Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica

Página principal: www.riiit.com.mx

Uso de etanol biocombustible de caña de azúcar en vehículos a gasolina en México. ¿Estrategia de seguridad energética y desarrollo sostenible?

Use of sugarcane biofuel ethanol in gasoline vehicles in Mexico. A strategy for energy security and sustainable development?

Aguilar-Rivera, N.

Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias. Amatlán de los Reyes. Universidad Veracruzana. Veracruz. México. C.P.94945.
naguilar@uv.mx

Innovación tecnológica: Producción sustentable de bioethanol, combustible de caña de azúcar mediante prácticas agroecológicas y tecnologias verdes.

Área de aplicación industrial: Reconversión de ingenios azucareros de baja productividad a destilerías, integrando sistemas de tratamiento de vinazas para fines energéticos.

Recibido: 20 noviembre 2023
Aceptado: 18 abril 2024

Abstract

This paper describes the production of sugarcane ethanol in Mexican sugar mills as the most attractive option from the point of view of availability of renewable raw materials, energy security, rural development, revalorization of sugarcane as a renewable raw material and mitigation of greenhouse gases emitted by gasoline-powered vehicles at the national level. A systematic review methodology was used to evaluate the complexity of its introduction as a biofuel, physicochemical properties, public policy instruments and technology to convert sugar mills into biorefineries, taking Brazil as the basis for analysis, as the world's largest producer of sugarcane ethanol, leader in technological development, production, ethanol commercialization and successful public policies to analyze the Mexican context, available technologies and its experience with the development of public policies to encourage its production and use. This work concludes that for its successful implementation as an oxygenate in gasoline blends, it is necessary to build a national ethanol plan with the participation of all the actors in the sugarcane value chain, based on international experience, government leadership with the creation of competitive advantages and the transfer to sugar mills developed by Mexican researchers.

Keywords: Sugar agro-Industry, Public policies, National ethanol program.

Resumen

El presente trabajo describe la producción de etanol de caña de azúcar en ingenios azucareros en México, como la opción más atractiva desde el punto de vista de disponibilidad de materias primas renovables, seguridad energética, desarrollo rural, revaloración de la caña de azúcar como materia prima renovable y mitigación de gases de efecto invernadero emitidos por vehículos a gasolina a nivel nacional. Se empleó una metodología de revisión sistemática con el objetivo de evaluar la complejidad de su introducción como biocombustible, propiedades fisicoquímicas, instrumentos de política pública y tecnología para reconvertir ingenios azucareros en biorefinerias tomando como base de análisis a Brasil, como el mayor productor mundial de etanol de caña de azúcar, líder en el desarrollo tecnológico, producción, comercialización de etanol y políticas públicas exitosas para analizar el contexto mexicano, las tecnologías disponibles y su experiencia con el desarrollo de políticas públicas para incentivar su producción y uso. Este trabajo concluye que para su implementación exitosa como oxigenante en mezclas con gasolina, es necesario construir con la participación de todos los actores de la cadena de valor de la caña de azúcar un plan nacional de etanol, basado en la experiencia internacional, el liderazgo gubernamental con la creación de ventajas competitivas y la transferencia de tecnología a ingenios azucareros desarrollada por investigadores mexicanos.

Palabras clave: Agroindustria azucarera, Políticas públicas, Plan nacional de etanol.

Introducción

El etanol es una molécula orgánica de fórmula CH_3-CH_2-OH (C_2H_6O) que tradicionalmente ha sido producido a partir de la fermentación anaerobia de azúcares simples derivados de cultivos o subproductos como la melaza de caña o remolacha azucarera, jugo o jarabe de caña, hidrólisis de almidones como maíz, yuca, trigo, cebada, etc. y biomasa lignocelulósica como bagazo de caña, residuos forestales o agave, para posteriormente pasar por el proceso de destilación del mosto y dependiendo de su pureza se emplea como el segundo disolvente universal en las industrias alimentaria, farmacéutica y química y en bebidas alcohólicas (Tanwar et al. 2023).

Sin embargo, su uso actual más importante radica en su capacidad para oxigenar y potenciar el desempeño y octanaje de la gasolina sustituyendo así a los oxigenantes comerciales principalmente el MTBE (Methyl tert-butyl ether), producido a partir de la reacción de metanol e isobutileno, que ha permitido desde su introducción en 1990s reemplazar los compuestos altamente tóxicos como el tetraetilo de plomo o TEL $(CH_3CH_2)_4Pb$ y reducir las emisiones contaminantes clave, azufre y BTEX (benceno, tolueno, etilbenceno y xileno) (Barua et al. 2023; Zhang et al. 2023).

La producción de etanol, para su uso en gasolinas, ha tenido su mayor aplicación comercial en el presente siglo XXI, se han llevado a cabo importantes desarrollos tecnológicos para incrementar su eficiencia de conversión de las materias primas de origen alimentario (melazas de caña o remolacha, almidón de cereales, etc.) vía fermentación, se han establecido nuevas rutas como el etanol de origen lignocelulósico, etc. y el desarrollo de tecnología de punta para la producción sostenible y el uso de subproductos de procesamiento, a la par de

estrategias de negocio principalmente en Brasil de caña de azúcar y en Estados Unidos de América con maíz (Marques et al. 2024; Sabour et al. 2021).

Sin embargo, en algunos países como México, productores de hidrocarburos, los factores socioeconómicos, ambientales, de política pública, de incertidumbre de los potenciales usuarios, entre otros han restringido su desarrollo a pesar de existir desarrollos tecnológicos domésticos multi, inter y transdiciplinarios. Por ejemplo, Aburto & Martínez-Hernández (2021) determinaron que con un análisis técnico-económico la producción de etanol de caña de azúcar debería llevarse a cabo empleando el 20% de la caña para la producción de azúcar reduciendo la presión de venta este commoditie para los ingenios azucareros en el mercado internacional incrementado la rentabilidad del cultivo de caña. Montiel-Rosales et al. (2022) evaluaron el potencial de las vinazas de las destilerías para bioproductos sobre el paradigma de la economía circular. Sadhukhan et al. (2023) examinaron las necesidades de políticas publicas basadas en la bioeconomía circular para el establecimiento de biorefinerias en México. Becerra-Pérez (2023) determinaron las rutas políticas para el establecimiento del mercado de etanol. Yaverino-Gutiérrez et al. (2024) revisaron los avances en biotecnología para la optimización del proceso de fermentación a etanol. Castro-Montoya et al. (2023) analizaron la optimización del procesamiento de melazas para etanol con herramientas de simulación.

En ese sentido, es fundamental revisar los impactos socioeconómicos y ambientales de los biocombustibles y las metas, objetivos y estrategias de implementación que han llevado a cabo otros países para desarrollar programas nacionales de etanol biocombustible para impulsar nuevas cadenas de valor agroindustrial, mejorar la calidad del aire, reducir la dependencia de gasolina importada y los precios de venta de los combustibles para el transporte (Verma & Goel, 2023; Chauhan et al. 2023).

Aunque en México se han registrado mejoras notables en la calidad del aire en los últimos años al mezclar MTBE en su gasolina (Salcido *et al.* 2019). Sin embargo, el crecimiento de la población de vehículos, escasa mejoría en los rendimientos de combustibles producidos en las refinerías existentes y el bajo desarrollo del transporte público, se muestran como las causas principales del aumento en el consumo de combustibles fósiles importados y de las emisiones de CO_2, ozono y otros contaminantes (Koupal et al. 2024; González et al. 2018).

Además, compuestos orgánicos volátiles como el benceno, tolueno, etilbenceno y xileno (BTEX) se emiten al mismo tiempo a la atmósfera, lo que genera una exposición crónica de los residentes cercanos y así plantea problemas de salud pública (Barros *et al.* 2019). Existen otros oxigenantes que son bioéteres de primera generación, los cuales son producidos por la reacción de etanol con isoolefinas, como el isobutileno. Los más importantes son dimetil éter (DME), metil teritbutilbutilo éter (MTBE), dietil éter (DEE), ter-amil metil éter (TAME), etil ter-butil éter (ETBE) y ter-amil etil éter (TAEE). Sin embargo, estos compuestos ya no se emplean en países desarrollados desde la década de 2000 y han sido sustituidos por etanol debido a los efectos negativos para la salud y están asociados con la inhalación, lo que aumenta potencialmente el riesgo de cáncer (EPA, 2019).

El etanol contiene aproximadamente un 30% menos de energía que la gasolina lo que resulta en una menor volatilidad y un mayor consumo de combustible por kilómetro, pero produce menos contaminantes al aire (Sanap

et al. 2023). Por lo tanto, este trabajo plantea que es necesario que los usuarios mexicanos tengan la información actualizada acerca de las propiedades del etanol como biocombustible u oxigenante, los impactos potenciales de orden tecnológico, socioeconómico y ambiental al mezclarse con gasolinas convencionales del mercado nacional y los empresarios el acceso a desarrollos de carácter tecnológico, socioeconómico, ambiental y de gestión así como la certidumbre política, estímulos fiscales, reducción de externalidades como el impacto del crimen organizado para invertir en la reconversión de ingenios, actualmente no competitivos en la producción de azúcar, en biorefinerias de etanol, cogeneración y otros bioproductos.

Lo anterior se plantea como una opción energética y de acción contra el cambio climático en el mediano plazo, derivado de que la producción de etanol en ingenios azucareros a partir de melazas ha mostrado una reducción significativa de hasta 92,2% en relación al inicio del siglo XXI y aunque han existido leyes para bioenergéticos y la controversial reforma energética de 2013 aplicable a las empresas PEMEX y CFE, derogada por el gobierno de la Cuarta Transformación (4T) (Montaño & Tornel, 2022), no se ha fomentado la producción de etanol derivado de la principal agroindustria de México y se continúa invirtiendo en la importación y producción nacional de gasolina, como única opción para la movilidad del autotransporte, y no se visualiza un cambio en políticas energéticas y climáticas en el próximo gobierno federal 2024-2030 (Suárez-Dávila, 2024).

El objetivo de este trabajo fue llevar a cabo un análisis de factores tecnológicos, socioeconómicos, de política pública, retos y opciones para el establecimiento de un plan nacional de etanol de caña de azúcar producido en ingenios azucareros, destilerías o biorrefinerías en México.

El trabajo se estructura con el análisis del impacto socioeconómico y ambiental actual de los actuales combustibles fósiles, los retos tecnológicos de los biocombustibles como el etanol en los actuales motores a gasolina, mercado mundial de etanol y rutas de producción, el contexto de Brasil como principal productor mundial y los factores limitantes para el desarrollo del mercado de este biocombustible en México.

Métodos

La revisión sistemática fue llevada a cabo para analizar las propiedades del biocombustible, principales tecnologías de producción, factores limitantes e instrumentos de política pública llevados a cabo en Brasil, como el mayor productor mundial de etanol de caña de azúcar y otros países, el contexto mexicano y su experiencia en investigación y el desarrollo de políticas públicas en la posible implementación de este biocombustible de acuerdo a las metodologías de Koutsos et al. (2019) acerca de construir un marco de revisión sistemática para las ciencias agropecuarias, base material de la producción de bioetanol; Mengist et al. (2020) propone emplear el método PSALSAR para ciencias ambientales que consiste en definir el protocolo o alcance de la investigación, llevar a cabo una síntesis y categorización de la información, análisis de los datos y elaborar el reporte y Xiao & Watson, (2019) que sugiere las etapas: 1) formulación del tema de investigación; 2) elaborar y validar un protocolo de revisión; 3) búsqueda de bibliografía; 4) selección de criterios de inclusión; 5) evaluación de la calidad de las fuentes; 6) extracción de información de las fuentes; 7) análisis y síntesis de los datos; y 8) reporte de las conclusiones. Este conjunto de metodologías fue la base para llevar a cabo una revisión

sistemática y definir subtemas. Para la búsqueda se emplearon en primera instancia palabras clave y categorías como “ethanol biofuel”, “sugarcane ethanol”, “public policies and mandates”, “Brasil”, “México” en idiomas inglés y español, entre otras para extraer y categorizar los archivos mediante una cadena de investigación. Posteriormente las búsquedas de información se refirieron al contexto mexicano buscando los diagnósticos, bases de datos y desarrollos tecnológicos de investigadores de universidades públicas y privadas y centros de investigación en los portales de Web of Science, Scopus, Google Scholar, Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar (CONADESUCA) y Biblioteca Virtual de Universidad Veracruzana lo cual permitió establecer los puntos clave y temáticas para el análisis e informar los resultados y conclusiones acerca de la sostenibilidad de este biocombustible.

Impactos del uso de combustibles fósiles

El deterioro del estado de los componentes de la atmosfera y generación de gases de efecto invernadero (GEIs) en las grandes y medianas ciudades es derivado de una sinergia de factores meteorológicos, fisiográficos y antropogénicos. De acuerdo con el Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero (INEGYCEI, 2021) del total de las emisiones, la mayor cantidad corresponden al consumo de combustibles fósiles; los sistemas de producción pecuaria; procesos industriales; manejo de residuos; emisiones por extracción de petróleo, gas y minerías y actividades agrícolas. Por otra parte, como resultado de la deforestación masiva, en México se absorbe tan solo 35% de los GEIs, equivalente a 173 Mt de CO_2 por la biota restante y 85.8 millones de hectáreas de los suelos están dañados, lo que limita también la absorción de CO_2 en ellos. El resto de los GEIs se acumula en el mar, provocando el incremento de su temperatura en profundidades mayores a 2 mil metros (Oswald, 2017). En este sentido, Islas-Samperio et al. (2019) llevo a cabo recomendaciones tecnológicas para transitar a una sociedad de baja emisión de carbono como incrementar la eficiencia energética de vehículos ligeros y establecer límites de emisiones, fomentar el uso del transporte público con la introducción de autobuses híbridos, sistemas de bicicletas públicas, desarrollo urbano orientado al transporte sostenible, el uso de etanol y biodiesel, entre otros sin que a la fecha se hayan establecido programas, planes o estrategias concretas.

Esta reducción se deberá lograr a través de eficaces políticas públicas con escenarios de cambio climático, que incluyan la mejora continua de los combustibles actuales y la adopción paulatina de biocombustibles, tecnologías de control ambiental y la renovación del parque vehicular privado y público, entre otras. El conjunto de estas acciones requiere de la participación de todos los sectores de la sociedad (Elizondo & Boyd, 2017; Yeboah & Shaik, 2021).

En este sentido, se ha demostrado con los estudios de Rimkus et al. (2024) que el desempeño de los motores y el rendimiento de combustible no cambia significativamente con el uso de mezclas gasolina-etanol ya que su efecto antidetonante aumenta la eficiencia del motor. Es decir, agregar etanol 5%, 10%, 15% y 25% en volumen a la gasolina convencional aumentaría la velocidad de reacción, reduciría la emisión no deseada de GEIs y mejoraría el perfil térmico en la zona de combustión. Al incrementar la fracción en volumen del biocombustible da como resultado una reducción en los componentes de COx y NOx de los gases de escape (Jassim *et al.* 2019). El potencial de mezclar etanol con gasolina pura para producir combustibles flexibles es regulado por la norma internacional: ASTM D5798 - 13a “*Standard*

Specification for Ethanol Fuel Blends for Flexible-Fuel Automotive Spark-Ignition Engines”.

El etanol de grado combustible, producido de la caña de azúcar (cultivo de mayor distribución mundial), bajo un programa formal de políticas públicas en condiciones tecnológicas y de sostenibilidad con uso de subproductos de proceso, tiene ventajas sobre la gasolina y MTBE, entre otros oxigenantes para reducir las emisiones de GEIs y mejorar la calidad del aire en las áreas metropolitanas (Prasad et al. 2021).

Por lo tanto, México como el 6to productor mundial de caña de azúcar equivalente al 3,1% (Di Tommaso et al. 2024), debe diversificar sus fuentes de energía basadas en renovables disponibles, ya que es exportador de petróleo (energía primaria), pero demanda importar de Estados Unidos más del 50% de gasolina (energía secundaria) que emplea el autotransporte y su bienestar económico depende de las fluctuaciones del precio internacional del petróleo. Por lo que de no sustituir parcialmente gasolina el país continuara importándola, pues no es competitivo producir gasolina en nuevas instalaciones petroquímicas debido a que a nivel mundial hay una sobreoferta de gasolina y la demanda se está reduciendo por la incorporación de etanol en mezclas desde 5 hasta el 100% y la incorporación de vehículos híbridos, eléctricos y de biohidrógeno (Ramírez-Díaz et al. 2023). Por lo que, ante este escenario, las políticas nacionales requieren promover la producción de energía renovable y menor dependencia de los hidrocarburos (gas licuado, gas natural, combustóleo, coque de carbón, gasolinas y diésel) para propiciar una seguridad energética integral de largo plazo (Becerra-Pérez et al. 2023; Astiazarán *et al.* 2020; Koupal, & Palacios, 2019; Galicia-Medina *et al.* 2018).

En este sentido, la gasolina de Estados Unidos contiene en mezcla de 10% o como combustible flexible hasta 85%. En los últimos cincuenta años, como nación ha instituido políticas federales diseñadas para aumentar la prevalencia y el uso de etanol como *The Renewable Fuel Standard (RFS)* actualmente vigente y reducir el consumo de gasolina (Konur 2023 y Engebretson and Diamond, 2019). Diversos autores desde principios del siglo XXI han enfatizado que México, a pesar de tener amplios recursos fósiles aún no ha desarrollado la capacidad instalada suficiente, infraestructura, ambiente competitivo primeramente para ser autosuficiente en el consumo de gasolinas, por lo que el establecimiento de opciones renovables como la biomasa de la caña de azúcar podría ser, bajo acuerdos políticos, estímulos fiscales, transferencia y adopción de tecnologías la alternativa real y competitiva en el transporte.

En el contexto internacional, actualmente el etanol es un biocombustible líquido esencial para el transporte. La revisión de Müller et al. (2023); Li et al. 2024; Rial, (2024) reportaron avances recientes en generaciones y tipos. En general, los autores los clasifican en cuatro generaciones tecnológicas basadas en el tipo de materia prima que procesan. Primera utiliza biomasa comestible la cual genera grandes controversias porque el etanol compite con las necesidades mundiales de alimentos. Segunda emplea biomasa no comestible como subproductos lignocelulósicos agroindustriales, pero aún existen algunas limitaciones relacionadas con la rentabilidad involucrado en escalar la producción a un nivel comercial. Tercera usa microorganismos como materia prima, y cuarta se enfoca en transformar estos microorganismos genéticamente para lograr mayor productividad y la creación de un reservorio de carbono artificial. Esta revisión concluye mencionando que los biocombustibles de primera y segunda

generación están en riesgo de satisfacer la creciente demanda por la competencia con el cambio de uso de suelo e insumos para la producción de alimentos. Por lo tanto, los esfuerzos de desarrollo deben centrarse en la tercera y cuarta generación, específicamente la ingeniería genética de algas. Actualmente, las principales materias primas para biocombustibles son los llamados "cultivos flexibles", que son productos agrícolas que tienen usos múltiples o flexibles en diversas industrias, incluidas alimentos, forrajes, aplicaciones industriales y bioproductos (Dharani et al. 2024). Soya, caña de azúcar, palma aceitera y maíz son ejemplos de cultivos flexibles. Por su parte, Haldar & Purkait, (2020) con un análisis crítico sobre el avance de las diferentes tecnologías de pretratamientos de biomasa exploran factores para comprender las interacciones involucradas durante la sacarificación de la biomasa, procesos de fermentación e ingeniería metabólica.

De la extensa literatura sobre el etanol, los trabajos de Prasad et al. (2024); Moreira et al. (2023) y Callegari et al. (2020) se centran en el análisis de materias primas, tecnologías de punta en destilerías, subproductos, propiedades de mezclas de etanol-gasolina, vehículos de combustible flexible (FFV), impactos ambientales, balance energético, emisiones de GEIs, etanolquímica y políticas públicas y mandatos a nivel mundial. Por lo tanto, teniendo en cuenta el extenso conocimiento tecnológico acerca de su cadena de producción y la infraestructura existente a nivel mundial, principalmente en Brasil con caña de azúcar y Estados Unidos de América con maíz antes y después de la pandemia de COVID-19 (Tabla 1 y 2).

Tabla 1. Producción de etanol (millones de Litros) antes de la pandemia de COVID-19.

Región	2014	2015	2016	2017	2018	2019	Porcentaje
Estados Unidos	54.1806	56.0506	58.3445	60.3243	60.7975	59.8095	54%
Brasil	25.5894	27.255	25.5894	25.9679	29.9804	32.6302	30%
Unión Europea	5.4699	5.2504	5.2125	5.2996	5.4131	5.4510	5%
China	2.4037	3.0775	3.1987	3.2555	3.9747	3.4069	3%
Canadá	1.9306	1.6504	1.6504	1.7791	1.8170	1.8927	2%
India	0.3218	0.7382	1.0410	0.7949	1.5142	2.0063	2%
Tailandia	1.1735	1.2643	1.2189	1.4006	1.4763	1.5899	1%
Argentina	0.6057	0.7987	0.9993	1.0978	1.0978	1.0978	1%
Resto del mundo	3.2744	1.4801	1.8549	1.5672	2.0782	2.2712	2%

Fuente: (Elaboración propia con datos de https://ethanolrfa.org/markets-and-statistics/annual-ethanol-production).

Tabla 2. Producción de etanol (millones de Litros) después de la pandemia de COVID-19.

Región	2020	2021	2022	2023	Porcentaje
Estados Unidos	52.7724	56.8417	58.1477	59.1281	53%
Brasil	30.6656	27.713	28.0158	31.2713	28%
Unión Europea	5.0384	5.3374	5.5267	5.2996	5%
China	3.5583	3.4069	3.4826	3.5962	3%
Canadá	1.6239	1.6429	1.6921	1.7413	2%
India	1.9684	3.29331	4.6561	5.4131	5%
Tailandia	1.4763	1.3249	1.4006	1.4006	1%
Argentina	0.7949	1.0221	1.1735	1.1356	1%
Resto del mundo	2.3469	2.5741	2.7331	2.8769	3%

Fuente: (Elaboración propia con datos de https://ethanolrfa.org/markets-and-statistics/annual-ethanol-production).

De acuerdo con Castañeda-Ayarza y Barbosa-Cortez (2017), Moreira & Goldemberg, (2023); y Shelar, (2023) la producción y el consumo de etanol ha estado creciendo a tasas tan altas como 12% por año en gran parte al incremento de la productividad de maíz y caña de azúcar debido a que las materias primas representan alrededor del 70% de los costos de producción de etanol. Torroba et al. (2023) concluyeron que algunos gobiernos latinoamericanos quieren estimular la producción nacional de etanol mediante el uso de rutas de producción bien conocidas y materias primas que ya están disponibles en sus países, donde se cultiva caña de azúcar parte de ella podría usarse para producir etanol combustible en un sistema de producción paralelo similar a la utilizada en Brasil.

En cuanto a la competencia entre los combustibles y los alimentos, la caña de azúcar tiene la gran ventaja de permitir la producción de azúcar y etanol con una considerable flexibilidad en la elección del porcentaje de productos finales y la materia prima (jugo, melaza, jarabe, biomasa o combinaciones) a emplear para producirlos con el beneficio de incrementar la captura de carbono o descarbonización de la agroindustria y biorefinerias de la caña de azúcar (Azevedo & Lagarinhos, 2024; Silveira et al. 2023).

Aunque existen actualmente diferentes estrategias tecnológicas como la combinación de química y biotecnología (fermentación, hidrólisis separadas o simultáneas). No obstante, estas mejoras incrementan los costos de producción y medioambientales si se emplean insumos derivados de fuentes no renovables (Bhatnagar & Khurana, 2023). La revisión de Yaverino-Gutiérrez et al. (2024) presenta una visión general de los avances en la producción de bioetanol acerca de los impactos económicos, sociales y ambientales asociados que en los proyectos gubernamentales de México son escasamente considerados debido a que la expansión de la producción de etanol se ve obstaculizada por la falta de consolidadas y estimulantes políticas gubernamentales domésticas para disminuir la dependencia del petróleo y su volatilidad derivado de su geopolítica.

En México, el rendimiento actual de etanol de 96° G.L. por el proceso convencional es 223.787 litros de etanol/tonelada de melaza o Miel final 85° Brix (CONADESUCA, 2023). Es decir, el uso de melaza podría contribuir al desarrollo del mercado de biocombustibles sin causar reducción significativa en el mercado de caña y azúcar. Al mismo tiempo, el esquema representa una oportunidad de transición de la agroindustria de la caña de azúcar y los ingenios azucareros a diversificarse y amortiguar los tradicionales impactos negativos del inestable mercado azucarero para mayor competitividad. Es decir, la decisión de producir etanol a partir de melazas, jugo de caña o bagazo es muy complejo; dependerá de otros factores, tales como mercado actual, subsidios a la agroindustria, estímulos fiscales, acuerdos comerciales, un programa nacional de etanol y políticas públicas eficientes de mezcla con gasolina (Aguilar-Rivera, 2022). Lo anterior no ha funcionado ya que las políticas públicas no han incentivado su producción y a partir de la zafra 1999/2000 a la fecha se ha reducido significativamente su producción en ingenios azucareros a pesar de que la producción de caña de azúcar se ha incrementado (Figura 1).

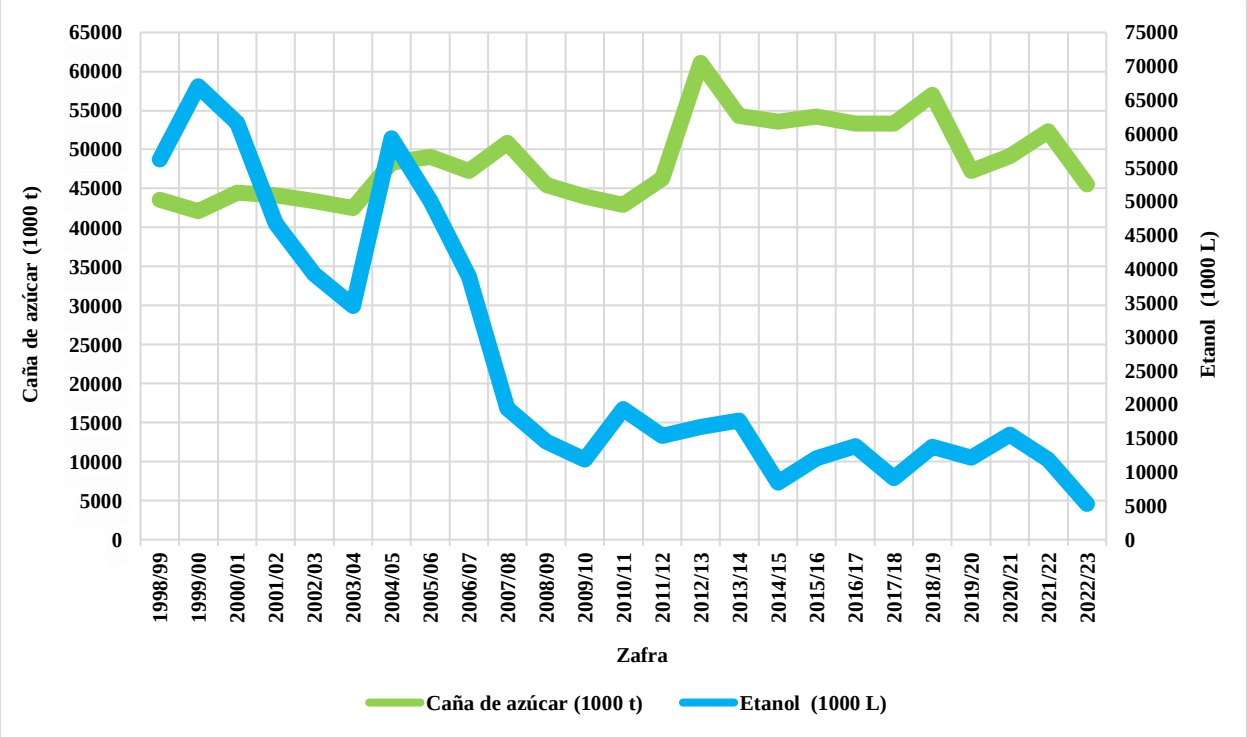


Figura 1. Producción de etanol en ingenios azucareros de 1999 a 2023 (datos de CONADESUCA, 2023).

En este sentido la producción de etanol de caña de azúcar o sus subproductos (residuos de cosecha, bagazo, melazas) debe llevarse a cabo con la sinergia de productos químicos, energía y otros commodities ya que el reemplazo de los recursos fósiles que actualmente proveen más del 90% de necesidades energéticas y materias primas de la industria química y energética, en combinación con una emisión reducida de CO_2 es uno de los retos más complejos del Antropoceno (Suali & Suali, 2023). La biomasa cañera como un recurso disponible a nivel mundial se ha propuesto como una materia prima alternativa para la producción de bloques de construcción básicos o moléculas, que podrían reemplazar parcial o incluso por completo a los actualmente basados en fósiles utilizados en procesos químicos bien establecidos, así como el desarrollo a mediano plazo de la etanol química (Matheus & Sousa-Aguiar, 2024), sucroquímica (Crucho & Barros, 2023) y lignoquímica (Martín et al. 2023) desarrollados desde finales de 1960s (Paturau, 1989) (Figura 2) como opciones tecnológicas para diversificar el uso de azúcar, melazas, bagazo y residuos de cosecha excedentes (da Conceição Infante et al. 2023).

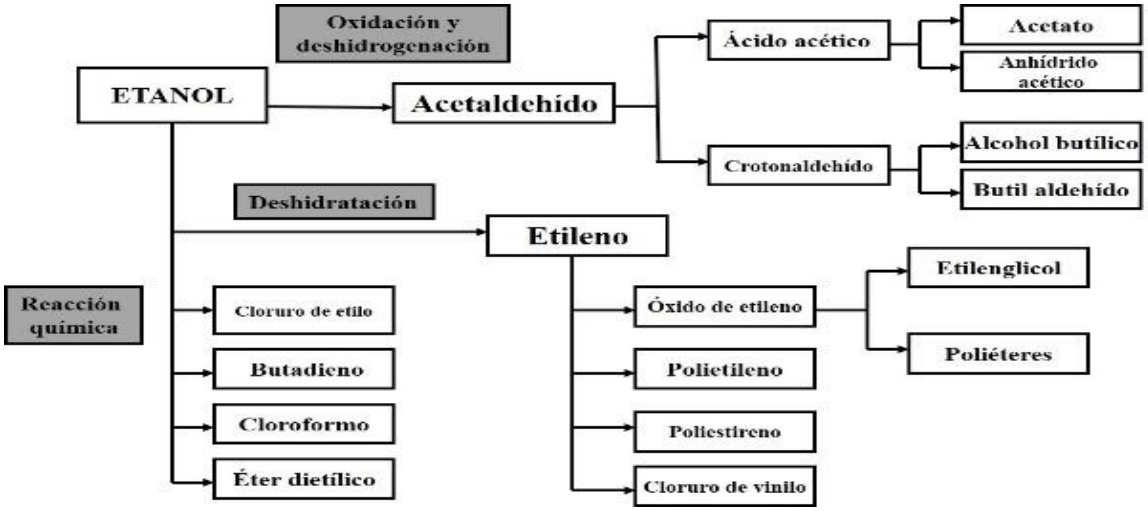


Figura 2. Etanol química, rutas tecnológicas y productos potenciales.
Fuente: Adaptado de Paturau, 1989.

Etanol biocombustible

Hasan et al. (2023); Morone et al. (2023) y Alizadeh et al. (2020) concluyeron que en la última década la producción de biocombustibles ha sido impulsada por políticas gubernamentales. Ellos revisaron los planes estratégicos nacionales (*biofuel mandates*) de los biocombustibles de primera generación haciendo énfasis en la combinación de objetivos, esquemas de soporte y uso de materias primas. Analizan perfiles de países de América del Norte (Canadá y Estados Unidos), América del Sur (Argentina, Brasil y Colombia), Europa (Unión Europea, Francia y Alemania), Asia (China, India, Indonesia, Malasia, y Tailandia) y Australia. Brasil y Estados Unidos han dominado los mercados de biocombustibles durante varias décadas. Sin embargo, la sostenibilidad de la producción de biocombustibles ha sido seriamente cuestionada en diversas conclusiones de investigaciones a nivel mundial, en los impactos sobre las emisiones de gases de efecto invernadero, pérdida de biodiversidad y servicios ecosistémicos, deforestación para expandir la frontera agrícola actual de cosechas de alimentos, uso de agua y suelo, seguridad alimentaria, prácticas y condiciones laborales, derechos humanos, desarrollo rural y social, alivio de la pobreza y equidad de género, entre otros temas.

De acuerdo a Goldemberg, (2008) el etanol no se usó en cantidades significativas hasta mediados de la década de 1970. El alza en el precio internacional del petróleo en el momento de la primera crisis petrolera impuso severas cargas por tipo de cambio a los países del tercer mundo que dependían de las importaciones. Esto motivó al Gobierno de Brasil a fomentar la redirección de un porcentaje del total de los cañaverales para generar etanol teniendo como objetivo inmediato, el 20% de reemplazo de toda la gasolina reduciendo así las importaciones de petróleo; este plan del gobierno brasileño se denominó ProAlcohol. En este PETROBRAS, la compañía petrolera estatal, compraría una cantidad garantizada de etanol a los productores (ingenios Sucro-Alcoholeros), se otorgaron incentivos económicos a las empresas agroindustriales con potencial para producir etanol, en forma de bajas tasas de interés. Sobre la base de tales políticas públicas, la producción de etanol aumentó rápidamente de forma competitiva a lo largo del siglo XXI (Correa et al. 2023).

Matsuoka *et al.* (2009) mencionaron que, en la primera fase, de 1975 a 1979, el programa creó una política pública (*biofuel mandate*) para mezclar gasolina con 5% de etanol anhidro. En la segunda, de 1979 a 1985, debido a la segunda crisis petrolera, el gobierno decidió subsidiar la industria automotriz para producir automóviles para etanol 100% hidratado. En la tercera fase, de 1985 a 1990, con la reducción del barril de petróleo, el costo de producción de etanol se volvió más alto que el de la gasolina, y el programa ProAlcohol enfrentó inconvenientes. En la cuarta fase, de 1990 a 2002, persistieron las incertidumbres económicas y los consumidores continuaron teniendo poca confianza en el programa ProAlcohol. Durante este período, la industria sucroalcoholera inició la privatización que provocó incertidumbres y perturbaciones en la producción y comercialización de los principales derivados de la caña. La quinta fase, desde 2003 hasta la actualidad, se caracterizó por la tecnología de combustible flexible (Flex-Fuel) que ofreció a los consumidores la posibilidad de operar sus automóviles con 100% de gasolina o 100% de etanol hidratado o cualquier mezcla proporcional entre los dos combustibles principalmente la E-27 (27% v/v etanol anhidro, 73% v/v gasolina) o bioetanol hidratado E-100 (92% v/v) (López-Ortega et al. 2021).

Por otra parte, el desarrollo del programa de etanol y biorrefinerías de la caña de azúcar de Brasil es el resultado a gran escala de varios factores clave. Primero, la economía impulsada por la necesidad de producir un combustible alternativo no fósil combinado con la voluntad política para fomentar el éxito a través de incentivos y regulaciones. En segundo lugar, la existencia de una base industrial local (ingenios azucareros) para proporcionar apoyo en Investigación, desarrollo e innovación más transferencia de tecnología (I+D+i+TT) para las necesidades tecnológicas de la conversión a ingenios sucroalcoholeros y hoy biorrefinerías. El tercero es la existencia de una industria automotriz local innovadora participativa en el desarrollo tecnológico de motores adecuados para combustibles de etanol en vehículos flexibles. El cuarto es el manejo sostenible de extensas tierras agrícolas con aptitud agroecológica al cultivo de caña de azúcar y una política socioeconómica favorable del uso de la tierra. Quinto es la puesta en marcha de un sistema de logística para entregar etanol al cliente de manera eficiente. Sexto desarrollo con centros de investigación de capacidades de ingeniería brasileña para integrar procesos de fabricación de azúcar, etanol y energía eléctrica de una forma eficiente y a bajo costo (Silva et al. 2023; Hasan et al. 2023).

Es decir, la producción flexible de azúcares, etanol, energía eléctrica, bioproductos, etc. ha creado la necesidad de nuevas tecnologías en todas las variables del ciclo del azúcar y alcohol. Desde la investigación y el desarrollo de nuevas plantas, hasta la modernización de los procesos agrícolas e industriales, capacitación de los profesionales y técnicos. El país ha desarrollado tecnología de punta en todos los sectores a través del concepto moderno de gestión de un ingenio sucroalcoholero o biorrefinería, tanto a nivel administrativo, financiero, agrícola, o industrial para producir más, con calidad y con el menor costo posible (Klein *et al.* 2019; Teixeira et al. 2024).

Hoy día Brasil se encuentra desarrollando la tecnología de producción de etanol a partir de dos materias primas procesadas simultáneamente granos de maíz y melaza en la misma planta (FlexMills) (Alcántara *et al.* 2019). Por otra parte, para la expansión de los biocombustibles en Brasil, se creó un programa gubernamental, RenovaBio, para alentar las inversiones privadas en el sector, incluidos los avances en la segunda y tercera

generación de biocombustibles, y también ayudar al país a cumplir metas de carbono cero (Lazaro et al. 2023). A diferencia de Pro-Alcool, el programa pretende impulsar la producción de biocombustibles sin centrarse en un tipo específico. El concepto clave de RenovaBio es minimizar las emisiones de carbono y mejorar el rendimiento del ciclo de vida de los biocombustibles. Esta política gubernamental incentiva a que el productor de biocombustibles comercialice créditos de descarbonización (CBIO) en el mercado. El CBIO se genera por la diferencia entre la emisión de CO_2e (valor equivalente de CO_2) de combustible fósil (línea de base) y su sustituto de biocombustible. Cuanto mayor sea esta diferencia, más CBIO podrían emitirse y comercializarse. Por lo tanto, como el etanol lignocelulósico generalmente presenta una huella de carbono más pequeña en comparación con el etanol de primera generación, la viabilidad de los biocombustibles avanzados posiblemente podría aumentar. RenovaBio podría conducir a una reducción de los precios del etanol y a una expansión real del desarrollo y la producción de tecnología de biocombustibles en Brasil aun con las barreras estructurales propias de un país en desarrollo (Salina *et al.* 2020; Jesus et al. 2023; de Oliveira Gonçalves et al. 2023).

Contexto mexicano

En México, el trabajo de Aguilera *et al.* (2016) analizó el funcionamiento estructural del sistema energético mexicano y sus vínculos con el crecimiento, la estabilidad y el desarrollo y concluyen que la reforma energética del sexenio 2012-2018 priorizaba las actividades primarias, refuerza el sesgo exportador de crudo e importador de derivados del petróleo; agrava la carga fiscal y la quiebra financiera latente de PEMEX; y cede al mercado la inserción del sistema energético nacional en la transición energética global. Es decir, solo consideraba normas como parte del Acuerdo de París ante la Convención Marco de Cambio Climático de la ONU (CNUMCC), en 2015 y ratificado en septiembre de 2016 por el Senado para cumplir con los compromisos voluntarios de los INDC (*Intended Nationally Determined Contributions*) y NDC (*Nationally Determined Contributions*) donde México se ha comprometido reducir 18% de emisiones de CO_2 del sector del transporte a partir de 2025 para estandarizar las normas y reglamentos ambientales del libre comercio de América del Norte (Oswald, 2017). Por su parte, Rousseau, (2017) mencionó que, en el nuevo marco legal sobre impactos sociales derivados de los proyectos energéticos, la regulación social tiene que considerar no sólo los temas de sostenibilidad y seguridad energética, sino también con la gobernabilidad. Es decir, reestructurar el paradigma sectorial (derivados del petróleo) con el paradigma global (energías renovables y biocombustibles). Por otra parte, Alpízar–Castro & Rodríguez–Monroy (2016) explicaron en detalle los objetivos de la Reforma energética de 2013 de los sectores de petróleo, gas y electricidad en México.

En este sentido, los renovables son esenciales en la soberanía del país ya que, mediante un manejo sostenible, será fundamentales en minimizar GEIs y rezago socioeconómico, incrementar rentabilidad agrícola y bienestar social. Sin embargo, están vinculados entre si con los sistemas económicos y dependen de la toma de decisiones de los actores políticos. La bioenergía debe competir en un mercado abierto contra energías fósiles, que todavía son abundantes y baratas porque no internalizan sus costos ambientales a diferencia de lo que se exige de las energías renovables, y esta es otra condición política (Islas-Samperio *et al.* 2020; Rendon-Sagardi *et al.* 2014; Röder *et al.* 2020).

García, (2023) llevó a cabo un análisis para entender las complejas interacciones entre los

aspectos políticos, sociales, técnicos y ambientales del sector energético, desarrollo histórico, influencia en la estructura actual con el gobierno de la cuarta transformación (4T) y perspectivas a futuro, las posibilidades de tecnologías de bajo carbono principalmente y la importancia del gobierno en la promoción de estos desarrollos y la inversión por parte de los actores del mercado.

En el caso particular de la agroindustria azucarera, si bien la producción de alcohol de melazas de caña (96° GL) se lleva a cabo desde hace décadas en fábricas de azúcar (ingenios azucareros), su destino final es industrial (alimentaria, química, fermentaciones, pecuaria, etc.) no energético. Se produce de mieles o melazas tipo C con una tecnología tradicional de regular productividad. Sin embargo, los principales desafíos son optimizar la producción agrícola en sinergia con el bienestar de productores, mejora en procesos industriales, automatización y control, biotecnología e ingeniería metabólica. Sin embargo, aunque en México desde 2008 se ha promovido moderadamente la importancia del etanol combustible con la Ley de Promoción y Desarrollo de Bioenergéticos considerando una mezcla de hasta 5% v/v incluyendo las principales áreas metropolitanas (México, Guadalajara and Monterrey). Sin embargo, hasta ahora no hay éxito porque no se ha desarrollado un modelo o programa nacional como en Estados Unidos de América o Brasil, debido a fuerzas impulsoras escasas, políticas públicas sin visión de sostenibilidad e intereses divergentes. En este contexto, la caña de azúcar es el cultivo más prometedor a mediano y largo plazo inclusive por encima del maíz derivado de su cultivo en más de 800,000 ha, pero podría ser rentable solo bajo ciertas condiciones económicas con un plan nacional de etanol para evaluar su viabilidad real y el desarrollo del mercado de biocombustibles en México (Elizondo & Boyd, 2017; Spring, 2020; Becerra-Pérez et al. 2023) (Tabla 3).

Tabla 3. Perspectivas del etanol combustible en México.

Conclusiones	Referencia
Los factores que reducirán el riesgo de mayor obsolescencia y cierre de ingenios son: investigación, desarrollo, innovación y transferencia de tecnología, diversificación con derivados de la caña de azúcar, reducción de costos de producción, incremento de productividad y competitividad	Villegas Vilchis et al. (2020).
La compleja problemática económica, social, institucional y ambiental del campo está afectando el desempeño óptimo de la agroindustria de la caña de azúcar en México.	Blas-Cortés et al. (2023).
La agroindustria de la caña de azúcar tiene un elevado impacto medioambiental debido a que las prácticas de cultivo y cosecha consumen y contaminan recursos ecológicos, la salud humana por contaminantes como el carbono negro por lo que se requieren cambios urgentes para reducir los costos ambientales.	Pérez Medina et al. (2023).
La producción de etanol para uso en gasolinas es técnicamente viable, pero el costo de producción no se considera competitivo en México. Sin embargo, con un esquema de incentivos fiscales y considerando la disminución de la dependencia energética, mejoras tecnológicas en conjunto con la transformación de subproductos hacen factible producirlo en México.	Bautista-Herrera et al. (2021).
En México es posible desarrollar una sólida industria del etanol, sin embargo, se requiere la participación y liderazgo del estado con políticas sostenibles en el largo plazo las cuales deben desarrollarse con técnicas eficaces de modelación para desarrollar un mercado nacional de biocarburantes los organismos reguladores o las políticas medioambientales.	Núñez, (2022).

Como resultado de numeras contradicciones presentadas en la tabla anterior, México es el único país importante en América Latina sin una industria comercial de biocombustibles, no existen mandatos para mezclar con combustibles fósiles, no hay suficiente oferta y demanda para permitir que la industria desarrolle una diversificada matriz energética, además los proyectos han fracasado por baja aplicación de conocimiento técnico, ambiental, económico y social para que el país lleve a cabo la mitigación de las emisiones de GEIs sin causar efectos negativos en el desarrollo rural y la sostenibilidad (Ordoñez Olivo & Lakner, 2023; Paredes-Cervantes *et al.* 2020; Subramaniam *et al.* 2020).

En la actualidad, el desarrollo de etanol a partir de la caña de azúcar parece ser la opción más rentable, debido a su cultivo en más de 800 mil ha y con el potencial de incrementar su productividad sin extender la frontera agrícola, por lo que habría caña suficiente para proyectos competitivos de etanol, pero existen obstáculos complejos antes de que pueda convertirse con éxito en una agroindustria de biocombustibles. En México la Ley de Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar, sin actualizar desde 2005, establece los elementos legales necesarios para su aprovechamiento, por lo que se pueden realizar acciones para inducir su uso Integral y diversificado y El CONADESUCA (Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar) es el organismo del gobierno federal dedicado a coordinar las acciones de difusión de estadísticas comerciales, productivas, meteorológicas, de investigación y desarrollo, vinculación, promoción, fomento, competitividad e innovación para el desarrollo sustentable de la agroindustria de la caña de azúcar, mediante la planeación y aplicación de las políticas públicas aplicables al sector cañero-azucarero (CONADESUCA, 2023, 2021) que den seguridad a todos los productores de este cultivo en su toma de decisiones. Este programa de gobierno impulsa los lineamientos del Sistema Integral de Información y el CICTCAÑA (Centro de Investigación Científica y Tecnológica de la Caña de Azúcar) debería gestionar, integrar, dirigir y estructurar los trabajos de investigación científica nacional para aplicarlos y lograr la competitividad de la agroindustria de la caña de azúcar a nivel nacional e internacional. Sin embargo, este último solo existe escrito en la ley. A la par existe como política publica el Programa Nacional de la Agroindustria de la Caña de Azúcar 2021-2024 (PRONAC), sin embargo, la producción de etanol combustible de caña de azúcar no es al menos mencionado.

Agroindustria azucarera mexicana

La caña de azúcar es una planta perenne con sacarosa (10-18 %) que en México y otros 130 países del mundo cubre el 79% de las necesidades básicas de un edulcorante básico para la población mundial y genera marginalmente sinergias en diversas cadenas productivas como azúcar, panela o piloncillo, etanol, energía eléctrica y potencialmente más de 100 derivados, los cuales han sido documentados en diversas publicaciones internacionales desde 1950 y ha sido parte del discurso cañero social y político en México desde la década de 1970, como la mejor opción para las continuas crisis socioeconómicas, ambientales y políticas del sector cañero-azucarero. Sin embargo, este cultivo requiere cantidades importantes de agroquímicos y las prácticas de manejo del mismo generan importantes y significativos impactos ambientales al suelo, aire, cuerpos de agua y salud de trabajadores y poblaciones vecinas. Los cañeros basan su modo de producción en factores como el tipo de tenencia de la tierra (ejidal o privado) y tamaño del predio desde media hectárea en adelante, continúan junto al resto de actores buscando minimizar costos e incrementar la

rentabilidad y prospectivamente desarrollar una cadena de valor competitiva con el empleo sostenible de los subproductos (residuos de cosecha, bagazo, melazas, cachaza, cenizas, vinazas y aguas dulces) eliminando la quema de cañaverales para minimizar riesgos ambientales y a la salud sin que a la fecha se den acciones concretas. Sin embargo, fenómenos como grandes inventarios de azúcar, las nuevas normas internacionales que regulan al sector azucarero como la certificación BONSUCRO (https://www.bonsucro.com/), el liderazgo internacional de Brasil en la producción, uso doméstico y exportación de diversos tipos de azúcares, etanol, bioplásticos y el desarrollo tecnológico de ingenios sucro-alcoholeros flexibles y biorrefinerías, en México la añeja crisis estructural de productores cañeros minifundistas, integración vertical de la producción, agricultura por contrato por intermediación de las organizaciones cañeras CNPR, CNC y otras, nula actualización tecnológica de campos cañeros y fábricas, inestabilidad de las exportaciones azucareras en el TLCAN hoy TMEC y el boom en el discurso político de los biocombustibles desde hace 3 sexenios sin consolidarse de ninguna forma en el actual, son factores de la pendiente reestructuración del sector cañero mexicano.

En este contexto, durante la zafra 2022/2023 se cosecharon 45´498,865 ton de caña en 806,193 ha con rendimiento de 58,998 ton ha^{-1} lo que generó una producción de azúcar de 5´224,248 ton y 5´285,217 L de etanol en 48 ingenios azucareros con una prevalencia de producción de azúcar estándar y de polarización debajo de 99,2% (crudo) (CONADESUCA, 2023), es decir de bajo potencial industrial que es exportada a refinadores en países desarrollados, debido a la saturación del mercado mexicano de azúcar y la competencia con otros edulcorantes como el jarabe de maíz de alta fructosa (JMAF), pero los impactos ambientales se quedan en México y la refinada por contratos con empresas alimentarias principalmente refresqueras.

El precio de venta de tallos de caña como materia prima en ingenios azucareros se ubicó en un promedio nacional de 63,24 USD/t. Actualmente con estos indicadores México es el sexto productor mundial de azúcar con el 3,4% del total mundial, el noveno consumidor mundial con el 2,5% y el séptimo exportador con el 3,4% del total mundial. México solo produce etanol hidratado o grado industrial pero no combustible como subproducto de la molienda de la caña de azúcar de melazas como materia prima, la cual ha sido empleada principalmente para el procesamiento industrial (predominantemente alimento para ganado, fermentaciones, producción de alcohol potable o industrial o exportación). Esta agroindustria azucarera aporta el 13,5% del valor de la producción agrícola nacional y representa el 0,4% del PIB y el 7,3% del PIB agropecuario. De esta viven 2,3 millones de personas y se desarrolla en 15 estados del país, donde vive el 13% de la población nacional (CONADESUCA, 2023). Sin embargo, estos indicadores reflejan un aumento considerable en la superficie cosechada por deforestación en las últimas décadas, sin incrementos en productividad de materia prima y diversificación como etanol, solamente en continuidad por la liquidación de la materia prima, pero con pérdida de competitividad internacional. Por ejemplo, en la zafra 2000/2001 se tenía una superficie de 609,157 ha, producción de caña de 42´903,622 ton con rendimiento de campo de 70,431 $tonha^{-1}$, de azúcar de 4´885,769 ton y etanol de 46´744,002 L con un precio de la caña de 33,49 USD/t. En la zafra 2010/2011 la superficie industrializada creció a 673,050 ha, así como la producción de caña a 44´131,570 ton con rendimiento de campo de 65,570 tha^{-1}, azúcar de 5´199,985 ton y etanol de 19´342,517 L. con un precio de la caña de

62,26 USD/t. Es decir en dos décadas la superficie cañera se ha incrementado 32%, la producción de caña y azúcar 27,6% y 31,7%, respectivamente, el rendimiento de campo ha estado en el rango de 64,122 a 78,742 tha^{-1}, y la producción de etanol ha disminuido 70,55% siendo la máxima producción de 59´326,646 L en la zafra 2004/2005 y las fábricas de azúcar han pasado de 60 a 48 lo que refleja en general una agroindustria de supervivencia, no competitiva con rendimientos de campo estancados por el desinterés de los actores, principalmente del comité de producción cañero integrado por representantes del gobierno federal, empresarios y líderes de organizaciones productores de caña (CNC y CNPR) hacia la producción de etanol y otros derivados no azúcar que para la zafra 2022/2023 registro una significativa caída en su indicadores derivada de la complejidad del cambio climático, la inercia de las prácticas de manejo y la ausencia de una transformación de las políticas públicas y las consecuencias del periodo post COVID (Ramírez-Vásquez et al, 2022; Figueroa-Rodríguez et al. 2019).

Por otra parte, la caña de azúcar se siembra en el sistema tradicional de roza-tumba y quema deforestando selvas tropicales y pastizales y la cosecha con quema de cañaverales (prequema, quema y requema de residuos) en el 91,523% de los predios cañeros. Los residuos de cosecha antes de la quema constituyen el 29% aproximadamente. Es decir, el 19,74% es paja y el 8,44% es el cogollo, parte verde de la planta que queda en el campo. Estos factores entre otros de índole socioeconómica y ambiental influyen directamente en un estancamiento de la productividad del rendimiento de la caña en algunas regiones de menos de 40 $tonha^{-1}$ y con mayor superficie para producir una tonelada de azúcar. Además, la quema antes y después de la cosecha agrava la situación de calor extremo en la época de zafra y la fertilidad de los suelos al disminuir el contenido de carbono orgánico y nitrógeno en el suelo y por lo tanto el papel de la agricultura cañera ante el cambio climático.

En México, el trabajo de Guerrero-Carrera *et al.* (2015) concluyó que los cañeros han percibido el cambio climático a través de cambios progresivos en la temperatura, baja precipitación y vientos, cambios que han afectado directa e indirectamente la rentabilidad. Sin embargo, a pesar de los efectos, las medidas de adaptación de los productores aún son escasas. Ciertamente, los productores que incorporan desarrollos tecnológicos son los que tienen mejor situación económica y académica que se manifiesta en su bienestar socioeconómico. Por otra parte, la caña de azúcar mayormente es cosechada de manera manual con 74,509 cortadores y la cosecha mecanizada apenas alcanza el 16,174% del total nacional y la caña alzada mecánicamente en el 81,049% de los cañaverales. En ella, los cortadores de tallos de caña son expuestos al impacto térmico del sol intenso y el fuego, fauna local, larga exposición al humo producido en el primer momento de la quema y la escasa cultura de protección al trabajador en vías respiratorias, ojos, cara, pies y manos. Es decir, precarias condiciones laborales y humanitarias diferentes al trabajo decente. Esta situación de los cortadores es documentada por Quintanar-Pérez, (2019) y Guerrero-Carrera et al. (2015) quienes reportaron que las cantidades de humo, tizne y hollín de la quema de caña de azúcar están asociadas con un aumento en los ingresos hospitalarios para la terapia de inhalación y el tratamiento de problemas de salud como hipertensión, neumonía e influenza, a la par el manejo agrícola emite 75.9 kg de partículas (PM10) inhalables en el aire al día, la principal causa de contaminación del aire por la quema de caña de azúcar afectando comunidades cercanas principalmente niños y ancianos (Mugica-Álvarez *et al.* 2018; Olvera-Vargas & Aguilar-Rivera, 2021).

El manejo tecnológico de la caña de azúcar en el ingenio da como resultado la generación de grandes cantidades de residuos (tlazole, hojas, puntas, bagazo, lodo de filtros, mieles o melaza C, vinaza, cenizas de combustión de bagazo) que pueden ser valorizados para forrajes, abonos orgánicos, biocombustibles y bio productos basados en el concepto de bioeconomía circular. Para una comercialización exitosa, se deben identificar claramente los cuellos de botella económicos y tecnológicos. En la revisión de Munagala & Shastri, (2023); Meghana & Shastri, (2020) y Silalertruksa & Gheewala, (2019) se discute el estado del arte de varias rutas de valorización para cada flujo de subproductos cañeros. Posteriormente, se revisan los estudios que cuantifican los impactos ambientales y realizan evaluaciones tecno económicas. Se identifica y analiza el alcance en la comercialización de estas rutas, pero existen fuertes discrepancias entre el desempeño económico y ambiental, que requieren un marco de toma de decisiones sistemático y específico por los actores de cada región cañera, ingenio o destilería.

Plan nacional de etanol en México

El trabajo de Aguilar-Rivera *et al.* (2019) concluye que el estado actual y potencial para etanol biocombustible en México ofrece, con respecto a la cadena de valor, condiciones agroecológicas para la producción de caña de azúcar, ya que la materia prima se ha identificado como un factor crítico de éxito en la producción intensiva de la materia prima tallos de caña de azúcar y subproductos como residuos de cosecha, bagazo y melazas (Figura 3).

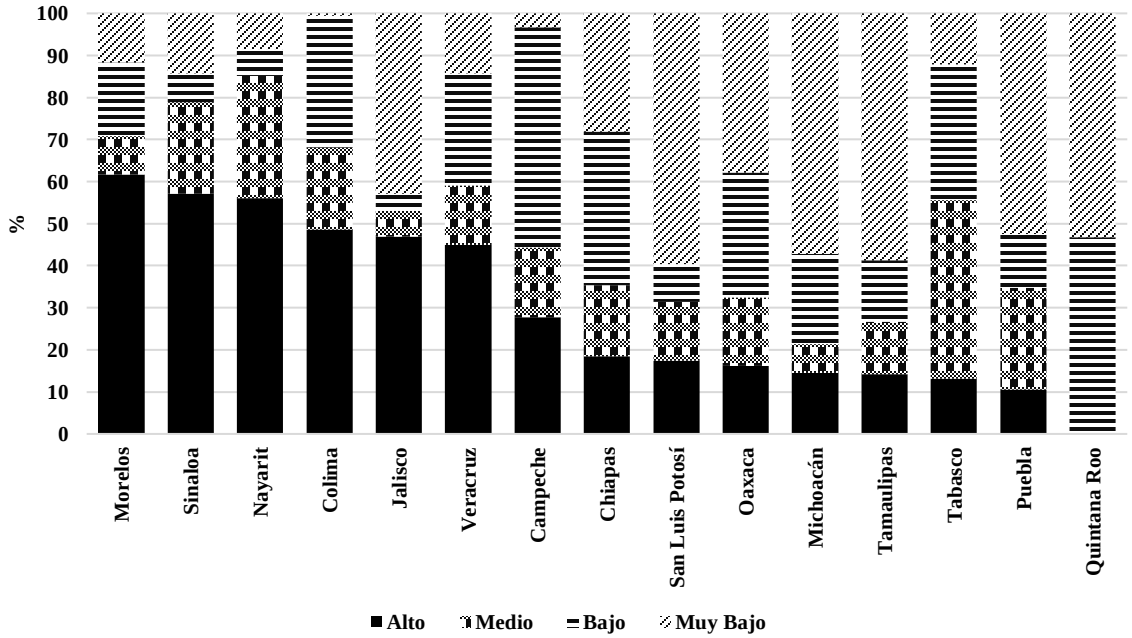


Figura 3. Aptitud agroecológica al cultivo de caña de azúcar en México.
Fuente: Datos de Aguilar-Rivera et al. (2018).

En este sentido las zonas cañeras de los estados de Morelos, Sinaloa, Nayarit; Colima, Jalisco y Veracruz presentan la superficie con mayor aptitud agroecológica al cultivo con el 62, 57, 56, 49, 47, 45 %, respectivamente, por lo tanto, con técnicas de manejo sostenible, principalmente en el uso de fertilización orgánica y mineral, manejo agroecológico de la fitosanidad, riego y cosecha verde podrán incrementar su

productividad sin necesidad de expandir la frontera agrícola por cambio de uso de suelo, lo que las convierte, en este aspecto, como zonas con potencial para la instalación de destilerías. Además, la producción a partir de jugo de caña, melazas o residuos de cosecha o bagazo está limitada para su implementación tecnológica, cultural y legislativa sostenible. Un exitoso programa nacional de etanol de caña en azúcar en México requiere mejoras en la tecnología de destilación, fermentación, el apoyo financiero a los empresarios y reestructuración de ingenios azucareros, incremento de la productividad de las tierras con los mismos insumos o menores, análisis del precio de venta de tallos y melazas, cogeneración eléctrica, abonos orgánicos, forrajes y biogás de vinazas, lodo de filtros, bagazo, cenizas y residuos de cosecha. Por otra parte, la falta de voluntad política, logística para la distribución de mezclas de etanol por PEMEX, bajo porcentaje de modelos recientes de automóviles y la ausencia de marcos metodológicos para el análisis de sostenibilidad de los biocombustibles de caña, también son algunos de los problemas que deben superarse junto a la nula participación de científicos mexicanos de todas las disciplinas en la estructuración de un programa nacional de etanol. Dado que el cultivo de la caña de azúcar tiene perspectivas de sostenibilidad en México, el concepto de biorrefinería en los ingenios azucareros para producir etanol de primera y segunda generación junto con la producción de azúcar y otros derivados como la cogeneración puede potencialmente beneficiar a los actores involucrados en la agroindustria de la caña de azúcar, además de cumplir con los compromisos del cambio climático y la generación de bienestar (Cisneros-López *et al.* 2020; El Chami et al. 2020).

García-Chávez (2014) propuso algunos cambios en materia política energética:

i) Establecer condiciones tecnológicas y logísticas para mezclas gasolina/etanol.
ii) Desarrollar un programa de incentivos para elevar la productividad cañera para el uso de tallos en etanol para oxigenar gasolinas.
iii) Bases económicas y fiscales para incentivar a empresarios la producción de etanol.
iv) Aplicar acciones de I+D+i+TT en los actuales campos de campo para incrementar la productividad, rentabilidad y minimizar impactos ambientales.
v) Aplicar recursos económicos públicos para generar investigación, desarrollo tecnológico e innovación, ciencia básica, infraestructura propia en biocombustibles e identificar oportunidades y necesidades tecnológicas, sociales y energéticas en cada región cañera y cada ingenio azucarero y destilería del país.
vi) Transitar hacia la producción de etanol 2G (biomasa) para evitar competencia con alimentos y reducir la huella ecológica (carbono y agua) (Carrillo-Nieves *et al.* 2019; Espinoza-Vázquez *et al.* 2021).

Por lo tanto, se requiere de un cambio tecnológico, reorientación de la agricultura cañera y una revisión de las políticas públicas en cuanto a dicha agroindustria pues para el desarrollo y competitividad del sector se requiere de la participación del Estado (Vilaboa-Arróniz *et al*. 2019). Es decir, existe la necesidad de expandir la investigación para buscar alternativas locales para un futuro sostenible de la bioenergía en México más allá del etanol como un reemplazo de aditivos de gasolina como se visualiza actualmente por la mayoría de los actores (Galicia-Medina *et al.* 2018) (Figura 4).

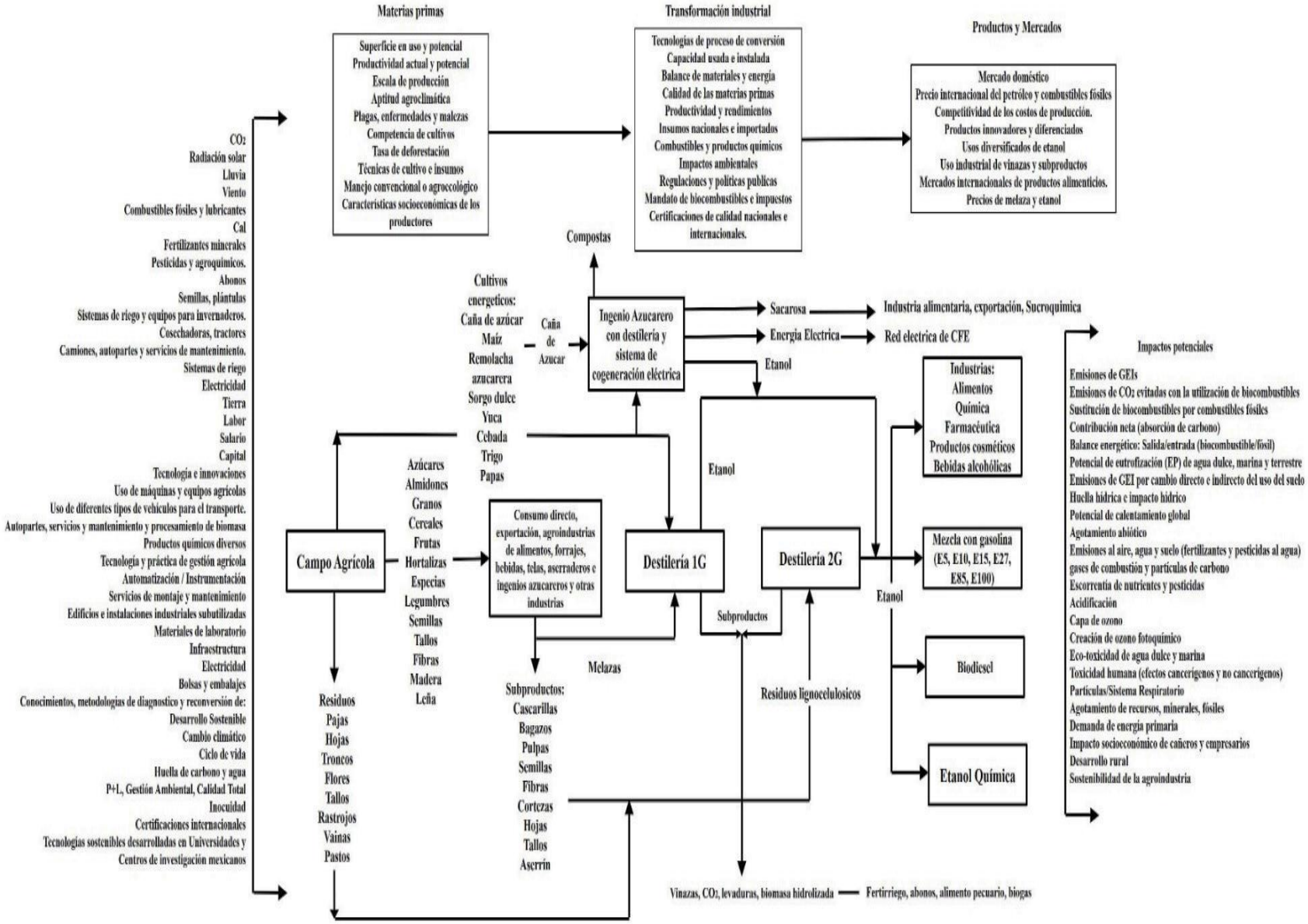


Figura 4. Cadena de valor del bioetanol en México.

Los impactos económicos a corto plazo de los biocombustibles dependerán de una variedad de aspectos, como el éxito o fracaso de la cosecha en un año determinado por efectos del cambio climático, precio del petróleo, crecimiento económico, tipo de cambio, cosmovisión de los actores, etc. A largo plazo dependerán de factores como la inversión en I+D+i, el cambio tecnológico, crecimiento demográfico y económico, cambio climático y las políticas a largo plazo hacia la seguridad alimentaria y energética, agricultura, industrialización (incluyendo refinación del petróleo y biorrefinerías) y el medio ambiente de forma continua en el futuro cercano (Figura 5).



Figura 5. Actores de la sostenibilidad del etanol en México. Fuente: elaboración propia.

Temas pendientes en el contexto mexicano

La transición energética de combustibles líquidos renovables, como lo mencionan autores de contextos mundiales y regionales e investigadores mexicanos, es una tarea compleja, con retos, barreras tecnológicas, socioeconómicas, políticas, ambientales, etc. Sin embargo, para México es imperativo en cualquier programa, propuesta o proyecto considerar las siguientes preguntas:

1. ¿Cuáles son las modificaciones necesarias a la Ley de Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar de 2005 y otras como la norma oficial mexicana NOM-016-CRE-2016, especificaciones de calidad de los petrolíferos, para establecer la producción competitiva y sostenible de etanol en México?
2. ¿Cómo puede desarrollarse un Plan Nacional de Etanol en México?
3. ¿Cuáles son las características de las políticas públicas y mandatos implementados en otros países productores de etanol de caña de azúcar?
4. ¿Cuáles son las ventajas y desventajas del proyecto de etanol nacional en los sectores primario, secundario y terciario?
5. ¿Cómo impactaría el uso de etanol anhidro en las políticas ambientales de México?

6. ¿Qué reestructuración requiere PEMEX llevar a cabo para el uso de etanol en gasolinas y la reducción del oxigenante MTBE?
7. ¿Cómo se incrementará la rentabilidad del etanol con la industrialización de sus subproductos?
8. ¿Qué transformaciones requiere la agroindustria azucarera para convertirse en biorrefinerías?
9. ¿Cuáles son las investigaciones básicas, de ciencia de frontera y aplicada desarrolladas por investigadores mexicanos en relación con la producción sostenible de caña, procesamiento en destilerías y su uso en gasolinas?

Conclusiones

La competitividad y sostenibilidad del uso de etanol biocombustible como oxigenante de gasolinas es aún un tema debatible y lleno de controversias dentro del sector público, académico, empresarial y principalmente en la agroindustria azucarera mexicana ya que esta última de régimen 100% privado está regida en políticas públicas no eficientes que solamente fomentan y regulan las relacionales entre cañeros y empresarios, precio de la caña y el comercio de azucares, sin considerar ningún otro derivado de la caña de azúcar como el etanol.

Por lo tanto, ante la ambigüedad o nulidad de las políticas públicas promulgadas por los distintos gobiernos en el siglo XXI como la ley de desarrollo sustentable de caña de azúcar que hoy día presenta un rezago desde su promulgación en 2005 para lograr objetivos en esta agroindustria hace necesario reestructurar la tradicional agroindustria azucarera por los actores mismos (cañeros, lideres, empresarios, consumidores) con la participación de investigadores de diversas disciplinas, para modelar con herramientas estadísticas y de simulación avanzada el comportamiento del proceso productivo de etanol de caña de azúcar incorporando diversos desarrollos tecnológicos, bajo diversos escenarios comerciales, ambientales y de cambio climático ya que actualmente la agroindustria azucarera solo produce de 4 tipos de sacarosa de baja calidad sin posibilidad de certificación internacional y baja o nula utilización de los subproductos en proyectos energéticos como etanol y cogeneración.

En consecuencia, buscar la reconversión de los ingenios azucareros a biorrefinerías, requiere que especialistas mexicanos determinen con metodologías multi-inter y transdiciplinarias la lotificación de las plantaciones cañeras sembrada, hoy en monocultivo y minifundio, donde las prácticas de manejo sostenible garanticen una productividad estable y/o creciente sin expandir la frontera agrícola, el estudio de las condiciones reales operativas de cada ingenio y sus posibilidades tecnológicas hacia la producción de azúcar, etanol y energía eléctrica, entre otros bioproductos como el etanol de biomasa (2G).

Se requiere una producción sostenible de caña de azúcar, con una productividad creciente o al menos estable con las aplicación de practicas de manejo agroecológicas, reducir la cosecha con quema, mejorar las condiciones labores de trabajo decente de los cortadores y empleados, mejorar la logística de transporte a los ingenios sucro alcoholeros mediante la lotificación o arquitectura de las plantaciones de caña, reducir tiempos de espera en patios de caña y en las instalaciones industriales aplicar tecnologías de punta para maximizar la producción de etanol, cogenerar energía eléctrica con biomasa cañera (residuos de cosecha y bagazo), y producir abonos orgánicos líquidos y solidos a base de vinazas, cachazas, cenizas de combustión, etc.

Referencias

Aburto, J., & Martínez-Hernández, E. (2021). Is Sugarcane a Convenient Feedstock to Provide Ethanol to Oxygenate Gasolines in Mexico? A Process Simulation and Techno-Economic-Based Analysis. *Frontiers in Energy Research*, *8*, 612647. https://doi.org/10.3389/fenrg.2020.612647

Montiel-Rosales, A., Montalvo-Romero, N., García-Santamaría, L. E., Sandoval-Herazo, L. C., Bautista-Santos, H., & Fernández-Lambert, G. (2022). Post-industrial use of sugarcane ethanol vinasse: A systematic review. *Sustainability*, *14*(18), 11635.https://doi.org/10.3390/su141811635

Aguilar-Rivera, N. (2022). Sustainable biofuels. Strategy for growth and energy security. Revista mexicana de economía y finanzas, 17(3).https://doi.org/10.21919/remef.v17i3.498

Aguilar-Rivera, N., Michel-Cuello, C., Serna-Lagunes, R., de Jesús Debernardi-Vázquez, T., & Trujillo-Mata, A. (2019). Ethanol Production from the Mexican Sugar Industry: Perspectives and Challenges. In Sugarcane Biofuels (pp. 203-235). Springer, Cham.

Aguilar-Rivera, N., Algara-Siller, M., Olvera-Vargas, L. A., & Michel-Cuello, C. (2018). Land management in Mexican sugarcane crop fields. Land Use Policy, 78, 763-780. doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.07.034

Aguilera, M., Alejo, F. J., Navarrete, J. E., & Torres, R. C. (2016). Contenido y alcance de la reforma energética. Economía Unam, 13(37), 3-44.

Alcantara, G. U., Nogueira, L. C., de Almeida Stringaci, L., Moya, S. M., & Costa, G. H. G. (2019). Brazilian Flex Mills: Ethanol from Sugarcane Molasses and Corn Mash. BioEnergy Research, 1-8. https://doi.org/10.1007/s12155-019-10052-3

Alizadeh, R., Lund, P. D., & Soltanisehat, L. (2020). Outlook on biofuels in future studies: A systematic literature review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 134, 110326.https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110326.

Alpizar–Castro, I., & Rodríguez–Monroy, C. (2016). Review of Mexico′ s energy reform in 2013: Background, analysis of the reform and reactions. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 58, 725-736. doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.291

Astiazarán, B. C., Vizcaíno, R. L., Mosqueda, J., & Sacelcedo, A. (2020). Competition and Coordination in the Mexican Retail Market for Gasoline (No. 2020-15). https://www.banxico.org.mx/publicaciones-y-prensa/documentos-de-investigacion-del-banco-de-mexico/%7BD209BCC8-25F3-8288-82C0-A023B02CE369%7D.pdf

ASTM D5798 - 13a Standard Specification for Ethanol Fuel Blends for Flexible-Fuel Automotive Spark-Ignition Engines. https://www.astm.org/DATABASE.CART/HISTORICAL/D5798-13A.htm [fecha de consulta: 20 de Marzo de 2020].

Azevedo, L. P., & Lagarinhos, C. A. (2024). Green energy from waste to promote decarbonization: A case study in Brazil. In *Decarbonization Strategies and Drivers to Achieve Carbon Neutrality for Sustainability* (pp. 527-554). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-443-13607-8.00027-4

Barros, N., Carvalho, M., Silva, C., Fontes, T., Prata, J. C., Sousa, A., & Manso, M. C. (2019). Environmental and biological monitoring of benzene, toluene, ethylbenzene

and xylene (BTEX) exposure in residents living near gas stations. Journal of toxicology and environmental health, Part A, 82(9), 550-563. doi.org/10.1080/15287394.2019.1634380

Barua, S., Sahu, D., Sultana, F., Baruah, S., & Mahapatra, S. (2023). Bioethanol, internal combustion engines and the development of zero-waste biorefineries: an approach towards sustainable motor spirit. *RSC Sustainability*, *1*(5), 1065-1084.

Bautista-Herrera, A., Ortiz-Arango, F., & Alvarez-Garcia, J. (2021). Profitability using second-generation bioethanol in gasoline produced in Mexico. Energies, 14(8), 2294. https://doi.org/10.3390/en14082294

Becerra-Pérez, L. A., Rincón, L. E., & Posada-Duque, J. A. (2023). Anhydrous Ethanol Pricing in Economies with an Underdeveloped Biofuels Market: The Case of Mexico. Sustainability, 15(9), 7084. https://doi.org/10.3390/su15097084

Becerra-Pérez, Luis Armando and Rincón, Luis E. and Posada, John A., Public Policies on Anhydrous Ethanol in Mexico: Diagnosis and Proposals. (2023) Available at SSRN: https://ssrn.com/abstract=4604046 or http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4604046

Bhatnagar, S., & Khurana, S. (2023). Global Aspects of Biofuel Extraction. *Biofuel Extraction Techniques*, 523-542.https://doi.org/10.1002/9781119829522.ch17

Blas-Cortés, J., Omaña-Silvestre, J. M., Valdivia-Alcala, R., Sandoval-Romero, F., Santiago-Zarate, I. M., & Valdivia-Cabral, J. J. (2023). Eficiencia técnica y economías de escala de los ingenios azucareros en México. Revista mexicana de ciencias agrícolas, 14(5), 14-26. https://doi.org/10.29312/remexca.v14i5.2999

Callegari, A., Bolognesi, S., Cecconet, D., & Capodaglio, A. G. (2020). Production technologies, current role, and future prospects of biofuels feedstocks: A state-of-the-art review. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 50(4),384-436. doi.org/10.1080/10643389.2019.1629801

Carrillo-Nieves, D., Alanís, M. J. R., de la Cruz Quiroz, R., Ruiz, H. A., Iqbal, H. M., & Parra-Saldívar, R. (2019). Current status and future trends of bioethanol production from agro-industrial wastes in Mexico. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 102, 63-74. doi.org/10.1016/j.rser.2018.11.031

Castañeda-Ayarza, J. A., & Cortez, L. A. B. (2017). Final and B molasses for fuel ethanol production and some market implications. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 70, 1059-1065. doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.010

Castro-Montoya, A. J., Méndez-Romero, T., Vargas-Tah, A. A., Aguilar-Rivera, N., & Lazato-Mixteco, P. E. (2023). Sugarcane molasses-based biorefinery: Organic acids and ethanol production. *Renewable energy, biomass & sustainability*, *5*(1), 1-9. https://doi.org/10.56845/rebs.v5i1.78

Chauhan, M., Vanshika, Kumar, A., Chauhan, D., & Jain, A. K. (2023). Renewable Feedstocks for Biofuels. *Biofuel Extraction Techniques*, 151-176. https://doi.org/10.1002/9781119829522.ch6

Cisneros-López, M. A., García-Salazar, J. A., Mora-Flores, J. S., Martínez-Damian, M. A., García-Sánchez, R. C., Valdez-Lazalde, J. R., & Portillo-Vázquez, M. (2020). Economic evaluation with real options: second generation bioethanol biorefinery in Veracruz, Mexico. Agricultura, Sociedad y Desarrollo, 17(3), 397-413.

CONADESUCA (2023). 10°. Informe estadístico del sector agroindustrial de la caña de azúcar en México, zafras 2013-2014 / 2022-2023. https://www.gob.mx/conadesuca/articulos/10-informe-estadistico-del-sector-agroindustrial-de-la-cana-de-azucar-en-mexico

da Conceição Infante, J., de Lucas, R. C., de Oliveira, T. B., Pasin, T. M., Benassi, V. M., & Nelson, D. L. (2023). Sugarcane Waste: Current Scenario in Microbial Valorization for Biomolecules. In *Microbial Bioprocessing of Agri-food Wastes* (pp. 149-179). CRC Press.

Dharani, L., Umapriya, R., Arunkumar, N., Gokila, M., & Sakthi Shankar, R. (2024). Generations of Biofuel. In *Emerging Sustainable Technologies for Biofuel Production* (pp. 15-42). Cham: Springer Nature Switzerland.https://doi.org/10.1007/978-3-031-52167-6_2

Di Tommaso, S., Wang, S., Strey, R., & Lobell, D. B. (2024). Mapping sugarcane globally at 10 m resolution using GEDI and Sentinel-2. *Earth System Science Data Discussions*, *2024*, 1-26. https://doi.org/10.5194/essd-2024-121

Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero INEGYCEI (2021) https://www.datos.gob.mx/busca/dataset/inventario-nacional-de-emisiones-de-gases-y-compuestos-de-efecto-invernadero-inegycei

CONADESUCA (2021). Legislación Aplicable a la Agroindustria de la Caña de Azúcar. https://www.gob.mx/conadesuca/documentos/legislacion-aplicable-a-la-agroindustria-de-la-cana-de-azucar

Correa, C., Alves, Y. A., Souza, C. G., & Boloy, R. A. M. (2023). Brazil and the world market in the development of technologies fo https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.09.004 r the production of second-generation ethanol. Alexandria Engineering Journal, 67, 153-170.

Crucho, C. I., & Barros, M. T. (2023). Sweet as sucrose. Nature Chemistry, 15(1), 154-154. https://doi.org/10.1038/s41557-022-01113-w

de Oliveira Gonçalves, F., Firmani Perna, R., Savioli Lopes, E., Plazas Tovar, L., Maciel Filho, R., & Savioli Lopes, M. (2023). Strategies to ensure fuel security in Brazil considering a forecast of ethanol production. Biomass, 3(1), 1-17. https://doi.org/10.3390/biomass3010001

Diario Oficial de la Federación, Ley de promoción y desarrollo de los bioenergéticos, México, Gobierno de la República, publicada el 1 de febrero de 2008.

El Chami, D., Daccache, A., & El Moujabber, M. (2020). What are the impacts of sugarcane production on ecosystem services and human well-being? A review. Annals of Agricultural Sciences, 65(2), 188-199. https://doi.org/10.1016/j.aoas.2020.10.001

Elizondo, A., & Boyd, R. (2017). Economic impact of ethanol promotion in Mexico: A general equilibrium analysis. Energy Policy, 101, 293-301. doi.org/10.1016/j.enpol.2016.11.017

Engebretson, A., & Diamond, J. W. (2019). Evaluating the economic impacts of the renewable fuel standards (RFS) and the ethanol quantity mandate. https://www.bakerinstitute.org/media/files/files/94e23233/cpf-pub-ethanol-111919.pdf

EPA Metil terc-butil éter (MTBE). (2019). https://archive.epa.gov/mtbe/web/html/faq.html

Espinoza-Vázquez, Y. M., Gómez-Castro, F. I., & Ponce-Ortega, J. M. (2021). Optimization of the supply chain for the production of biomass-based fuels and high-added value products in Mexico. Computers & Chemical Engineering, 145, 107181. doi.org/10.1016/j.compchemeng.2020.107181

Figueroa-Rodríguez, K. A., Hernández-Rosas, F., Figueroa-Sandoval, B., Velasco-Velasco, J., & Aguilar Rivera, N. (2019). What has been the focus of sugarcane research? A bibliometric overview. International Journal of Environmental Research and Public Health, 16(18), 3326.https://doi.org/10.3390/ijerph16183326

Galicia-Medina, C. M., Barrios-Estrada, C., Esquivel-Hernández, D. A., de Jesús Rostro-Alanís, M., Torres, J. A., & Parra-Saldívar, R. (2018). Current state of bioethanol fuel blends in Mexico. Biofuels, Bioproducts and Biorefining, 12(3),338-347. doi.org/10.1002/bbb.1842

García, A. R. V. (2023). Sueños en la transición energética y crítica a la reforma energética. Argumentos. Estudios críticos de la sociedad, 131-149.https://doi.org/10.24275/uamxoc-dcsh/argumentos/2023101-06

García-Chávez L. R. (2014). Analysis of the current situation, issues and alternatives for ethanol production and use in Mexico. Ingeniería Agrícola y Biosistemas 6(1). 31 – 42.

Goldemberg, J. (2008). The Brazilian biofuels industry. Biotechnology for biofuels, 1(1) 6. doi.org/10.1186/1754-6834-1-6

González, U., Schifter, I., Díaz, L., González-Macías, C., Mejía-Centeno, I., & Sánchez-Reyna, G. (2018). Assessment of the use of ethanol instead of MTBE as an oxygenated compound in Mexican regular gasoline: combustion behavior and emissions. Environmental monitoring and assessment, 190(12), 1-15. doi.org/10.1007/s10661-018-7083-7

Guerrero-Carrera, J., Landeros-Sánchez, C., Martínez-Dávila, J. P., López-Romero, G., Nikolskii-Gavrilov, I., Hernández-Pérez, J. M., & Soto-Estrada, A. (2015). Climate change impact on sugarcane crop in the Gulf of Mexico: a farmers perception and adaptation measures. Journal of Agricultural Science, 7(10),140.

Haldar, D., & Purkait, M. K. (2020). Lignocellulosic conversion into value-added products: A review. Process Biochemistry. 89,110-133 doi.org/10.1016/j.procbio.2019.10.001

Hasan, M., Abedin, M. Z., Amin, M. B., Nekmahmud, M., & Oláh, J. (2023). Sustainable biofuel economy: A mapping through bibliometric research. Journal of Environmental Management, 336, 117644.https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117644

Islas-Samperio, J. M., Manzini, F., & Grande-Acosta, G. K. (2019). Toward a Low-Carbon Transport Sector in Mexico. Energies, 13(1), 1-27. doi.org/10.3390/en13010084

Jassim, E. I., Sphicas, P., & Jasem, B. I. (2019, November). Environmental Impact of Mixing Biofuel with Gasoline in Spark Ignition Engine. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 401, No. 1, p. 012013). IOP Publishing.

Jesus, G. M. K., Jugend, D., Paes, L. A. B., Siqueira, R. M., & Leandrin, M. A. (2023).

Barriers to the adoption of the circular economy in the Brazilian sugarcane ethanol sector. Clean Technologies and Environmental Policy, 25(2), 381-395. https://doi.org/10.1007/s10098-021-02129-5

Klein, B. C., de Mesquita Sampaio, I. L., Mantelatto, P. E., Filho, R. M., & Bonomi, A. (2019). Beyond ethanol, sugar, and electricity: a critical review of product diversification in Brazilian sugarcane mills. Biofuels, Bioproducts and Biorefining, 13(3), 809-821. doi.org/10.1002/bbb.1969

Konur, O. (2023). The US experience of bioethanol fuels: Scientometric study. In *Evaluation and Utilization of Bioethanol Fuels. II.* (pp. 110-138). CRC Press.

Koupal, J., Cashman, S., Young, B., & Henderson, A. D. (2024). Carbon Footprint of Oxygenated Gasolines: Case Studies in Latin America, Asia, and Europe. *Fuels*, *5*(2), 123-136. https://doi.org/10.3390/fuels5020008

Koupal, J., & Palacios, C. (2019). Impact of new fuel specifications on vehicle emissions in Mexico. Atmospheric Environment, 201, 41-49. doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.12.028

Koutsos, T. M., Menexes, G. C., & Dordas, C. A. (2019). An efficient framework for conducting systematic literature reviews in agricultural sciences. Science of The Total Environment, 682, 106-117. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.354

Lazaro, L. L. B., Grangeia, C. S., Santos, L., & Giatti, L. L. (2023). What is green finance, after all?–Exploring definitions and their implications under the Brazilian biofuel policy (RenovaBio). Journal of Climate Finance, 2, 100009. https://doi.org/10.1016/j.jclimf.2023.100009

Li, Y., Sun, H., Zhang, Y., Wang, X., Gao, M., Sun, X., & Wang, Q. (2024). Research progress for co-production ethanol and biobased products. Industrial Crops and Products, 212, 118351. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.118351

López-Ortega, M. G., Guadalajara, Y., Junqueira, T. L., Sampaio, I. L., Bonomi, A., & Sánchez, A. (2021). Sustainability analysis of bioethanol production in Mexico by a retrofitted sugarcane industry based on the Brazilian expertise. Energy, 232, 121056. https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121056

Marques, J. C., Gasi, F., & Lourenço, S. R. (2024). Biofuel in the Automotive Sector: Viability of Sugarcane Ethanol. *Sustainability*, *16*(7), 2674. https://doi.org/10.3390/su16072674

Martín, M., Taifouris, M., & Galán, G. (2023). Lignocellulosic biorefineries: A multiscale approach for resource exploitation. Bioresource Technology, 129397. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.129397

Matheus, C. R., & Sousa-Aguiar, E. F. (2024). Main catalytic challenges in ethanol chemistry: A review. Catalysis Reviews, 66(1), 174-213. https://doi.org/10.1080/01614940.2022.2054554

Matsuoka, S., Ferro, J., & Arruda, P. (2009). The Brazilian experience of sugarcane ethanol industry. In Vitro Cellular & Developmental Biology-Plant, 45(3),372-381. DOI 10.1007/s11627-009-9220-z

Meghana, M., & Shastri, Y. (2020). Sustainable valorization of sugar industry waste: Status, opportunities, and challenges. Bioresource Technology, 303, 122929-

122929. doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122929

Mengist, W., Soromessa, T., & Legese, G. (2020). Method for conducting systematic literature review and meta-analysis for environmental science research. MethodsX, 7, 100777. doi.org/10.1016/j.mex.2019.100777

Montaño, P., & Tornel, C. (2022). Balance de la política climática de AMLO. *Análisis Plural*, (1). https://doi.org/10.31391/ap.vi1.8

Moreira, J. R., & Goldemberg, J. (2023). Ethanol Fuel from Sugarcane: Present and Future Contribution to Climate Change Mitigation. In Evaluation and Utilization of Bioethanol Fuels. I. (pp. 248-266). CRC Press.

Moreira, B. P., Sganzerla, W. G., Torres-Mayanga, P. C., Ruiz, H. A., & Lachos-Perez, D. (2023). Overview of Commercial Bioethanol Production Plants. In *Bioethanol: A Green Energy Substitute for Fossil Fuels* (pp. 279-303). Cham: Springer International Publishing.https://doi.org/10.1007/978-3-031-36542-3_11

Morone, P., Cottoni, L., & Giudice, F. (2023). Biofuels: Technology, economics, and policy issues. In *Handbook of biofuels production* (pp. 55-92). Woodhead Publishing. https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91193-1.00012-3

Múgica-Álvarez, V., Hernández-Rosas, F., Magaña-Reyes, M., Herrera-Murillo, J., Santiago-De La Rosa, N., Gutiérrez-Arzaluz, M., & González-Cardoso, G. (2018). Sugarcane burning emissions: Characterization and emission factors. Atmospheric environment, 193, 262-272. doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.09.013

Müller, C., Scapini, T., Rempel, A., Abaide, E. R., Camargo, A. F., Nazari, M. T., ... & Alves Jr, S. L. (2023). Challenges and opportunities for third-generation ethanol production: A critical review. Engineering Microbiology, 3(1), 100056. https://doi.org/10.1016/j.engmic.2022.100056

Munagala, M., & Shastri, Y. (2023). Integrated Sugar Industry Complex in India: Comparison of Different Potential Configurations. Industrial & Engineering Chemistry Research, 62(45), 18918-18930.https://doi.org/10.1021/acs.iecr.2c04593

Núñez, H. M. (2022). Building a Bioethanol Market in Mexico. EconoQuantum, 19(2), 21-56. https://doi.org/10.18381/eq.v19i2.7258

Olvera-Vargas, L. A., & Aguilar-Rivera, N. (2021). Monitoring Wildfires in Forest and Grassland Related to Sugarcane Burning with Geotechnologies. In Sustainability in Natural Resources Management and Land Planning (pp. 511-530). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-76624-5_29

Ordoñez Olivo, M. L., & Lakner, Z. (2023). Food Security and Biofuels in Latin America and the Caribbean Region: A Data Panel Analysis on Eight Countries. Energies, 16(23), 7799. https://doi.org/10.3390/en16237799

Oswald, Ú. (2017). Seguridad, disponibilidad y sustentabilidad energética en México. Revista mexicana de ciencias políticas y sociales, 62(230), 155-195.

Paredes-Cervantes, S. A., Barahona-Pérez, L. F., Barroso-Tanoira, F. G., & Ponce-Marbán, D. V. (2020). Biofuels and their potential in

the Mexican energy market. Revista de economía, 37(94), 35-56. https://doi.org/10.33937/reveco.2020.128

Paturau, J. M. (1989). By-products of the cane sugar industry. An introduction to their industrial utilization. Elsevier Science Publishers BV.

Pérez Medina, P., Galindo Mendoza, M. G., Álvarez Fuentes, G., Tenorio Martínez, L. D., & Barrera López, V. A. (2023). Economic Assessment of the Impact of the Sugarcane Industry: An Empirical Approach with Two Focuses for San Luis Potosí, México. J, 6(2), 342-360. https://doi.org/10.3390/j6020024

Prasad, S., Yadav, K. K., Kumar, S., Pandita, P., Bhutto, J. K., Alreshidi, M. A., ... & Cabral-Pinto, M. M. (2024). Review on biofuel production: Sustainable development scenario, environment, and climate change perspectives− A sustainable approach. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, *12*(2), 111996. https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.111996

Prasad, S., Gupta, V. C., Bhatt, R., & Dhanya, M. S. (2021). Ethanol production from sugarcane: an overview. *Input Use Efficiency for Food and Environmental Security*, 665-686. https://doi.org/10.1007/978-981-16-5199-1_22

Quintanar-Pérez, H. A. (2019). La zafra desde adentro: los rostros detrás del corte de caña de azúcar en Veracruz, México. Revista Latinoamericana de Antropología del Trabajo, 3(5).

Ramírez-Díaz, R. C., Prato-Garcia, D., & Vasquez-Medrano, R. (2023). How sustainable is the biohydrogen produced from sugarcane vinasse? An approach based on life cycle assessment. *Biomass Conversion and Biorefinery*, *13*(16), 14755-14775. https://doi.org/10.1007/s13399-022-03242-1

Ramírez-Vásquez, J. D., Figueroa-Rodríguez, K. A., Velasco-Velasco, J., & Aguilar-Rivera, N. (2022). Trends and research on Covid-19 and farmers using VOSviewer. Agro Productividad, 15(11).165-176 https://doi.org/10.32854/agrop.v15i11.2412

Rendon-Sagardi, M. A., Sanchez-Ramirez, C., Cortes-Robles, G., Alor-Hernandez, G., & Cedillo-Campos, M. G. (2014). Dynamic analysis of feasibility in ethanol supply chain for biofuel production in Mexico. Applied energy, 123, 358-367. doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.01.023

Rial, R. C. (2024). Biofuels versus climate change: Exploring potentials and challenges in the energy transition. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 196, 114369. https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114369

Rimkus, A., Pukalskas, S., Mejeras, G., & Nagurnas, S. (2024). Impact of Bioethanol Concentration in Gasoline on SI Engine Sustainability. Sustainability, 16(6), 2397. https://doi.org/10.3390/su16062397

Röder, M., Mohr, A., & Liu, Y. (2020). Sustainable bioenergy solutions to enable development in low-and middle-income countries beyond technology and energy access. Biomass and Bioenergy, 143, 105876. doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105876

Rousseau, I. (2017). La nueva regulación de la gestión social de los proyectos energéticos en México. Seguridad, sustentabilidad y gobernabilidad. Revista mexicana de ciencias políticas y sociales, 62(230), 197-219.

Sabour, M. R., Tajvar, A., Hatami, A. M., & Mohamadi, F. (2021). Analysis of three decades of sugarcane researches focusing on ethanol and bioethanol. https://www.researchsquare.com/article/rs-

406682/v1 https://orcid.org/0000-0002-3606-3762

Sadhukhan, J., Martinez-Hernandez, E., Allieri, M. A. A., Eguía-Lis, J. A. Z., Castillo, A., Dominguillo, D., ... & Aburto, J. (2023). Strategic navigation of world-leading biorefineries and Mexico's policy landscape: A gateway to a sustainable circular bioeconomy. *Journal of cleaner production*, 140386.https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140386

Salcido, A., Carreón-Sierra, S., & Celada-Murillo, A. T. (2019). Air Pollution Flow Patterns in the Mexico City Region. Climate, 7(11), 128. https://doi.org/10.3390/cli7110128

Salina, F. H., de Almeida, I. A., & Bittencourt, F. R. (2020). RenovaBio Opportunities and Biofuels Outlook in Brazil. In Renewable Energy and Sustainable Buildings (pp. 391-399). Springer, Cham.

Sanap, P. P., Diwan, A. G., & Mahajan, Y. S. (2023). Ethanol blending in petrol: A techno-commercial overview. Materials Today: Proceedings. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.04.055

Shelar, M. N., Matsagar, V. K., Patil, V. S., & Barahate, S. D. (2023). Net energy analysis of sugarcane based ethanol production. Cleaner Energy Systems, 4, 100059. https://doi.org/10.1016/j.cles.2023.100059

Silalertruksa, T., & Gheewala, S. H. (2019). Competitive use of sugarcane for food, fuel, and biochemical through the environmental and economic factors. The International Journal of Life Cycle Assessment, 1-13. doi.org/10.1007/s11367-019-01664-0

Silva, H. J. T. D., Alcantara, I. R., Santos, P. F. A., Ferreira, B., & Delloiagono, R. (2023). Cana-de-açúcar e seus derivados no Brasil: um mapeamento setorial. Revista de Política Agrícola, 32(3), 36. https://seer.sede.embrapa.br/index.php/RPA/article/view/1889

Silveira, B. H., Costa, H. K., & Santos, E. M. (2023). Bioenergy with carbon capture and storage (BECCS) in Brazil: A review. *Energies*, *16*(4), 2021. https://doi.org/10.3390/en16042021

Spring, Ú. O. (2020). Energy Security: Policies and Potentials in Mexico. In Earth at Risk in the 21st Century: Rethinking Peace, Environment, Gender, and Human, Water, Health, Food, Energy Security, and Migration (pp. 413-447). Springer, Cham.

Suárez-Dávila, F. (2024). La encrucijada de México: 2024 ante las turbulencias globales. Una nueva estrategia necesaria. Ante serios peligros y grandes oportunidades/The crossroads of Mexico: 2024 in the face of global turbulence. A necessary new strategy. Faced with serious dan. *EconomíaUNAM*, *21*(61), 24-40. https://doi.org/10.22201/fe.24488143e.2024.61.848

Suali, E., & Suali, L. (2023). Impact assessment of global biofuel regulations and policies on biodiversity. In *Environmental Sustainability of Biofuels* (pp. 137-161). Elsevier.https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91159-7.00012-6

Subramaniam, Y., Masron, T. A., & Azman, N. H. N. (2020). Biofuels, environmental sustainability, and food security: A review of 51 countries. Energy Research & Social Science, 68, 101549. doi.org/10.1016/j.erss.2020.101549

Tanwar, M. D., Torres, F. A., Alqahtani, A. M., Tanwar, P. K., Bhand, Y., & Doustdar, O. (2023). Promising bioalcohols for low-

emission vehicles. Energies, 16(2), 597. https://doi.org/10.3390/en16020597

Teixeira, L. L. L., Murari, T. B., Brito, F. C., de Azevedo Marques, S. C., Cardoso, H. S. P., & Nascimento Filho, A. S. (2024). Scenarios and opportunities in the sugar and ethanol industry-challenges and opportunities towards a low carbon economy in Brazil. Revista de Gestão e Secretariado, 15(1), 276-290. https://doi.org/10.7769/gesec.v15i1.2996

Torroba, A., Orozco Montoya, R. A., & Productivo, D. Atlas de los biocombustibles líquidos 2022-2023.(2023). https://repositorio.iica.int/bitstream/handle/11324/21986/BVE23129369p.pdf?sequence=6&isAllowed=y

Verma, J., & Goel, S. (2023). State-of-the-art in bioresources for sustainable transportation. *International Journal of Hydrogen Energy*, *48*(10), 3768-3790. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.10.206

Vilaboa-Arroniz, J., Lopez-Collado, J., Platas-Rosado, D. E., & Vilaboa-Arroniz, I. (2019). The myth of biofuels in Mexico. Tropical and Subtropical Agroecosystems, 22(2), 431-441.

Villegas Vilchis, A., Platas Rosado, D., Gallardo-López, F., & López-Romero, G. (2020). Análisis estructural MicMac para determinar las variables estratégicas de la agroindustria azucarera en México. Revista mexicana de ciencias agrícolas, 11(6), 1325-1335. https://doi.org/10.29312/remexca.v11i6.2194

Xiao, Y., & Watson, M. (2019). Guidance on conducting a systematic literature review. Journal of Planning Education and Research, 39(1), 93-112. doi.org/10.1177/0739456X17723971

Yaverino-Gutiérrez, M. A., Wong, A. Y. C. H., Ibarra-Muñoz, L. A., Chávez, A. C. F., Sosa-Martínez, J. D., Tagle-Pedroza, A. S., ... & Balagurusamy, N. (2024). Perspectives and Progress in Bioethanol Processing and Social Economic Impacts. Sustainability, 16(2), 608. https://doi.org/10.3390/su16020608

Yeboah, O., & Shaik, S. (2021). The influence of climate change on the demand for ethanol. Renewable Energy, 164, 1559-1565. doi.org/10.1016/j.renene.2020.10.139

Zhang, X., Zhang, S., Zhao, Y., Liu, J., Zhang, S., Wen, M., & Liu, H. (2023). Effects of different additives on physicochemical properties of gasoline and vehicle performance. Fuel Processing Technology, 242, 107668. https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2023.107668