuos de diferente sexo (Figura 1 B). Ambos cruzamientos se realizan en farol para evitar la contaminación de polen extraño. A los dieciocho días después del cruzamiento, se cosecha la semilla botánica o Fuzz, procedimiento que consiste en cortar las espigas hembra en los cruzamientos biparentales y espigas hembras y macho en los policruzamientos (CIDCA, 2015). Posteriormente se realiza el secado, desgrane, despeluzado, sopleteado y envasado del Fuzz. Finalmente el Fuzz se conserva en refrigeración a 4 °C hasta el momento de ser utilizadas (Flores-Revilla, 2012).

FASES DE SELECCIÓN

La Estación de Hibridación año con año produce Fuzz suficiente para iniciar el proceso de selección a nivel nacional con una población de hasta 360 mil híbridos, la cual es distribuida entre los Campos Experimentales Regionales (CER) y el mismo CIDCA durante el mes de julio del año posterior a la realización de la cruce para dar continuidad con el programa de selección regional, con una población de hasta 30 mil híbridos (Flores-Revilla, 2012). Posteriormente a la germinación del Fuzz, se realiza la inoculación y evaluación de la resistencia a la enfermedad del virus del mosaico de la caña de azúcar (VMCA), dando inicio al proceso de selección. El CIDCA inicia el proceso de selección de variedades, únicamente en las Fases de Plántula y Surco, remitiendo un par de estacas de las variedades sobresalientes (entre 50 y 70) a cada uno de los CER, que dan continuidad con el pro-

ceso de selección, estableciendo la Fase Cepa (CIDCA, 2015). El proceso de selección está constituido por las fases de Plántula, Surco, Cepa, Parcela, Multiplicación I, Prueba de adaptabilidad, Multiplicación II, Evaluación Agroindustrial, Multiplicación III, Prueba Semicomercial y Semillero. Este proceso permite liberar de una a diez variedades cada 14 a 16 años (Cuadro 1) (IMPA, 1983; Flores-Cáceres, 2001). La nomenclatura de las variedades mexicanas se designa con las siglas Mex, seguidas del año de la generación, y la numeración restante se determina con base a los rangos asignados a cada CER (Flores-Revilla, 2012).

Fase Plántula

Esta fase se establece en el mes de noviembre de cada año. La siembra se realiza con una separación entre surcos de 1.4 m y de 1 m entre cada híbrido, intercaldando una variedad testigo antes de después de cada cruce, con la finalidad de facilitar la selección. La distribución es en forma de culebrilla. Se levanta el registro y un croquis para poder identificar el material cuando desarrollen las plantas. La fertilización se realiza con la mitad de la fórmula que se utiliza en la región, tomando en consideración los análisis de suelo y de tejido vegetal que se hayan hecho. Las labores de cultivo se hacen según requerimientos de la planta y del manejo del cultivo. Tres meses después, a principios de marzo, se roza el pelillo (rebrotos provenientes de las yemas o "semilla agronómica") para que desarrolle la soca y en noviembre se efectúa la selección. Se recomienda una presión de selección máxima de 20 %, definiendo los grados Brix como el indicador prioritario. Las características agroindustriales son:



Figura 1. A: Cruzamientos biparentales en farol. B: Policruzamientos en farol.

sanidad (calificaciones trimestrales; enfermedades como mosaico [VMCA], carbón [*Ustilago scitaminea*], roya común [*Puccinia melanocephala melanocephala*] y roya naranja [*Puccinia kuehnii*]) son discriminatorias), grados Brix, médula, oquedad, diámetro, altura y población de tallos.

Fase Surco

Esta fase se establece en los meses de noviembre a diciembre, con los clones de la Fase Plántula y variedades de la Fase Cepa. La siembra se realiza a cordón doble. La distancia entre surco es de 1.4 m, y se siembra un surco de 3 m a una distancia de 1.4 m entre cada clon, y se distribuyen en fajas en el terreno en forma de culebrilla, intercalando un testigo cada 25 clones. Se levanta el registro y un croquis para poder identificar el material cuando desarrollen las plantas. Las labores de cultivo son fertilización, limpia, control de malezas, etcétera, y de acuerdo a los requerimientos de la planta, y considerando las condiciones de manejo propias de la región. La parcela se conserva en ciclo de plantilla y

soca, por lo tanto, son dos ciclos de evaluación, donde las características a evaluar son las mismas que en la Fase Plántula. Estos materiales son compartidos entre los diferentes CER y el CIDCA, remitiendo cuatro estacas de 3 yemas cada una, para continuar la selección en Fase Cepa.

Fase Cepa

Esta fase se establece de noviembre a diciembre, con los híbridos sobresalientes de la Fase Plántula y variedades de la Fase Surco. También se incorporan variedades extranjeras enviadas de la estación de cuarentena. Se siembran dos pares de estacas de tres yemas cada estaca con una distancia de separación de 1.8 m de centro a centro de par de estacas. Se intercalan las variedades testigo de la misma forma que en la Fase Plántula. La distribución es en forma de culebrilla, y se debe levantar el registro y croquis correspondiente al momento de la siembra. La fertilización y labores de cultivo son de acuerdo a las fases anteriores. Los criterios de evaluación son los mismos que en la Fase Plántula.

Cuadro 1. Síntesis del proceso de selección de variedades de *Saccharum* spp., en México (Adaptado para las condiciones del campus Córdoba, con base en las metodologías desarrolladas por el IMPA [1983] y Flores-Cáceres [2001]).

Fase	Periodo de evaluación		Presión de selección	Población teórica	Nomenclatura	Parcela experimental	Superficie total (ha)	Localización	Actividad
	Ciclo	Meses							
Plántula	Soca	18	20 %	30,000	Híbrido	1 Cepa c/1 m	4.5	Campo Experimental	Investigación Aplicada
Surco	Soca	24	20 %	6,000	Clón	1 Surco de 3 m	4.5	Campo Experimental	Investigación Aplicada
Cepa	Soca	24	20 %	6,000	Variedad	1 Cepa c/1.8 m	4.5	Campo Experimental	Investigación Aplicada
Parcela	Soca	24	20 %	1,200	Variedad	3 Surcos de 5 m	5.0	Campo Experimental	Investigación Aplicada
Multiplicación I	Plantilla	10 a 12	---	240	Variedad	4 Surcos de 5 m	1.2	Campo Experimental	Investigación Aplicada
Prueba de Adaptabilidad	Soca	24	20 %	240	Variedad	3 Surcos de 10 m	2.0	Campo Experimental	Investigación Aplicada
Multiplicación II	Plantilla	10 a 12	---	48	Variedad	5 Surcos de 25 m	1.2	Campo Experimental	Investigación Aplicada
Evaluación Agroindustrial	Resoca	38 a 42	20 %	48	Variedad	6 Surcos de 12 m	1.0	Campo Experimental	Investigación Aplicada
Multiplicación III	Plantilla	10 a 12	---	1 a 10	Variedad Prometedora	15 Surcos de 50 m	1.2 a 12	Campo Experimental o Comercial	Investigación Aplicada
Prueba Semicomercial	Plantilla	10 a 12	---	1 a 10	Variedad Prospecto Comercial	1 ha	1 a 10	Campo Comercial	Desarrollo Experimental
Semillero	Plantilla	10 a 12	---	1 a 10	Variedad Liberada	10 ha	10 a 100	Campo Comercial	Desarrollo



Fase Parcela

Se establece en los meses de noviembre a diciembre, con las variedades seleccionadas en la Fase Surco. Para la siembra se trazan fajas con parcelas de 3 surcos de 5 m separadas por calles transversales de 2 m y 1.4 m entre surcos. La siembra se hace a cordón cruzado y por cada cinco parcelas se intercala una de la variedad testigo. Se levanta el registro y el croquis de siembra. La fertilización y labores de cultivo son de acuerdo a la región. La evaluación de los materiales se efectúa en ciclo plantilla y soca, mediante calificaciones fitosanitarias trimestrales y la calificación agronómica a la edad de 12 meses. En ambos ciclos, se aplica una presión de selección máxima del 20 % en base a las consideraciones indicadas en la Fase Plántula para las calificaciones y criterio de selección estipulado. Así también se integran las características agronómicas siguientes: uniformidad de desarrollo, tenacidad, jugosidad, floración y la modificación de la calificación a las enfermedades de carbón y roya.

Multipliación I

Se establece con la caña-semilla de ciclo plantilla de la selección de la Fase Parcela; se siembran cuatro surcos de 25 m de cada variedad, estableciendo así el lote de multiplicación.

Fase Prueba de Adaptabilidad

Se establece de noviembre a diciembre y consiste en determinar el grado de adaptación regional de las variedades, así como conocer su madurez industrial en las diferentes zonas agroecológicas en el área influencia de cada CER. Para su establecimiento, se divide el terreno en parcelas de tres surcos de 10 m de largo; la separación entre surcos debe ser con calles transversales de 2 m. Se utiliza la caña-semilla proveniente del lote de Multipliación I. La distribución de los testigos se realiza de la misma forma que en la Fase Parcela. Anexo al lote anterior, se siembra un surco de 10 m de largo de cada variedad incluyendo a los testigos, para efectuar determinaciones destructivas con la finalidad de calcular las curvas de madurez de cada una de las variedades con referencia a los testigos. El método de análisis debe ser de acuerdo al utilizado por los ingenios del área de influencia, lo mismo que las labores de fertilización y manejo agronómico del cultivo. La evaluación de las variedades se realiza durante los ciclos de platilla y soca, efectuando calificaciones fitosanitarias trimestrales y la selección de los 12 meses de edad. En esta fase el criterio de selección se basa en las características agronómicas

en el tipo de madurez y en el rango de adaptación de las variedades. Lo anterior, con el objetivo de seleccionar variedades de comportamiento agroindustrial balanceado, de buen contenido de sacarosa en el primer tercio de la zafra de preferencia y de amplio espectro de adaptación o bien de adaptación específica que signifique la solución a un problema determinado. Para la identificación varietal en esta fase, se consideran las características: diámetro del tallo, tipo de yema, cantidad de ahuate, población de tallos molederos y mamonos, hábito de crecimiento, altura de tallo, uniformidad de desarrollo, despaje, tenacidad, resistencia al acame, floración, médula, oquedad, sanidad interna y externa, madurez, jugosidad y contenido de sacarosa, pureza y fibra. Así también la caracterización de la adaptación de las variedades a las condiciones de altitud, régimen pluviométrico, suelos, drenaje, sequía, vientos y heladas. En esta fase también se da un intercambio de material de variedades seleccionadas en cada CER para su incorporación en la fase.

Multipliación II

Con el material preseleccionado en ciclo plantilla de la Fase Prueba de Adaptabilidad, se establece de inmediato (en la época apropiada) el lote de multiplicación II, sembrando nueve surcos de 20 m de cada variedad. Tiene la finalidad de proveer de caña-semilla de ciclo plantilla de las variedades seleccionadas en dicha fase para establecer los trabajos de la Fase Evaluación Agroindustrial.

Evaluación Agroindustrial

Esta fase tiene como finalidad evaluar con mayor precisión el comportamiento agroindustrial de las variedades en las zonas agroecológicas donde fueron seleccionadas, y de esta manera, obtener información más consistente de la respuesta varietal a condiciones más específicas del medio ambiente. Para esta evaluación se debe realizar un experimento utilizando diferentes diseños experimentales (bloques al azar, cuadro latino, etcétera), con la finalidad de calificar diferentes características agronómicas, industriales y de adaptabilidad durante tres ciclos de evaluación, correspondiendo a los ciclos productivos de plantilla, soca y resoca. En este experimento se debe incluir como testigo a las variedades sobresalientes de la región, las variedades seleccionadas en la Fase Prueba de Adaptabilidad y las Prometedoras enviadas por los diferentes CER. La agrupación de las variedades debe considerar su madurez y riqueza en sacarosa, por consiguiente, los valores más altos del Rendimiento Teórico de Azúcar de

todas las variedades integradas en un experimento, deben coincidir con la época de cosecha más adecuada o establecida en la zona agroecológica donde se vaya a ubicar dicho experimento. La siembra se realiza con la caña-semilla proveniente del lote de Multiplicación II. El tamaño de la parcela experimental debe ser de seis surcos de 12 m de largo y la parcela útil es de cuatro surcos por 10 m de largo. La distancia del surco debe ser la utilizada en la región. Las parcelas deben estar separadas por surcos muertos y calles transversales de 2 m de ancho. Las repeticiones deben estar en función del tipo de diseño experimental; se recomienda un mínimo de tres repeticiones. Se levanta el registro y el croquis de siembra. En el Cuadro 2, se describen las principales características agroindustriales y de adaptación para esta fase de evaluación.

Cuadro 2. Principales características agronómicas, industriales y de adaptación para la Fase de Evaluación Agroindustrial nuevas variantes biológicas de *Saccharum* spp.

Características agronómicas	Características industriales	Características de adaptación
Germinación	Grados Brix laboratorio	Altitud
Cierre de campo	Grados Brix refractómetro	Precipitación y sequía
Hábito de crecimiento	Sacarosa, pureza y fibra	Vientos
Resistencia al acame	Tipo de madurez	Heladas
Despaje	Rendimiento de azúcar teórico por hectárea	Tipos de suelos y drenajes
Tenacidad	Jugosidad	
Altura de tallo moledero	Dureza de corteza	
Cantidad de ahuates		
Uniformidad de desarrollo		
Población		
Floración		
Médula		
Oquedad		
Sanidad		

Multiplicación III

Con los resultados de los dos primeros ciclos de selección, se establecen los lotes de Multiplicación III, para disponer de caña-semilla para la fase siguiente.

Prueba Semicomercial

El objetivo de esta fase es la observación en un área más extensa y la multiplicación de las variedades prometedoras propuestas para su introducción al cultivo comercial, en base a los resultados obtenidos en la Fase Evaluación Agroindustrial. Los trabajos de esta fase deben ser de acuerdo a las recomendaciones específicas para cada variedad dadas sus características de adaptación. De cada variedad se siembra máximo una hectárea en la época más adecuada, considerando que este material será utilizado como caña-semilla. La siembra se realiza a cordón doble. La fertilización y labores de cultivo de-

ben ser de acuerdo a la región. La evaluación se hace a través de calificaciones sanitarias trimestrales y una calificación botánica de acuerdo a lo descrito por Gómez-Merino y Senties-Herrera (2015) y agronómica como en la fase anterior a los nueve meses de edad.

Fase Semillero

Esta fase considerada como semillero básico, corresponde a la última etapa del proceso de selección de variedades y tiene el objetivo de multiplicar las variedades prometedoras y aportar semilla de calidad para su introducción al cultivo comercial.

Aportes del programa de mejoramiento genético de caña de azúcar en México

El programa mexicano de mejoramiento genético en caña de azúcar ha permitido desarrollar cerca de 66 % de las variedades que actualmente se cultivan en territorio nacional (Senties-Herrera *et al.*, 2017), y junto con las variedades extranjeras, se han convertido en pilar fundamental de variabilidad genética para el diseño, implementación y evaluación de estrategias de producción de azúcar y otros productos, coproductos, subproductos y derivados, pues constituyen la materia prima de las transformaciones agroindustriales. Es importante notar que los aportes de este programa han sido desta-

cados, pues en las dos décadas anteriores el porcentaje de variedades nacionales en el campo cañero se había estimado en 55 % (Flores-Revilla, 2012; Senties-Herrera *et al.*, 2016). Las nuevas directrices para el mejoramiento genético y continuidad del fortalecimiento de esta agroindustria, con fines de diversificación productiva, incluyen la ampliación de la base genética mediante la hibridación, selección e intercambio de variedades, aplicación del cultivo *in vitro*, generación de modelos estadísticos multivariados que permitan evaluar la interacción genotipo por ambiente, y desarrollos biotecnológicos tendientes a aplicar avances recientes sobre el genoma de este cultivo (Senties-Herrera y Gómez-Merino, 2014). Para una mejor producción en campo, Gómez-Merino *et al.* (2014) proponen una serie de necesidades de innovación, que incluyen la generación de variedades con mayor capacidad para producir biomasa y sacarosa,

además de resistencia a factores bióticos (plagas) y abióticos (sequía, inundaciones, heladas, acidez, salinidad, entre otros), uso eficiente del agua, mayor infraestructura para riego, uso eficiente de fertilizantes, generación y aplicación de biofertilizantes y abonos, desarrollo de variedades biotecnológicas, generación de sistemas de producción orgánicos, diversificación de la producción, cosecha en verde y mecanización, entre otros. Al menos parcialmente, a través de la implementación de estas innovaciones será posible estimular mayor progreso social de quienes se benefician de esta cadena de valor. En todo caso, con fines de diversificación productiva, los criterios de evaluación tendrán que ser adecuados al perfil de producto, coproducto, subproducto o derivado que se quiera obtener.

CONCLUSIONES

Los aportes del programa mexicano de mejoramiento genético en caña de azúcar en las últimas dos décadas, han pasado de 55% a 66 % del material biológico cultivado en México. Dados los desafíos que actualmente enfrenta la agricultura en México en términos de agotamiento y contaminación del agua, alza generalizada de precios de los insumos agrícolas, embates ambientales impuestos por el cambio climático global y baja en la productividad y rentabilidad del sector, entre otros, resulta prioritario para México canalizar esfuerzos significativos para que la caña de azúcar continúe siendo un soporte para el desarrollo del campo y

de la industria diversificada. Estos esfuerzos deben ser en términos de investigación básica, desarrollos tecnológicos e innovación.

LITERATURA CITADA

- CIDCA. 2015. Centro de Investigación y Desarrollo de la Caña de Azúcar (CIDCA). <http://www.camaraazucarera.org.mx/Cidca.aspx>
- Flores-Cáceres C.S. 2001. Las variedades de caña de azúcar en México. Editorial ATAM, México. 308 p.
- Flores-Revilla C. 2012. Proyectos: Avances y Resultados 2012. http://www.caneros.org.mx/site_caneros/descargas/pleno_gdl/04_PONENCIA_ESTACIONES_HIBRIDACION.pdf
- Gómez-Merino F.C., Trejo-Téllez L.I., Morales-Ramos V., Salazar-Ortiz J., Velasco-Velasco J., Senties-Herrera H.E., Ladewig P. 2014. Necesidades de innovación en la producción de caña de azúcar (*Saccharum* spp.). *Agroproductividad* 7: 22- 26.
- Gómez-Merino F.C., Senties-Herrera H.E. 2015. Manual para la identificación varietal de caña de azúcar. Colegio de Postgraduados. México. 40 p.
- IMPA. 1983. Programa de variedades. Objetivos, Importancia y Metodología Experimental. Centro Nacional de Investigaciones Azucareras, México, D. F. 63 p.
- Senties-Herrera H.E., Gómez-Merino F.C. 2014. Nuevas directrices en mejoramiento genético de caña de azúcar (*Saccharum* spp.). *Agroproductividad* 7: 9-15.
- Senties-Herrera H.E., Gómez-Merino F.C., Loyo Joachin R. 2016. El mejoramiento genético de la caña de azúcar (*Saccharum* spp.) en México: Una historia de éxito con nuevos desafíos. *Agroproductividad* 9: 8-13.
- Senties-Herrera H.E., Trejo-Téllez L.I., Gómez-Merino F.C. 2017. The Mexican Sugarcane Production System: History, Current Status, and New Trends. In: Sugarcane: Production Systems, Uses and Economic Importance. R. Murphy (Ed.). Nova Publishers. New York, USA. pp. 39-71.



RESIDUOS ORGÁNICOS DE LA AGROINDUSTRIA AZUCARERA: RETOS Y OPORTUNIDADES

ORGANIC RESIDUES FROM THE SUGAR CANE AGROINDUSTRY: CHALLENGES AND OPPORTUNITIES

Velasco-Velasco, J.¹; Gómez-Merino, F.C.¹; Hernández-Cázares, A.S.¹; Salinas-Ruiz, J.¹; Guerrero-Peña, A.^{2*}

¹Colegio de Postgraduados Campus Córdoba. Carretera Córdoba-Veracruz km 348, Congregación Manuel León, municipio de Amatlán de los Reyes, Veracruz, México. C. P. 94961. ²Colegio de Postgraduados Campus Tabasco. Periférico Carlos A. Molinas s/n, H. Cárdenas, Tabasco, México. C. P. 86500.

*Autor de correspondencia: garmando@colpos.mx

RESUMEN

Los residuos orgánicos de la agroindustria azucarera, su manejo y su aprovechamiento representan un tema central que debe ajustarse a las tendencias de sustentabilidad y responsabilidad social de toda actividad económica. La diversificación de sus productos y adaptación de los sistemas de producción para mantener e incrementar productividad son un área de oportunidad para investigar e innovar en la generación de tecnologías. Existen diversos usos alternativos de los residuos orgánicos, tales como: alimentación de ganado, bio remediación de suelos, obtención de biocombustibles, obtención de energía eléctrica y producción de abonos orgánicos. Se describen alternativas de uso y aprovechamiento de los residuos de caña de azúcar en campo e industria para subrayar el potencial de aprovechamiento de los mismos en el corto y mediano plazo.

Palabras clave: *Saccharum* spp., abonos orgánicos, bio remediación, biocombustibles, diversificación.

ABSTRACT

Organic residues from the sugar agroindustry, their management and exploitation, represent a central theme that must adjust to the trends of sustainability and social responsibility of all economic activities. The diversification of products and adaptation of production systems to maintain and increase productivity are an area of opportunity to study and innovate in the generation of technologies. There are diverse alternative uses for organic residues, such as livestock feeding, soil bioremediation, obtaining biofuels, obtaining electric energy, and production of organic fertilizers. Alternatives for use and exploitation of sugar cane residues are described, in the field and industry, to highlight the potential for their exploitation, in the short and medium term.

Keywords: *Saccharum* spp., organic fertilizers, bioremediation, biofuels, diversification.

INTRODUCCIÓN

La caña de azúcar (*Saccharum* spp.) es un cultivo de importancia a nivel mundial utilizada para la producción de azúcar y con una tendencia actual hacia la diversificación productiva. En México esta agroindustria representa un sector productivo que tiene un gran peso social, pues de ella dependen directamente e indirectamente alrededor de tres millones de personas que realizan diversas actividades inherentes y complementarias, tales como siembra, manejo del cultivo, cosecha, industrialización, transporte y comercialización (Aguilar-Rivera, 2017). Más de 35 % de la producción de este cultivo se realiza en el estado de Veracruz (SIAP, 2017), lo que indica la significancia para la región Golfo de México. La composición de materia seca de la caña de azúcar en su estado natural es la siguiente: 8.4 %, cogollo y hojas verdes; 19.7 %, hojas secas o paja; y 71.8 %, tallos limpios, es decir, los residuos constituyen alrededor de 28 % de su composición (León-Martínez, 2013). Recientemente, CONADESUCA (2016a) publicó una revisión sobre la diversificación productiva de este sector, donde resalta la importancia del aprovechamiento de los residuos de cosecha. El objetivo de este trabajo fue documentar alternativas de uso y aprovechamiento de los residuos de caña de azúcar en campo e industria para subrayar el potencial de aprovechamiento de los mismos.

MATERIALES Y MÉTODOS

En el presente trabajo se obtuvo información de dos fuentes: una indirecta, por medio de revisión bibliográfica, y otra directa, a través de encuestas realizadas en dos ingenios (estudio de caso). Se consultó información en publicaciones impresas y en bases de datos de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA); el Instituto Nacional para el Federalismo y Desarrollo Municipal (INAFED); el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP); y el Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar (CONADESUCA), entre otros. Se logró recolectar información acerca de cuáles son los principales estados productores y con mayor rendimiento de caña en México. También se obtuvo información directamente (estudio de caso) a cañeros y personal estrechamente relacionado con el procesamiento de la caña de la región de Tezonapa (zona centro del estado de Veracruz) y la comunidad de El Refugio (Región del Papaloapan al norte del estado de Oaxaca). Esta presenta un clima templado-húmedo-regular, con un rango de temperatura media anual de 20 °C a 26 °C, precipita-

ción pluvial media anual es de 2,888 mm. Cuenta con algunas planicies montañosas propias para la agricultura y el pastoreo de ganado bovino. La vegetación principal es selva media sub-perennifolia (INAFED, 2002). Por medio de encuestas realizadas a productores de la zona se recaudó información para conocer los rendimientos y subproductos que se obtienen en una hectárea de caña por dos diferentes métodos de cultivo o sistemas de producción (temporal y riego). De igual forma, se obtuvo información de la producción, así como sus subproductos en dos distintos ingenios azucareros, entrevistando a personal de la planta. Con la información reunida por los diferentes métodos se pudo realizar una comparación para conocer la cantidad de subproductos que se genera en una zafra en los principales estados productores de caña en México y así brindar algunas alternativas para los aprovechamientos de los residuos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En México los principales estados productores de caña de azúcar son Veracruz, con una producción de 19, 715, 409; Jalisco, con 7, 964, 203; y San Luis Potosí, con 5, 188, 654. Estas tres entidades federativas aportan 57.6 % de la superficie ocupada por el cultivo de caña de azúcar en el ámbito nacional. Aunque Veracruz se ubica en el primer lugar nacional con casi la tercera parte de la producción, el mayor rendimiento se observa en Morelos, con 119.8 t ha⁻¹ (Atlas Agroalimentario, 2016). De acuerdo con la SAGARPA (2013), la agroindustria de la caña de azúcar presenta diversas problemáticas, incluyendo el escaso aprovechamiento de los residuos de campo e industria de la caña de azúcar debido a que son considerados basura y no como un subproducto (Cuadro 1).

Residuos de cosecha y pérdidas en campo

Actualmente en Veracruz el cultivo de caña de azúcar ocupa una superficie de 287,813 hectáreas, con una producción de 2,320,901 toneladas de azúcar, lo que representa 38 % de la producción de azúcar en el país (SIAP, 2017). Una de las características principales de la caña de azúcar es la vasta producción de follaje. En más de 90 % de la superficie dedicada a caña de azúcar en México se realizan quemadas, a fin de facilitar su corte, lo que elimina parte importante de la biomasa producida por la planta (Figura 1). Después de esto queda la paja (localmente conocida como tlazole) y las puntas o cogollos, que constituyen entre 20 % y 30 % de la biomasa de la planta (León-Martínez et al., 2013). De acuerdo con Mora (2015), en la cosecha de caña de azúcar se

Cuadro 1. Situación actual de la agroindustria de la caña de azúcar (*Saccharum spp.*) en México (SAGARPA, 2013).

Problemática	Oportunidad
Deficiencias en la infraestructura, maquinaria y equipo.	Agroindustria más antigua del país, con una ubicación geográfica estratégica.
Deficiente organización de la cosecha.	
Crédito insuficiente.	Tratados internacionales de libre comercio que posibilitan la venta de productos.
Variedades de caña en estado degenerativo, con alto desbalance en campo	Se tiene una creciente diversificación del uso del azúcar.
Insuficiente fertilización.	Existe un potencial de incremento de la productividad en campo.
Bajo nivel de investigación científica y tecnológica en campo.	Alto grado de integración organizativa del gremio cañero.
Bajo nivel de capacitación.	Tiene un marco legal que le brinda seguridad y certeza jurídica (Ley de Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar).
El 60% se cultiva en zonas de temporal y las zonas de riego son en su mayoría de gravedad.	

pueden producir entre 50 a 100 t ha⁻¹ de residuos vegetales factibles de aprovecharse. Según estimaciones de Salgado-García *et al.* (2014), el rendimiento promedio de paja seca es de 18.2 t ha⁻¹ en sistemas de producción con cosecha mecanizada.

Los residuos de caña que se pierden durante el corte y la recolección varían de acuerdo con el volumen de biomasa producido, manejo del cultivo y sistema de riego o temporal. En México, Veracruz es el mayor generador de residuos, seguido de Jalisco y San Luis Potosí (Cuadro 2).

Residuos y pérdidas de la industria azucarera

Durante aproximadamente ocho meses que dura la zafra en la zona central del estado de

Veracruz se generan volúmenes considerables de residuos de cosecha que en principio son considerados como basura. Gracias a las políticas de protección al ambiente se han estado implementando proyectos de innovación para el aprovechamiento de estos residuos y, al mismo tiempo, generar beneficios económicos adicionales. La cantidad de residuos de cosecha y subproductos que pueden generar los ingenios azucareros dependerá del nivel de automatización, ya que entre más automatizado sea el sistema de producción, habrá mayor capacidad para procesar la materia prima y, en consecuencia, los residuos también aumentan. Es im-

portante mencionar que no todos los ingenios del país producen azúcar estándar, ya que algunos procesan mascabado y otros producen azúcar refinada; por lo tanto, cada ingenio produce diferentes residuos durante su proceso.

Con los datos obtenidos a través de las encuestas a trabajadores de los ingenios visitados (Cuadro 3) se deta-

llan los residuos que se obtienen en dos diferentes ingenios. Se encontró que el nivel de automatización del ingenio El Refugio es menor, ya que este solo produce mascabado, en comparación con el Ingenio Constancia que produce azúcar estándar.

Los valores obtenidos son datos aproximados, ya que el personal técnico

de los ingenios maneja datos en porcentaje. Otros residuos pertenecen a productos que se utilizan durante el proceso, como la lechada de cal. En los últimos años las investigaciones acerca de la utilización de residuos de la caña han aumentado, dando como resultado su uso innovador, creando nuevas normas medio ambientales. A continuación se dan algunas de estas alternativas para utilizar estos residuos.

Alternativas de uso para residuos de la caña de azúcar en campo

De acuerdo con Toledo *et al.* (2008) y Mora (2015), los



Figura 1. Caña de azúcar (*Saccharum spp.*) recién cortada, montada en "burritos" para su transporte a fábrica.

Cuadro 2. Valores promedio en toneladas de residuos y pérdidas durante el corte y recolección de caña de azúcar en los principales estados productores de México (CONADESUCA, 2016b).

Rendimientos y residuos	Veracruz		Jalisco		San Luis Potosí	
	Producción (2015-2016)		Producción (2008-2009)		Producción (2013-2014)	
	Temporal	Riego	Temporal	Riego	Temporal	Riego
Rendimientos (t ha ⁻¹).	60 - 70	80 - 120	50 - 68	70 - 95	61 - 65	62 - 85
Residuos de hoja en (t ha ⁻¹).	Nulo debido quema	Nulo debido quema	Nulo debido quema	Nulo debido quema	Nulo debido quema	Nulo debido quema
Tlazole (t ha ⁻¹).	13 -14	16 - 24	12 - 14	14 - 19	13 - 13.5	13 - 17
Punta/cogollo (t ha ⁻¹).	Aprox. de 40	Aprox. de 60	Aprox. de 35	Aprox. de 50	Aprox. de 30	Aprox. de 42.5
*Pérdida de caña por maquinaria en campo (t ha ⁻¹).	Aprox. 3.5	Aprox. 4.2	Aprox. 3.2	Aprox. 4.5	Aprox. 3.1	Aprox. 3.7
Residuos por traslado t.	Por viaje (0.01 a 0.012).	Por viaje (0.01 a 0.012).	-	-	-	-
	Por turno (0.45 a 0.6)	Por turno (0.7 a 0.9)	-	-	-	-

Nota 1: *Los residuos por maquinaria varían ya que en campo se pierde aprox. 5 % de la producción (Información de personal de ingenios).

Cuadro 3. Residuos y pérdidas en el proceso de elaboración de azúcar en dos ingenios azucareros en la zafra 2015-2016.

Indicadores	Ingenio El Refugio (Automatizado en un 50%)	Ingenio Constanica (Automatizado en un 70%)
Caña procesada (t día ⁻¹)	5,385	5,784
Azúcar al día (t).	240	454
Bagazo t día ⁻¹ (60%)	3,231	3,470
Cachaza t día ⁻¹ (23%)	1,238	1,380
Cenizas t día ⁻¹ (6%)	323	347
Otros residuos t (≤1%)	53.8 máximo	57.8 máximo

residuos agrícolas que se generan en los campos de cultivo de caña de azúcar pueden ser distribuidos en los mismos con los siguientes beneficios:

- Cobertura entre las calles en el terreno de cultivo, lo que promueve la conservación del suelo y evita la proliferación de malezas.
- Aporte de materia orgánica, nutrimentos y conservación de la humedad en el suelo.
- Mejoramiento de algunas propiedades físicas y químicas del suelo.
- Evitan el encharcamiento en épocas de lluvias.
- Promueven la actividad microbiológica, facilitando el transporte y asimilación de los nutrientes.
- Producen en el suelo un efecto mecánico, como cobertura y posterior incorporación, superior a la subsolada y escarificada
- Facilitan la aireación del suelo una vez descompuestos e incorporados

En la Figura 2 se muestra un terreno de cultivo de caña de azúcar donde se distribuyeron los residuos de cosecha.

Otro de los usos de los residuos de campo de la caña de azúcar es para la alimentación del ganado,



Figura 2. Puntas o cogollos de caña de azúcar (*Saccharum* spp.) que aprovechan como abonos orgánicos en los terrenos de cultivo en la zona de influencia del Campus Córdoba.

combinada con otros forrajes e ingredientes alimenticios; así, la caña de azúcar representa una opción nutricional de bajo costo y mayor eficiencia en la producción animal (Muñoz y González, 1998; León-Martínez *et al.*, 2013).

Alternativas de uso para residuos de la caña de azúcar de la agroindustria

Abonos orgánicos

La agroindustria azucarera genera muchos subproductos y el compostaje es una alternativa para que estos sean transformados en materiales útiles que pueden ser reincorporados al sistema de producción (Figura 3). A partir de la cachaza y del bagazo, que son los principales residuos agroindustriales, se pueden elaborar diversos tipos de vermicompostas para mezclarse con diferentes fuentes de estiércol de aves, equinos, vacunos, ovinos, caprinos o porcinos, y ser sometidas en vermicompostaje por tres meses. De acuerdo con Pérez-Méndez *et al.* (2011) y Palma-López *et al.* (2016), los mejores tratamientos son los adicionados con estiércol de ganado ovino y vacuno (Figura 3).



Figura 3: Cachaza esparcida en terrenos para ser envasada como abono orgánico en los terrenos experimentales del Campus Córdoba.

Remediación de suelos contaminados

La cachaza y el bagazo de caña de azúcar se utilizan para la remoción de hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) y de hidrocarburos totales del petróleo (HTP) de suelos contaminados con petróleo crudo. En un estudio se encontró que la cachaza es más eficiente en comparación con el bagazo para ser utilizada en los procesos bio remediación de suelos contaminados con hidrocarburos (García-Torres *et al.*, 2011; Antonio-Ordaz *et al.*, 2011). Sin embargo, en otro estudio se observó que la combinación cachaza-bagazo es más eficiente en la remoción de hidrocarburos que su eficiencia de forma individual (Cuevas *et al.*, 2016). La cachaza también se utiliza en la bio remediación de suelos contaminados con pesticidas, como DDT (Betancur-Corredor *et al.*, 2013). La planta en su totalidad puede ser utilizada con propósitos de fitorremediación; por ejemplo, para eliminar metales pesados como cadmio (Trejo-Téllez *et al.*, 2014).

Energía eléctrica

La caña de azúcar es uno de los cultivos con mayor capacidad para convertir la energía solar en biomasa. El rendimiento experimental máximo ha sido de 212 t ha⁻¹ año⁻¹, en tanto que el potencial productivo se ha estimado entre 500 y 800 t ha⁻¹ año⁻¹ (Moore, 2009; Yadav *et al.* (2010), lo que le coloca como el cultivo agroalimentario más productivo sobre la tierra. La producción energética de la caña es 20 veces mayor que la energía que se utiliza para producirla, cosecharla y trasladarla hasta el ingenio (Reyes-Montiel *et al.*, 2016). Al respecto se conoce que cuatro toneladas de residuos equivalen en energía eléctrica a lo producido por una tonelada de carbón (León-Martínez *et al.*, 2013; Mora, 2015). En el caso del bagazo por cada hectárea cosechada se obtienen anualmente 13.5 toneladas equivalentes a 2.7 tce (tonelada de combustible equivalente:

37.5 MJ/Kg). Este se utiliza mayormente como combustible directo en la generación de energía eléctrica y térmica (generación de vapor en las calderas) (García-Torres *et al.*, 2011). Un ejemplo de generación de energía eléctrica a partir de residuos de caña es el Ingenio Tres Valles de Veracruz, que desde 2010 está cogenerando electricidad tanto eléctrica

como térmica (vapor), la cual es una práctica redituable para los ingenios de México y eficaz para el desarrollo rural sustentable. En la zafra de noviembre de 2014 a junio de 2015 generó 64,182.995 kilowatt (kW) por hora, con un total de 663,331 toneladas del bagazo que se obtuvieron de 40,850 hectáreas de superficie de caña cosechada. La electricidad que generan sería suficiente para alumbrar a más de 100 mil hogares de Veracruz durante 365 días (Pineda, 2016).

CONCLUSIONES

La innovación en el uso y aprovechamiento de los residuos agroindustriales de caña de azúcar permitirán la diversificación de productos y fomentarán su manejo sostenible. Con ello se pretende fomentar la agroindustria azucarera mexicana mediante el incremento de su productividad y competitividad a escala Nacional e internacional.

LITERATURA CITADA

- Aguilar Rivera N. 2017. Cadena de valor de la diversificación de la agroindustria de la caña de azúcar en México. *Agroproductividad*: En prensa
- Antonio-Ordaz J., Martínez-Toledo A., Ramos-Morales R., Sánchez-Díaz L.F., Jesús-Martínez A., Tenorio-López J.A., Cuevas-Díaz M. del C. 2011. Biorremediación de un suelo contaminado con petróleo mediante el empleo de bagazo de caña con diferentes tamaños de partícula. *Multiciencias* 11: 136-145.
- Atlas Agroalimentario 2016. Publicaciones SIAP 2016. Disponible en: http://nube.siap.gob.mx/gobmx_publicaciones_siap/pag/2016/Atlas-Agroalimentario-2016.
- Betancur-Corredor B., Pino N., Peñuela G.A., Cardona-Gallo S. 2013. Biorremediación de suelo contaminado con pesticidas: caso DDT. *Revista Gestión y Ambiente* 16: 119-135.
- CONADESUCA. 2016. Diversificación de la caña de azúcar para otros fines. Nota Técnica Informativa del sector de la caña de azúcar. <http://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/114368/CAMBIOSNotaABRIL2016.pdf>
- CONADESUCA. 2016. Informe estadístico del sector agroindustrial de la caña de azúcar. Zafra 2008/09 2014/15. www.cndsca.gob.mx/documentos%20de%20interés/Informe%20Estadístico%20CONADESUCA%2014-15%20completo.pdf.
- Cuevas-Díaz M.C., Torres-López C.P., Martínez-Toledo A., Sánchez-Díaz L.F. 2016. Actividad de fosfatasa en suelo biorremediado con residuos de caña de azúcar. http://ameqa.org/AMEQA/V_congreso_memorias/EXTENSOS/EXT%20BB29.pdf
- García-Torres R., Ríos-Leal E., Martínez-Toledo A., Ramos-Morales F.R., Cruz-Sánchez J.S., Cuevas-Díaz M. C. 2011. Uso de cachaza y bagazo de caña de azúcar en la remoción de hidrocarburos en suelo contaminado. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 27: 31-39.
- Herrera-Solano A., Milanés-Ramos N., Molina-Lara F.A., Ordoñez-Barahano P., Elorza-Martínez P., Castillo Moran A., Enríquez-Ruvalcaba V., Rodríguez-Lagunes D.A. 2009. Efecto del manejo de los residuos de cosecha de la caña de azúcar (*Saccharum* spp. híbrido) sobre el rendimiento de campo en Veracruz, México. *Revista UDO Agrícola* 9: 517-521.
- INAFED. 2002. Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal. <http://www.gob.mx/inafed>.
- León-Martínez T.S., Dopico-Ramírez D., Triana-Hernández O., Medina-Estévez M. 2013. Paja de la caña de azúcar. Sus usos en la actualidad ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar. <http://148.215.2.10/articulo.oa?id=223128548003> ISSN 0138-6204.
- Mora O. 2015. Propuesta de alternativas hacia una producción sostenible de la caña de azúcar en la zona azucarera de Colombia. *Revista Agricultura Orgánica*. <http://www.controlbiologico.com/produccion-de-cana.htm>
- Moore P.H. 2009. Sugarcane Biology, Yield, and Potential for Improvement. In: *Proceedings of the Workshop BIOEN on sugarcane improvement*. Sao Paulo, Brazil. March 2009. http://www.fapesp.br/pdf/bioen1803/Bioen_Moore.pdf
- Muñoz E., González R. 1998. Caña de azúcar integral para estimular el consumo a voluntad de alimentos voluminosos en vacas. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola* 32: 33-40.
- Palma-López D., Zavala-Cruz J., Cámara-Reyna J. 2016. Uso de residuos de la agroindustria de la caña de azúcar (*Saccharum* spp.) para elaborar abonos orgánicos. *Agroproductividad* 9: 29-34.
- Pérez-Méndez M.A., Sánchez-Hernández R., Palma-López D.J., Salgado-García S. 2011. Caracterización química del compostaje de residuos de caña de azúcar en el sureste de México. *Interciencia* 36: 45-52.
- Pineda C. 2016. Ingenio genera electricidad con residuos de caña de azúcar. *Energías Renovables Sustentabilidad* <http://agromarketing.mx/sustentabilidad/ingenio-genera-electricidad-con-residuos-de-cana-de-azucar/>
- Reyes-Montiel J.L., Pérez-Bermúdez R., Betancourt-Mena J. 2016. Uso de la biomasa cañera como alternativa para el incremento de la eficiencia energética y la reducción de la contaminación ambiental. <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/Ecosolar/Ecosolar05/HTML/articulo01.htm>.
- SAGARPA. 2013. Impactos caña. Disponible en: <http://www.sagarpa.gob.mx/agricultura/Documents/Cultivos%20Agroindustriales/Impactos%20Ca%C3%B1a.pdf> [Consultado el 13 de Enero 2017].
- SIAP. 2017. Anuario Estadístico de Producción Agrícola. Caña de Azúcar. http://infosiap.siap.gob.mx/agricola_siap_gb/icultivo/index.jsp.
- Salgado-García S., Aranda-Ibañez E.M., Castelán-Estrada M., Ortiz-Laurel H., Palma-López J.D., Córdova-Sánchez S. 2014. Qué hacer con la paja de la cosecha mecanizada de caña de azúcar. *Agroproductividad* 7: 3-8.
- Toledo E., Cabrera J.A., Leyva A., Pohlen H.A.J. 2008. Estimación de la producción de residuos agrícolas en agroecosistemas de caña de azúcar. *Cultivos Tropicales* 29: 17-21.
- Trejo-Téllez L.I., Gómez-Merino F.C., Rivera-Olivares L.Y., Tejeda-Sartorius O. 2014. Cadmium-induced changes in leaf nutrient concentrations in sugarcane. *Journal of Food, Agriculture and Environment* 12: 879-885.
- Yadav D.V., Jain R., Rai R.K. 2010. Impact of Heavy Metals on Sugarcane. In: I. Sherameti and A. Varma (Eds.). *Soil Heavy Metals-Soil Biology*. pp. 339-367

EVALUACIÓN DE VARIABLES DE CALIDAD EN HÍBRIDOS DE *Saccharum* spp. EN DIFERENTES AMBIENTES AGROECOLÓGICOS DE JALISCO, MÉXICO

EVALUATION OF QUALITY VARIABLES IN *Saccharum* spp. HYBRIDS IN DIFFERENT AGROECOLOGICAL ENVIRONMENTS IN JALISCO, MÉXICO

García-Preciado J.C.^{1*}; Álvarez-Cilva M.¹; Guzmán-Martínez M.²; Cervantes-Preciado J.F.¹; Bermúdez-Guzmán M.J.¹

¹Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Campo Experimental Tecomán. Km. 35 Carretera Colima-Manzanillo, Tecomán, Colima, C.P. 28930. ²Universidad Autónoma de Guerrero, Facultad de Matemáticas, Av. Javier Méndez Aponte Núm. 1, Fracc. Servidor Agrario, C.P. 39070, Chilpancingo, Guerrero.

*Autor para correspondencia: garcia.concepcion@inifap.gob.mx

RESUMEN

La caña de azúcar (*Saccharum* spp.) en Jalisco, México representa uno de los principales cultivos agroindustriales y el de mayor relevancia socioeconómica para la entidad. Ante la disminución de productividad en las variedades comerciales se llevó a cabo una evaluación de variables de calidad industrial en nuevos híbridos y variedades comerciales en tres zonas cañeras de Jalisco, diferenciadas por su condición de clima, manejo y suelo. La información obtenida fue analizada mediante métodos estadísticos multivariados-combinados durante dos ciclos de cultivo, resultando sobresalientes por su contenido de sacarosa para las zonas de estudio los híbridos nacionales ATEMEX 99-48, COLMEX 95-27 y ATEMEX 99-1.

Palabras clave: caña de azúcar, análisis multivariados, sacarosa, variedades.

ABSTRACT

Sugar cane (*Saccharum* spp.) in Jalisco, México, represents one of the main agro-industrial crops and the one of highest socioeconomic relevance for the entity. In face of the decrease in productivity of commercial varieties, an evaluation was carried out of the industrial quality variables in new hybrids and commercial varieties in three cane-producing zones in Jalisco, differentiated by their conditions of climate, management and soil. The information obtained was analyzed through multivariate-combined statistical methods, during two cultivation cycles. The national hybrids ATEMEX 99-48, COLMEX 95-27 and ATEMEX 99-1 turned out to be outstanding for the study zones due to their sucrose content.

Keywords: sugar cane, multivariate analysis, sucrose, varieties.

INTRODUCCIÓN

La caña de azúcar

(*Saccharum* spp.) se cultiva en las regiones tropicales y subtropicales de todo el mundo. En México constituye uno de los cultivos agroindustriales de mayor importancia económica y social, siendo una fuente de empleo directo en campo e industria (SIAP, 2015). El estado de Jalisco, México, ocupa el segundo lugar a nivel nacional con una producción de 792 mil toneladas de azúcar y tercero en superficie sembrada, con aproximadamente 74 mil hectáreas (CONADESUCA, 2016). A pesar de la relevancia del cultivo tanto en el país como en dicha entidad actualmente se depende principalmente de dos variedades comerciales de caña de azúcar: CP 72-2086 y MEX 69-290, las cuales representan más de 50 % de la superficie cultivada (CONADESUCA, 2016). Estos genotipos tienen más de 30 años de uso, por lo que han presentado disminución en su rendimiento y calidad por mezclas físicas en campo, deterioro genético y decline productivo, entre otras. Dentro de algunas alternativas para aumentar la productividad se encuentra la selección de híbridos de caña de azúcar, que constituye un paso importante en el mejoramiento genético del cultivo, ya que los mejoradores seleccionan genotipos con características de mayor rendimiento ($t\ ha^{-1}$), °Brix, porcentaje de sacarosa (Pol), y resistentes a enfermedades entre otras principales. En México, actualmente el mejoramiento genético de *Saccharum* spp. es llevado a cabo por el Centro de Investigación y Desarrollo de la Caña de Azúcar (CIDCA), cuya tarea consiste en generar híbridos que una vez establecidos comercialmente se clasifican como variedades comerciales más productivas y tolerantes a enfermedades. El Campo Experimental Tecomán del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) es uno de los 11 Campos Experimentales Regionales, distribuidos en las diferentes zonas cañeras del país, que tiene la tarea de evaluar los híbridos generados por el CIDCA. Su finalidad es probar la adaptación de los materiales a diferentes condiciones de suelo y clima (IMPA, 1990; Martínez, 2006). En dicha fase se evalúan variables agronómicas y de calidad industrial de forma periódica, con base en la metodología del IMPA (1953). Respecto al análisis de variables de calidad, tradicionalmente se realizan gráficos de madurez, tomando como variable única al porcentaje de sacarosa en caña, aun cuando se dispone de información sobre porcentaje de fibra, °Brix, azúcares reductores, humedad y pureza del jugo (IMPA, 1983). En México, comúnmente se utiliza el análisis de varianza (Martínez-Torres, 2009) o regresiones lineales simples por híbrido para modelar las curvas de madurez (Delgado *et al.*, 2012). Sin embargo, es importante hacer uso de metodologías de análisis que permitan incorporar un mayor número de variables, tal como el uso métodos estadísticos multivariados (Senties y Gómez, 2014). Este tipo de análisis se han utilizado para la evaluación de variables agroindustriales en programas de mejoramiento genético de caña de azúcar, así como para la selección de híbridos comerciales en países como Argentina, China, Etiopía, India, Kenia, Pakistán y Venezuela (Ostengo *et al.*, 2011; Bastidas *et al.*, 2012; Luo *et al.*, 2015; Zhou *et al.*, 2015; Ftwi *et al.*, 2016; Ong'ala *et al.*, 2016; Shahzad *et al.*, 2016; Ahmed *et al.*, 2017). Por lo anterior, el presente trabajo propuso analizar el comportamiento e interacción de variables de calidad industrial en nuevos híbridos de caña de azúcar en la fase de prueba de adaptación en tres ambientes agroclimáticos mediante dos métodos estadísticos mul-

tivariados: Análisis de Componentes Principales (APC) y Análisis de Conglomerados Jerárquicos (ACJ), para con ello favorecer el proceso de selección de genotipos de caña en fases intermedias de selección para el programa de mejoramiento genético de México.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se utilizaron genotipos de caña de azúcar de origen nacional y extranjero obtenido a partir de hibridaciones e intercambios de germoplasma, respectivamente. Los cruzamientos genéticos fueron realizados en el Centro Nacional de Hibridación ubicado en Tuxtla Chico, Chiapas, México. A partir de ello, todos los materiales se evaluaron y multiplicaron en el Campo Experimental Tecomán y Sitio Experimental Costa de Jalisco, del INIFAP, así como en el Campo Experimental regional Atencingo, de la misma estructura del CIDCA. Los híbridos se evaluaron durante la etapa de selección denominada: fase prueba de adaptabilidad, durante dos ciclos de cultivo (planta y soca), en tres sitios ubicados en gradientes altitudinales de los 300 a 1300 m (Cuadro 1). En estos, el número de nuevos híbridos establecidos por ensayo fue variable (29 a 73) junto con los híbridos comerciales: CP 72-2086, ITV 92-1424, MEX 69-290, MEX 57-473 Y MEX 79-431 (Cuadro 2).

El diseño experimental fue bloques completos al azar, con una repetición. La unidad experimental fue de cuatro surcos, cada uno de 15 m de longitud por 1.40 m de ancho, y la parcela útil fue de dos surcos centrales, eliminando dos metros entre sus extremos. Durante el ciclo planta, entre los 10 y 13 meses de edad se analizaron datos de calidad industrial: porcentaje de sacarosa,

Cuadro 1. Descripción de los sitios donde se establecieron los ensayos.

Ingenio	Localidad	altitud (m)	PAA (mm)	TMA (°C)	Textura del suelo	Condición	Establecimiento	Coordenadas	
								Lat. norte	Log. oeste
José María Morelos	Las Varas	302	1651	28.1	Franco arcilloso	Riego de auxilio	2010	19° 36' 47.27"	104° 28' 55.80"
Melchor Ocampo	Corral de Piedra	880	852	22.0	Franco	Riego	2010	19° 43' 59.91"	104° 09' 11.19"
José María Martínez (Tala)	Los Troncones	1300	990	21.1	Franco	Riego de auxilio	2010	20° 41' 53.64"	103° 51' 18.86"

Los datos de clima se recolectaron de las estaciones del SMN cercanas a los experimentos (normales climáticas periodo 1981-2010). MSNM es la altura en metros sobre el nivel del mar. Precipitación acumulada anual (PAA). TMA representa la temperatura media anual.

°Brix, pureza del jugo, porcentaje de fibra, azúcares reductores y porcentaje de humedad. En el ciclo soca se realizaron las mismas determinaciones entre los ocho y once meses de edad del cultivo. Lo anterior dio como resultado tres monitores diferentes para cada variable a lo largo de tres meses por espacios de tiempo iguales. Para las determinaciones de las variables de calidad se tomaron muestras de tallos de caña en la parcela útil y se trasladaron a los laboratorios de campo de cada uno de los Ingenios para su debido procesamiento de acuerdo con las Normas Oficiales vigentes. Se calculó el promedio por variable de calidad e híbrido, y dicha información se utilizó para el análisis mediante las técnicas multivariadas: Análisis de Componentes Principales (ACP) y el Análisis de Conglomerados Jerárquicos (ACJ) (Johnson y Wichern, 2014). La combinación de estos dos análisis permitió estudiar la variabilidad de los híbridos de acuerdo con las diferentes variables de calidad. Paralelamente se realizó una prueba de Tukey (1991) con un nivel de significancia de 5 % ($p \leq 0.05$) solo para la variable sacarosa. El análisis estadístico se llevó a cabo con la ayuda del software estadístico R® versión 3.3.0.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis de componentes principales resultó significativo para todos los sitios. En Corral de Piedra el análisis explicó 88 % de la variabilidad total en los 73 híbridos analizados, en Troncones, el ACP explica 70.3 % de la variabilidad de 29 híbridos; finalmente, en las Varas la variabilidad explicada fue de 86.1 %. Lo anterior coincide con la evaluación de variables de calidad en diferentes clones de caña de azúcar, donde se explicó 80.8 %, realizando el ACP (Ong'ala et al., 2016).

Análisis de conglomerados jerárquicos

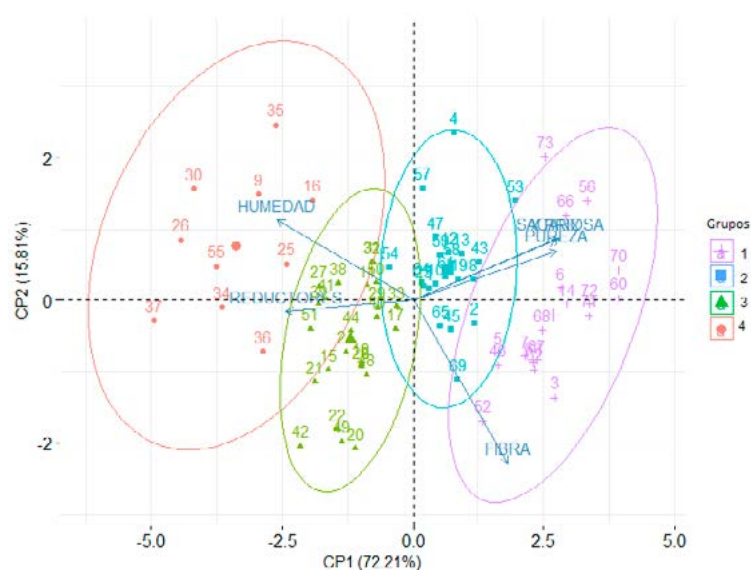
El análisis de conglomerados jerárquicos en combinación con el ACP agrupó los híbridos de acuerdo con características similares entre las variables de calidad;

resultando el contenido de sacarosa la variable más importante para dicho agrupamiento (Figura 1). Respecto a la agrupación de las variedades comerciales que se repiten en los tres sitios, al no presentar el mismo porcentaje de sacarosa en caña se clasificaron en distintos grupos. Estas diferencias pueden atribuirse a condiciones de suelo, clima, riego y la fertilización de cada sitio particular (Salgado et al., 2008). En este sentido la variedad comercial CP 72-2086 en Corral de Piedra se ubicó en el Grupo 3, mientras que los Troncones se dispersaron en el Grupo 1. Otro ejemplo es la MEX 69-290 que en Corral de Piedra se observó en el Grupo 4 y en las Varas en el Grupo 2. Este resultado refleja inestabilidad de la MEX 69-290 y CP 72-2086 en lo que respecta a contenido en sacarosa. En cambio, el nuevo híbrido ATEMEX 99-48 se ubicó en el Grupo 1 en las tres localidades (Figura 1 a, b y c), al igual que la C3COLMEX 05-256 y ATEMEX 99-1, que se presenta en el mismo grupo (Figura 1 a y c). Al respecto, Senties y Gómez (2014) mencionan que la interacción Genotipo-ambiente tiene un efecto diferencial sobre la estabilidad y adaptabilidad a diferentes condiciones ambientales, reflejándose en la expresión final del fenotipo. El ACJ también muestra que los híbridos con mayor contenido de sacarosa presentaron los menores porcentajes en azúcares reductores y porcentaje de humedad. Al respecto, Chávez (1982) menciona que la sacarosa de la caña de azúcar muestra una correlación lineal inversa con el contenido de humedad. Con las variables sacarosa, pureza y °Brix, lo que se observó fue una correlación lineal positiva, ya que cualquier aumento que se tenga en alguna de ellas se observará en las otras variables (Figura 1). Lo anterior difiere con los resultados de Salgado et al. (2016), quienes mencionan que no se puede establecer una relación directa entre pureza y contenido de sacarosa en variedades de caña (*Saccharum* spp). La única variable que presentó un comportamiento casi ortogonal con los dos grupos de variables antes mencionadas fue el porcentaje de fibra;

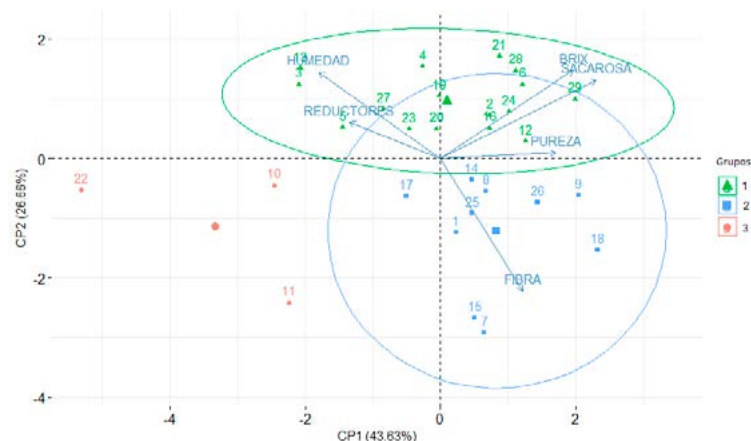
Cuadro 2. Híbridos de *Saccharum* spp., evaluados en tres zonas de abasto de Jalisco, México.

No.	Híbrido	Origen	No.	Híbrido	Origen	No.	Híbrido	Origen	No.	Híbrido	Origen
Corral de Piedra											
1	C3 COLMEX 05-373	N	20	C1 COLMEX 05-89	N	38	C1 COLMEX 05-373	N	56	ATEMEX 99-29	N
2	C12 COLMEX 05-456	N	21	C4 COLMEX 05-633	N	39	C6 COLMEX 05-897	N	57	ATEMEX 99-74	N
3	C11 COLMEX 05-520	N	22	C1 COLMEX 05-437	N	40	C4 COLMEX 05-69	N	58	ATEMEX 99-44	N
4	C2 COLMEX 05-232	N	23	RB 85-5113	E	41	C1 COLMEX 05-343	N	59	ATEMEX 99-26	N
5	C3 COLMEX 05-129	N	24	C5 COLMEX 05-633	N	42	C1 COLMEX 05-236	N	60	ATEMEX 99-64	N
6	C5 COLMEX 05-234	N	25	C5 COLMEX 05-192	N	43	C2 COLMEX 05-147	N	61	RB 72-1012	E
7	C3 COLMEX 05-107	N	26	C1 COLMEX 05-511	N	44	C3 COLMEX 05-256	N	62	CP 16-94	E
8	C3 COLMEX 05-192	N	27	CP 72-2086*T	E	45	C1 COLMEX 05-255	N	63	ATEMEX 99-34	N
9	C4 COLMEX 05-520	N	28	C3 COLMEX 05-204	N	46	C1 COLMEX 05-5	N	64	ATEMEX 99-62	N
10	C1 COLMEX 05-327	N	29	C5 COLMEX 05-373	N	47	ATEMEX 96-40	N	65	ATEMEX 99-1	N
11	C3 COLMEX 05-448	N	30	C5 COLMEX 05-47	N	48	C3 COLMEX 05-66	N	66	ATEMEX 99-26	N
12	C1 COLMEX 05-212	N	31	C8 COLMEX 05-458	N	49	C1 COLMEX 05-542	N	67	ATEMEX 99-58	N
13	C3 COLMEX 05-484	N	32	C3 COLMEX 05-633	N	50	C1 COLMEX 05-47	N	68	ATEMEX 99-1	N
14	C4 COLMEX 05-843	N	33	C9 COLMEX 05-38	N	51	C7 COLMEX 05-238	N	69	ATEMEX 99-14	N
15	C9 COLMEX 05-147	N	34	C3 COLMEX 05-884	N	52	C7 COLMEX 05-212	N	70	ATEMEX 99-48	N
16	C10 COLMEX 05-454	N	35	MEX 69-290*T	N	53	ITV 92-1424*T	N	71	ATEMEX 99-53	N
17	C1 COLMEX 05-207	N	36	C1 COLMEX 05-730	N	54	C5 COLMEX 05-38	N	72	ATEMEX 99-27	N
18	C1 COLMEX 05-114	N	37	C1 COLMEX 05-884	N	55	C8 COLMEX 05-38	N	73	ATEMEX 99-5	N
19	C5 COLMEX 05-192	N									
Los Troncones											
1	C9 COLMEX 05-147	N	9	C1 COLMEX 05-212	N	16	CP 72-2086*T	E	23	ATEMEX 99-34	N
2	C4 COLMEX 05-627	N	10	C1 COLMEX 05-236	N	17	ATEMEX 99-14	N	24	COLMEX 94-8	N
3	C1 COLMEX 05-214	N	11	C1 COLMEX 05-542	N	18	MEX 57-473*T	N	25	ATEMEX 99-62	N
4	MEX 57-473*T	N	12	C3 COLMEX 05-256	N	19	RB 85-5113	E	26	ATEMEX 99-27	N
5	C9 COLMEX 05-38	N	13	C5 COLMEX 05-147	N	20	ATEMEX 99-44	N	27	ATEMEX 99-5	N
6	C8 COLMEX 05-38	N	14	C5 COLMEX 05-47	N	21	ATEMEX 99-48	N	28	ATEMEX 99-26	N
7	C3 COLMEX 05-129	N	15	C1 COLMEX 05-89	N	22	ATEMEX 99-58	N	29	COLMEX 95-27	N
8	C1 COLMEX 05-207	N									
Las Varas											
1	C4 COLMEX 01-627	N	14	C9 COLMEX 05-147	N	27	C3 COLMEX 05-448	N	40	MEX 79-431*T	N
2	C1 COLMEX 05-437	N	15	C3 COLMEX 05-884	N	28	C3 COLMEX 05-107	N	41	ATEMEX 99-74	N
3	C2 COLMEX 05-134	N	16	C12 COLMEX 05-454	N	29	C1 COLMEX 05-147	N	42	ATEMEX 99-26	N
4	C2 COLMEX 01-1062	N	17	MEX 69-290*T	N	30	C3 COLMEX 05-129	N	43	ATEMEX 99-48	N
5	C3 COLMEX 05-66	N	18	C1 COLMEX 05-730	N	31	C3 COLMEX 05-256	N	44	RB 72-1012	E
6	C1 COLMEX 05-212	N	19	C10 COLMEX 05-454	N	32	CP 88-1508	E	45	ATEMEX 99-53	N
7	C1 COLMEX 05-89	N	20	C10 COLMEX 05-627	N	33	ATEMEX 99-62	N	46	ATEMEX 99-14	N
8	C1 COLMEX 05-236	N	21	C5 COLMEX 05-38	N	34	ATEMEX 99-27	N	47	ATEMEX 99-53	N
9	C6 COLMEX 05-897	N	22	CP 72-2086*T	E	35	COLMEX 94-8	N	48	ATEMEX 99-44	N
10	C1 COLMEX 05-255	N	23	C9 COLMEX 05-38	N	36	CP 89-1684	E	49	COLMEX 95-27	N
11	C8 COLMEX 05-38	N	24	C7 COLMEX 05-238	N	37	ATEMEX 99-58	N	50	ATEMEX 99-29	N
12	C5 COLMEX 05-147	N	25	C4 COLMEX 05-404	N	38	ATEMEX 99-1	N	51	ATEMEX 99-26	N
13	C1 COLMEX 05-542	N	26	C4 COLMEX 05-520	N	39	ATEMEX 99-5	N	52	ATEMEX 99-34	N

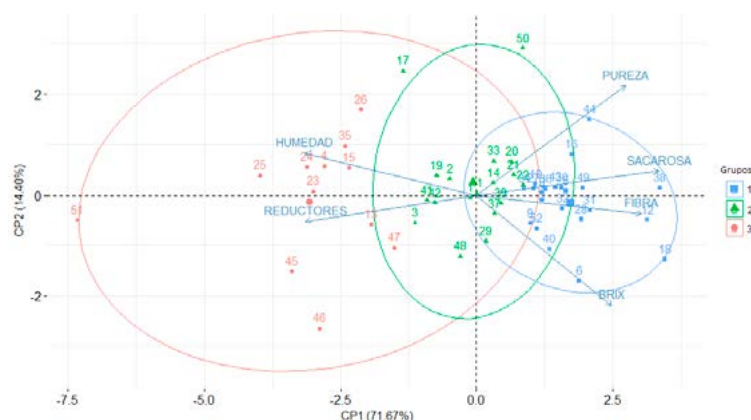
*T=testigos comerciales. No.=el número asignado al híbrido para el análisis. Híbrido=nombre del híbrido evaluado. N=híbrido nacional. E=híbrido extranjero.



a) Corral de Piedra



b) Los Troncones



c) Las Varas

Figura 1. Análisis de componentes principales y análisis de conglomerados jerárquicos en tres localidades cañeras del estado de Jalisco para híbridos de *Saccharum* spp.

así, a medida que aumenta el porcentaje de sacarosa, el contenido de fibra en tallo disminuye (Figura 1 a, b y c).

Contenido de sacarosa en los híbridos

El ACP y ACJ consideraron al porcentaje de sacarosa como la variable de mayor importancia, de tal modo que para clasificar híbridos sobresalientes se utilizó como referencia la máxima óptima de las Estadísticas de la Agroindustria de la Caña de Azúcar 2007-2016 (CNPR, 2016), donde los híbridos con mayor contenido en sacarosa son nacionales (Cuadro 3) y algunos de ellos presentan coincidencias de superioridad (ATEMEX 99-48 y ATEMEX 99-26). Al realizar la prueba de medias Tukey ($p \leq 0.05$) no se encontraron diferencias estadísticas significativas entre los contenidos promedios de dicha variable, excepto en los Troncones entre la COLMEX 95-27 y COLMEX 94-8 (Cuadro 3). Estos resultados son congruentes con los obtenidos en la evaluación de los porcentajes de sacarosa en ciclo planta y soca a 53 variedades de caña de azúcar (nacionales y extranjeras) en el estado de Campeche, México (Vera *et al.*, 2016).

CONCLUSIONES

A pesar de las diferencias de manejo agro-nómico, climatológicas y de suelo en los sitios donde se efectuaron las evaluaciones se encontró que la ponderación de las variables de calidad cambia en cada par de combinaciones que se tiene por sitio. El ACP y ACJ ofrece una alternativa para la evaluación de variables de calidad en nuevos híbridos de caña de azúcar en fases intermedias y/o avanzadas de selección. Los materiales sobresalientes son: ATEMEX 99-48, ATEMEX 99-26, C3COLMEX 05-256, ATEMEX 99-1, COLMEX 95-27 y COLMEX 94-8. Respecto a las variedades comerciales, la sobresaliente en Corral de Piedra es la ITV 92-1424, en los Troncones la CP 72-2086 y en las Varas la MEX 69-290.

AGRADECIMIENTOS

A los Comités de Producción y Calidad Cañera de los Ingenios participantes. A la Fundación Produce Jalisco A.C. por su colaboración para el financiamiento del se-

Cuadro 3. Representación de híbridos de *Saccharum* spp. con mayor contenido de sacarosa por localidad.

No.	T _A	Híbrido	% de Sacarosa promedio	No.	T _A	Híbrido	% de Sacarosa promedio	No.	T _A	Híbrido	% de Sacarosa promedio
Localidad: Corral de Piedra											
70	a	ATEMEX 99-48	14.71	60	a	ATEMEX 99-64	14.57	66	a	ATEMEX 99-26	14.22
56	a	ATEMEX 99-29	14.61	72	a	ATEMEX 99-27	14.27				
MOP-SAC ≥ 14.21% DMS 12.24% CV 6.18%											
Localidad: Los Troncones											
29	a	COLMEX 95-27	16.02	6	bc	C8 COLMEX 05-38	15.71	24	d	COLMEX 94-8	15.48
21	b	ATEMEX 99-48	15.73	28	c	ATEMEX 99-26	15.70				
MOP-SAC ≥ 14.61% DMS 1.29% CV 5.82%											
Localidad: Las Varas											
38	a	ATEMEX 99-1	13.59	12	ab	C5 COLMEX 05-147	13.17				
8	ab	C1 COLMEX 05-236	13.22	43	abc	ATEMEX 99-48	13.16				
MOP-SAC ≥ 13.11% DMS 3.68% CV 6.04%											

*T=Testigos comerciales. No.=el número de híbrido asignado para el análisis. Híbrido=nombre del nuevo híbrido evaluado (nacional o extranjero). TA=Tukey agrupamiento (alpha 0.05). MOP-SAC=Máxima optima proyectada en % de sacarosa, periodo 2007-2016. DMS=Diferencia mínima significativa; CV=Coeficiente de Variación.

guimiento técnico de dicha investigación, y muy en especial a los productores cooperantes donde se llevaron a cabo las evaluaciones.

LITERATURA CITADA

- Bastidas L., Rea R., De Sousa-Vieira, O., Hernández E., Briceño R. 2012. Análisis de variables agronómicas en cultivares de caña de azúcar con fines azucareros, paneleros y forrajeros. *Bioagro*, vol. 24, núm. 2, pp. 135-142.
- Chaves-Solera M. A. 1982. La maduración, su control y la cosecha de la caña de azúcar. Seminario de Tecnología Moderna de la Caña de Azúcar. San José, Costa Rica, 1982. Memorias. San José, setiembre. p: 28-40.
- CNPR. 2014. Estadísticas de la Agroindustria de la Caña de Azúcar zafra 2003-2014. De la Unión Nacional de Cañeros, A.C.-CNPR. Recuperado de: <http://www.caneros.org.mx/estadisticas.html>
- CONADESUCA. 2016. Reporte de producción de caña y azúcar. Zafra 2015/16. Reporte de avance de producción por estado (semana no. 41). 5 p.
- CONADESUCA. 2016. Nota informativa sobre innovaciones en materia de productividad del sector. Nuevas variedades de caña de azúcar. 7 y 8 pp.
- CONADESUCA. 2016. Variedades con mejores rendimientos de las zonas cañeras en México. Nota Técnica Informativa. 7 p.
- Delgado-Mora I, Suárez H. J., García-Pérez H., Bernal-Liranza N., Díaz-Mujica F. R., Bernal-Villegas A., Gómez-Pérez J. R., Aday-Díaz O., González-Gallardo H., Buedo-Domínguez M., Reyes-Pérez S., Núñez-Jaramillo D., Barroso-Medina J. y. Machado-Toledo L. F. 2012. Potencialidades de familias de variedades de caña de azúcar para diferentes periodos de zafra en Cuba. *Cultivos Tropicales*, vol. 33, no. 3, p. 5-14.
- Ftwi M., Mekbib F., Abraha E. 2016. Multivariate analysis of sugar yield contributing traits in Sugarcane (*Saccharum officinarum* L.), in Ethiopia. *African Journal of Plant Science* 10: 145-156.
- IMPA. 1990. Informe técnico 1989, Córdoba, Veracruz, México.
- IMPA. 1983. Programa de Variedades, Objetivos, Importancia y Metodología Experimental. Centro Nacional de Investigaciones Azucareras. Córdoba, Veracruz.
- Johnson, R. A., & Wichern, D. W. (2014). *Applied multivariate statistical analysis*. Pearson.
- Luo J., Pan Y.-B., Xu L., Grisham M. P., Zhang H., & Que Y. 2015. Rational regional distribution of sugarcane cultivars in China. *Scientific Reports* 5: 1-10.
- Martínez-Arroyo J. 2006. Guía Metodológica para la Selección de Variedades de Caña. Atencingo, Puebla, México. 3 p.
- Martínez-Torres, D. R. (2009). Evaluación Agroindustrial de Variedades de Caña de Azúcar (*Saccharum officinarum* L.) en el Ingenio El Modelo, Úrsulo Galván, Veracruz.
- Ong'ala J., Mwanga D., Nuani F. 2016. On the Use of Principal Component Analysis in Sugarcane Clone Selection. *Journal of the Indian Society of Agricultural Statistics* 70: 33-39.
- Ostengo S., García M. B., Díaz-Romero C., Delgado N., Díaz J. V., Cuenya M. I. 2011. Evaluación de la estabilidad de un cultivar de caña de azúcar (*Saccharum* spp.) en diferentes ambientes agroecológicos a través de una técnica no paramétrica en Tucumán, R. Argentina. *Revista Industrial y Agrícola de Tucumán* 88: 21-26.
- Salgado-García, S., Castelán-Estrada, M., Aranda-Ibañez, E.M., Ortiz-Laurel, H., Lagunes-Espinoza, L.C., Córdoba-Sánchez, S. 2016. Calidad de jugos de caña de azúcar (*Saccharum* spp.) según el ciclo de cultivo en Chiapas, México. *Agroproductividad*, 9 (7) 23-28 pp.
- Salgado-García S., Palma-López D.J., Zavala-Cruz J., Lagunes-Espinoza L.C., Castelán-Estrada M., Ortiz-García C.F., Juárez-López J.F., Rincón-Ramírez J.A., Hernández-Nataren E. 2008. Programa sustentable de fertilización para el ingenio Pujilic, Chiapas, México. *Terra-Latinoamericana*. 26 (4):361-373.
- Senties-Herrera H.E. 2013. Variabilidad genética y caracterización de variedades de caña de azúcar (*Saccharum* spp.). Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados, México. 142-143 pp.

- Senties-Herrera, H.E., y Gómez-Merino, F.C. 2014. Nueva Directrices en Mejoramiento Genético de Caña de Azúcar (*Saccharum* spp.). *Agroproductividad*, 7(2), 10-12 pp.
- Shahzad M., Ahmed D. 2017. Multivariate Analysis in Determining Morphologically Diverse Sugarcane Genotypes (*Saccharum officinarum* L.) and their Flowering Response at Arja, Azad Kashmir. *Sarhad Journal of Agriculture* 33: 90-102.
- SIAP. 2015. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Recuperado de: http://infosiap.siap.gob.mx/aagricola_siap_gb/ientidad/index.jsp
- Unión Nacional de Cañeros, A.C.-CNPR (2017). Estadísticas de la Agroindustria de la Caña de Azúcar 2007-2016 (E-41, E-51 y E-70). Recuperado de <http://caneros.org.mx/historica/>
- Vera-Espinosa J., Carrillo-Ávila E., Flores-Cáceres S., Arreola-Enríquez J., Osnaya-González M., Castillo-Aguilar C.D.C. 2016. Evaluación Agroindustrial de Diez Variedades de Caña de Azúcar (*Saccharum* spp.). *Agroproductividad*, 9(3), 21-26 pp.
- Zhou H., Yang R.-Z., Li Y.-R. 2015. Principal Component and Cluster Analyses for Quantitative Traits in GT Sugarcane Germplasm (*Saccharum* spp. Hybrids). *International Journal of Agriculture Innovations and Research* 3: 2319-1473.



POTENCIAL DEL USO DEL RASTROJO DE LA CAÑA DE AZÚCAR (*Saccharum* spp.) PARA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS

POTENTIAL FOR THE USE OF SUGAR CANE STUBBLE (*Saccharum* spp.) FOR BIOGAS PRODUCTION

Sánchez-Herrera, D.¹; Houbbron, E.²; Alzate, L.³; Valdés-Rodríguez, O.A.^{4*}; Sánchez-Sánchez, O.⁵

^{1,5}Universidad Veracruzana. José María Morelos 44, Zona Centro, Centro, 91000. Xalapa, Veracruz, México. ²Universidad Veracruzana. Facultad de Ciencias Químicas campus Orizaba, LADISER. Prolongación de Oriente 6 No. 1009 Col. Rafael Alvarado C.P. 94340. Orizaba, Veracruz.

³Centro de investigaciones Científicas de Yucatán (CICY). Unidad de Energías Renovables. Carretera Sierra Papacal-chuburna Puerto, Km.5 C.P. 97302. Sierra Papacal, Yucatán. ⁴El Colegio de Veracruz; Carrillo Puerto No. 26 Col. Centro. C.P. 91000. Xalapa, Veracruz.

*Autor de correspondencia: andrea.valdes@gmail.com

RESUMEN

Durante la zafra de caña de azúcar (*Saccharum* spp.) 2011-2012 en México se estimó una generación de 1,082,245 toneladas de residuos como rastrojo para los estados de Campeche, Chiapas, Oaxaca, Querétaro, Tabasco, Veracruz y Yucatán. La disponibilidad de dicho residuo en la región plantea una excelente oportunidad para su utilización en la generación de biogás. El uso de biodigestores para su producción puede proveer al sector cañero una solución ambiental y de bienestar social si se realiza un procesamiento adecuado de dicho residuo, y plantea una posibilidad para la diversificación de la economía en el campo dada a la generación de productos de alto valor agregado, como lo son el biogás y biofertilizantes. En este artículo se proporciona una breve reseña sobre el potencial del rastrojo de la zona Sureste del país para ser utilizado como materia prima para biodigestores para producir energía y al mismo tiempo mejorar aspectos ambientales y de salud.

Palabras clave: desechos agrícolas, biodigestores, uso y reciclado.

ABSTRACT

During the sugarcane harvest (*Saccharum* spp.) 2011-2012 in Mexico, a generation of 1,082,245 tons of waste was estimated as stubble for the states of Campeche, Chiapas, Oaxaca, Querétaro, Tabasco, Veracruz and Yucatán. The availability of this waste in the region presents an excellent opportunity for its use in the generation of biogas. The use of biodigesters for their production can provide the sugarcane sector with an environmental and social welfare solution if an adequate processing of said waste is carried out, and it raises a possibility for the diversification of the economy in the field given the generation of high-quality products. Added value such as biogas and biofertilizers. This article provides a brief overview of the stubble potential of the southeastern part of the country to be used as a raw material for biodigesters to produce energy, and at the same time improve environmental and health aspects.

Keywords: agricultural waste, biodigesters, use and recycling.

Agroproductividad: Vol. 10, Núm. 11, noviembre, 2017. pp: 112-115.

Recibido: junio, 2017 **Aceptado:** julio, 2017.

INTRODUCCIÓN

¿Alguna vez te has encontrado con las plantaciones de caña de azúcar durante la zafra? Las cenizas en el aire y el olor a carbón son apenas una pequeña sensación de malestar que no termina de advertir el daño real generado en tu persona y los seres vivos que ahí habitan, además del ambiente. La región Sur Sureste del país (Campeche Chiapas, Oaxaca, Quintana Roo, Tabasco, Veracruz y Yucatán) representa 56 % (32) de los ingenios en México. La abundancia de plantaciones e ingenios azucareros ha llevado a la creación de un paisaje distintivo no solo en dicha región, sino en varias partes de México. Este se hace aún más llamativo durante el periodo de zafra (octubre-enero) cuando se lleva a cabo la quema de los residuos de la caña, también conocidos como rastrojo. De acuerdo con la Unión Nacional de Cañeros A.C. (2015), la región sureste produjo alrededor de 7'214,967 toneladas de caña de azúcar durante la zafra 2011-2012; esto quiere decir que se llevó a cabo la quema de aproximadamente 1'082,245.05 toneladas de rastrojo (hojas, puntas y cogotes de la planta que se eliminan a través de la cosecha tradicional) en las plantaciones cañeras. Mediante la implementación de la cosecha verde en la región Sureste la disponibilidad de dicho residuo plantea una excelente oportunidad para su utilización en la generación de biogás. La generación de biogás puede proveer al sector cañero una solución ambiental y de bienestar social en cuanto a la promoción de la cosecha verde para la utilización de las hojas, puntas y demás partes de la planta de la caña que actualmente son quemadas mediante la cosecha tradicional. De acuerdo con la Comisión para la Cooperación Ambiental (CEC, por sus siglas en inglés, 2014), la quema de la caña de azúcar conlleva a la emisión de contaminantes, tales como el CO₂, CO, cenizas y dioxinas (debido a la presencia de insecticidas en las plantaciones). Las dioxinas emitidas son de particular interés en términos de salud, dado que se acumulan en el tejido graso de los seres vivos, pueden ser transportadas a través del viento a largas distancias y se requiere de periodos prolongados de tiempo para su degradación en el ambiente. Además de esto se ha demostrado su relación con varias afecciones a la salud, los cuales pueden ser: cambios en los niveles hormonales tiroideos, daños neurológicos en fetos durante la gestación, problemas reproductivos, diabetes, efectos dañinos para el sistema inmune y varios tipos de cáncer en el ser humano. La quema tiene repercusiones en el rendimiento de la cosecha. En 2009 el investigador Herrera Solano registró que la cosecha verde de la caña de azúcar produce ma-

yor rendimiento de campo que la tradicional quemada. Ejemplo de la factibilidad de este tipo de práctica se encuentra en el norte de Queensland, donde 85 % de la caña es procesada mediante la cosecha verde. Si bien dicha práctica (manual o mecanizada) aumenta costos de producción por el requerimiento de la remoción y procesamiento de los residuos de la cosecha, también ha presentado ventajas, tales como la reducción de costos por control de malezas (35%), menos costos de irrigación (10%), preservación del suelo y su diversidad microbiológica, así como reducción de gases perjudiciales para el ambiente y la salud de los seres vivos. La recolección de los residuos (hojas, puntas y cogotes de caña) durante la cosecha verde proporcionaría el abastecimiento de la materia prima requerida para la generación de biogás como fuente de energía alternativa mediante la implementación de biodigestores. Desde el punto de vista energético el rastrojo tiene la capacidad de generar 115.5 L de gas metano por cada kilo de residuo implementado para la generación de biogás, lo cual puede ser utilizado en los ingenios o en zonas aledañas a los cañaverales como fuente de energía de combustión para su quema directa, o bien, como combustible para motores de combustión interna de encendido por chispa (estos operan con 100 % de biogás como combustible) por compresión (requiere de modificaciones y solo opera con 60 % de biogás y 40 % diesel). La implementación de biodigestores dentro de los ingenios azucareros ofrece una alternativa atractiva en cuanto al abastecimiento de energía eléctrica (mediante su combustión en generadores) o como gas carburante para los procesos dentro del ingenio que requieren la combustión de bagazo o carbón; por ejemplo, funcionamiento de las calderas. En el mundo se encuentran proyectos que escalan la utilización de los residuos de la caña de azúcar (principalmente el bagazo) para la generación de biogás dentro de los mismos ingenios azucareros y en zonas aledañas, demostrando viabilidad de su implementación, tanto a pequeña como a gran escala. Un ejemplo de lo anterior es el proyecto llevado a cabo en Kenya, auspiciado por la fundación Volkswagen Stiftung con el propósito no solo de generar energía para zonas rurales en África sino de generar empleos y disminuir la pobreza económica dentro de estas áreas. De igual forma, en la India se ha llevado a cabo la implementación de biodigestores dentro de ingenios azucareros (en Uttar Pradesh) a través del programa Nacional para el Desarrollo del Biogás (NPBD, por sus siglas en inglés), el cual llevó a cabo la construcción de 4.17 millones de biodigestores a lo largo del país.

Biodigestores y su utilidad en el sector cañero

Para comprender el proceso de generación de biogás hay que entender el funcionamiento de la maquinaria que hace posible dicha conversión. Un biodigestor dentro de un sistema integral agrícola para el aprovechamiento del rastrojo plantea una alternativa sencilla y práctica que elimina la necesidad de la quema en las plantaciones durante la zafra (Figura 1).

Dicho sistema no solo proporciona la generación de una energía alternativa, sino también una fuente útil para la fertilización de los suelos mediante la producción de biofertilizantes a partir del excedente del lodo generado en el biodigestor, que contiene materia orgánica de fácil degradación y microorganismos benéficos para el enriquecimiento del suelo. Además, la utilización del estiércol generado por las zonas ganaderas y granjas aledañas agrega un valor útil al proceso como medio para el tratamiento adecuado de dichos residuos que contaminan los suelos y generan gases altamente contaminantes liberados a la atmósfera. La utilización de aguas residuales de los ingenios

azucareros puede abastecer el requerimiento mínimo de agua para la generación de biogás, proveyendo de dicha manera un proceso de tratamiento de bajo costo. Durante el periodo de febrero-septiembre, en el cual no se realiza la zafra, la capacidad de biodegradación de diversos residuos orgánicos le proporciona a los biodigestores la capacidad de operar con residuos de otros desechos agrícolas, tales como frutales y vegetales. Existen diversas clases de biodigestores, cada uno adaptado a las condiciones del terreno y el ambiente, entre otros factores; sin embargo, de manera general cuentan con cinco componentes principales (Figura 2).

La operación y funcionamiento de cada una de estas partes se describen brevemente:

Fosa de carga: En ella se deposita y mezcla el residuo orgánico (rastrojo) que alimenta el biodigestor. Se requiere únicamente de la capacitación básica del opera-

dor designado en la cual se especifique la cantidad de residuo y tiempos de alimentación (a través de la fosa de carga), los cuales dependerán de la capacidad de procesamiento del biodigestor.

Digestor: Dentro de él los residuos orgánicos son descompuestos por los microorganismos contenidos en los lodos anaerobios (que trabajan en ausencia de oxígeno). Los lodos activados se pueden obtener de cualquier planta de tratamiento de aguas residuales, estas generan dichos lodos como un producto de desecho. Si se desea adicionar estiércol animal como fuente de nutrimentos al proceso se requerirá de un sistema para la recolección de dicha materia de las zonas ganaderas aledañas.

Fosa de descarga: En ella se depositan los residuos provenientes del digestor que ya han sido digeridos. Dichos residuos, se deben retirar y pueden procesar

para su venta como biofertilizante. En esta etapa se requiere de la implementación de un sistema para el procesamiento, empaque y distribución de las ventas de dicho producto.

Cámara de almacenamiento de biogás (CAB). Esta parte del biodigestor tiene

como función el almacenamiento del gas generado en el digestor.

Tubería, válvula y llave de paso. Por medio de estos se regula y dirige el biogás a la toma final donde será aprovechado. Por lo general el destino final del biogás generado son tanques estacionarios de almacenamiento, los cuales son llenados de biogás mediante un compresor. Este tanque cuenta con una tubería y válvula de regulación del flujo hacia los quemadores donde se puede utilizar como combustible para su carburación (dentro de procesos de incineración, cocción o sistemas de calentamiento) bajo la supervisión de personal capacitado. También se puede optar por su conversión a energía eléctrica mediante una planta con turbina de gas (usualmente con una operación de ciclo abierto y un intercambiador de calor, los cuales incrementan la eficiencia en 65 %. La combustión del biogás genera dióxido de carbono; no obstante, se deben tomar en consideración los siguientes dos puntos: en comparación con los combustibles fósiles, el carbón del biogás ha sido tomado de



Figura 1. Sistema integral agrícola del manejo de residuos de caña de azúcar (rastrojo).

manera mucho más inmediata de la atmósfera mediante la actividad fotosintética de las plantas, lo cual cierra el ciclo del carbono de manera natural. La utilización del estiércol reduce la emisión de gases contaminantes.

La implementación de este tipo de tecnología ya se ha realizado con éxito desde 1994 con biodigestores a pequeña escala en los sectores agrícolas en Europa, África, Asia y la India. Esto ha permitido una mejor calidad de vida para la gente del campo debido a la reducción de contaminantes en el suelo, el aire y el agua. Además, también ha demostrado un mejoramiento en la economía rural, ya que propicia la generación de empleos y diversifica el campo, esto último debido a la generación de productos de alto valor agregado como lo es el gas metano y el biofertilizante. Por todo esto, es conveniente impulsar y promover la utilización de dicha tecnología no solo para mejorar el ambiente, sino para proporcionar fuentes alternativas de ingresos que promueva la sustentabilidad que tanto necesita hoy en día el sector cañero y la gente que de él depende.

LITERATURA CITADA

Pérez J. 2010. Estudio y diseño de un biodigestor para aplicación en pequeños ganaderos y lecheros. Tesis. Universidad de Chile. 83 p. Consultado el 20/07/2015. Dirección web: http://repositorio.uchile.cl/tesis/uchile/2010/cf-perez_jm/pdfAmont/cf-perez_jm.pdf.

Unión Nacional de Cañeros A.C. 2015. Región cañera Sureste. Sitio web. Consultado el 20/07/2015. Dirección web: <http://www.caneros.org.mx/sureste.html>.

CEC. 2014. Burning Agricultural Waste: A source of Dioxins. Montreal, Canada: Commission for Environmental Cooperation. 6 p. Consultado el 20/07/2015. Dirección web: <http://www3.cec.org/islandora/es/item/11405-la-quema-de-residuos-agr-colas-es-una-fuente-de-dioxinas-en.pdf>.

Herrera.Solano. 2009. Efecto del manejo de los residuos de cosecha de la caña de azúcar (*Saccharum* spp. híbrido) sobre el rendimiento de campo en Veracruz, México. Revista UDO Agrícola. 9 (3): 517-521.

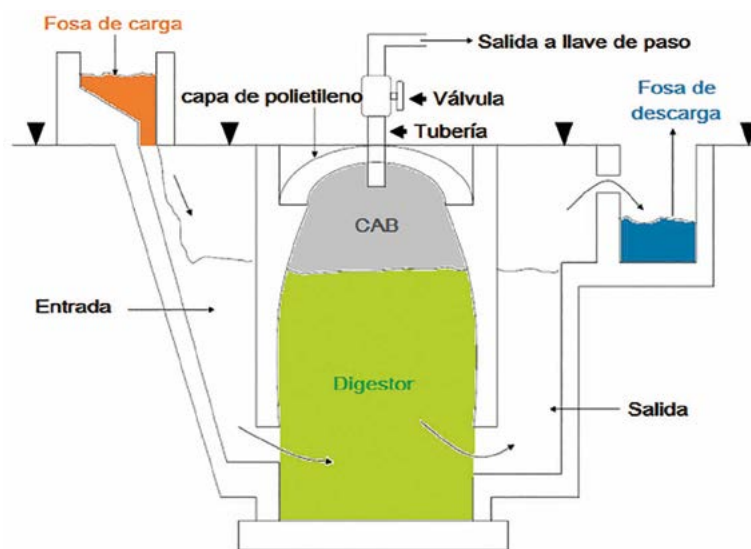


Figura 2. Biodigestor de domo fijo chino (modificado). Modificado de Pérez (2010).

EFICIENCIA DE LA APLICACIÓN MECANIZADA DE ESTIÉRCOL LÍQUIDO Y SU EFECTO SOBRE EL RENDIMIENTO DE MAÍZ (*Zea mays* L.) FORRAJERO

EFFICIENCY OF THE MECHANIZED APPLICATION OF LIQUID MANURE AND ITS EFFECT ON FODDER MAIZE (*Zea mays* L.) YIELD

Ortiz-Laurel, H.^{1*}; Rössel-Kipping, D.²; Rosas-Calleja, D.¹; Muñoz Márquez-Trujillo, R.A.¹

¹Colegio de Postgraduados Campus Córdoba. Carretera Córdoba-Veracruz km 348, Amatlán de los Reyes, Veracruz, México. C.P. 94946. ²Colegio de Postgraduados Campus San Luis Potosí. Iturbide No. 76, Salinas de Hidalgo, San Luis Potosí, México. C.P. 78600.

*Autor de correspondencia: hlaurel@colpos.mx

RESUMEN

Con la tecnología y los procedimientos adecuados el estiércol del ganado puede manejarse en estado líquido, ya que se facilita su almacenamiento, disminuye las pérdidas de nutrientes, posibles afectaciones al ambiente, y mejora su incorporación al suelo para la producción sustentable de cultivos. Se evaluó la inyección mecanizada del estiércol líquido de bovino (EBL) y sus implicaciones sobre el rendimiento de forraje de maíz (*Zea mays* L.), comparada con la fertilización química. La dosis de referencia fue 160N-30P-00K y en un diseño experimental de bloques al azar con tres tratamientos la cantidad a aplicar del estiércol líquido de bovino fue al 50 %, 100 % y 150 % de la dosis prevista para los tratamientos uno, dos y tres, respectivamente, y el tratamiento cuatro (testigo) con fertilizante químico (100 %) de la dosis establecida. Para la recolección y aplicación satisfactoria del EBL, se construyó una fosa y un equipo inyector. El rendimiento final mostró diferencias ($P > 0.05$) de 1.9 t ha^{-1} mayor, solo en la aplicación de EBL del tratamiento de 100 % de la dosis comparado con el tratamiento de fertilización química.

Palabras clave: manejo de estiércol, rendimiento de forraje, mecanización agrícola.

ABSTRACT

With adequate technology and procedures, livestock manure can be handled in liquid state, since it eases its storage, decreases the loss of nutrients, possible impacts on the environment, and improves its incorporation to the soil for the sustainable production of crops. The mechanized injection of liquid bovine manure (LBM) and its implications on fodder maize (*Zea mays* L.) yield was evaluated, compared to chemical fertilization. The reference dose was 160N-30P-00K, and in a random block experimental design with three treatments, the amount to be applied was at 50 %, 100 % and 150 % of the dose foreseen for treatments one, two and three, respectively, and treatment four (control) with chemical fertilizer (100 %) of the dose established. For the satisfactory recollection and application of LBM, a tank and injector equipment was built. The final yield showed differences ($P > 0.05$) of 1.9 t ha^{-1} higher, only in the application of LBM of the 100 % treatment of the dose compared to the chemical fertilization treatment.

Keywords: management of manure, fodder yield, agricultural mechanization.

Agroproductividad: Vol. 10, Núm. 11, noviembre. 2017. pp: 116-120.

Recibido: octubre, 2017. **Aceptado:** noviembre, 2017.



INTRODUCCIÓN

El crecimiento de las explotaciones de ganado bovino estabulado ha ocasionado incrementos en la producción de estiércol, el cual se podría aprovechar para aportar nutrimentos al suelo, mejorar el rendimiento de los cultivos, reducir costos de producción y reducir afectos nocivos al ambiente (Dell *et al.*, 2011; Krueger *et al.*, 2013). Destaca, sin embargo, la incapacidad para generar procesos de manejo más eficientes, dentro de los que se incluyen infraestructura inadecuada en las instalaciones actuales y la carencia de equipo para su recolecta y distribución eficiente en campo. De ahí que en algunos establos la limpieza de los corrales se realiza con la tecnología al alcance; por ejemplo, pala cargadora frontal y camión de volteo (Luna-Anguiano *et al.*, 2014). La fertilización química al suelo no ha estado exenta de complicaciones debido a su alto costo, escasez de mano de obra para su aplicación y dosificaciones extremas que han causado toxicidad y contaminación del agua, causales de los bajos rendimientos de los cultivos (Annicchiarico *et al.*, 2011). Esta situación ha renovado el interés de agricultores por la utilización intensiva del estiércol como la base de nutrimentos para sus cultivos (Salgado García y Nuñez Escobar, 2010; Trejo-Escareño *et al.*, 2013). A través de un programa sostenible los estiércoles agrícolas pueden satisfacer las necesidades nutrimentales de diferentes cultivos, además de que aportan materia orgánica, micro y macro nutrientes. En países de Europa y los Estados Unidos, el marco regulatorio respecto a emisión de gases, olores desagradables y escurrimiento de líquidos por los desechos de las explotaciones pecuarias obliga a instaurar técnicas para manejar, tratar y dosificar el estiércol líquido con la mayor eficiencia posible (Akar *et al.*, 2014; Matsi, 2012; Sanford *et al.*, 2008). En México, únicamente la Comarca Lagunera de Torreón, Coahuila y la cuenca lechera de Tizayuca, Hidalgo han realizado ensayos de aplicación de estiércol de bovino líquido (EBL) con resultados satisfactorios (Figueroa-Viramontes *et al.*, 2010; López Martínez *et al.*, 2010; Luna-Anguiano *et al.*, 2014). El manejo del estiércol en

forma líquida ha registrado mejores resultados cuando es inyectado al suelo, registrando pérdidas menores a 5 % de nitrógeno (N) total (Costa *et al.*, 2014; Dell *et al.*, 2011). El estiércol líquido se obtiene mediante la dilución del excremento fresco del ganado, utilizando el agua de la limpieza de los corrales e instalaciones para la ordeña. Por lo anterior, este trabajo se realizó con el objetivo de evaluar un sistema mecánico para aplicar estercoladura, evaluando tres dosis de fertilización a base de EBL en un cultivo de maíz (*Zea mays* L.) para forraje en dos sitios, para constatar la adaptabilidad del estiércol líquido a una agricultura intensiva.

MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento de inyección del estiércol de bovino líquido se estableció en Texcoco, Estado de México, en el campo experimental agrícola del Colegio de Postgraduados, en una superficie de 0.50 ha (19° 27' N; y 98° 54' O).

Diseño y construcción del equipo inyector de EBL

Para cumplir el objetivo de este estudio se construyó un tanque contenedor para acoplarse a un tractor agrícola, cuya capacidad se calculó con base en los requisitos de los experimentos y realizar en una pasada la aplicación completa de EBL, además de que se pudiera realizar la distribución en surcos de diferente separación. El aplicador se integró de los siguientes componentes (Figura 1):

Depósito o cisterna. Con capacidad de 400 l. **Sistema regulador de flujo.** Mediante una llave de paso se regulan los litros de EBL a descargar en función de la calibración para la aplicación. **Sistema de conducción.** Con-

siste de ductos de acero y plástico con los diámetros de acuerdo con el flujo de salida, el que se realiza por gravedad. **Sistema de filtrado.** Se utilizó una malla metálica con abertura de orificio de 5.0 mm en la boca de llenado para retener la paja de menor tamaño y así evitar obstrucciones.

Capacidad y construcción de la fosa de recolección

Para calcular la capacidad de la fosa se estimó el volumen de EBL necesario para los tratamientos con mayor



Figura 1. Vista general del tanque aplicador de EBL.

porcentaje de dosificación. El volumen de almacenamiento especificado fue de 5500 litros, el cual satisfizo las necesidades de los ensayos. En el sitio seleccionado para la colecta del estiércol líquido se realizó una excavación de las medidas apropiadas, impermeabilizándose todo su interior, utilizando plástico calibre 600. Todas las labores agronómicas para el establecimiento del cultivo se efectuaron de acuerdo con la guía técnica agrícola para esta zona (SAGARPA, 2015), utilizando la sembradora MP-25 y la variedad HS-2 con 50 kg ha⁻¹ de semilla para lograr una densidad de 80000 plantas ha⁻¹. La distancia de separación entre surcos fue de 90 cm y de 9 cm entre plantas. Los tratamientos se distribuyeron bajo el diseño de bloques al azar y en contra del gradiente del terreno. El lote experimental con un área efectiva de 937.5 m² se dividió en seis bloques con cuatro tratamientos cada bloque para tener seis repeticiones por tratamiento y 24 parcelas experimentales (Cuadro 1).

Recolecta del estiércol y llenado de la fosa.

El estiércol fresco y húmedo fue trasladado hacia el canal de desagüe ubicado al centro del corral, utilizando palas anchas y tablas (avión) (Figura 2 A). Una vez en el canal se le agregó agua para conseguir una dilución aproximada

a 4 % de materia seca y facilitar su conducción hacia la fosa (Figura 2 B).

Limpieza, mezclado y toma de muestra. Se retiró el material vegetal mezclado en el estiércol para evitar obstrucciones en el sistema de salida. Se agitó el estiércol para deshacer las excretas sólidas y obtener una mezcla homogénea (Figura 2 C), recolectándose una muestra para el análisis de laboratorio y determinar el contenido de N total. Esta operación se realizó cada día de recolección y de la aplicación programada del estiércol.

Llenado del depósito y traslado. Con el dato del contenido del N de la muestra se determinó la dosificación, procediéndose al llenado del depósito, pasando por un filtro-malla con abertura de orificio de 5.0 mm en la entrada del contenedor (Figura 2 D). El aplicador se trasladó acoplado al enganche de tres puntos del tractor hacia el lote del cultivo para realizar la inyección al suelo (Figura 3).

Cuadro 1. Distribución y dosificación de los tratamientos para este estudio.

Tratamiento	% del tratamiento	kg-nitrógeno
1	50	7.5
2	100	15.0
3	150	22.5
4 (testigo)	100	15.0

Cantidad real de EBL aplicado por día. El periodo de aplicación de la dosis de EBL programada por el experimento se fijó en cinco días, así que, los análisis mostraron valores de 2.6, 2.4, 2.1, 2.3 y 2.6 g de N/l de estiércol para cada uno de esos días. Como cada muestra reportó diferente contenido de nitrógeno se calibró la abertura de la llave de paso para obtener la dosificación prevista del experimento (Cuadro 2).

Fertilización química. La dosis completa previamente calculada de fertilizante se aplicó manualmente en una sola aplicación directamente a la planta para este tratamiento, tapándolo posteriormente en la segunda escarda.

Previo a la inyección del EBL, en el cultivo ya establecido y hasta la cosecha se realizaron varios muestreos de plantas con inter-



Figura 2. Etapas del proceso para manejar EBL en una explotación. a) Recolecta en el corral, b) Llenado de la fosa, c) Agitación y retiro de sólidos grandes y d) Llenado del contenedor.



Figura 3. Inyección de EBL en parcela experimental del Colegio de Postgraduados-Montecillo.

valos de 20 días (etapas VE–R3); las variables evaluadas fueron: altura de plantas, diámetro de tallos, número de hojas (anchura y longitud), peso fresco y peso seco. Antes de iniciar labor alguna de cultivo en el terreno y al concluir la evaluación se muestreó el suelo para analizar su condición nutrimental, respecto al N total, N amoniacal (N-NH₄) y nitratos (N-NO₃). El método de muestreo fue el aleatorio simple, tomando tres muestras por parcela de los bloques impares y mezclándolas para obtener una muestra compuesta. En total se tomaron 12 muestras, las cuales fueron analizadas en el laboratorio (Salgado-García *et al.*, 2013).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Evaluación del rendimiento de forraje verde

El maíz forrajero para ser ensilado debe cortarse a 2/3 de la línea de leche del grano cuando el elote alcanza un estado masoso (González-Castañeda *et al.*, 2006). Bajo esta condición pueden obtenerse rendimientos de 70 a 80 t ha⁻¹ de forraje verde, equivalentes a 18.5 t de materia seca (Figuroa-Viramontes *et al.*, 2010). La variable de respuesta evaluada fue el rendimiento en kilogramos de forraje obtenidos por cada tratamiento, el cual se determinó mediante el corte y pesado de una cantidad de forraje dentro del área útil de cada parcela. Así, los

rendimientos estimados promedio en el experimento fueron: tratamiento 1 (50 %) de 74.3 t ha⁻¹; del tratamiento 2 (100 %) de 77.3 t ha⁻¹; del tratamiento 3 (150 %) de 70.6 t ha⁻¹; y del tratamiento testigo (100 %) de 75.4 t ha⁻¹. De acuerdo con el análisis de varianza, para esta variable no existió diferencia significativa ($P>0.05$) entre los tratamientos. Por lo anterior, en términos de producción de forraje verde se presentaron diferencias, ya que en el tratamiento de abonado con EBL al 100 % de necesidades de N se obtuvo en promedio un excedente de producción de 1.94 t ha⁻¹ con respecto al tratamiento en el que se dosificó fertilizante químico que reportó en promedio un menor rendimiento. Respecto a las variables morfológicas analizadas de los muestreos de plantas individuales, los resultados obtenidos no mostraron diferencias estadísticas significativas ($P\geq 0.05$) (Cuadro 3).

Los resultados en los análisis de suelo antes y al finalizar el experimento mostraron que no hubo cambio significativo en el nitrógeno total y amoniacal; sin embargo, los nitratos sí cambiaron a una clasificación media, con base en el parámetro establecido (Cuadro 4; Vázquez, 1999). Puede decirse que esta técnica puede formar parte de un modelo alternativo de aplicación de nutrimentos para la producción de cultivos.

CONCLUSIONES

El equipo aplicador de EBL funcionó con una uniformidad superior a 90 % en su dosificación. El rendimiento final de maíz forrajero reportó diferencias numéricas ($P>0.05$) de 1.94 t ha⁻¹ en el tratamiento dos (100%), su-

Cuadro 2. Días calendario de aplicación e inyección real (N total) por tratamiento realizada durante el mes de Mayo.

Días	9		10		11		12		16		Aplicación total	
	Cantidad de nitrógeno total a aplicar											
	2.6		2.4		2.1		2.3		2.6			
	l	g	l	g	l	g	l	g	l	g	l	G
T-1	1486	3865	1486	3568	-	-	-	-	-	-	2972	7433
T-2	1486	3865	1486	3568	1735	3644	1690	3887	-	-	6397	14964
T-3	1486	3865	1486	3568	1735	3644	1690	3887	2971	7724	9368	22688
T-4	--	--	--	--	--	--	--	--	--	15000	--	15000
Total	4458	115 95	4458	10704	3470	7288	3380	7774	2971	7724	--	--

perior al tratamiento de aplicación de fertilizante químico. El rendimiento obtenido con los tratamientos donde se dosificaron las mismas necesidades de N y superiores, a base de EBL, determinan que el rendimiento del cultivo puede superarse utilizando únicamente fertilizantes químicos y posiblemente aplicando la mitad de nitrógeno, con base en la dosis de EBL.

LITERATURA CITADA

- Akar T., Kaplan M., Sagir N., Gelebur A. 2014. Effects of different liquid-manure treatments on yield and quality parameters of second-crop silage corn under reduced tillage conditions. *Romanian Agricultural Research* 3: 193-203.
- Annicchiarico G., Caternolo G., Rossi E., Martiniello P. 2011. Effect of manure vs. fertilizer inputs on productivity of forage crop models. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 8: 1893-1913.
- Costa M., Shigaki F., Alves B., Kleinman P., Pereira M. 2014. Swine manure application methods effects on ammonia volatilization, forage quality, and yield in the Pre-Amazon Region of Brazil. *Chilean Journal of Agricultural Research* 74(3): 311-318.
- Dell C.J., Meisinger J.J., Beegle D.B. 2011. Subsurface application of manures slurries for conservation tillage and pasture soils and their impact on the nitrogen balance. *J. Environ. Qual* 40: 352-361.
- Figueroa-Viramontes U., Cueto-Wong J.A., Delgado J.A., Núñez-Hernández G., Reta-Sánchez D.G., Quiroga-Garza H.M., Faz-Contreras R., Márquez-Rojas J.L. 2010. Estiércol de bovino lechero sobre el rendimiento y recuperación aparente de nitrógeno en maíz forrajero. *Terra Latinoamericana* 28(4): 361-369.
- González Castañeda F., Peña Ramos A., Núñez Hernández G. 2006. Etapas de corte, producción y calidad forrajera de híbridos de maíz de diferente ciclo biológico. *Revista Fitotecnia Mexicana* 29(2): 103-107.
- Krueger E.S., Baker J.M., Ochsner T.E., Wente C.D., Feyereisen G.W., Reicosky D.C. 2013. On-farm environmental assessment of corn silage production systems receiving liquid dairy manure. *Journal of Soil and Water Conservation* 68(6): 438-449.
- López Martínez J.D., Martínez Parada P.E., Vázquez Vázquez C., Salazar Sosa E., Zúñiga Tarango R. 2010. Producción de maíz forrajero con labranza, fertilización orgánica e inorgánica. *Revista Científica UDO Agrícola* 10(1): 55-59.
- Luna-Anguiano J., Silos-Córdova S.G., Salazar-Meléndez E., Trujillo Herrada U., Alvarado-Arroyo R.A. 2014. Producción de maíz forrajero abonado con efluentes líquidos de un biodigestor en la región lagunera. *Memoria del XXXIX Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. División III Aprovechamiento del Recurso Suelo. Chihuahua, México.* 101-105.
- Matsi T. 2012. Liquid cattle manure application to soil and its effect on crop growth, yield, composition, and on soil properties. Ch. 6. In: *Soil Fertility Improvement and Integrated Nutrient Management-A Global Perspective*. Joann Whalen (Ed.). InTech 97-118.
- SAGARPA. 2015. Agenda Técnica Agrícola de Estado de México. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. 2da. Edición. México. 288p.
- Salgado García S., Nuñez Escobar R. 2010. Manejo de fertilizantes químicos y orgánicos. *Colegio de Postgraduados/BBA. México.* 158p.
- Salgado-García S., Palma-López D.J., Castelán-Estrada M., Lagunes-Espinoza L.C., Ortiz-Laurel H. 2013. Manual para muestreo de suelos, plantas y aguas e interpretación de análisis para la producción sostenible de alimentos. *Colegio de Postgraduados, Campus Tabasco, Tabasco, México.* 100p.
- Sanford G.R., Posner J.L., Schuler R.T., Baldock J.O. 2008. Effect of dairy slurry application on soil compaction and corn (*Zea mays* L.) yield in Southern Wisconsin. *Soil & Tillage Research*. 100(1-2): 42-53.
- Trejo-Escareño H.I., Salazar-Sosa E., López-Martínez J.D., Vázquez-Vázquez C. 2013. Impacto del estiércol bovino en el suelo y producción de forraje de maíz. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 4(5): 727-738.
- Vázquez A., A. 1999. Guía para interpretar el análisis químico del agua y suelo. 2da. Edición, Chapingo, México. 32p.

Cuadro 3. Promedios de las variables analizadas en los muestreos de plantas.

Tratamientos	Altura de plantas (m)	Diámetro de tallos (cm)	Número de hojas	Por planta individual	
				Peso fresco (g)	Peso seco (g)
T1	3.17a	9.83a	13.00a	2383.5a	569.4a
T2	3.26a	8.67a	13.67a	1944.9a	558.5a
T3	2.68a	9.50a	13.33a	2793.5a	507.6a
T4 (testigo)	2.19a	8.50a	12.00a	2335.4a	582.8a
Dif	11.765	13.324	39.694	1319.5	367.86

Las medias con la misma letra (a) no presentan diferencias significativas (Tukey, $\alpha=0.05$).

Cuadro 4. Análisis químico del suelo al inicio y al concluir el estudio.

Etapa de experimento	N total (%)	N-NH ₄ (ppm)	N-NO ₃ (ppm)
	0.09-0.15	11.0-20.0	04-10
Inicio	0.1	11.16	7.67
Conclusión	0.12	16.30	14.7
Clasificación	Medio	Medio	Bajo a Medio

EFECTO DE LA ADICIÓN DE HOJAS DE *Azadirachta indica* A. Juss Y *Stevia rebaudiana* Bertoni EN LA CALIDAD SENSORIAL DE UN PAN DULCE

EFFECT OF THE ADDITION OF *Azadirachta indica* A. Juss AND *Stevia rebaudiana* Bertoni LEAVES ON THE SENSORY QUALITY OF SWEET BREAD

Salgado-Cruz, M. de la P.¹⁻², Calderón-Domínguez, G.², Díaz-Ramírez, M.^{3*}, Cortés-Sánchez, A. de J.⁴, Tellez-Medina, D. I.², Tapia-Ochoategui, A.²

¹Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. Insurgentes Sur 1582, Col. Crédito Constructor, Benito Juárez, México, D.F., 03940, México. ²Escuela Nacional de Ciencias Biológicas. Instituto Politécnico Nacional. Plan de Ayala y Carpio s/n. Col Santo Tomas. C.P. 11340. México, D.F. ³Departamento de Ciencias de la Alimentación. División de Ciencias Biológicas y de la Salud. Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Lerma. Av. Hidalgo Poniente 46, Col. La Estación, Lerma de Villada, Estado de México. 52006. México. ⁴Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C. Unidad Nayarit. Tepic, Nayarit. México.

*Autor de correspondencia: marea131079@hotmail.com

RESUMEN

En la actualidad se han buscado fuentes naturales que contengan sustancias con actividad biológica para incorporarlas en la alimentación y coadyuvar en la disminución de padecimientos como la diabetes o la hipertensión; entre ellas se encuentran el Neem (*Azadirachta indica*) y la Stevia (*Stevia rebaudiana*), por lo que el objetivo de este trabajo fue elaborar pan dulce "tipo concha" adicionado con hojas de Neem (NM) y Stevia (SV) con características organolépticas aceptables. Se realizó un diseño de experimentos para variar la cantidad de azúcar, SV y NM; las respuestas fueron emitidas mediante la evaluación sensorial del producto con un panel de jueces entrenados. Los resultados mostraron que la formulación óptima emplea 8.99 g de azúcar, 0.05g de NM y 0.946g de SV, es importante destacar que el sabor amargo del NM no se enmascara con la intensidad de sabor de SV.

Palabras clave: pan, estevia, neem, evaluación sensorial.

ABSTRACT

At present, there is a search for natural sources that contain substances with biological activity to incorporate them into the diet and contribute to the decrease of illnesses like diabetes or hypertension; among them, there is Neem (*Azadirachta indica*) and Stevia (*Stevia rebaudiana*). Therefore, the objective of this study was to elaborate a sweet bread of "concha" type with acceptable organoleptic characteristics, to which Neem (NM) and Stevia (SV) leaves were added. An experimental design was used to vary the amount of sugar, SV and NM, the responses were obtained through the sensory evaluation of the product with a panel of trained judges. The results showed that the optimal formulation uses 8.99 g of sugar, 0.05g of NM and 0.946g of SV; it is important to highlight that the bitter taste of the NM is not masked with the intensity of flavor of the SV.

Keywords: bread, stevia, neem, sensory evaluation.

Agroproductividad: Vol. 10, Núm. 11, noviembre. 2017. pp: 121-127.

Recibido: agosto, 2017. **Aceptado:** octubre, 2017.



INTRODUCCIÓN

La demanda mundial de edulcorantes se ha incrementado y por ende la búsqueda de nuevas sustancias. En 2011 la EC (The European Commission) aprobó el uso de glucósidos de esteviol (Rebaudiósido A (Reb-A) y el esteviósido (ST), los cuales se encuentran en la planta *S. rebaudiana*; estos exhiben propiedades funcionales y sensoriales superiores a otros edulcorantes además de ser no tóxicos, naturales, no calóricos, potenciadores del sabor, no adictivos (Chatsudthipong y Muanprasat, 2009). Los principales componentes de la hoja son esteviósidos (5-10% peso total), rebaudiósido A (2-4%), rebaudiósido C (1-2%) y dulcósido A (0.4-0.7%) (Wood *et al.*, 1955); estos componentes en estado puro y cristalino tienen un poder edulcorante que puede ser 300 veces mayor que el del azúcar de caña; además de presentar propiedades terapéuticas poseen actividad antioxidante, antimicrobiana y antifúngica (Lemús-Mondaca *et al.*, 2011). También se han utilizado otras plantas, como el Neem (*Azadirachta indica*), la cual contiene nimbidina, principal componente al que se atribuye capacidad antiinflamatoria, hipoglucémica, antiartrítica; sin embargo, el extracto obtenido de las hojas es amargo. Estas plantas han sido investigadas, ya que se cree suprimen la producción y/ o absorción de glucosa en el intestino (Shori y Baba, 2011). La búsqueda de ingredientes funcionales ha crecido junto con los cambios en los hábitos nutricionales y las exigencias de los consumidores hacia alimentos que puedan proporcionar además del valor nutritivo, otros componentes con actividad fisiológica que permitan un mejor estado tanto físico como mental, reduciendo así el riesgo de enfermedades, al tiempo que mantienen su calidad (Cortés *et al.*, 2005; Ares *et al.*, 2009). No obstante, en muchos casos la incorporación de sustancias funcionales es la responsable de sabores desagradables como el amargo, astringente o pungente, limitando su uso en alimentos (Villegas-Ruíz, 2010), por lo que el objetivo de este trabajo fue elaborar pan dulce “tipo concha” adicionado con NM (*Azadirachta indica*) y SV (*Stevia rebaudiana*) con características organolépticas aceptables.

MATERIALES Y MÉTODOS

Elaboración del pan tipo concha. Se siguió la metodología de Tlapale-Valdivia *et al.* (2010), con algunas modificaciones. Se colocaron 300 g de harina de trigo, 6.9 g de levadura seca (Nevada oro, Safmex), 3.6 g de sal (La Fina; sales del Itsmo), 36 g de leche descre-

mada en polvo (Svelty, Nestle), 61.5 g de huevo fresco (Bachoco), 48 g de margarina (Primavera; Unilever) y azúcar (Great Value; Walmart) o NM (Cuadro 1) en batidora (KitchenAid, EUA) a 63 rpm durante el tiempo óptimo de amasado (TOA). El agua y TOA se determinaron mediante análisis farinográfico (500 unidades Brabender). Para la masa madre se emplearon 10 g de harina refinada de trigo, 0.6 g de levadura y 6 g de agua; esta esponja se fermentó durante 30 minutos a 37 °C con humedad de saturación y después se colocó con los demás componentes de la fórmula para la elaboración de la masa final. Esta se fermentó 120 min a 37 °C, con humedad relativa constante (saturación). Posteriormente se pesaron porciones de 50 g, se bolearon, aplanaron y se colocaron en charola para una segunda fermentación durante 30 minutos a 37 °C. Después cada muestra se cubrió con 14 g de una capa dulce circular que es preparada mezclando azúcar glas, SV (“Truvia”; Cargill), manteca vegetal (Inca; ACH Foods México) y harina refinada de trigo a una proporción 0.6:0.4:1:1, respectivamente, la cubierta se marca con un molde para obtener el patrón tipo concha y se fermentó nuevamente durante 55 minutos a 37 °C y humedad constante (saturación). Las muestras se hornearon a 180 °C /15 minutos en un horno rotatorio (Henry Simon Limited, Cheshire, Reino Unido). Se utilizó un diseño de experimentos D-optimal (Design Expert 9.0) con 14 formulaciones y tres variables. Los límites mínimos y máximos de NM, SV y azúcar se presentan en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Diseño experimental para la sustitución de NM, SV por azúcar.			
Corrida	Neem (g)	Stevia (g)	Azúcar (g)
1	0.28	9.23	0.49
2	0.1	6.7	3.2
3	1	6.7	2.3
4	0	7.38	2.62
5	1	6.7	2.3
6	0	10	0
7	1	7.8	1.2
8	0	8.25	1.75
9	0	10	0
10	1	9	0
11	0.56	7.53	1.92
12	1	9	0
13	0.51	8.51	0.99
14	0.1	6.7	3.2

Evaluación sensorial del pan tipo Concha

Selección de jueces. Se realizó una encuesta a 50 alumnos de la Escuela Nacional de Ciencias Biológicas para determinar el estado de salud, disponibilidad de tiempo, motivación e interés en realizar pruebas de evaluación sensorial; no se otorgó ningún pago por su participación y 16 personas contestaron afirmativamente a cada uno de los cuestionamientos realizados (International Standard, 8586:2012). Estas realizaron la prueba de identificación de sabores básicos, la cual consistió en presentar soluciones de NaCl (0,20 %), ácido cítrico (0,07 %), sacarosa (2,00 %), cafeína (0,07 %) y agua para determinar su capacidad de detectar e identificar los sabores dulce, amargo, ácido y salado, fueron seleccionados solo aquellos que presentaron un porcentaje de aciertos de 70% o superior. Además se realizó una prueba de ordenamiento para color para observar su capacidad de reconocer diferentes intensidades y, por lo tanto, desarrollar la habilidad de jerarquizar según una característica dada. Se le presentó a cada juez una serie de 10 tubos de un mismo color,

pero en distintas diluciones, y se les pidió que los ordenaran de manera creciente según su intensidad de color, de izquierda a derecha, con un descanso de 20 minutos entre cada evaluación (Anzaldúa, 2005). Terminada la fase de entrenamiento básico se realizaron sesiones de entrenamiento específico en análisis sensorial para evaluar, determinar y establecer la terminología descriptiva; se unificaron las características del pan dulce tipo concha mediante un análisis descriptivo cuantitativo, se utilizó una escala no estructurada de 10 cm, se determinaron los atributos positivos de sabor (dulce, resabio dulce, afrutado) y textura (suave, crujiente, esponjosa) así como los descriptores negativos (Amargo, resabio amargo, herbal, go-

moso, apelmazado y duro).

El análisis de los datos se realizó mediante el software informático Design Expert versión 10; se optimizó la respuesta para obtener la mejor formulación de acuerdo con las respuestas sensoriales del panel de jueces.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El Cuadro 2 muestra los TOA y la cantidad de agua para obtener masa con una consistencia de 500 ± 20 UB. Para todas las formulaciones se consideró el contenido de humedad de los componentes. Del cuadro se observa que las formulaciones 3 y 5, las cuales tienen mayor sustitución de azúcar por NM y SV, requieren mayor cantidad de agua debido probablemente a la fibra presente de estos materiales (Kučerová *et al.*, 2013). Se observa también una relación inversa entre la cantidad de hoja añadida y el TOA, ya que las formulaciones 6 y 9 (testigo) presentan un TOA de 12 minutos, mientras que las formulaciones 3 y 4 añadidas con NM y SV presentan un TOA de 5.5 minutos.

Cuadro 2. Parámetros farinográficos de TOA y % de agua para cada formulación.

Formulación	Porcentaje de absorción de agua (%)	TOA (min)
1	52	10
2	62.6	6
3	63	5.5
4	62.2	5.5
5	63	6
6	52	12
7	61.6	7
8	61.2	7.3
9	52	12
10	59.8	8.5
11	62	6.6
12	59.8	8.5
13	61	7.7
14	62.6	6

Las Figuras 1 y 2 muestran el pan con los parámetros establecidos en el Cuadro 2.

Las Figuras 3 y 4 muestran los descriptores analizados por los jueces, de los cuales se determinó que los más importantes fueron el sabor dulce de los parámetros positivos, así como el amargo y herbal de los parámetros negativos. La evaluación con el valor más alto para el primer descriptor fue la muestra No 6, elaborado solo con azúcar como edulcorante. El valor más cercano es el experimento número 8 y 4; no obstante, se observa que presenta un sabor herbal intenso de 5.78 y 7.57, respectivamente, enmascarando el sabor amargo de NM, obte-



Figura 1. Concha obtenida de la formulación No. 4 y 5.



Figura 2. Concha obtenida de la formulación No. 9.

niendo puntuaciones de 0,67 y 1,52, respectivamente. Es importante destacar que aun cuando el sabor amargo disminuye, el resabio herbal de SV es un descriptor negativo para el pan.

En la Figura 4 se observa que la formulación 5 y 10 presentaron los valores más altos de los descriptores negativos del sabor amargo y herbal con valores de 8,38, 9,03, 5,98 y 0,87, respectivamente, denotando un producto que no genera agrado para los jueces, así que la sustitución de NM y SV no es una buena opción para este tipo de producto.

Evaluación del diseño de experimentos. Para evaluar e identificar la significancia de las variables de estudio se realizó un análisis de varianza por cada respuesta obtenida, usando el valor-F de Fisher para determinar si las variables evaluadas describen adecuadamente la varia-

ción de los datos sobre su medida. El Cuadro 3 muestra que la distribución de los puntos experimentales en el área de evaluación se ajusta a modelos lineales, cuadráticos y cúbicos. No obstante el valor de R^2 ajustada, así como la R^2 predicha de algunas respuestas son bajos, por lo que se evaluó el valor de la precisión adecuada del modelo, el cual compara la gama de valores predichos en los puntos del diseño con la predicción media del error, los valores mayores de cuatro indican una adecuada discriminación del modelo, el cual se puede utilizar

para navegar por el espacio de diseño y predecir la respuesta. Es importante destacar que las tres variables estudiadas afectan las respuestas emitidas por los jueces, contribuyendo de manera significativa.

En la Figura 5 se muestra la superficie de respuesta del a) sabor dulce y b) amargo, parámetros representativos de la calidad sensorial del pan. Se puede observar que para a) existen dos regiones bien definidas que representan un sistema de respuestas múltiples en las que los requisitos satisfacen simultáneamente las propiedades críticas que son buscadas en cuanto a la respuesta de sabor dulce. Los valores predichos más bajos para este parámetro se encuentran en el contorno definido por el área azul, donde la SV se incrementa y el contenido de azúcar disminuye. Esto puede ser atribuido a los esteviósidos y rebaudiósido A, que generan sabor amargo y herbal debido a la presencia de clorofilas A,

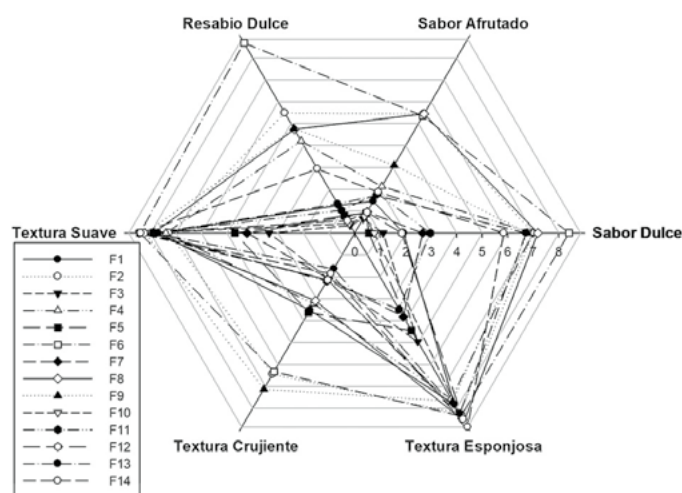


Figura 3. Resultados del análisis descriptivo cuantitativo para atributos positivos de las 14 formulaciones.

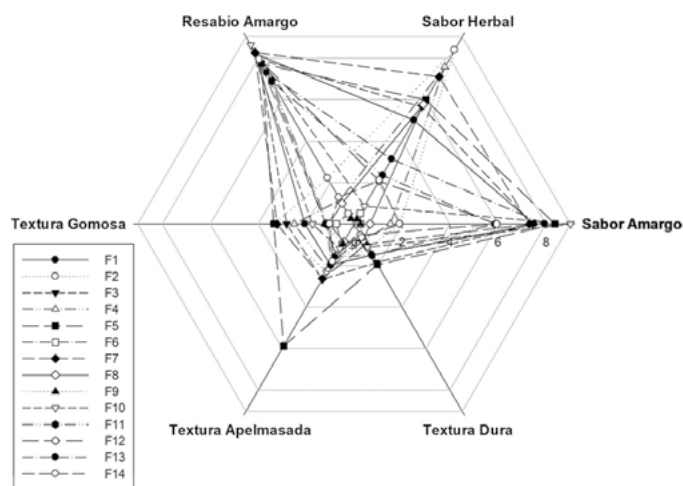


Figura 4. Resultados del análisis descriptivo cuantitativo para atributos negativos de las 14 formulaciones.

Cuadro 3. Resultados del ANOVA para cada una de las respuestas evaluadas.

Respuesta Evaluada	Modelo	F-Value	p-Value Prob>F	R ² (Ajustada)	R ² (Predicha)	Precisión adecuada
Sabor dulce	Cúbico	16.97	0.0076	0.9745	0.9170	9.68
Resabio dulce	Lineal	7.68	0.0082	0.5828	0.5070	5.477
Sabor afrutado	Lineal	12.25	0.016	0.6901	0.6338	7.618
Textura suave	Cuadrático	9.65	0.0031	0.8578	0.7690	8.738
Textura crujiente	Cúbico	4.18	0.0365	0.7230	0.5499	6.216
Textura esponjosa	Cuadrático	37.98	0.016	0.9884	0.9624	15.998
Sabor amargo	Cuadrático	13.98	0.0009	0.8973	0.8331	7.867
Sabor herbal	Lineal	4.28	0.0421	0.4377	0.3355	4.808
Resabio amargo	Cúbico	100.32	0.0002	0.9956	0.9857	22.096
Textura Gomosa	Lineal	3.91	0.0521	0.4156	0.3094	5.347
Textura apelmazada	Lineal	5.65	0.0205	0.5069	0.4172	6.485
Textura dura	Cuadrático	6.02	0.0133	0.79	0.6587	6.178
Aceptación de color	Especial cúbico	17.19	0.0007	0.936	0.8820	11.32

B, C (Rios-Cortés *et al.*, 2017) en contribución de los compuestos NM: la nimbidina y los limonoides (Data *et al.*, 2017), lo cual se comprueba en la Figura 5-b), donde se muestra que a menor contenido de SV y NM se encuentran las respuestas con el menor valor con respecto a este parámetro evaluado. Es importante destacar que la intensidad del sabor dulce no reduce la amargura que generan estos fitonutrientes, provocando un efecto perjudicial sobre el perfil de sabor del pan.

En el Cuadro 4 se muestran los modelos matemáticos que permiten predecir el comportamiento para las variables respuestas, como el sabor dulce o amargo del pan; en las ecuaciones el signo positivo está asociado con los efectos combinados o de interacción, sugiere sinergia, es decir, que respuestas mayores resultan cuando se mezclan esos componentes. Por el contrario, el signo negativo implica efecto antagónico entre los componentes, o sea, que se producen respuestas menores (Kamairudin *et al.*, 2014), mostrando que el NM tiene un efecto negativo en el sabor y la textura.

La Figura 6 a)-b) muestra la superficie de respuesta para el resabio dulce y amargo. Estas características son importantes porque es el sabor que deja el alimento después de ser ingerido, generando aceptación o rechazo de un producto. Es por ello que se buscan tecnologías de enmascaramiento (Villegas-Ruiz *et al.*, 2010; Ares *et al.*, 2008) como la adición de endulzan-

tes artificiales, sabores e inclusive otros compuestos ácidos, amargos o astringentes. No obstante, el SV y NM contienen compuestos que generan resabio herbal y amargo, observándose que a mayor concentración de azúcar y SV predomina el resabio dulce y de forma inversa para el amargo. Esta información es corroborada por las ecuaciones de predicción (Cuadro 4) donde la variable NM es aditiva para las características negativas; sin embargo, la SV es sustractiva, generando enmascaramiento del sabor amargo, pero resaltando el resabio herbal.

Optimización del diseño de mezcla. Los criterios de optimización para obtener las mejores características sensoriales se muestran en la Figura 7. Esta combina-

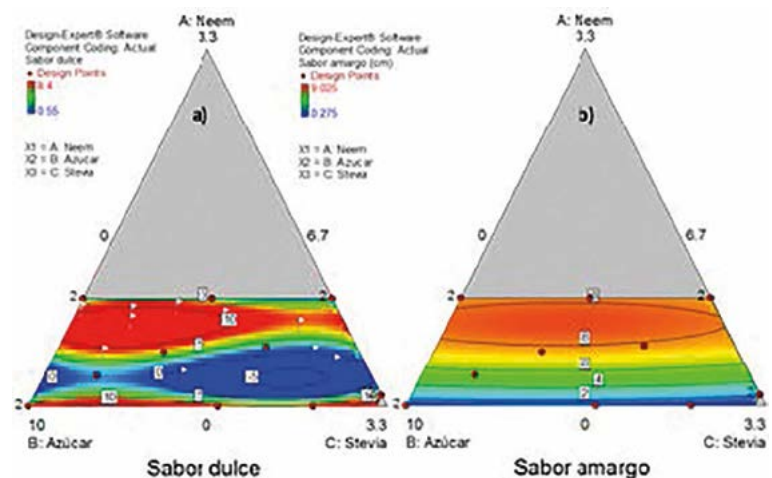


Figura 5. Gráfica de contornos de la superficie de respuesta del sabor a) dulce y b) amargo.

Cuadro 4. Ecuaciones de predicción para las variables respuesta.

Sabor dulce = $-14852.18 \cdot NM + 0.76 \cdot AZ + 176.73 \cdot SV + 2341.86 \cdot NM \cdot AZ + 2348.49 \cdot NM \cdot SV - 30.76 \cdot AZ \cdot SV - 174.98 \cdot NM \cdot AZ \cdot SV + 86.53 \cdot NM \cdot AZ \cdot (NM - AZ) + 91.49 \cdot NM \cdot SV \cdot (NM - SV) + 1.45 \cdot AZ \cdot SV \cdot (AZ - SV)$.

Resabio dulce = $-2.69 \cdot NM + 0.38 \cdot AZ + 0.33 \cdot SV$

Sabor afrutado = $-4.24 \cdot NM + 0.53 \cdot AZ + 0.25 \cdot SV$

Textura suave = $-47.39 \cdot NM + 0.82 \cdot AZ + 2.99 \cdot SV + 5.33 \cdot NM \cdot AZ + 3.57 \cdot NM \cdot SV - 0.33 \cdot AZ \cdot SV$

Textura crujiente = $+24.38 \cdot NM + 0.66 \cdot AZ + 5.57 \cdot SV - 3.13 \cdot NM \cdot AZ - 2.09 \cdot NM \cdot SV - 0.83 \cdot AZ \cdot SV$

Textura esponjosa = $-7181.75 \cdot NM + 0.80 \cdot AZ + 141.16 \cdot SV + 1129.64 \cdot NM \cdot AZ + 1161.11 \cdot NM \cdot SV - 24.7 \cdot AZ \cdot SV - 88.43 \cdot NM \cdot AZ \cdot SV + 41.44 \cdot NM \cdot AZ \cdot (NM - AZ) + 45.92 \cdot NM \cdot SV \cdot (NM - SV) + 1.19 \cdot AZ \cdot SV \cdot (AZ - SV)$

Sabor amargo = $-107.04 \cdot NM + 0.08 \cdot AZ - 1.51 \cdot SV + 12.66 \cdot NM \cdot AZ + 12.78 \cdot NM \cdot SV + 0.21 \cdot AZ \cdot SV$

Sabor herbal = $+1.04 \cdot NM + 0.14 \cdot AZ + 1.68 \cdot SV$

Resabio amargo = $+6169.19 \cdot NM + 0.04 \cdot AZ - 65.01 \cdot SV - 980.69 \cdot NM \cdot AZ - 955.73 \cdot NM \cdot SV + 11.39 \cdot AZ \cdot SV + 71.34 \cdot NM \cdot AZ \cdot SV - 37.01 \cdot NM \cdot AZ \cdot (NM - AZ) - 34.90 \cdot NM \cdot SV \cdot (NM - SV) - 0.53 \cdot AZ \cdot SV \cdot (AZ - SV)$

Textura gomosa = $+1.09 \cdot NM + 0.08 \cdot AZ + 0.51 \cdot SV$

Textura apelmazada = $+1.63 \cdot NM + 0.05 \cdot AZ + 0.61397 \cdot SV$

Textura dura = $-17.42 \cdot NM + 0.08 \cdot AZ + 0.02 \cdot SV + 1.94 \cdot NM \cdot AZ + 2.42 \cdot NM \cdot SV + 2.65 \cdot AZ \cdot SV - 0.03 \cdot NM \cdot AZ \cdot SV$

Aceptación de color = $-17.32 \cdot NM + 0.13 \cdot AZ + 1.84 \cdot SV + 2.05 \cdot NM \cdot AZ - 2.04 \cdot NM \cdot SV - 0.16 \cdot AZ \cdot SV + 0.58 \cdot NM \cdot AZ \cdot SV$

AZ: Azúcar; NM: Neem y SV: Stevia

ción se obtuvo de la optimización numérica, estableciendo los máximos de todas las respuestas positivas y los valores mínimos de las respuestas negativas; las proporciones de la formulación óptima son 0.055g de NM, 8.99g de azúcar y 0.946 de SV, prediciendo que esta formulación tendrá valores de sabor dulce de 6.5 y sabor amargo de 2.5.

CONCLUSIONES

La incorporación de SV y NM a un pan dulce tipo concha es una alternativa para enmascarar y contrarrestar los sabores generados por estas plantas, además de generar un alimento con impacto nutricional positivo; no obstante, aún faltan estudios para obtener una formulación con características sensoriales aceptables. Los modelos matemáticos permiten predecir satisfactoriamente el comportamiento de las variables respuestas, disminuyendo el trabajo de un panel de jueces entrenados para optimizar el desarrollo e incorporación de nuevos ingredientes a alimentos.

LITERATURA CITADA

- Anzaldúa M. A. 2005. La Evaluación Sensorial de los Alimentos en la Teoría y la Práctica. Ed. Acribia S. A. Zaragoza, España. pp. 67-122.
- Ares G., Barreiro C., Deliza R., Gámbaro A. 2009. Alternatives to reduce the bitterness, astringency and characteristic flavour of antioxidant extracts. Food Research International 42: 871-878.

Cortés M., Chiralt B. A., Puente L. 2005. "Alimentos funcionales: una historia con mucho presente y futuro." Vitae. Vol. 12. Numero 1. Pp. 5-14.

Chatsudhipong V., Muanprasat C. 2009. Stevioside and related compounds: Therapeutic benefits beyond sweetness, Pharmacology & Therapeutics 121 41-54.

Datta A., Grün I. U., Kwasniewski M. T., Fernando L. N. 2017. Comparison of Two Adsorbent Based de-Bittering Procedures for Neem (*Azadirachta indica* A. Juss) Tea- Effect on Polyphenols, Anti-Oxidant Capacity, Color and Volatile Profile. Plant Foods Human Nutrition 72: 88-95.

International Standard ISO 8586:2012, Sensory analysis: General guidelines for the selection, training and monitoring of selected assessors and expert sensory assessors, First Edition.

Kamairudin N., Abd Gani S. S., Masoumi H.R. F., Hashim P. 2014. Optimization of Natural Lipstick Formulation Based on Pitaya

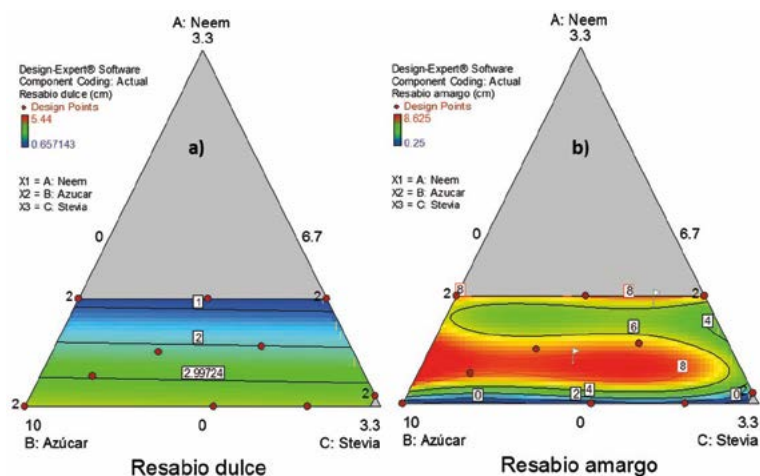


Figura 6: Gráfica de contornos de la superficie de respuesta del resabio a) dulce y b) amargo.

(*Hylocereus polyrhizus*) Seed Oil Using D-Optimal Mixture Experimental Design. *Molecules* 19: 16672-16683.

Kučerová J., Šottníková V., Nedomová, Š. 2013. Influence of Dietary Fibre Addition on the Rheological and Sensory Properties of Dough and Bakery Products. *Czech J. Food Science* 31(4): 340-346.

Lemus-Mondaca R., Vega-Gálvez A., Zura-Bravo L., Ah-Hen K. 2012. Stevia rebaudiana Bertoni, source of a high-potency natural sweetener: A comprehensive review on the biochemical, nutritional and functional aspects. *Food Chemistry* 132: 1121-1132.

Ríos-Cortés G., Ramírez-Aguilar D., Bobadilla-Reyes C. Q., Ríos-Cortés A. M., Ramírez-Bello, M. A., Sales-Chávez, R. M., Rosas-Morales, M. 2017. Remoción de clorofilas presentes en extractos de Stevia (*Stevia rebaudiana* Bertoni) por adsorción con carbón activado y precipitación con cal grado alimenticio. *Acta Universitaria*, vol. 27(1): 67-75.

Shori A.B., Baba A.S. 2011. Antioxidant activity and inhibition of key enzymes linked to type-2 diabetes and hypertension by *Azadirachta indica*-yogurt. *Journal of Saudi Chemical Society* 17: 295-301.

Tlapale-Valdivia A. D., Chanona-Pérez J. J., Mora-Escobedo R., Farrera-Rebollo R. R., Gutiérrez-López G. F., Calderón-Domínguez G. 2010. Dough and crumb grain changes during mixing and fermentation and their relation with extension properties and bread quality of yeasted sweet dough. *International Journal of Food Science and Technology* 45(3): 530-539.

Design-Expert® Software
Component Coding: Actual
Overlay Plot

Sabor dulce
Resabio dulce
Sabor afrutado
Textura suave
Textura crujiente
Textura esponjosa
Sabor amargo
Sabor herbal
Resabio amargo
Textura Gomosa
Textura apelmazada
Textura dura
Aceptación de color
• Design Points

X1 = A: Neem
X2 = B: Azúcar
X3 = C: Stevia

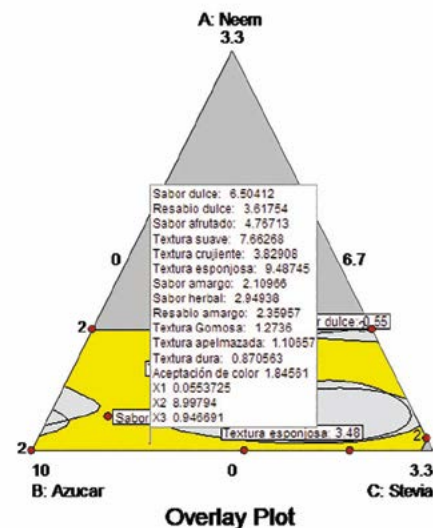


Figura 7. Optimización de la respuesta.

Villegas-Ruiz X., Ruiz-Espinoza H., Bárcenas-Pozos M.E. 2010. Tecnologías de enmascaramiento de sabor amargo en alimentos. *Temas selectos de Ingeniería de Alimentos*, 4(1): 27-30.

Wood H. B. Jr., Allerton R., Diehl H. W., Fletcher H. G. Jr. 1955. Stevioside. I. The structure of the glucose moieties. *The Journal of Organic Chemistry* 20: 875-883.