

## *Desarrollo Sustentable y Aprovechamiento del Residuo de la Caña de Azúcar*

### *Sustainable Development and Sugarcane Waste Use*

*Lázaro De la torre López*  
*Instituto Politécnico Nacional - UPIICSA*  
[ldelatorrel1101@egresado.ipn.mx](mailto:ldelatorrel1101@egresado.ipn.mx)

*María Elena Tavera Cortés\**  
*Instituto Politécnico Nacional - UPIICSA*  
[mtavera@ipn.mx](mailto:mtavera@ipn.mx)

*Xenia Mena Espino*  
*Universidad Autónoma Metropolitana - Unidad Iztapalapa*  
[xenia.mena.espino@gmail.com](mailto:xenia.mena.espino@gmail.com)

Recibido 14, febrero, 2021

Aceptado 24, marzo, 2021

#### **Resumen**

El presente trabajo tiene como objetivo realizar un estudio sobre la industria azucarera y su impacto en el desarrollo sustentable. La industria azucarera produce residuos que no se están aprovechando económicamente en México. Sin embargo, el desarrollo tecnológico puede ser una alternativa para su transformación.

La generación de sub-productos a partir de los residuos producidos por la industria azucarera en México es una estrategia de desarrollo sustentable, tomando en consideración el impacto económico, ambiental, y social que se tiene derivado de la actividad azucarera en México. Se realizó un diagnóstico mediante la revisión de bibliografía y análisis de datos que permite plantear la hipótesis sobre el aprovechamiento de los residuos generados de la industria azucarera, mediante la obtención de subproductos, como composta o etanol de segunda generación, a partir de la biomasa lignocelulosa generada por los residuos de caña de azúcar, siendo técnicamente apropiados, económicamente viables, ambiental y socialmente responsables.

**Palabras Clave:** Economía, Agricultura, Desarrollo sustentable, Residuos

## Abstract

*The primary focus of this work is to carry through a study about sugarcane industry and its impact on sustainable development. Currently, the waste produced by sugarcane industry in Mexico is not being used economically. However, technological development could be an alternative to take advantage of this waste. In Mexico, the generation of by-products from waste produced by sugarcane industry is a sustainable development strategy, bearing in mind economic, environmental, and social impact, derived from sugarcane's activity in Mexico. A diagnostic was made by bibliographic reviewing and data analysis, that allows the formulation of the hypothesis on the use of waste generated from the sugarcane industry by obtaining compost or second-generation ethanol, from lignocellulose biomass generated by sugarcane residues, being technically appropriate, economically viable, environmentally and socially responsible.*

**Keywords:** *Economy, Agriculture, Sustainable development, Waste.*

## 1. INTRODUCCIÓN

La agricultura genera estabilidad alimentaria, tiene injerencia en aspectos sociales y culturales y en la actividad económica mundial. Debido a esto, la implementación de estrategias para aprovechar los recursos existentes sin comprometer los disponibles para las generaciones futuras es de relevancia en los gobiernos de países mundo. Las actividades agrícolas generan productos y alimentos para la prevalencia del ser humano y paralelamente produce residuos agrícolas que ponen en riesgo los recursos disponibles del planeta (The World Bank, 2019).

Dentro de la agenda de los objetivos de desarrollo sostenible para el año 2030 se encuentran nuevas esferas como el consumo sostenible mediante el cual los países de todo el mundo están tratando de aprovechar y conservar los recursos de naturales por implementación de tecnología innovadora y cambios institucionales (FAO, 2015). En el desarrollo sostenible se deben conservar la tierra, suelo y aire, así como los recursos de flora y fauna del planeta, cuidando ser técnicamente apropiado, económicamente viable y socialmente aceptable (Muñiz, 2016). En México, el procesamiento de la caña de azúcar es de relevancia económica y social, específicamente en el campo mexicano (DOF, 2018). El azúcar forma parte de la canasta básica de los mexicanos, junto al maíz, frijol y arroz. En el territorio mexicano, el cultivo y procesamiento de la caña de azúcar se inició cuando Hernán Cortés trajo el cultivo de Cuba en 1522, pero algunos estudios señalan que se empezó a cultivar dos años después, es decir, en 1524 (Javier, et al., 2013).

Conforme a la información consultada en el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, a nivel nacional la caña de azúcar es el segundo cultivo después del maíz con mayor participación en México, dado al valor de la producción que este representa. El proceso de producción de azúcar involucra varias etapas, primeramente, la cosecha de la caña de azúcar la cual se realiza de forma manual o mecánica, posteriormente se trasladan los tallos de la planta a ingenios azucareros donde se lleva a cabo la molienda de los tallos mediante aplanadoras de acero para

la extracción del jugo, posteriormente se realiza un proceso de clarificación, evaporación, cristalización, separación o centrifugación, refinado, secado y por último, el envasado del azúcar (SIAP, 2018).

El residuo que se genera de exprimir los tallos se le conoce como bagazo y tiene diferentes usos, entre los cuales se encuentran el de la elaboración de papel, como combustible para generar vapor en calderas de ingenios azucareros y en algunos lugares, ya se está utilizando en la producción de etanol de segunda generación (SIAP, 2018). Siendo el objetivo de investigación de este trabajo analizar la relevancia que tiene el aprovechamiento del residuo de la caña de azúcar así como identificar las estrategias exitosas que pueden replicarse en el municipio de Tenosique, Tabasco. Mediante la implementación de nuevas técnicas que permitan dar valor agregado a la cadena de valor del sector productivo cañero, de tal manera que repercuta en la economía del municipio, apegándose a las estrategias de desarrollo sustentable establecidas dentro de la normatividad vigente en México.

Impacto económico de la producción de la caña de azúcar en México

Son aproximadamente 15 entidades federativas dedicadas al cultivo de la caña de azúcar. El consumo per cápita promedio de azúcar al año es de 36.7 kg, por lo que la ley de Desarrollo Rural Sustentable cataloga la caña de azúcar como un cultivo básico para el país. Según datos de la SAGARPA, la caña de azúcar representa el 4.50% del PIB agrícola nacional y el 92.33% de producción de agroindustriales, por lo que se ubica como uno de los 10 cultivos más consumidos por las familias mexicanas, con lo que el gasto en productos que se obtienen derivados de caña de azúcar representa el 5% del gasto total per cápita de bebidas, alimentos y tabaco (SAGARPA, 2017). Dicha agroindustria genera aproximadamente 440 mil empleos directos y beneficia indirectamente a más de 2.2 millones de personas (DOF, 2018).

Por otro lado, en referencia al mercado internacional, la mayor parte de la producción se destina al mercado de Estados Unidos y Puerto Rico; como un indicador dichas exportaciones se tiene los datos de la zafra del 2016-2017, en la cual México exportó 1.11 millones de toneladas de azúcar, y el 67.60% tuvo como destino los dos países mencionados anteriormente (SAGARPA, 2017). Debido a investigaciones antidumping y anti-subsidios, se establecieron disposiciones legales de importación entre el comercio de Estados Unidos y México a partir del 2015, donde se dispuso cupos de importaciones en el que se contempla el valor mínimo de la producción de México y la demanda no cubierta del mercado estadounidense, volumen que puede ajustarse de acuerdo con las interacciones y las necesidades de azúcar de los dos mercados. Así mismo, para junio de 2017 se ajustaron las cuotas de importación de caña de azúcar: 30% refinada y 70% en crudo (SAGARPA, 2017). México es considerado el cuarto exportador de confitería a nivel internacional, por lo que sus exportaciones representan el 6.07% del total mundial (SAGARPA, 2017).

De acuerdo con la Encuesta Nacional Agropecuaria existen aproximadamente 11.8 millones de puestos de trabajo (outsourcing) como jornalero en las unidades de producción de interés de la encuesta, de los cuales el 12.8% de los puestos jornaleros están ocupados por mujeres y 87.2% por hombres (INEGI, 2017). El 12% de los puestos de trabajo son actualmente ocupados por mujeres y el 87.2% es ocupado por hombres, siendo el tiempo de trabajo de un jornalero de 7.2 horas diarias con un sueldo aproximado de \$167.70 pesos mexicanos, teniendo un jornalero un contrato de 25 días aproximadamente (INEGI, 2017).

## Valor de la Producción

Conforme al Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera la producción de caña de azúcar presentó los siguientes resultados anuales los cuales pueden observarse en la Tabla 1.

Tabla 1. Producción anual de caña de azúcar en el periodo 2012-2018

Año de Producción	Cultivo	Superficie (ha)		Producción (ton)	Rendimiento (Ton ha <sup>-1</sup> )	PMR (\$ ton <sup>-1</sup> )	Valor Producción (miles de Pesos)
		Sembrada	Cosechada				
2018	C.A	847,523.0	771,109	56,385,368	73.12	781.6	44,074,843
2017	C.A	836,108.5	772,003	56,954,992	73.78	674.4	38,412,155
2016	C.A	848,964.2	781,054	56,446,821	72.27	549.1	30,994,949
2015	C.A	826,909.6	758,607	55,396,061	73.02	481.5	26,673,757
2014	C.A	828,745.1	761,969	56,682,689	74.39	462.7	26,230,481
2013	C.A	845,162.6	782,801	61,182,077	78.16	514.8	31,497,145
2012	C.A	777,242.7	735,126	50,946,483	69.30	663.6	33,808,086
2011	C.A	774,243.2	713,824	49,735,273	69.67	610.6	30,369,849
2010	C.A	734,818.7	703,943	50,421,619	71.63	619.7	31,250,311

Fuente: Elaboración en base a datos del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera consultado en: <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>, 07/03/2020. C.A.:Caña de Azúcar.

Como puede observarse en la tabla 1, la superficie cosechada anual se ha incrementado en 9.5%. No toda la superficie cultivada de caña de azúcar se cosecha, esto debido a factores como el mal funcionamiento de ingenios azucareros, en ciertas ocasiones las cosechas se incendian accidentalmente por las condiciones climatológicas como sequías o exceso de lluvia. Así mismo la producción anual en toneladas ha incrementado del 2010 al 2018 en 11.8%, llegando a su máximo histórico en el año 2013, al igual que la superficie cosechada dado que, se puede considerar que estos dos factores son directamente proporcionales. La producción anual se encuentra influenciada por las condiciones de financiamiento a los que pueden acceder los productores, dado que, mediante estos pueden comprar fertilizantes, herbicidas e insumos en general para ser aplicados en tiempo y forma en la plantación. De igual manera se evalúa el impacto económico de la producción anual de caña de azúcar en el país, con el cual se puede entender el contexto en el cual se encuentra actualmente dicho cultivo. El valor de producción anual de caña de azúcar se encuentra en su máximo histórico de los últimos 10 años, lo que representa un panorama favorable para la economía del país.

## 2. MATERIALES Y METODOS

Actualmente en México existen 51 ingenios en operación distribuidos en 15 estados pertenecientes al país los cuales son: Campeche, Chiapas, Michoacán, Morelos, Colima, Jalisco, Nayarit, Oaxaca, Puebla, Quintana Roo, San Luis Potosí, Sinaloa, Tabasco, Tamaulipas y Veracruz. El estado con mayor número de ingenios es Veracruz que cuenta con 18 ingenios,

seguido del estado de Jalisco con seis y San Luis Potosí con cuatro. El Servicio de Información Agropecuaria y Pesquera es el organismo que informa sobre las cifras de producción del país y la desglosa a nivel municipal. Para el año 2018, la cifra preliminar de cierre de producción en el país ascendió a 55.9 millones de toneladas, de acuerdo con el reporte presentado de avances y cosechas al mes de julio de dicho año (SIAP, 2018). En el 2018, las mayores producciones fueron dadas por los siguientes estados: Veracruz (37.5%) y Jalisco (13.1%) que en conjunto representan 28.3 millones de toneladas; que viene siendo 50.6% de la producción total nacional (SIAP, 2018). Hasta el 2018, fueron 261 municipios que cultivaron caña de azúcar en el país, 97 pertenecieron al Estado de Veracruz mientras que el Estado de México y Sinaloa participaron solamente con un municipio (SIAP, 2018). El municipio de Tenosique, Tabasco, participó con (0.9%) de la producción total nacional de azúcar.

Derivado del procesamiento de la caña de azúcar se obtiene un residuo lignocelulósico, el cual se considera que en promedio se obtiene 171 kg de residuos en base seca por cada 1000 kg de caña de azúcar procesada (Pohlan & Habana, 2008).

Considerando los datos anteriores, se puede estimar la cantidad de bagazo que se produciría en el país y que determinaría el valor potencial que tienen estos residuos para poder ser utilizados para producir etanol de segunda generación (2G), el cual se calcula de manera teórica en la tabla 2:

Tabla 2. Cantidad de bagazo potencial en base seca derivado de la producción anual

	Cantidad (Ton)
Producción Anual (2018)	56,385,368.24
Factor de Conversión	0.171
Bagazo Potencial (B.S <sup>1</sup> )	9,641,897.97

Fuente: Elaboración en base a datos del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera consultado en: <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/> 07/03/2020. B.S.<sup>1</sup>: Base Seca.

Considerando la metodología de Pereira, en el cual se caracterizaron diferentes tamaños de partículas de entre 0.6-12mm (milímetros), para obtener las propiedades fisicoquímicas del bagazo de caña de azúcar, para posteriormente se procede a analizar los componentes que están presentes, un ejemplo de dichas composiciones es la que se presentan en la tabla 4 como objeto de estudio se establecen variedades de caña de azúcar que se cosechan en Brasil y Cuba.

Tabla 4. Composición Química del Bagazo de Caña de Azúcar por Elemento

Composición Química (elemento)	Origen del Bagazo y Diámetro de los Gránulos		
	Cuba (6mm)	Brasil (6mm)	Brasil (12mm)
C <sup>1</sup>	46.9	47	47.2
H <sup>2</sup>	0.18	0.21	0.24
N <sup>3</sup>	5.49	5.98	5.77
O <sup>4</sup>	47.4	46.8	46.8

Humedad	16.3	6.7	6.6
Ceniza	1.7	5.5	5.5
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	1030-1150	1100-1260	1030-1090

Fuente: Elaboración en base a datos de (Basurto et al., 2015).

C<sup>1</sup>: carbono; H<sup>2</sup>: hidrógeno; N<sup>3</sup>: nitrógeno; O<sup>4</sup>: oxígeno. Los valores es presentados carbono, hidrógeno, nitrógeno, oxígeno, humedad y ceniza se encuentran en porciento peso.

Como podemos observar en la tabla 4, la composición química por elemento del bagazo de caña de azúcar no varía significativamente de una variedad a otra inclusive siendo de países (latinoamericanos) diferentes que presentan condiciones climatológicas, terrestres y atmosféricas diferentes por lo que se podría considerar aplicable para la región de Latinoamérica (Pereira et al., 2015)

Tomando como referencia esta información se puede considerar un área de oportunidad relevante para el sector azucarero en México.

### 3. RESULTADOS

Las estrategias de desarrollo sustentable inciden en la creación de una serie de indicadores ambientales que tienen como objetivo mitigar y dar seguimiento al impacto generado por el ser humano en los recursos naturales disponibles así como el efecto sobre el ambiente biofísico y socioeconómico de este, así como como los instrumentos diseñados para la aplicación de una política ambiental orientada al cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible establecidos en los compromisos de la agenda 2030 por las Naciones Unidas (Tavera et al., 2019). En México, la industria azucarera es una actividad de alto impacto social, debido a la generación de empleo con que se encuentra relacionado la economía y cultura del país (Aguilar, 2014). Las plantaciones de caña de azúcar en México son un proceso productivo semi-mecánico debido a que combinan trabajo manual con la ayuda de operaciones mecánicas (Ortiz et al., 2016). Los residuos orgánicos entre los que se encuentran los derivados del procesamiento de la caña de azúcar comúnmente terminan en rellenos sanitarios o depósitos a cielo abierto en los cuales generan escurrimientos llamados lixiviados que son contaminantes del subsuelo y mantos acuíferos. De igual manera la degradación de estos residuos genera una cantidad importante de gases de efecto invernadero como el metano (DOF, 2018).

Durante los últimos siglos el mundo ha enfrentado un aumento anual de temperatura de aproximadamente 0.7 °C, esperándose que el incremento sea mayor en los próximos años, con un intervalo de entre 0.8 °C y 2.6 °C para el año 2050. Como consecuencia, ha habido un decremento en el volumen de los glaciares y los océanos congelados del Ártico, así como la decoloración de los corales (Pérez et al., 2019). Hoy en día numerosos cambios se pueden percibir en el ambiente, presentándose huracanes de mayor magnitud, desiertos con mayores periodos de lluvia y, por el contrario, bosques con menores periodos de lluvia, todo esto como resultado del cambio climático en el mundo. Estos efectos son asociados a la emisión desmedida de gases de efecto invernadero (Leduc, 2009). De estos gases, el CO<sub>2</sub> representa más del 80%, siendo México, uno de los 20 países con mayor emisión en volumen de CO<sub>2</sub> (UCL, 2010).

Por lo consiguiente, tratar los residuos orgánicos generados del procesamiento de caña de azúcar brinda la posibilidad de generar beneficios ambientales, económicos y productivos significativos, además de que podría alargar la vida útil de los rellenos sanitarios, así como disminuir los gastos de disposición final, debido a la reducción del volumen que se desecharía.

### **Caracterización del bagazo de caña de azúcar**

La biomasa celulósica es utilizada como materia prima para la producción de biocombustibles de segunda y tercera generación, debido a que se considera como la fuente de carbohidratos más abundante de la tierra, y es el componente principal obtenido de desechos agrícolas; no obstante, el establecimiento de una economía basada en residuos lignocelulósicos depende en gran medida del proceso de sacarificación de los mismos (Mena et al., 2011). Las biomásas que se prueban para someterlos a procesos de termo-conversión suelen caracterizarse tomando en cuenta principalmente las siguientes propiedades: carbón fijo, ceniza, volátiles, humedad, así como el análisis de elementos como el Carbono (C), Oxígeno (O), Hidrógeno (H) y Nitrógeno (N). Las propiedades de la composición química varían dependiendo del material del que provengan (Méndez et al., 2011). El bagazo es un residuo lignocelulósico generado a la salida del último molino del procesamiento de caña de azúcar. Se encuentra constituido por 4 fracciones: fibra (45%), sólidos insolubles (2-3%) sólidos solubles (2- 3%), y agua (50%), por lo que es considerado como el co-producto de mayor tonelaje y volumen del proceso de caña de azúcar (Almazán et al., 2015). La composición química del bagazo de caña de azúcar es de aproximadamente de 41 a 44% en peso de celulosa, 25 a 27% de hemicelulosa, de 20 a 22% de lignina y de 8 a 10% de otros componentes, entre los cuales se contempla la ceniza (Gaston et al., 2000).

Según (Almazán et al., 2015) la estructura del bagazo se encuentra constituida por la fracción fibra (brinda rigidez) y el parénquima o meollo, presentando este último un nivel alto de absorción. La fracción fibra y la médula o meollo, es la parte orgánica insoluble en agua presente en el tamaño de la caña y se caracterizan por una marcada heterogeneidad morfológica (Almazán et al., 2015).

En la siguiente tabla 3 se encuentran las propiedades químicas de variedades mezcladas de bagazo de caña y la solubilidad que presenta en agua fría y Sosa caustica.

Tabla 3. Propiedades Químicas del Bagazo de Caña de Azúcar

I	Integral <sup>1</sup>	Fracción Fibra <sup>2</sup>	Médula <sup>3</sup>
Celulosa	46.6	47	41.2
Pentosas	25.2	25.1	26
Lignina	20.7	46.8	46.8
Extractivos A/B	2.7	2.3	2.9
Solubilidad en Agua Caliente	4.1	3.4	4.2
Solubilidad en Agua Fría	2.2	2.1	4
Solubilidad en Sosa al 1%	34.9	32	36.1
Cenizas	2.6	1.4	5.4

Fuente: Elaboración en base a datos de (Almazán et al., 2015).

Integral<sup>1</sup>: Mezcla de diferentes bagazos Fracción Fibra<sup>2</sup>: parte del bagazo integral que presenta fibras lignocelulosas Médula<sup>3</sup>: Células de almacenamiento para soluto de forma irregular y paredes finas y porosas. El bagazo integral es rico en celulosa y lignina principalmente, la fracción fibra, por el contrario, es rica en celulosa y lignina al igual que sus solubilidades en sosa son altas (Tabla 3). La médula representa el 35% de la producción total de bagazo por lo que es una fuente de biomasa importante debido a la composición que presenta siendo similar a la fracción fibra (Flores et al., 2008). La celulosa es un homo-polímero de D glucosa de cadenas moleculares lineales las cuales se encuentran unidas entre sí mediante enlaces secundarios, lo cual propicia la estructura cristalina que estos compuestos presentan y es un componente fundamental para la producción de diferentes productos (Almazán et al., 2015).

La hemicelulosa es un polímero con cadenas de hexosas y pentosas. Se puede considerar como el segundo compuesto de importancia en el bagazo de caña de azúcar dada la proporción que representa en este (Saavedra et al, 1987).

La lignina se considera como el tercer componente de importancia y se encuentra constituida, en mayor proporción por hidrocarburos aromáticos (Tiana & Fernández, 1977). El resto de los elementos, que conforman el bagazo de caña de azúcar, representan el 10% de la composición total y dentro del cual se encuentran incluidas las cenizas (Almazán et al., 2015).

La presencia de hemicelulosa y lignina en el bagazo producen una red hidrofóbica en la cual las microfibras de celulosa se encuentran retenidas (Carpita & Gibeaut, 1993). Dicha red limita el acceso de las enzimas celulíticas y bacterias a las microfibras por lo que el proceso enzimático se ve restringido. Otros factores que limitan el acceso a las fibras celulosa son el índice de cristalización de estas, los grupos acetilos de la hemicelulosa y la superficie presenta para el acceso enzimático (Gutiérrez et al., 2012). Por otro lado, el uso de combustibles fósiles como fuente de energía están asociados a diferentes problemas ambientales y políticos, la producción de biocombustibles partiendo de biomasa ha sido foco de atención en el mundo durante los últimos años (Jonker et al., 2015). Durante las últimas décadas se ha llevado a cabo diversas investigaciones con el objetivo de producir compuestos de interés económicos y social a partir de materiales lignocelulósicos mediante bio-refinerías que sean viables económicamente. La biomasa lignocelulosa es una compleja estructura constituida principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina (Palomo Briones et al., 2018). Entre los materiales utilizados con este propósito se encuentra el bagazo de caña de azúcar (BCA) siendo una de las fuentes con mayor potencial para producir combustibles de segunda generación en diferentes países (Umagiliyage et al., 2015).

#### **4. DISCUSIÓN**

Como resultado de estas investigaciones y con el objetivo de enfrentar dichas problemáticas, existen hoy en día compañías que se encuentran incursionando en la investigación, desarrollo e innovación de tecnología para la producción de biocombustibles de segunda generación (2G) a escala industrial, así como otros subproductos valorizables (Jonker et al, 2015). El bagazo de caña de azúcar (BCA) representa un residuo potencial para la obtención de subproductos como papel, fabricación de tableros aglomerados, producción de etanol 2G entre otros usos, presentándose esta última como la mejor valorizable en el mercado (Bohórquez et al., 2015).

El etanol de segunda generación (2G) producido a través de biomasa lignocelulósica es considerado como el biocombustible con mayor potencial para reemplazar los combustibles a base de petróleo los cuales están tratándose de ir disminuyendo su uso por los efectos adversos que ocasionan al medio ambiente (MacRelli, 2012). Para la obtención de etanol de segunda generación se utiliza principalmente residuos agrícolas o forestales (Palomo et al., 2018).

El etanol anhidro tiene principalmente dos funciones: como sustituto de las gasolinas o como materia prima para oxigenar las mismas, previa a haberse combinado en diferentes porcentajes comúnmente indicado por el contenido de etanol, se puede utilizar desde un 10% (E10) hasta un 85% (E85) en volumen de etanol y para vehículos con las adaptaciones necesarias para el uso de biocombustible (Becerra, 2019).

En los procesos de producción de biocombustibles de segunda generación se utilizan plataformas bioquímicas, en las cuales, mediante procesos fermentativos se logra obtener etanol. También se utilizan 2 principales plataformas termoquímicas con procesos de Gas To Liquids y Biomass To Liquids (siglas en inglés respectivamente GTL y BTL). Dichos procesos transforman de la celulosa contenida en el bagazo de caña para obtener combustibles líquidos como el etanol (Luque et al., 2012).

El primer paso para la obtención de etanol 2G, mediante bagazo de caña de azúcar, es realizar la conversión enzimática de celulosa presente en el material a transformar. Según estudios de Pereira y colaboradores en el 2015, el bagazo presenta una digestibilidad enzimática promedio de 22.2 g/L de glucosa obtenida en un periodo de tiempo de aproximadamente 24h y una conversión de celulosa a glucosa del 35.5 % (ECC%) (Pereira et al., 2015). Posteriormente se realiza la fermentación del hidrolizado del bagazo que contiene los azúcares presenta una conversión enzimática promedio del 65% de la glucosa disponible a una producción de 20 g/L de etanol (Pereira et al., 2015).

Sin embargo, la tecnología de 2G todavía se encuentra en proceso de maduración, contrario, a la tecnología del etanol convencional o también llamado de primera generación (1G), por lo que el proceso de 2G es menos factible económicamente hasta el momento (Macrelli et al., 2014).

Sin embargo, las tecnologías desarrolladas para el aprovechamiento (BCA) todavía deben ser desarrolladas y necesitan más investigación, tomando en cuenta los problemas sociales, ambientales, normativos y políticos asociados con el uso de combustibles para poder evadir los obstáculos que se presenten (Terán et al., 2016). Actualmente, la producción de etanol podría generar un impacto ambiental significativo, dado que el uso de tierras de cultivos podría cambiar para producir este tipo de biocombustibles, por lo que se pondría en riesgo la producción de alimentos (SENER, 2017).

Se debe analizar desde el concepto de economía ambiental de que las imperfecciones del mercado incentivan la aplicación de medidas correctivas basadas en multas, impuestos o estímulos económicos que incidan en la reducción de los impactos negativos para el medio ambiente (Tavera et al., 2019).

Entre los principales retos ambientales que se presentan para la inclusión del etanol al mercado están los siguientes (SENER, 2017):

Desarrollar tecnologías más eficientes que ayuden a mitigar los impactos ambientales y económicos.

Erosión de suelos y daño a mantos acuíferos por producción de materia prima para obtener etanol.

Deterioro de la calidad del agua y consumo de esta, debido al uso de pesticidas, fertilizantes sintéticos, que se emplean en las prácticas agrícolas.

Contaminación del aire debido a las emisiones de óxidos nitrosos y las reacciones que estos pueden generar en la atmósfera.

Para sobrellevar la industria del etanol en el país y a nivel internacional se deben considerar diferentes obstáculos económicos que se pueden presentar, ya sea de mercado, inversiones financiamiento o políticas públicas. Dentro de las acciones económicas que se pueden implementar para impulsar la industria del etanol se encuentran las siguientes (SENER, 2017):

Encontrar financiamiento mediante subsidios gubernamentales

Establecer política de precios estables para asegurar que no incrementen el precio de los alimentos derivados de la producción de los cultivos que se utilicen para producir etanol.

Establecer mecanismos de financiamientos adecuados para la creación de procesadoras industriales, para la producción de etanol a partir de materiales lignocelulósicos.

Incentivar el financiamiento a desarrollo e innovación de tecnología que ayuden a hacer eficiente el proceso productivo del etanol y a disminuir el riesgo para los inversionistas.

Analizando desde el panorama internacional, Estados Unidos y Brasil dominan la producción y el consumo mundial de etanol. Según datos de EPA (Environmental Protection Agency), se produjeron 1 millón de galones de etanol lignocelulósico durante el primer cuatrimestre del 2016 en Estados Unidos, mientras que Brasil es responsable de un poco menos de la mitad de las exportaciones mundiales de etanol.

Dentro de la normativa vigente presente en el país, se encuentran en primera instancia, la Ley general de Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar, la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA), la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LPGIR) y la Ley General de Cambio Climático (LGCC) las cuales establecen lineamientos generales a seguir para el sector azucarero y así como, el enfoque sustentable dentro del mismo sector (DOF, 2018).

Por otro lado, el compostaje se presenta como otra alternativa valorizable y se define como el proceso de transformación y mineralización de materia orgánica mediante microorganismos aerobios, en él se cual consideran 4 etapas: mesofílica, termofílica, enfriamiento y maduración, y es utilizado como una alternativa para el aprovechamiento de los subproductos de la caña de azúcar, pero debe acoplarse a la normativa mexicana (DOF, 2018). Se debe evaluar la calidad de las compostas que son obtenidas de la combinación de los subproductos que se derivan del proceso de moler la caña (Bohórquez et al., 2015).

De igual manera, el compostaje se debe acoplar a los lineamientos establecidos en la norma mexicana NMX-AA-180-SCFI-2018, la cual establece los métodos y procedimientos que se deben seguir para el tratamiento adecuado de la fracción orgánica de los residuos de manejo especial (RME), así mismo, busca establecer una gestión integral y valorizable del cual se logren obtener subproductos que fomenten prácticas agrícolas ecológicas y a la conservación y mejoramiento de los suelos (DOF, 2018).

Por otra parte, es importante destacar que el compostaje como acondicionador orgánico mejora a mediano y largo plazo las propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos, así como mejora la porosidad, consolida la estructura y consistencia del suelo y disminuye su densidad aparente.

En Colombia, por ejemplo, el compostaje de los residuos orgánicos se ha presentado como una alternativa para la utilización de las grandes cantidades de residuos orgánicos generados por los sectores agroindustriales o forestales, llegando a obtener una producción mayor a 24,000 ton mensuales de composta (Bohórquez et al., 2015).

Sin embargo, uno de los problemas que se presenta para el compostaje de los residuos de caña de azúcar es la degradación de este debido a su lento proceso, por esto se suele utilizar fertilizantes, que consisten en una mezcla de ingredientes formulados que estimulan el crecimiento microbiano, como catalizadores para acelerar la degradación, esta técnica ya ha sido evaluada presentando buenos resultados (Rao et al., 1995) y (FAO, 2013).

## 5. CONCLUSIONES

Se realizó una investigación bibliográfica de la situación actual de la industria azucarera en México, tomando como punto de partida el impacto económico, social y ambiental que se tiene derivado de este sector productivo, pasando por la estructura productiva azucarera y llegando a las alternativas valorizables para el aprovechamiento del residuo del procesamiento de caña de azúcar encontrándose delimitadas por la normativa vigente aplicable en el país y en el ámbito internacional. Se establece que la industria azucarera en el país es de relevancia económica y social por lo que la prevalencia de la misma mediante el desarrollo tecnológico para el aprovechamiento óptimo de los recursos disponibles es crucial para las familias mexicanas. Se consideran dos principales formas de aprovechamiento de los residuos generados por la industria azucarera en México, la producción de biocombustibles y el compostaje considerándose, las cuales se presentan cada una sus principales beneficios y limitaciones, dado las condiciones tecnológicas, financieras, ambientales, culturales y normativas en el país. Por lo tanto, establecer políticas públicas, de mercado y financieras, incluyentes e innovadoras en el desarrollo de estos subproductos valorizables podría dar valor agregado al proceso productivo de la caña de azúcar y garantizar la prevalencia de este sector productivo.

## 6. REFERENCIAS

- Aguilar Rivera, N. (2014). Gestión de factores limitantes para la diversificación de la agroindustria azucarera. *Revista Venezolana de Gerencia*. <https://doi.org/10.31876/revista.v19i65.11252>
- Almazán, O., Hernández, A., Brizuela, M. A., Carvajal, O., Arias, N., & Fernández, N. (2015). *Parte V El bagazo de la caña de azúcar. Propiedades, constitución y potencial*. 87.
- Basurto, R., Escamilla, A., Moya, S., Ramírez, E., & Becerra, J. (2015). Caracterización del bagazo de caña como biomasa vegetal. *Tecnología Química*. <https://doi.org/10.1590/2224->

6185.2015.2.%x

- Becerra, L. (2019). La industria del etanol en México. *Economíaunam*.
- Bohórquez, A., Puentes, Y. J., & Menjivar, J. C. (2015). Evaluación de la calidad del compost producido a partir de subproductos agroindustriales de caña de azúcar. *Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 15(1), 73. [https://doi.org/10.21930/rcta.vol15\\_num1\\_art:398](https://doi.org/10.21930/rcta.vol15_num1_art:398)
- Carpita, N. C., & Gibeaut, D. M. (1993). Structural models of primary cell walls in flowering plants: Consistency of molecular structure with the physical properties of the walls during growth. *Plant Journal*. <https://doi.org/10.1111/j.1365-313X.1993.tb00007.x>
- Diario Oficial de la Federación. (2018). Programa Nacional De La Agroindustria De La Caña De azúcar. Retrieved March 8, 2020, from [http://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5343244&fecha=02/05/2014](http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5343244&fecha=02/05/2014)
- Diario Oficial de La Federación. (2018). *NMX-AA-180-SCFI-2018*.
- FAO. (2013). Manual de compostaje del agricultor, Experiencias en América Latina. In *Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe*.
- Gaston, C., Bambanaste, R., Correa, J., Alfonso, G., & Herryman, M. (2000). Manual de los Derivados de la Caña de azúcar. *ICIDCA*, 40.
- Gutiérrez, R. B., Martínez, A. E., Vega, S. M., Rodríguez, E. R., & Becerra, J. B. (2012). Composición química, digestibilidad y cinética ruminal de la digestión de residuos agrícolas tratados con explosión de vapor. *Revista Mexicana De Ciencias Pecuarias*.
- INEGI. (2017). Encuesta Nacional Agropecuaria Ena Boyaca-2012. 1, 1(1), 24. Retrieved from <http://www.simco.gov.co/>
- Javier, F., Ayón, H., & Valencia, C. (2013). El sector cañero en Nayarit desde una perspectiva organizacional y ambiental. *La Fundación Universitaria Andaluza Inca Garcilaso*, 1–215. Retrieved from <http://www.eumed.net/libros-gratis/2013a/1333/index.htm>

- Jonker, J. G. G., van der Hilst, F., Junginger, H. M., Cavalett, O., Chagas, M. F., & Faaij, A. P. C. (2015). Outlook for ethanol production costs in Brazil up to 2030, for different biomass crops and industrial technologies. *Applied Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.090>
- Leduc, S. (2009). *Development of an optimization model for the location of biofuel production plants*.
- Luque, De la Osa, Campero, Romero, V. & S. (2012). Design and Development of catalysts for Biomass-To-Liquid-Fischer- Tropsch (BTL-FT) Processes for Biofuels Production. *Energy and Environmental Science*. <https://doi.org/10.1039/C1EE02238E>
- Macrelli, S., Galbe, M., & Wallberg, O. (2014). Effects of production and market factors on ethanol profitability for an integrated first and second generation ethanol plant using the whole sugarcane as feedstock. *Biotechnology for Biofuels*. <https://doi.org/10.1186/1754-6834-7-26>
- MacRelli, S., Mogensen, J., & Zacchi, G. (2012). Techno-economic evaluation of 2 nd generation bioethanol production from sugar cane bagasse and leaves integrated with the sugar-based ethanol process. *Biotechnology for Biofuels*. <https://doi.org/10.1186/1754-6834-5-22>
- Mena, X., Barahona Pérez, F., Alzate Gaviria, L., Rodríguez Vázquez, R., Tzec Simá, M., Domínguez Maldonado, J., & Canto Canché, B. B. (2011). Saccharification with phanerochaete chrysosporium and pleurotus ostreatus enzymatic extracts of pretreated banana waste. *African Journal of Biotechnology*. <https://doi.org/10.5897/AJB10.1470>
- Méndez, M. A. P., Hernández, R. S., Palma, D. J., & García, S. S. (2011). *Caracterización química del compostaje de residuos de caña de azúcar en el sureste de México*.
- Muñiz, K. G. D. (2016). *La Normatividad Ambiental y la Sustentabilidad de las Empresas Públicas en México*.
- Ortiz-Laurel, H., Rosas-Calleja, D., Rössel-Kipping, D., Salgado-Garcia, S., & Debernardi de la Vequia, H. (2016). Efectividad y rentabilidad de técnicas de siembra de caña de azúcar. *AGROProductividad*, 9(3), 40–47.

- Palomo Briones, R., López Gutiérrez, I., Islas Lugo, F., Galindo Hernández, K. L., Munguía Aguilar, D., Rincón Pérez, J. A., ... Razo-Flores, E. (2018). Agave bagasse biorefinery: processing and perspectives. In *Clean Technologies and Environmental Policy* (Vol. 20). <https://doi.org/10.1007/s10098-017-1421-2>
- Pereira, S. C., Maehara, L., Machado, C. M. M., & Farinas, C. S. (2015). 2G ethanol from the whole sugarcane lignocellulosic biomass. *Biotechnology for Biofuels*. <https://doi.org/10.1186/s13068-015-0224-0>
- Pérez-Lechuga, G., Aguilar-Velázquez, S. L., Cisneros-López, M. A., & Martínez, F. V. (2019). A model for the location and scheduling of the operation of second-generation ethanol biorefineries. *Journal of Mathematics in Industry*. <https://doi.org/10.1186/s13362-019-0060-0>
- Pohlan, J., & Habana, L. (2008). Estimación De La Producción De Residuos Agrícolas En Agroecosistemas De Caña De Azúcar. *Cultivos Tropicales*, 29(3), 17–21.
- Rao, N., Grethlein, & Reddy, H. C. A. (1995). EFFECT OF C/N RATIO AND MOISTURE CONTENT ON THE COMPOSTING OF POPLAR WOOD. *Biotechnology Letters*, 29(8), 571.
- Saavedra, F., Gonzales, J., & Cordero, D. (1987). *Studies of sugar cane cell wall polysaccharides*.
- SAGARPA. (2017). Planeación Agrícola Nacional. *Planeación Agrícola Nacional 2017-2030*, 1(1), 1–14.
- SENER. (2017). *Reporte de Inteligencia Tecnológica “Bioetanol.”*
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. (2018). La producción de caña de azúcar supera los 55 millones de toneladas en 2018\* | Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera | Gobierno | gov.mx. Retrieved February 10, 2020, from <https://www.gob.mx/siap/articulos/la-produccion-de-cana-de-azucar-supera-las-55-millones-de-toneladas-en-2018?idiom=es>
- Tavera, M., Salinas, E., Guadarrama, A., & Cavita. (2019). *La sustentabilidad y Crecimiento*

*Económico en México*. México.

Terán-Hilares, R., Reséndiz, A. L., Martínez, R. T., Silva, S. S., & Santos, J. C. (2016). Successive pretreatment and enzymatic saccharification of sugarcane bagasse in a packed bed flow-through column reactor aiming to support biorefineries. *Bioresource Technology*, 203, 42–49. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.12.026>

Tiana, C., & Fernandez, D. (1977). *Caracterización de la lignina hidrolítica de bagazo y determinación de grupos funcionales*.

Umagiliyage, A. L., Choudhary, R., Liang, Y., Haddock, J., & Watson, D. G. (2015). Laboratory scale optimization of alkali pretreatment for improving enzymatic hydrolysis of sweet sorghum bagasse. *Industrial Crops and Products*. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.05.044>

United Cities and Local Governments. (2010). *Second Global Report on Decentralization and Local Democracy Local Government Finance: The Challenges of the 21st Century. Challenges*.