

UACM

Universidad Autónoma
de la Ciudad de México

NADA HUMANO ME ES AJENO

COLEGIO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

MAESTRÍA EN INGENIERÍA ENERGÉTICA

**Estudio del empleo de diferentes cáscaras como materia prima
para la obtención de bioetanol en México**

TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN INGENIERÍA ENERGÉTICA

PRESENTA

Celestino Díaz Sánchez

Director de la Tesis

Dr. José Alberto Mendoza Espinoza

Ciudad de México, octubre de 2024

SISTEMA BIBLIOTECARIO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE LA CIUDAD DE MÉXICO COORDINACIÓN ACADÉMICA

RESTRICCIONES DE USO PARA LAS TESIS DIGITALES

DERECHOS RESERVADOS[©]

La presente obra y cada uno de sus elementos está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor; por la Ley de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México, así como lo dispuesto por el Estatuto General Orgánico de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México; del mismo modo por lo establecido en el Acuerdo por el cual se aprueba la Norma mediante la que se Modifican, Adicionan y Derogan Diversas Disposiciones del Estatuto Orgánico de la Universidad de la Ciudad de México, aprobado por el Consejo de Gobierno el 29 de enero de 2002, con el objeto de definir las atribuciones de las diferentes unidades que forman la estructura de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México como organismo público autónomo y lo establecido en el Reglamento de Titulación de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México.

Por lo que el uso de su contenido, así como cada una de las partes que lo integran y que están bajo la tutela de la Ley Federal de Derecho de Autor, obliga a quien haga uso de la presente obra a considerar que solo lo realizará si es para fines educativos, académicos, de investigación o informativos y se compromete a citar esta fuente, así como a su autor ó autores. Por lo tanto, queda prohibida su reproducción total o parcial y cualquier uso diferente a los ya mencionados, los cuales serán reclamados por el titular de los derechos y sancionados conforme a la legislación aplicable.

Integración del jurado:

- Presidente: Dr. Fernando Díaz de León Sánchez, Universidad Autónoma Metropolitana, campus Iztapalapa.
- Secretario: Dr. José Alberto Mendoza Espinoza, Academia de Biología Humana, Universidad Autónoma de la Ciudad de México.
- Vocal: Dr. Carlos Chávez Baeza, Programa de Energía, Universidad Autónoma de la Ciudad de México
- Suplente: Dr. Alberto García Quiroz, Academia de Física, Universidad Autónoma de la Ciudad de México

Lugar donde se realizó el posgrado:

Plantel Centro Histórico, UACM.

Director de tesis:



Dr. José Alberto Mendoza Espinoza
Universidad Autónoma de la Ciudad de México

Agradecimientos Institucionales

Mi más sincero agradecimiento a la Universidad Autónoma de la Ciudad de México por brindarme un espacio para fortalecer mis conocimientos profesionales, y por brindarme las facilidades para culminar este trabajo, especialmente a los integrantes del Programa de Energía, a los profesores integrantes del Programa de Productos Naturales, a los profesores integrantes del Laboratorio de Biología y Química y a la Unidad de Investigación del Centro Histórico. A la Secretaria de Educación Ciencia tecnología e Innovación de la Ciudad de México, por el apoyo parcial recibido como parte del proyecto titulado: "*Búsqueda de compuestos dirigidos contra la subunidad alfa del dímero de tubulina* convenio SECTEI/148/2024 folio (3617c24)", bajo la responsabilidad del profesor José Alberto Mendoza, director de este trabajo.

Sin más mi reconocimiento a todas las personas que hicieron posible que este trabajo fuera una realidad.

Esta investigación derivó los siguientes trabajos:

1. En el XXVIII Simposio del Departamento de Ciencias de la Salud: Determinación del perfil químico de los compuestos fenólicos, capacidad antioxidante y grupos funcionales presentes en 6 cáscaras de frutos tropicales.
2. Celestino Díaz Sánchez, Mendoza-Espinoza, José Alberto, Claudia Ponce Sánchez, Fernando Díaz de León-Sánchez. Chemical Profile of Polyphenolic Compounds Present in the red and white varieties of Tunillo (*Stenocereus stellatus*) fruit. *Advances in Pharmacology & Clinical Trials (APCT)*. 2023.

Contenido

ÍNDICE DE FIGURAS	7
ÍNDICE DE TABLAS	8
INTRODUCCIÓN	9
CAPÍTULO I. MARCO CONTEXTUAL	11
1.1. ABASTO ENERGÉTICO GLOBAL Y SU IMPACTO SOCIOECONÓMICO Y AMBIENTAL	12
1.2 TENDENCIAS DE LA ENERGÍA RENOVABLE.....	14
1.3 FUENTES DE ENERGÍA RENOVABLE	15
1.3.1 <i>Energía solar</i>	17
1.3.2 <i>Energía eólica</i>	18
1.3.3 <i>Energía geotérmica</i>	19
1.3.4 <i>Energía hidráulica</i>	20
1.3.5 <i>Bioenergía</i>	21
1.4 BIOMASA Y EMISIONES DE DIÓXIDO DE CARBONO (CO ₂)	23
1.4.1 <i>Efectos de la sustitución de combustibles fósiles</i>	23
1.4.2 <i>Cambio de uso del suelo (directo e indirecto)</i>	23
1.5 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	24
1.6 JUSTIFICACIÓN.....	26
1.7. OBJETIVOS.....	28
1.7.1. <i>Objetivo general</i>	28
1.7.2. <i>Objetivos específicos</i>	28
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	29
2.1 <i>Bioetanol</i>	29
2.2 MATERIA PRIMA PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOETANOL	29
2.2.1 <i>Materia prima que contiene azúcar</i>	30
2.2.2 <i>Materia prima que contiene almidón</i>	30
2.2.3 <i>Materia prima que contiene lignocelulosa</i>	31
2.2.4 <i>Desechos agroindustriales como materia prima para la producción de biocombustibles</i> 32	
2.3 PRODUCCIÓN GLOBAL DE BIOETANOL	32
2.3.1 <i>Producción de bioetanol en México</i>	33
2.4 PRODUCCIÓN DE BIOETANOL.....	33
2.4.1 <i>Producción de bioetanol de primera generación</i>	33
2.4.2 <i>Producción de bioetanol de segunda generación</i>	34
2.4.3 <i>El pretratamiento en la producción de bioetanol</i>	37
2.4.3.1.1 <i>Métodos químicos</i>	41
2.4.3.1.2 <i>Métodos físicos</i>	46
2.4.3.1.3 <i>Métodos biológicos</i>	51
2.4.4 <i>La hidrólisis o sacarificación y fermentación</i>	52
2.4.5 <i>Destilación</i>	54
2.4.6 <i>Biorrefinerías</i>	54
2.4.7 <i>Producción de bioetanol de tercera generación</i>	55
2.5 PERSPECTIVAS DEL USO DE LA BIOMASA A NIVEL GLOBAL.....	56
2.6. PERSPECTIVAS DEL USO DE LA BIOMASA EN MÉXICO.....	58
CAPÍTULO III. METODOLOGÍA	60

3.1 ESQUEMA GENERAL DE LA METODOLOGÍA	60
3.2 OBTENCIÓN DE MATERIA PRIMA Y PROCESAMIENTO.....	60
3.3 OBTENCIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD Y MATERIA SECA	61
3.4 CARACTERIZACIÓN QUÍMICA.....	62
3.4.1 <i>Contenido de polifenoles totales</i>	62
3.4.2 <i>Evaluación cualitativa del contenido de azúcar</i>	63
3.4.3 <i>Cuantificación de azúcares reductores</i>	63
3.4.4 <i>Determinación de la capacidad oxidante</i>	65
ESQUEMA DE LA DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL ENERGÉTICO TEÓRICO DEL BIOETANOL.....	65
3.5 DETERMINACIÓN TEÓRICA DEL CONTENIDO DE ALCOHOL OBTENIDO POR FERMENTACIÓN	65
3.6 ANÁLISIS DEL POTENCIAL ENERGÉTICO.....	66
CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	67
4.1 EVALUACIÓN QUÍMICA Y FÍSICA DE LAS CÁSCARAS ESTUDIADAS	67
4.2 EVALUACIÓN CUALITATIVA DEL CONTENIDO DE SÓLIDOS SOLUBLES DE LAS CÁSCARAS DE LAS FRUTAS ESTUDIADAS	68
4.3 EVALUACIÓN DEL CONTENIDO DE LOS COMPUESTOS POLIFENÓLICOS TOTALES.....	70
4.4 DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE AZÚCAR EN LAS MUESTRAS	71
4.5 DETERMINACIÓN TEÓRICA DEL BIOETANOL OBTENIDO Y POTENCIAL ENÉRGICO.....	72
4.6 PROYECCIÓN Y POSIBLE IMPACTO EN EL COSTO DE PRODUCCIÓN DE BIOETANOL	73
CONCLUSIONES.....	75
PERSPECTIVAS.....	76
ANEXOS.....	77
ANEXO 1. ANALISIS ESTADISTICO DEL PORCENTAJE DE HUMEDAD	77
ANEXO 2. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA DETERMINACIÓN CUALITATIVA DEL CONTENIDO DE AZÚCAR EN LAS CÁSCARAS DE DIVERSAS FRUTAS MEDIANTE GRADOS BRIX.....	82
REFERENCIAS.....	94

Índice de figuras

FIGURA 1	EMISIONES GLOBALES DE GEI POR GAS	10
FIGURA 2	CRECIMIENTO ANUAL (%) DEL CONSUMO DE ENERGÍA DE DIFERENTES FUENTES DE 1965 A 2018	11
FIGURA 3	PARTICIPACIÓN DE LA PRODUCCIÓN GLOBAL DE PETRÓLEO CRUDO	12
FIGURA 4	PARTICIPACIÓN DE REFINADOS POR PRODUCTO EN 2019	13
FIGURA 5	SUMINISTRO MUNDIAL TOTAL DE ENERGÍA PRIMARIA EN 2020	15
FIGURA 6	SUMINISTRO MUNDIAL EN LA GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD MEDIANTE ENERGÍA SOLAR	16
FIGURA 7	TENDENCIA MUNDIAL EN LA GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD MEDIANTE ENERGÍA EÓLICA	17
FIGURA 8	TOP 8 PAÍSES CON CAPACIDAD GEOTÉRMICA INSTALADA EN 2019	18
FIGURA 9	TENDENCIA MUNDIAL EN LA GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD MEDIANTE ENERGÍA HIDRÁULICA	19
FIGURA 10	TENDENCIAS EN GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD EN MÉXICO	20
FIGURA 11	PARTICIPACIÓN DE LA BIOENERGÍA Y OTRAS FUENTES RENOVABLES EN EL CONSUMO GLOBAL TOTAL FINAL	21
FIGURA 12	PRODUCCIÓN GLOBAL DE ETANOL POR PAÍS (DEL TERCERO AL SÉPTIMO), 2016-2026	31
FIGURA 13	PRODUCCIÓN GLOBAL DE BIOETANOL (1G)	32
FIGURA 14	ESQUEMA DE LA PRODUCCIÓN GLOBAL DE BIOETANOL DE SEGUNDA GENERACIÓN (2G) A PARTIR DE RESIDUOS LIGNOCELULÓSICOS	33
FIGURA 15	TIPOS DE BIOMASA 2G	34
FIGURA 16	COMPOSICIÓN Y ESTRUCTURA DE LA BIOMASA LIGNOCELULÓSICA	34
FIGURA 17	EFFECTOS DEL PRETRATAMIENTO EN LA BIOMASA LIGNOCELULÓSICA. (A) BIOMASA LIGNOCELULÓSICA ANTES DEL PRETRATAMIENTO, (B) BIOMASA LIGNOCELULÓSICA DESPUÉS DEL PRETRATAMIENTO	37
FIGURA 18	PRODUCCIÓN GLOBAL DE BIOCOMBUSTIBLES LÍQUIDOS	56
FIGURA 19	CURVA PATRÓN DEL CONTENIDO DE POLIFENOLES CON ÁCIDO GÁLICO	61
FIGURA 20	CURVA PATRÓN PARA OBTENER LOS EQUIVALENTES DE AZÚCARES REDUCTORES	69

Índice de tablas

TABLA 1	ALGUNOS MÉTODOS DE PRETRATAMIENTO PARA LA MATERIA LIGNOCELULÓSICA Y SUS COSTOS	37
TABLA 2	DIFERENTES MÉTODOS DE PRETRATAMIENTO Y SU IPACTO EN LA MATERIA LIGNOCELULÓSICA	39
TABLA 3	PRODUCCIÓN DE BIOETANOL CON DIFERENTES TIPOS DE PRETRATAMIENTO ALCALINO	41
TABLA 4	PRODUCCIÓN DE BIOETANOL CON DIFERENTES TIPOS DE PRETRATAMIIENTO ÁCIDO	42
TABLA 5	PRODUCCIÓN DE BIOETANOL CON DIFERENTES TIPOS DE PRETRATAMIENTO CON LÍQUIDO IÓNICO	43
TABLA 6	PRODUCCIÓN DE BIOETANOL CONNDIFERENTES TIPOS DE PRETRATAMIENTO USANDO SOLVENTES ORGÁNICOS	44
TABLA 7	PRODUCCIÓN DE BIOETANOL CON DIFERENTES TIPOS DE PRETRATAMIENTO CON MICROONDAS	47
TABLA 8	PRODUCCIÓN DE BIOETANOL CON PRETRATAMIENTO USANDO EXPLOSIÓN DE VAPOR	48
TABLA 9	PRODUCCIÓN DE BIOETANOL CON PRETRATAMIENTO USANDO AGUA LÍQUIDA CALIENTE	49
TABLA 10	PRODUCCIÓN DE BIOETANOL CON PRETRATAMIENTO USANDO MÉTODOS BIOLÓGICOS	51
TABLA 11	PRODUCCIÓN DE BIOETANOL A PARTIR DE DIFERENTES ESPECIES DE ALGAS Y DE MICROALGAS	55
TABLA 12	CURVA PATRÓN DE GLUCOSA CON EL MÉTODO DE MILLER	64
TABLA 13	DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE DE HUMEDAD DE LAS CÁSCARAS DE DIVERSAS FRUTAS	66
TABLA 14	DETERMINACIÓN CUANTITATIVA DEL CONTENIDO DE AZÚCAR EN LAS CÁSCARAS DE DIVERSAS FRUTAS	68
TABLA 15	CONTENIDO DE AZÚCAR EN LAS MUESTRAS DE CÁSCARAS	71
TABLA 16	COSTO (%) POR CONCEPTO EN LA PRODUCCIÓN DE ETANOL (PESOS/LITRO)	73

Introducción

El incremento de la industrialización y el crecimiento de la población mundial han provocado un aumento en el consumo de la energía debido a la necesidad de satisfacer sus demandas, la cual es generada principalmente por fuentes fósiles, con el consiguiente aumento de problemas asociados a dicho consumo, tales como son la emisión de gases de efecto invernadero (GEI), y la creación de desechos tóxicos difíciles de manejar.

Esto plantea la necesidad de buscar fuentes alternativas de energía, sustentables de bajo costo. Una opción para satisfacer dichas necesidades es el empleo de alternativas para la obtención de biocombustibles, lo que tiene como ventajas que son amigables al medio ambiente y ayudan a un manejo adecuado de los desechos agrícolas y domésticos.

Entre la biomasa disponible para la obtención de biocombustibles en países como México, se puede mencionar a los desechos de productos agrícolas y domésticos, como las cáscaras de las frutas, ya que su uso como materia prima para obtener dichos biocombustibles no representan ninguna amenaza a la seguridad alimentaria debido a que no se usan como alimento, ayudando además a un manejo sustentable de dichos residuos.

Además, de estos residuos es posible obtener otros compuestos de gran valor tanto en la industria alimentaria como en la farmacéutica, entre los que se encuentran los ácidos grasos, los polifenoles, flavonoides, carotenoides, entre otros compuestos derivados del metabolismo secundario. En este trabajo se determinaron los polifenoles para las cáscaras de las frutas estudiadas debido a que este tipo de compuestos se correlacionan con la prevención de enfermedades crónico-degenerativas gracias a sus propiedades antioxidantes. Sin embargo, el aporte principal de este trabajo fue la determinación del potencial energético teórico de varias cáscaras de frutas.

En el capítulo I se presenta una visión general acerca de las tendencias en la obtención y desarrollo de las fuentes de energía renovable, haciendo énfasis en la biomasa y sus ventajas, desventajas y efectos en las emisiones de CO₂. Además,

se plantea el manejo y uso de los residuos orgánicos, en particular, los de cáscaras de frutas, con el objetivo de obtener bioetanol para usarlo como biocombustible en los automóviles. Asimismo, se presenta la justificación del trabajo, con datos acerca del uso de combustibles fósiles y la producción de desechos de cáscaras de frutas, y la conveniencia de tratarlas con el fin de obtener biocombustibles de ellas, hasta llegar a plantear los principales objetivos de este trabajo, los cuales fueron evaluar el contenido de azúcares reductores, y determinar el potencial energético teórico de las mismas.

El capítulo II presenta los avances en las técnicas de tratamiento de residuos orgánicos para la obtención de biocombustibles, haciendo un recuento de la materia prima adecuada para la obtención de azúcares reductores, los métodos de pretratamiento, los métodos de hidrólisis, así como los de destilación; finalmente, se mencionan las perspectivas en el uso de los biocombustibles en México y a nivel global.

En el capítulo III se presenta la metodología utilizada para el procesamiento de la materia prima para la obtención de azúcares reductores, desde el pretratamiento, la hidrólisis y finalmente la obtención de azúcares reductores. Además, se determinó el contenido teórico de alcohol que se obtendría mediante fermentación, y el potencial energético teórico de dicho alcohol con base en su capacidad calorífica.

En el capítulo IV se analizan los resultados obtenidos en el laboratorio, así como los cálculos teóricos para la determinación de azúcares reductores en las muestras de cáscaras de frutas seleccionadas, para finalmente plantear las conclusiones y los trabajos futuros derivados de este reporte de investigación.

CAPÍTULO I. Marco contextual

Para satisfacer las necesidades globales de energía se ha recurrido principalmente al uso de combustibles fósiles, cuya demanda se espera que se incremente rápidamente, para la producción de combustibles, electricidad y otros bienes, lo que provoca impactos nocivos en el medio ambiente (Kour y cols., 2019).

Desde el comienzo de la revolución industrial hasta el día de hoy, los combustibles fósiles han sido y son la principal fuente de energía, y su uso ha aumentado hasta cerca de 10,000 millones de toneladas de equivalentes de petróleo. Se espera que para el año 2040 el 78% del total del consumo de energía en el mundo sea cubierto por combustibles fósiles (Klemes y cols., 2019).

De acuerdo con la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA, por sus siglas en inglés), el 65% del total de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) son emisiones de dióxido de carbono (CO₂) que provienen de combustibles fósiles y de procesos industriales (EPA, 2022) (Figura 1).

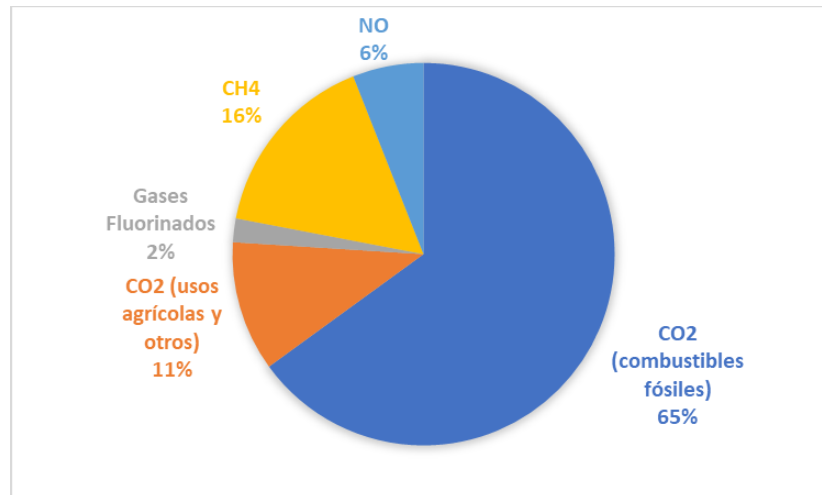


Figura 1. Emisiones Globales de GEI por gas.

Tomado de: US Environmental Protection Agency.

1.1. Abasto energético global y su impacto socioeconómico y ambiental

Los combustibles fósiles son recursos energéticos derivados de restos de organismos vivos enterrados bajo sedimentos y sometidos a presiones y temperaturas elevadas a lo largo de millones de años. Se definen como no renovables debido a los largos periodos que toma su formación (Gerali, 2020). Los principales grupos de combustibles fósiles son el petróleo, el carbón y el gas natural.

Los datos estadísticos proporcionados por British Petroleum (BP Statistical) acerca de la energía mundial muestran que la humanidad ha quemado 404 gigatoneladas de combustible fósil equivalente (Gtoe, por sus siglas en inglés) durante el periodo de 1965 a 2018, emitiendo durante este periodo aproximadamente 1204 gigatoneladas de CO₂ (Gt) en la atmósfera de la Tierra (BP Statistical, 2014).

Con el desarrollo de nuevas tecnologías para aprovechar la energía de diversas fuentes (nuclear, hidráulica, eólica o solar) el consumo de los combustibles fósiles ha disminuido un poco a partir de 1980 como se muestra en la Figura 2.

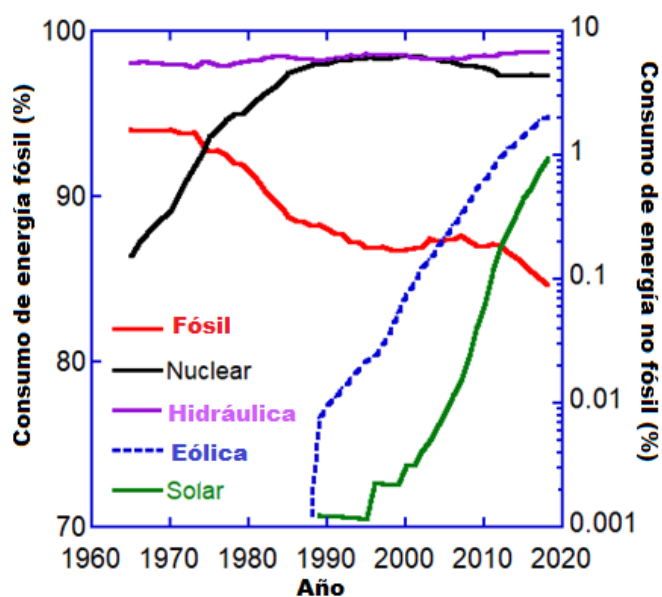


Figura 2. Crecimiento anual (%) del consumo de energía de diferentes fuentes de 1965 a 2018.

Tomado de: Ghosh & Ghosh, 2020.

Las malas noticias son que se estima que la emisión total anual global de CO₂ ha aumentado en más de 2% en 2018 y probablemente alcanzará niveles mayores. Se atribuye este incremento al aumento en el uso de combustibles fósiles de algunos países con el fin de obtener beneficios económicos (Corinne y cols., 2018).

El consumo global total de energía a partir de combustibles fósiles (petróleo, gas y carbón) en 2018 fue de 84.7%, mientras que a partir de otras fuentes (nuclear, solar, hidráulica y otras) fue de 15.3% (Ghosh & Ghosh, 2020).

En cuanto al petróleo, en la Figura 3 se muestra a los principales productores de petróleo crudo a nivel global, en donde Estados Unidos de Norteamérica se mantiene como el mayor productor de este hidrocarburo.

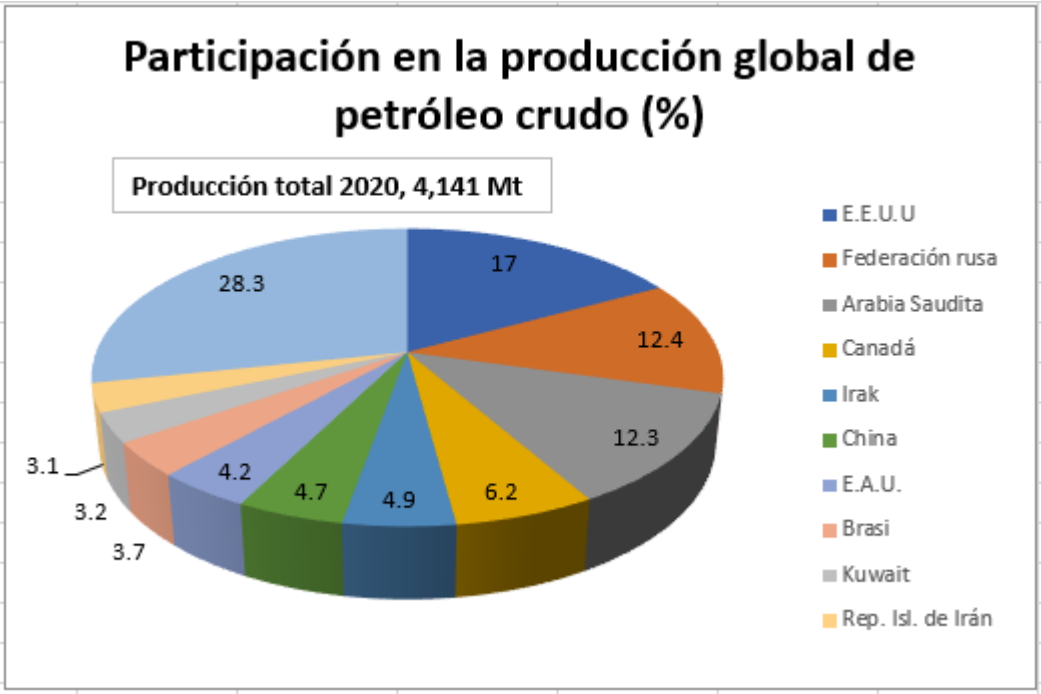


Figura 3. Participación en la producción global de petróleo crudo. Elaboración propia con datos recuperados de IEA.

Por otra parte, México tuvo una producción de 1.732 Mt, lo que lo mantiene lejos de los principales productores de petróleo en el mundo (PEMEX, 2021).

La mayor parte de la producción de petróleo crudo se destina a la obtención de gasolina para motores, como se observa en la Figura 4.

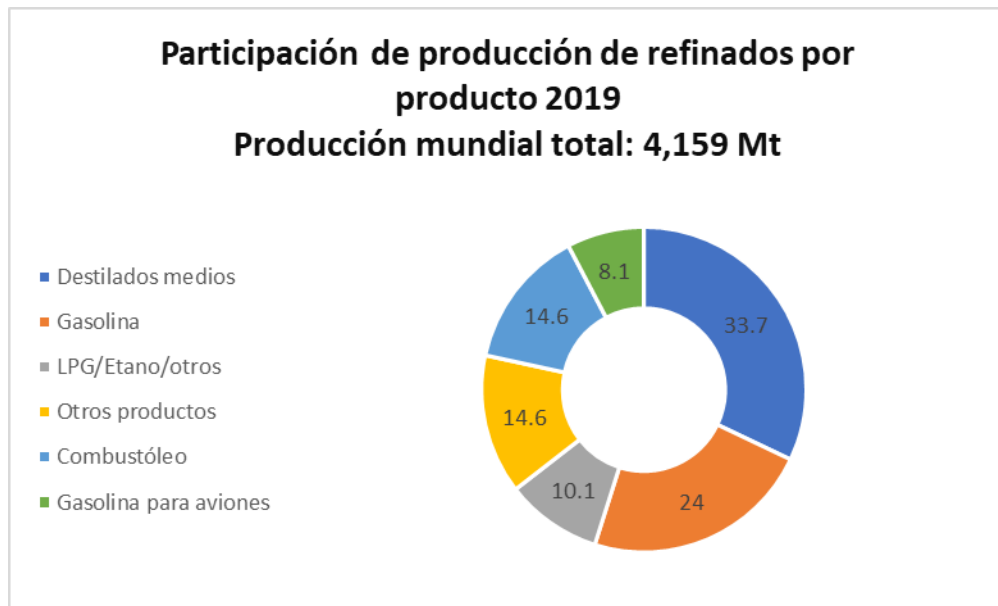


Figura 4. Participación de refinados por producto en 2019. Elaboración propia con datos recuperados de IEA.

1.2 Tendencias de la energía renovable

Se requiere energía para el desarrollo, por lo que es necesario avanzar en el estudio de tecnologías de energía sustentables. Es necesario hacer tres cambios importantes para lograr el desarrollo de las energías sustentables: la reducción de las emisiones, la sustitución de la generación de potencia eléctrica basada en combustibles fósiles por fuentes de energía renovable (ER) y el mejoramiento de la eficiencia energética (EE) (Ostergaard, 2020).

Las fuentes de energía renovable (FER) o fuentes de energía alternas son todas aquellas fuentes que pueden producir energía casi indefinidamente, y son inagotables. Las FER incluyen a la energía solar, la eólica, la bioenergía, la geotérmica, la hidráulica, y la energía del océano, y pueden ser usadas para generación de energía eléctrica, transportación, usos domésticos, calefacción urbana, entre otros.(Panwar y cols., 2011).

La capacidad de las energías renovables (ER) está creciendo vertiginosamente, gracias a las tecnologías vanguardistas que han disminuido los costos y prometen un futuro con energía limpia. A pesar del rápido crecimiento de todos los tipos de ER, esta capacidad varía dependiendo de una forma de ER a otra (Moriarty, 2020).

La principal forma de energía renovable (ER) hoy en día es la biomasa, principalmente como combustible, a partir de madera que se usa en países con bajos ingresos (IEA, 2019). En 2017, se estimó que era del 9.5% de la energía primaria global. A pesar de que su gran potencial, la competencia con otras formas de uso de la biomasa, como alimento, forraje, fibras y silvicultura, ha restringido fuertemente su crecimiento por la necesidad de preservar la biodiversidad (Moriarty & Honnery, 2019).

Las Naciones Unidas han estimado que en 2050 la población global será de alrededor de 7.8 a 9.7 billones de personas, y ninguna forma de energía procedente de fuentes diferentes a la biomasa crecerá en la misma proporción (UN, 2020). Los combustibles líquidos en el año 2019 proporcionaron globalmente solamente 4.1 exajoules (EJ = 10¹⁸ Joules), siendo E.U.A y Brasil los que suministraron 62% del total de esa cantidad de energía (BP, 2020).

1.3 Fuentes de energía renovable

Las tecnologías de energías renovables proveen una excelente oportunidad para mitigar las emisiones de GEI y reducir el calentamiento global sustituyendo las fuentes de energía convencionales, de las cuales el biocombustible representa solo el 9 % (Figura 5). Estas tecnologías se consideran fuentes limpias de energía cuyo uso óptimo minimiza los impactos ambientales, produce pocos desechos secundarios y son sustentables basándose en las necesidades económicas y sociales actuales y futuras. La luz solar y el calor se transforman en una multitud de tipos de energía utilizables (Paanwar y cols., 2011).

Las fuentes de energía renovables tienen un número significativo de potencialidades y de ventajas. Pueden mejorar la calidad del ambiente, ya que producen muy poca o ninguna emisión de GEI. Distribuyen equitativamente la

energía y solucionan la seguridad energética y los problemas de pobreza energética, ya que dichas fuentes se pueden encontrar en casi cualquier lugar de la tierra, asimismo pueden considerarse una fuente confiable de energía, comparadas con los combustibles fósiles. Además, tienen bajos costos de operación y beneficios económicos y, en un nivel macroeconómico, apoyan a los empleos y estabilizan los precios de la energía. Pueden mejorar las condiciones de vida en una familia y pueden satisfacer más necesidades energéticas sin agotarse (Sisksnelyte-Butkiene y cols., 2020).

Las principales desventajas de las fuentes de energía renovables incluyen sus altos costos iniciales, los que pueden ser excesivos y disuasorios para los usuarios, así como el costo de los sistemas de almacenamiento, los cuales también son muy altos. Además, la energía renovable depende de las condiciones ambientales, así que, si hay condiciones ambientales impredecibles por un largo periodo de tiempo, puede provocar deficiencia energética (Owusu & Asumadu-Sarkodie, 2016). Adicionalmente, se necesitan grandes áreas de tierra para instalar la tecnología necesaria para las energías renovables. La energía renovable puede proporcionar cerca del 50% del total de energía requerida en los E.U., pero utiliza más del 17% de la tierra disponible en ese país (Figura 5) (Klemes y cols., 2019).

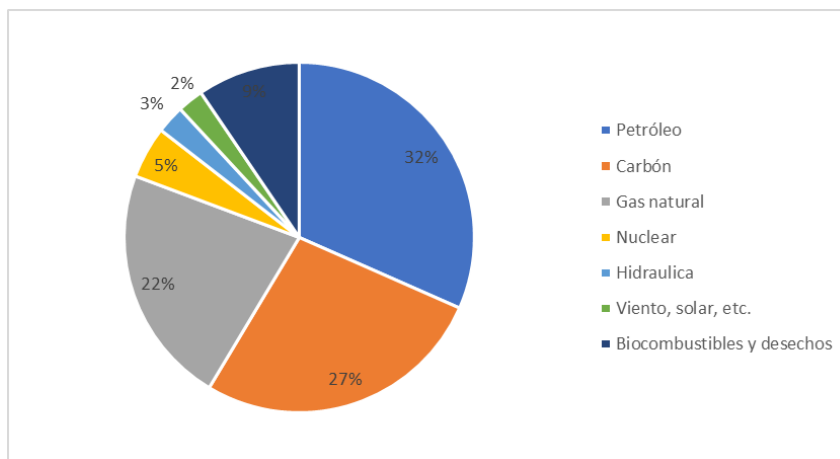


Figura 5. Suministro mundial total de energía primaria en 2020.

Figura

1.3.1 Energía solar

La energía solar se refiere a la energía que proviene de la luz solar o del calor de este (Timilsina y cols., 2012). Se genera ya sea en sistemas fotovoltaicos (FV) o en sistemas de generación de concentración solar (GCS). Los sistemas FV son paneles que convierten la energía del sol en electricidad, pueden tener uso doméstico o a gran escala, y son una de las más importantes tecnologías modernas de energía renovable. Se espera que tengan un importante papel en la generación de energía y electricidad en el futuro. Los GCS usan espejos para recolectar los rayos solares los cuales calientan un fluido, y el vapor generado mueve una turbina para generar electricidad (IRENA, 2020).

El sol puede producir energía por un periodo indeterminable a escala humana, lo que significa que la energía solar puede potencialmente eliminar el uso de combustibles fósiles y satisfacer toda la demanda de energía a nivel mundial (Kabir y cols, 2018).

Específicamente, el sol puede proveer más de 7,500 veces el consumo mundial total anual de energía primaria que asciende a 450 EJ, según el Consejo Mundial de Energía (Urban & Mitchell, 2018). Adicionalmente, la energía solar no contamina y no daña el ambiente y la salud humana, mientras que puede proporcionar seguridad energética, ya que la energía solar está disponible en prácticamente todas partes en el planeta (Timilsina y cols., 2012). Es importante mencionar que la tendencia en la generación de electricidad va en aumento globalmente (Figura 6).

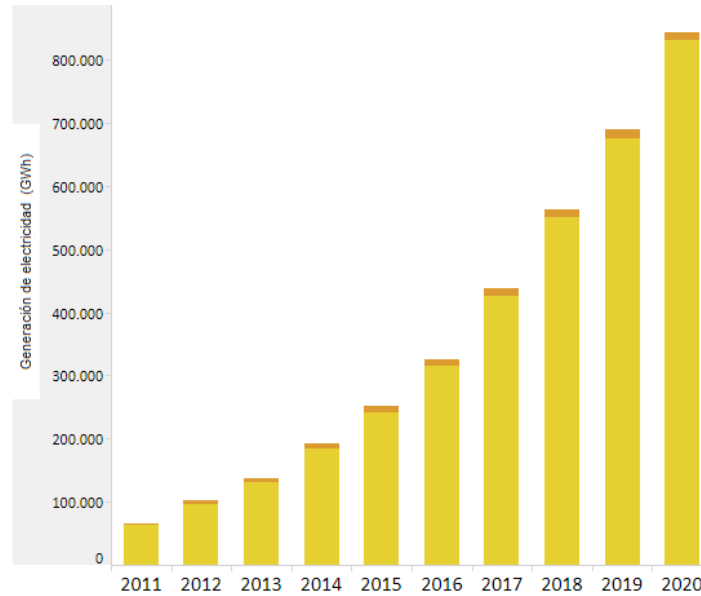


Figura 6. Tendencia mundial en la generación de electricidad mediante energía solar.

1.3.2 Energía eólica

La energía eólica produce electricidad convirtiendo la energía cinética del aire en energía mecánica, y posteriormente en energía eléctrica a través de turbinas de aire o sistemas de conversión de energía eólica (Ellabban y cols., 2014). Las aspas de las turbinas rotan impulsadas por el viento, lo que hace girar a una turbina conectada, produciendo energía, cuya cantidad depende del tamaño de la turbina y de la longitud de las aspas (IRENA, 2019).

La capacidad global instalada de generación eólica en la tierra y en océanos se ha incrementado en un factor de casi 75 en las pasadas dos décadas, pasando de 7.5 GW en 1997 a casi 564 GW en 2018, de acuerdo con los datos de IRENA. La producción de electricidad usando la energía del viento se duplicó entre 2009 y 2013, y en 2016 proporcionó el 16% del total de las energías renovables (IRENA, 2019), observándose esta tendencia en aumento en 2020 como se observa en la Figura 7 (IRENA, 2020).

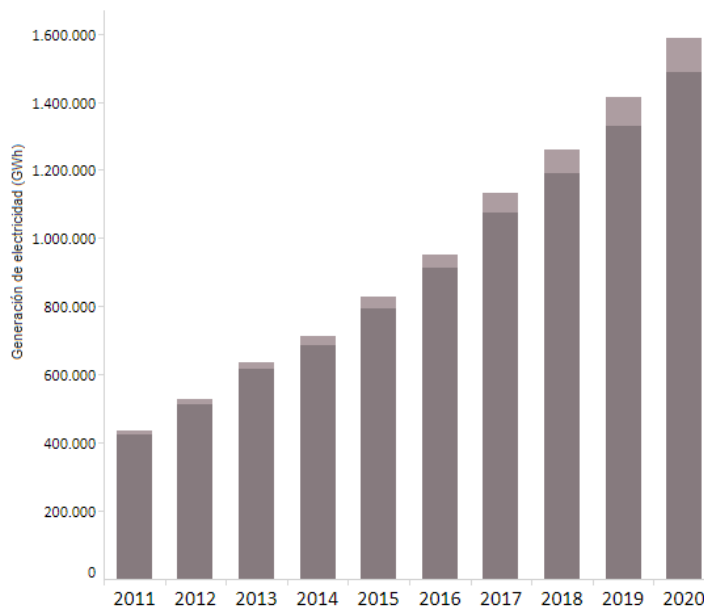


Figura 7. Tendencia mundial en la generación de electricidad mediante energía eólica.

1.3.3 Energía geotérmica

La energía geotérmica se refiere a la energía extraída de la Tierra usando procesos naturales (Owusu y cols., 2016). Estos procesos incluyen agua y vapor, los cuales pueden transferir energía térmica a la superficie de la Tierra. Hay diferentes tecnologías que pueden usarse, como calefacción urbana, bombas de calor geotérmico, reservorios hidrotermales, entre otras fuentes. (IRENA, 2019).

Los impactos negativos surgen del uso de la energía geotérmica que incluyen la liberación de ciertos GEI en la atmósfera, aun cuando sus cantidades son significativamente menores comparadas con la cantidad de GEI liberados por los combustibles fósiles. Finalmente, los altos costos iniciales pueden desalentar a los usuarios a invertir en este tipo de fuente de energía (Shortall y cols., 2015). En este rubro Estados Unidos lleva la delantera en la capacidad instalada, seguido de Indonesia y Filipinas (Figura 8).

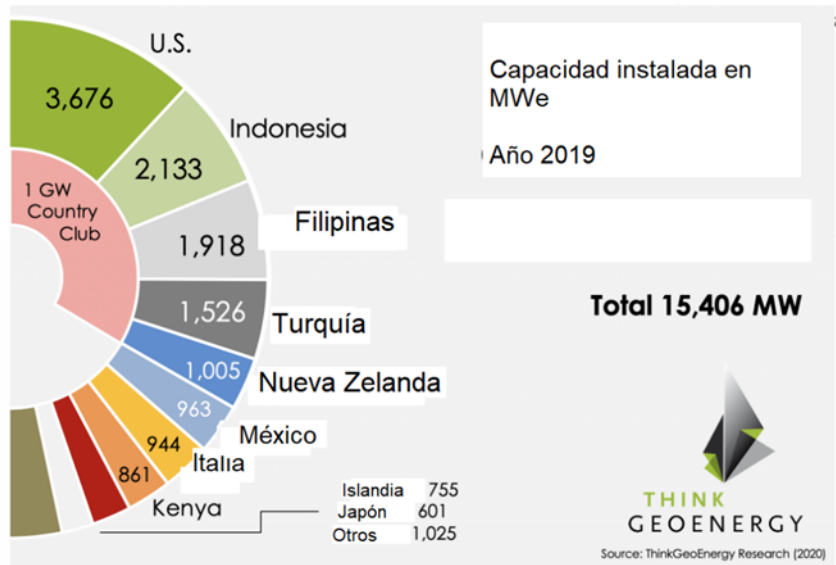


Figura 8. Top 10 países con capacidad geotérmica instalada en 2019.

1.3.4 Energía hidráulica

La energía hidráulica es la que se obtiene a partir del movimiento del agua, para convertirla en electricidad (Ellabban y cols., 2014). Las plantas de generación hidráulica pueden estar o no en presas o reservorios de agua, las primeras pueden tener una gran capacidad de almacenamiento y producir energía a gran escala, mientras que, si no cuenta con una presa, se recomienda para producir energía para satisfacer pequeñas necesidades, por lo que es considerada una opción de generación de energía mucho más amigable al ambiente (IRENA, 2019).

Entre las desventajas de la energía hidráulica, debemos mencionar que puede interferir en los hábitats acuáticos y su población, y requiere monitoreo constante de la calidad del agua (Okot, 2013). También, depende de los ciclos de las precipitaciones, y la disponibilidad del agua no puede ser controlada.

Finalmente, los costos efectivos de la tecnología usada y los costos iniciales de instalación son bastante altos (Mohtasham, 2015). En la tendencia de generación de energía se ha mantenido constante (Figura 9).

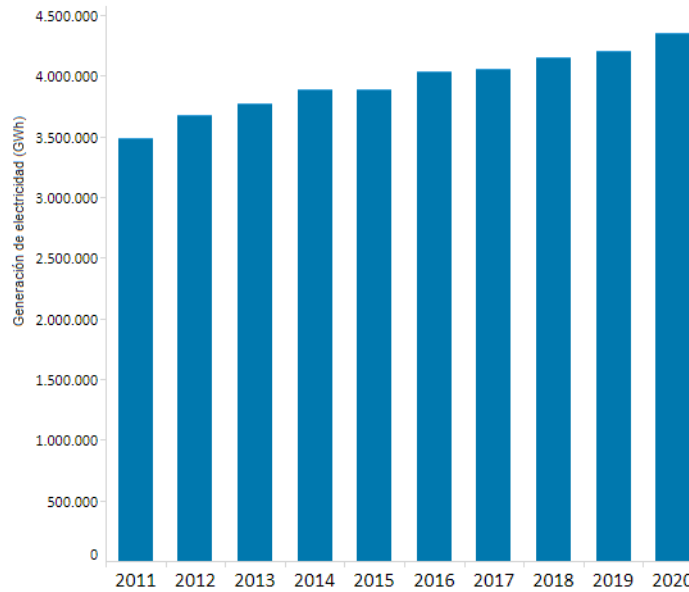


Figura 9. Tendencia mundial en la generación de electricidad mediante energía hidráulica.

1.3.5 Bioenergía

La bioenergía es renovable, puede ser producida en cualquier parte, y puede ser usada para generar electricidad, calor o en el transporte (Bildirici, 2013). Debido a este potencial, y a su amplio uso, aproximadamente 75% de la energía renovable involucra energía de biomasa (IRENA, 2019), teniendo una tendencia de producción muy estable en el tiempo (Figura 10). Adicionalmente, es neutral con respecto al carbono, lo que significa que no origina aumento neto al dióxido de carbono de la atmósfera (Abbasi & Abbasi, 2017). La bioenergía también tiene beneficios socioeconómicos ya que su producción estimula la creación de empleos rurales con los consiguientes beneficios, por lo que puede contribuir a la reducción de la pobreza en países en desarrollo (Bildirici, 2013).

Las fuentes de biomasa pueden ser transformadas en biocombustibles en estado sólido, líquido o gaseoso, y la energía de la biomasa (o bioenergía) obtenida a partir de estas fuentes puede ser usada para el transporte, calefacción y generación de electricidad (Searle & Malins, 2015). Además, el diésel y la gasolina pueden reemplazarse con biocombustibles (Demirbas, 2008).

En México ha habido un aumento constante de la generación eléctrica (Figura 10); para el uso de generación de electricidad, calor y movilidad mediante diversas fuentes alternativas de energía, se ha determinado que 16% del consumo de electricidad basado en combustibles fósiles puede ser reemplazado por fuentes de biomasa, por lo que las emisiones de GEI se reducirían en un 17% en el año 2035 (García, 2015).

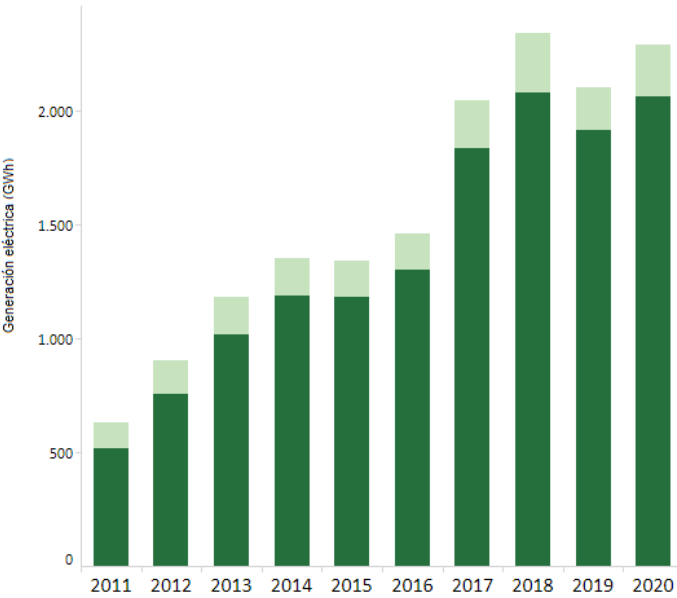


Figura 10. Tendencias en generación de electricidad en México.

Globalmente, la bioenergía se mantiene como la más grande fuente de energía renovable contribuyendo con 12% del consumo final de energía (Figura 11). Actualmente, más del 80% de la bioenergía se usa para cocinar y para calefacción en edificios y la industria. En forma global, en 2020, la bioenergía proveyó cerca del 20% del consumo total para calefacción, con el 8% obtenido a partir de formas modernas de bioenergía y 12% a partir de usos tradicionales de la biomasa (IRENA, 2022).

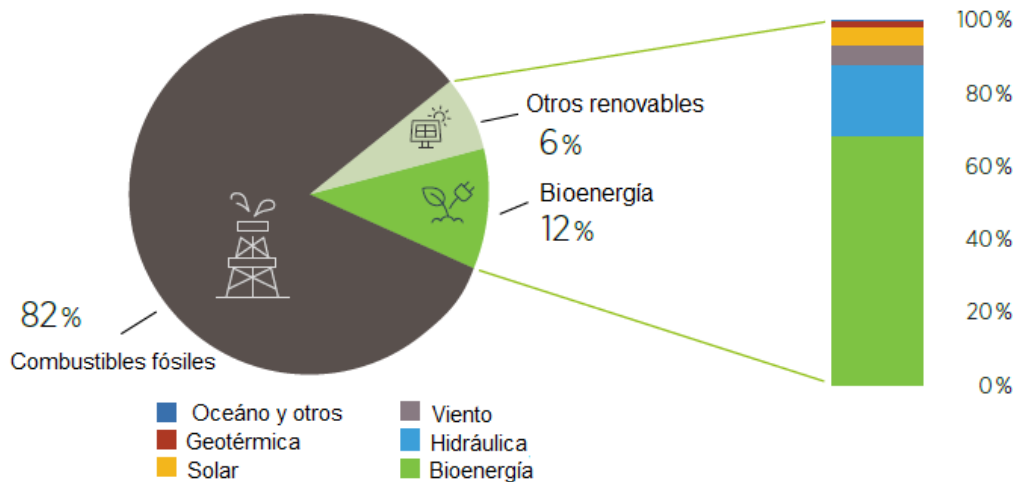


Figura 11. Participación de la bioenergía y otras fuentes renovables en el consumo global total final.

1.4 Biomasa y emisiones de dióxido de carbono (CO₂)

La biomasa produce menos dióxido de carbono y otras emisiones de gases contaminantes comparado con los combustibles fósiles (Demirbas, 2009). Algunos trabajos sobre el ciclo de vida revelan que, si la gasolina se reemplaza por bioetanol producido a partir de maíz, celulosa y caña de azúcar, la emisión de GEI se reduce sustancialmente (Searchinger, 2008).

1.4.1 Efectos de la sustitución de combustibles fósiles

Un estudio indica que el uso de etanol y biodiesel pueden reducir la emisión de GEI en un 30% y 50%, respectivamente (Pradhan & Mbohwa, 2014). Además, es de notar que los combustibles derivados del aceite vegetal pueden reducir las emisiones de CO₂ en entre 30-60% (Fontaras y cols., 2012).

1.4.2 Cambio de uso del suelo (directo e indirecto).

El incremento en la necesidad de materia prima para producir bioenergía requiere más tierra, por lo que los granjeros necesitan más bosques y pastizales (Searchinger, 2008). De acuerdo con lo anterior, la producción de materia prima para producir bioenergía tiene un impacto directo en la transformación de tierras y en su deforestación (Rajcaniova y cols., 2014). Las tierras forestales retienen una gran cantidad de CO₂. Por lo tanto, la producción de materia prima para producir

bioenergía puede inducir a la deforestación y, por lo tanto, puede causar que una gran cantidad de dióxido de carbono se libere a la atmósfera (Searchinger y cols., 2008).

1.5 Planteamiento del problema

Una de las principales preocupaciones a nivel global es que la energía no es ilimitada. La industrialización, el crecimiento de la población a grandes velocidades, así como la urbanización, y el desarrollo del transporte ha incrementado el uso de carbón, petróleo y gas natural. La demanda global de energía se ha incrementado al doble de 1970 a 2000, y ha aumentado en 26% de 2000 a 2010 (IEA, 2012), mientras que, en 2019, globalmente se produjeron y consumieron 100 millones de barriles de petróleo por día. Los Estados Unidos lideran mundialmente tanto en producción como en consumo, produciendo cerca de 18.6 millones de barriles y consumiendo cerca de 18.1 millones de barriles por día en 2020 (EESI, 2021).

La seguridad energética es la segunda preocupación a nivel mundial, y se refiere al uso de diferentes tipos de energía a precios convenientes de tal manera que no se produzcan efectos intolerables en la economía ni en el ambiente (Vivoda, 2012).

La tercera preocupación a nivel mundial es el calentamiento global. Las emisiones de CO₂ debido al uso de fuentes fósiles de energía, como petróleo, carbón y gas natural son la principal razón de serios problemas ambientales (Nejat, 2015). El carbón contribuyó con más del 40% del crecimiento total en las emisiones globales de CO₂, alcanzando 15.3 billones de toneladas. Las emisiones de este gas a partir del gas natural regresaron a los niveles de 2019 de 7.5 billones de toneladas. Las emisiones de CO₂ a partir del petróleo fueron de 10.7 billones de toneladas en 2021, las cuales son significativamente más bajas que antes de la pandemia, debido a la limitada recuperación en la actividad global del transporte (IEA, 2022).

Según datos de SENER (SENER, 2020), en 2019, el consumo mundial de energía fue de 9,983.11 millones de toneladas equivalentes de petróleo (MMtep). Los países que registraron mayor consumo energético fueron: China (21.05%),

Estados Unidos (15.91%), India (6.31%), Rusia (5.22%) y Japón (2.80%), mientras que México se ubicó en el lugar quince de este ranking internacional.

Particularmente en el caso de México, en 2020 la producción de energía primaria se basó principalmente en los hidrocarburos, con el 84.06% de un total de 6,784.80 PJ y con solamente el 11.25% en la participación de fuentes renovables de energía. En el mismo año, el consumo total energético en el sector transporte fue el 38.44% de un consumo nacional total de 4,432.60 PJ. Las gasolinas y naftas fueron los combustibles de mayor consumo energético, con el 24.91% (SENER, 2020).

En 2021, de acuerdo con datos de Petróleos Mexicanos, en los primeros 11 meses del año se vendieron 564 mil 700 barriles diarios del combustible; contra 568 mil registrados en el mismo periodo del año anterior 2020. En ambos años, la compra de gasolina en el país se ha mantenido por debajo de los niveles de 2019, periodo previo a la pandemia (García, 2021).

Por otro lado, en el reporte de Pemex, se señala que la caída en la venta se concentra en la gasolina premium, es decir, la de alto octanaje. En promedio, en el país se consumieron 122 mil 700 barriles diarios de este producto, lo que representó una baja de casi 10 mil barriles diarios en relación con el año previo (García, 2021).

Entre la primera quincena de diciembre de 2021 y el mismo periodo del año anterior, el precio del combustible de alto octanaje presenta un incremento de 22 por ciento, mientras que la gasolina magna se encareció casi 15 por ciento en el mismo lapso, de acuerdo con datos del Instituto Nacional de Geografía e Informática (INEGI) (García, 2021).

Por otra parte, un tercio de los alimentos producidos para consumo humano se convierten en desechos en el proceso de su producción hasta que son consumidos (Gustavsson y cols., 2011). Esto provoca pérdidas económicas en términos de los recursos usados para producirlos, problemas ambientales como la emisión de GEI, así como la generación y acumulación de dichos desechos, lo que genera costos de recolección, transporte y disposición final de los mismos. Se estima que la producción global de desechos orgánicos municipales será de más de 100 millones de toneladas por año en 2025 (Ranieri y cols., 2018).

1.6 Justificación

Una opción para mitigar los problemas generados por los altos consumos de combustibles fósiles es el uso de recursos renovables para la producción de energía y mantener la neutralidad del carbón. Entre estos recursos renovables se encuentra la biomasa proveniente de los desechos agroindustriales para la producción de biocombustibles (Induleka y cols., 2017).

Entre los desechos agroalimenticios más importantes generados en la industria de procesamiento, los supermercados y los hogares, podemos mencionar a las frutas y vegetales, cuyos desechos en algunos casos exceden 25% del producto adquirido (Gustavsson y cols., 2011). Estos residuos son de interés debido a su alto contenido de carbohidratos como sustratos para la obtención de biocombustibles (Esparza y cols., 2020), tales como bioetanol, biohidrógeno, biometano y biobutanol (Habubackar y cols., 2019).

Después de ser sometidos a pretratamiento estos desechos de frutas y vegetales, pueden ser usados como sustratos en bioprocesos fermentativos para obtener biocombustibles debido a su alto contenido de carbohidratos (20-30% del peso seco en la pulpa de los cítricos, 50-60% del peso seco en la pulpa de las manzanas y 60-70% del peso seco en la cáscara de la papa) (Arapoglou y cols., 2010).

Las frutas cítricas, entre las que se encuentran las naranjas, toronjas, limones y mandarinas, son de las más ampliamente cultivadas en todo el mundo. Su producción aumenta cada año debido al incremento en su consumo. Las industrias de procesamiento de los cítricos generan grandes cantidades de desechos cada año, con cerca del 50% de la masa de la fruta perteneciente a la cáscara de naranja. Estos desechos de cítricos contienen sustancias de gran valor económico, como flavonoides, carotenoides, azúcares, fibras, polifenoles, aceites esenciales, ácido ascórbico y otras trazas de elementos activos (Kavita y cols., 2017).

La producción de naranjas para la temporada 2020-21 aumento en 3.6 millones de toneladas métricas en comparación con el año anterior, la cual fue de 49.4 millones de toneladas métricas (Citrus Industry, 2021).

Para el año 2020, de acuerdo con registros estadísticos de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), los 10 principales países exportadores de cítricos del mundo, movilizaron 14,586 mil toneladas de producto, lo equivalente al 77.99% del volumen exportado; en este rubro México ocupó el séptimo lugar aportando el 4.68% de esta cantidad, esto es, 682.62 mil toneladas. Esto genera una gran cantidad de desecho, lo que causa problemas en su manejo y disposición, además de cuestiones ambientales, pero también una gran fuente de biomasa que puede ser aprovechada para fabricar biocombustibles (SENASICA, 2021).

La cáscara de los cítricos es un material apropiado para la producción de bioetanol debido a su bajo contenido de lignina y altas concentraciones de azúcares fermentables como son la glucosa, la fructosa o la sacarosa (Rivas y cols., 2008).

Se estima que el 80% de los residuos de cítricos generados en el mundo son de cáscara de naranja. Las naranjas son una de las frutas cítricas más consumidas en el mundo, y su cáscara representa entre el 45-60% del peso de la fruta, y frecuentemente se desecha o se usa como forraje para ganado (Bustamante y cols., 2020).

1.7. Objetivos

1.7.1. Objetivo general

Estudiar el empleo de diferentes cáscaras de frutas como materia prima a fin de identificar la más adecuada para la obtención de bioetanol en México, en donde se comparará el potencial energético de seis cáscaras de frutas: mango (*Mangifera indica*), piña (*Ananas comosus*), plátano (*Musa paradisiaca*), mandarina (*Citrus reticulata*), naranja (*Citrus sinensis*), y toronja (*Citrus paradisi*).

1.7.2. Objetivos específicos

- Caracterizar el contenido de humedad de las cáscaras de las frutas seleccionadas.
- Evaluar de manera cualitativa el contenido de azúcar de dichas cáscaras.
- Evaluar el contenido de algunos compuestos fenólicos en las cáscaras.
- Evaluar el contenido de azúcares reductores en las cáscaras de las frutas seleccionadas.
- Evaluar el potencial de las cáscaras para la producción de etanol y su posible impacto en la generación de energía.
- Identificar el potencial energético de la generación de bioetanol a partir de la cáscara de seis diferentes frutas seleccionadas: mango (*Mangifera indica*), piña (*Ananas comosus*), plátano (*Musa paradisiaca*), mandarina (*Citrus reticulata*), naranja (*Citrus sinensis*), y toronja (*Citrus paradisi*).

Capítulo II. Marco teórico

2.1 Bioetanol

El etanol es un alcohol anhidro desnaturalizado que, según la especificación estándar D4806 para el etanol de la Sociedad Americana de Pruebas y Materiales (ASTM, por sus siglas en inglés), se usa como combustible en máquinas de ignición. Mucha de la producción de bioetanol alrededor del mundo se obtiene fermentando el azúcar en el almidón de granos como maíz, sorgo y cebada, y del azúcar presente en la caña de azúcar y de la remolacha. Se le agregan desnaturalizantes al etanol, tales como petróleo o pentanos típicos, para hacerlo no apto para el consumo humano. En los Estados Unidos, casi todo el bioetanol combustible se produce a partir de almidón del grano del maíz, el cual se considera como un biocombustible convencional según el Programa de Combustibles Renovables Estandarizados (RFS, según sus siglas en inglés) (EIA, 2022).

Hay otras fuentes potenciales de etanol además de la fermentación del almidón de grano y de azúcares. Se ha experimentado con materia prima que incluye residuos agrícolas como tallos de maíz y de arroz, álamos de rápido crecimiento y árboles de sauce, pastos tales como el pasto perene norteamericano que puede producir dos cosechas al año a lo largo de varios años, y biomasa de los desechos sólidos municipales. Los árboles y el pasto requieren menos combustible, fertilizantes y agua, para crecer que, para la producción de granos, además de que pueden ser cultivados en tierras que no son apropiadas para el cultivo de granos alimenticios. El etanol que se elabora a partir de estas fuentes se llama *etanol celulósico* y se considera un biocombustible avanzado según el RFS. Sin embargo, a pesar del potencial técnico de la producción de etanol celulósico a partir de estas fuentes, ha sido difícil lograr una producción con beneficios económicos. Por lo tanto, en 2020 no había producción comercial de dicho bioetanol en los EE.UU. Brasil, el segundo consumidor mundial de etanol combustible en el mundo después de los Estados Unidos, usa la caña de azúcar para producir etanol (EIA, 2022).

2.2 Materia prima para la producción de bioetanol

Diversos tipos de biomasa tiene el potencial para ser usados como materia prima para la producción de bioetanol. Debido a su composición química, por

ejemplo, fuentes de carbohidratos, se pueden clasificar en tres grupos: (i) materia prima que contiene azúcar, como caña de azúcar, melaza, remolacha, suero o sorgo dulce, (ii) material que contiene almidón, por ejemplo, granos tales como maíz, trigo, tubérculos, etc., y (iii) biomasa lignocelulósica, desechos agrícolas, de cultivos y forestales (Mussatto y cols., 2010).

Las materias primas que contienen almidón (primera generación), compiten en la obtención de azúcar en su uso como alimento, lo que influye en su abastecimiento. Por lo anterior, la biomasa lignocelulósica (segunda generación) representa una alternativa para su uso como materia prima para la producción de bioetanol debido a su bajo costo, disponibilidad, amplia distribución y su escasa competencia como cultivos alimenticios (Tomás-Pejó y cols., 2011).

2.2.1 Materia prima que contiene azúcar

Dos tercios de la producción mundial de azúcar es de caña de azúcar y un tercio es de remolacha (Linoj y cols., 2006).

La melaza, el principal subproducto de la industria azucarera, sirve principalmente como un sustrato para la levadura para la producción de bioetanol, pero también puede ser apropiada para la producción de materia prima (BMBF, 2012). El azúcar residual total en la melaza puede ser de 50-60% (m/V) del cual cerca del 60% es sacarosa, lo que hace de este sustrato materia prima apropiada para la producción a gran escala de bioetanol (Senthilkumar & Gunasekaran, 2009).

El azúcar de caña y la remolacha de la melaza son subproductos de la fabricación o refinamiento de la sacarosa a partir de la caña de azúcar. La melaza de la caña contiene por lo menos 46% de azúcar y la remolacha de la melaza no menos de 48% (m/V). La melaza es también un subproducto de la producción de la pulpa seca de cítricos, con, por lo menos, 45% (m/V) del total de azúcar. La elaboración de glucosa a partir de almidón (para la hidrólisis del almidón se usan enzimas o ácidos, así como granos de maíz o de sorgo) también produce melaza. La melaza de almidón contiene cerca de 43% (m/V) de azúcares reducidos y 73% (m/V) de sólidos totales (Senthilkumar & Gunasekaran, 2009).

2.2.2 Materia prima que contiene almidón

Los granos de cultivo (por ejemplo, maíz, trigo, cebada o de sorgo) y los cultivos rotulares o de tubérculos, por ejemplo, papas, papa dulce, cactus o

mandioca, entre otros, contienen grandes cantidades de almidón (Senthilkumar & Gunasekaran, 2009).

Los tubérculos de la mandioca contienen cerca del 80% en masa de almidón y menos de 1.5% en masa de proteínas. El pretratamiento de los tubérculos de la mandioca para la producción de bioetanol incluye las siguientes operaciones: limpieza, pelado, rebanado y secado. Después de esto, las rebanadas de mandioca seca se usan para la producción de bioetanol (Khanal, 2009).

Para la producción de bioetanol a partir de la materia prima que contiene almidón, es necesario realizar la hidrólisis del almidón en jarabe de glucosa, el cual puede ser convertido en etanol usando la levadura *Saccharomyces cerevisiae*. Este paso implica un costo adicional comparado con la producción de bioetanol a partir de la materia que contiene azúcar (Soccol y cols., 2011).

Bajo condiciones anaeróbicas, la levadura *S. cerevisiae* metaboliza la glucosa en etanol. La máxima eficiencia de conversión de la glucosa en etanol es de 51% en masa. Sin embargo, la levadura también usa la glucosa para el crecimiento celular y la síntesis de otros productos metabólicos, reduciendo así la máxima eficiencia de conversión. En la práctica, realmente de 40 a 48% de la masa de la glucosa se convierte en bioetanol (Lee y cols., 2007).

2.2.3 Materia prima que contiene lignocelulosa

La materia prima que contiene lignocelulosa para la producción de bioetanol se organiza en seis grupos: residuos de cosechas (bagazo de caña y de sorgo dulce, forraje de maíz, diferentes tipos de paja, vainas de arroz y pulpa de oliva), leña dura, leña blanda, residuos de celulosa (por ejemplo, restos de papel y sedimentos de papel reciclado), biomasa herbácea (alfalfa, césped, etc.) y residuos sólidos municipales como alimentos, cartón y papel (Quintero y cols., 2011).

La biomasa lignocelulósica contiene 43% de celulosa, 27% de lignina, 20% de hemicelulosa y 10% de otros componentes (Cherubini & Stromann, 2011). Esta variedad en la composición de la biomasa lignocelulósica puede ser una ventaja (disponibilidad de más productos que los que se obtienen en refinerías de petróleo, y con un rango más amplio de materia prima) pero también presenta desventajas (necesidad de más tecnologías) (Dale & Kim, 2010).

2.2.4 Desechos agroindustriales como materia prima para la producción de biocombustibles

La producción de biocombustibles utilizando desechos agroindustriales es una interesante e importante área de estudio. Los desechos provenientes de diversos procesos industriales agrícolas, de granjas, de ganado y de desechos animales de cultivo, etc., son eficientes para la producción de biocombustibles. Entre sus componentes principales podemos mencionar polímeros carbohidratados como almidón, celulosa y hemicelulosa, proteínas, lípidos, fibras y otras sustancias orgánicas. La presencia de alto contenido orgánico en estos desechos puede generar impactos negativos en el ambiente si no se dispone adecuadamente de ellos (Sindhu y cols., 2019).

2.3 Producción global de bioetanol

La producción de bioetanol se ha incrementado de manera constante, debido a la necesidad de cubrir requerimientos de combustible, ya sea para la producción de electricidad o como combustible en los vehículos automotores.

Como se observa en la Figura 12, China e India son los mayores productores de este biocombustible, con 4.1 billones de litros por año, mientras que Canadá alcanzó una producción de 3.1 billones de litros por año.

Asimismo, se espera que la producción de estos países sea de 4.3 billones de litros por año en China, 5.4 billones de litros en la India y de 3.7 billones de litros por año para Canadá.

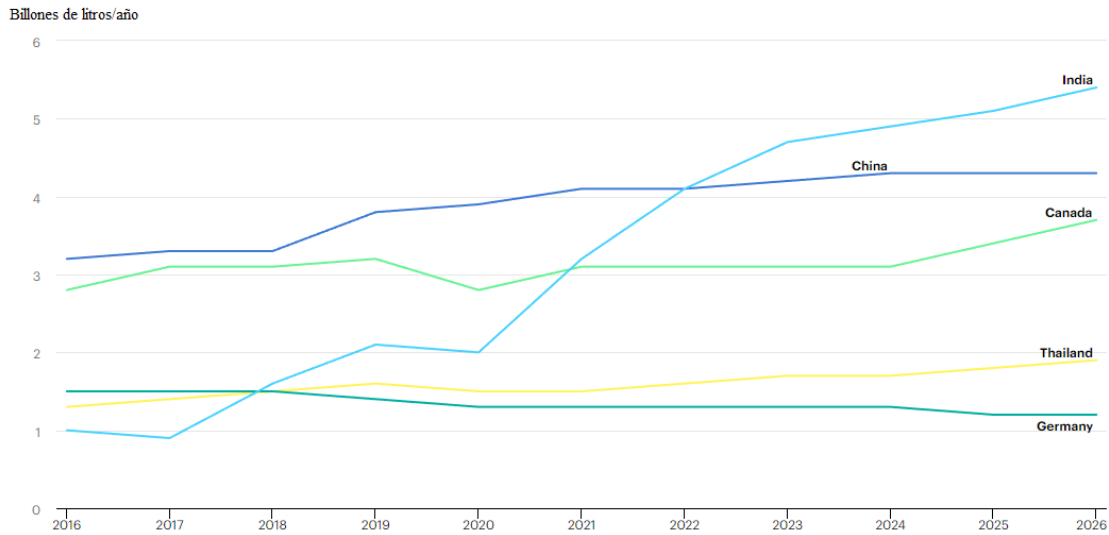


Figura 12. Producción global de etanol por país (del tercero al séptimo), 2016-2026.

2.3.1 Producción de bioetanol en México

Debido a las necesidades energéticas del país y a las exigencias de los organismos internacionales para que los países reduzcan sus emisiones de GEI, se ha incrementado la producción de biocombustibles en México, en el caso de etanol la producción en el país pasó de 10 millones de galones en 2010 a 175 millones de galones en 2014, y se espera que esta producción crezca aún más (Pérez y Venegas, 2017).

2.4 Producción de bioetanol

La producción de bioetanol ha experimentado avances que han contribuido en el aumento de la capacidad de producción de dicho biocombustible (Gavahian y cols., 2018).

2.4.1 Producción de bioetanol de primera generación

El bioetanol comercial puede ser producido a partir de azúcar y almidón, como el maíz en E.E.U.U, el cual es el principal productor a nivel mundial seguido de Brasil (Figura 13), la caña de azúcar en Brasil, o el trigo, la remolacha y la cebada en la Unión Europea (Friedl, 2019). Este tipo de bioetanol producido a partir de

materia prima basada en el almidón se conoce como producción de primera generación (1G) (Damay y cols., 2018). La producción de bioetanol basada en materia prima que proporciona azúcar, promete ser un buen reemplazo de los combustibles derivados del petróleo para el uso en el transporte debido a su baja emisión de contaminantes (Dutta, 2014). Sin embargo, debido a que la producción de bioetanol de 1G compite con la producción de alimentos, se ha generado un debate muy serio por la demanda de terrenos fértiles con mucha precipitación y/o irrigación para el cultivo, por ejemplo, de la caña de azúcar (Finkbeiner, 2014).

La caña de azúcar y el maíz seguirán dominando como materias primas para el etanol. Se prevé que para 2029 la producción de etanol utilizará 25% y 14% de la producción mundial de caña de azúcar y maíz, respectivamente (OCDE FAO, 2023), exceptuando a México donde está prohibido su uso con este fin.

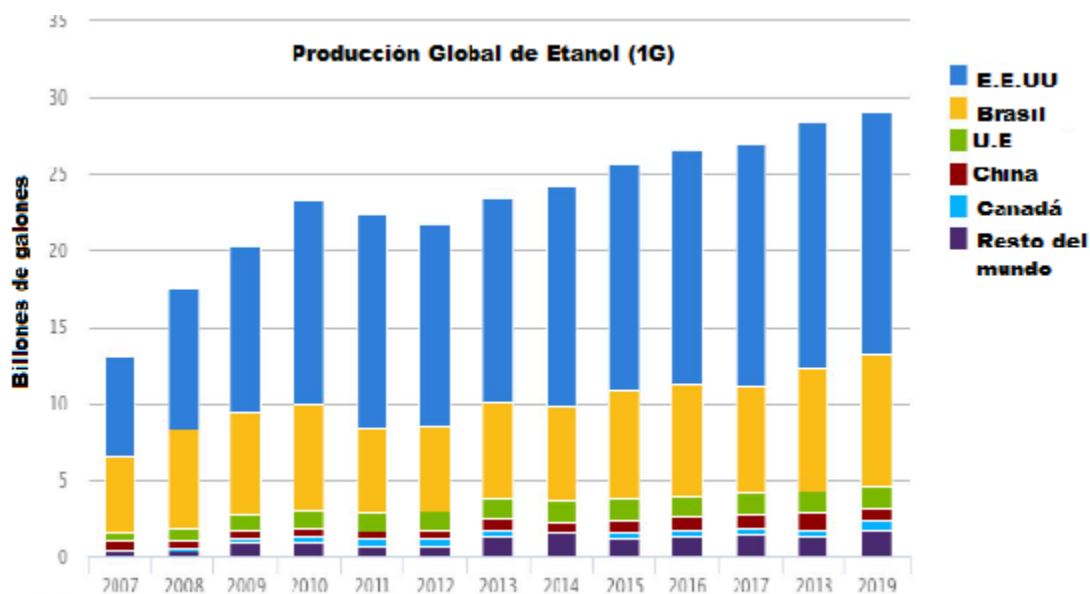


Figura 13. Producción Global de Bioetanol (1G).

2.4.2 Producción de bioetanol de segunda generación

El bioetanol de segunda generación (2G) se produce típicamente a partir de la biomasa lignocelulósica, pero también es posible usar subproductos como suero o glicerol crudo (Balat y cols., 2008). Este tipo de biomasa en general es relativamente barata, y fácil de obtener localmente (Achinas & Euverink, 2016).

El mecanismo para obtener bioetanol 2G incluye una etapa de pretratamiento, sacarificación y fermentación (Figura 14) (Mendes y cols., 2020). Por otra parte, el pretratamiento facilita el fraccionamiento de la biomasa y mejora la posterior producción de hidrólisis enzimática (Das y cols., 2019), en la cual diferentes enzimas actúan para provocar el rompimiento de los polímeros de la celulosa en monómeros de glucosa (Arismendy y cols., 2019). Subsecuentemente, la fermentación se lleva a cabo usando una levadura, generalmente la *Saccharomyces Cerevisiae*, para producir el bioetanol (Arismendy y cols., 2020).

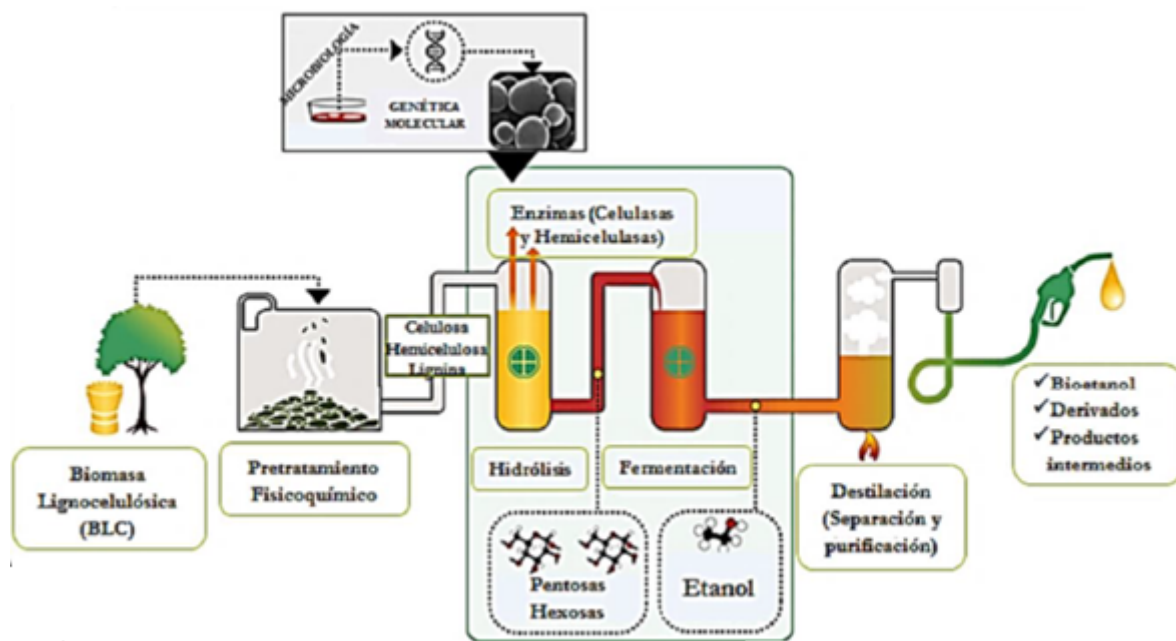


Figura 14. Esquema de la producción global de bioetanol de segunda generación (2G) a partir de residuos lignocelulósicos.

Los tallos y el bagazo de la caña de azúcar son materiales lignocelulósicos que pueden ser usados eficientemente para la producción simultanea de bioetanol de segunda generación (2G) (Figura 15), bioelectricidad y energía (Chandel y cols., 2018).

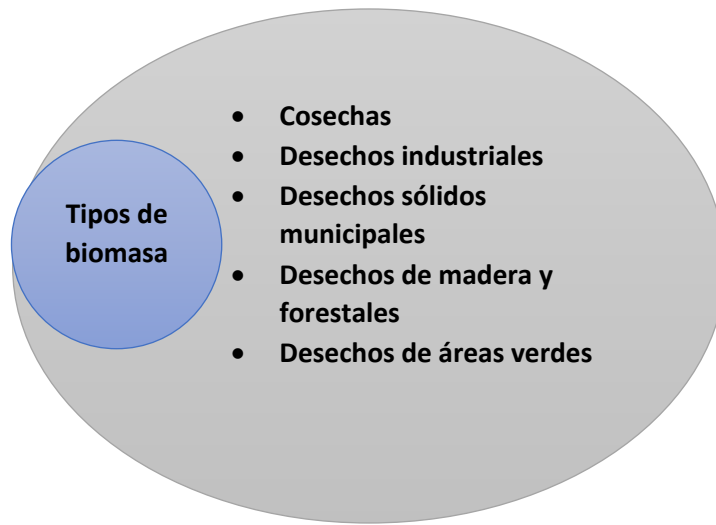


Figura 15. Tipos de biomasa 2G. Elaboración propia con datos de Sims y cols.

Los principales componentes de la biomasa lignocelulósica son la lignina, la celulosa y la hemicelulosa, los cuales pueden ser convertidos en biocombustible mediante procesos termoquímicos o biológicos (Ma y cols., 2019).

La biomasa de segunda generación tiene en general grandes cantidades de celulosa, excepto en las hojas y en el pasto, dicha celulosa está unida usualmente a la hemicelulosa formando un complejo de celulosa-hemicelulosa (Figura 16). Este complejo se encuentra encapsulado en lignina, lo que dificulta obtener el azúcar fermentable a través de la hidrólisis (Banerjee, 2010).

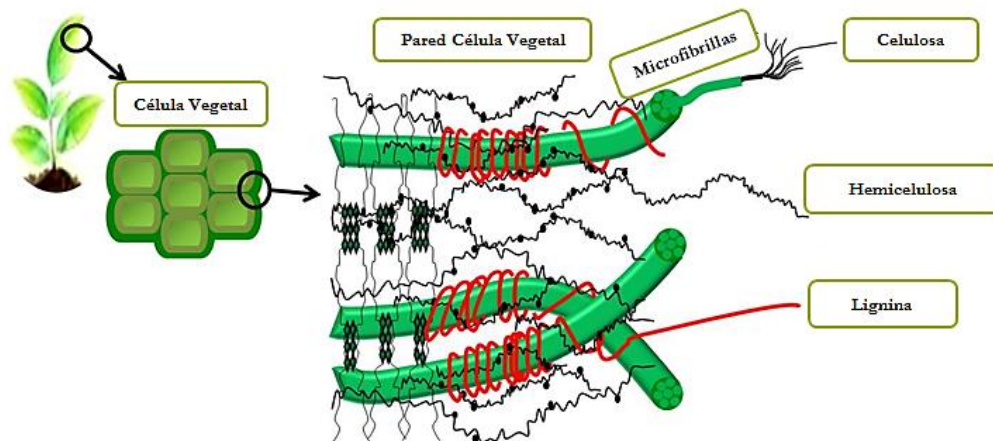


Figura 16. Composición y estructura de la biomasa lignocelulósica.

2.4.3 El pretratamiento en la producción de bioetanol

A nivel mundial, los cultivos más utilizados como materia prima para la biomasa lignocelulósica son el trigo, el maíz, y el bagazo de la caña de azúcar, los que producen más de 530 millones de toneladas de biomasa seca por año (Dias y cols., 2018).

Entre sus principales ventajas podemos mencionar su accesibilidad, su asequibilidad (bajo costo), su abundancia y su alto contenido de carbohidratos (Ghosh y cols., 2017).

Una de las principales restricciones a la producción de bioetanol 2G es la etapa de pretratamiento, la que constituye 18% del costo del proceso de producción (Rajendran y cols., 2018). Otros parámetros que influyen en la producción de bioetanol 2G son el costo de capital de la planta de producción, de la materia prima, de la enzimas y de la energía usada en el proceso de fabricación del biocombustible (Erdei y cols., 2013). Una propuesta para reducir los costos de producción es a través de la obtención de grandes cantidades de etanol con elevadas concentraciones (Naresh y cols., 2019).

La Tabla 1 muestra el consumo de energía y su costo en términos de una unidad funcional en centavos por litro (¢/L EtOH) para diferentes métodos de pretratamiento de la biomasa lignocelulósica.

Tabla 1. Algunos métodos de pretratamiento para la materia lignocelulósica y sus costos en centavos de dólar por litro (¢/L).

Utilidad	Ácido diluido		Alcali diluido		Agua caliente		Explosión de vapor	
	Cantidad (Kg/L EtOH)	Costo (¢/L EtOH)	Cantidad (Kg/L EtOH)	Costo (¢/L EtOH)	Cantidad (Kg/L EtOH)	Costo (¢/L EtOH)	Cantidad (Kg/L EtOH)	Costo (¢/L EtOH)
Electricidad (KWh)	0.56	3.91	0.52	3.64	0.52	3.64	0.58	4.05
Vapor	5.91	0.00	5.82	0.00	6.01	0.00	4.03	0.00
Agua de enfriamiento	500.24	2.50	500.50	2.50	570.00	2.85	401.44	2.00
Agua fría	0.73	0.03	0.84	0.03	0.84	0.03	0.89	0.04
Agua CT	88.76	0.62	89.04	0.62	89.23	0.63	98.94	0.69
Vapor (alta presión)	0.42	0.00	0.42	0.00	0.42	0.00	0.62	0.00

(Kumar & Murthy, 2011).

2.4.3.1 Métodos de pretratamiento para la biomasa lignocelulósica (BLC)

La lignocelulosa es una parte inevitable de la pared celular de la planta. Es un compuesto natural y a la vez una complicada mezcla de celulosa, hemicelulosa y lignina (Zabed y cols., 2016).

La celulosa es un polímero de glucosa y su estructura ayuda a empaquetar estrechamente las cadenas de polímeros, haciéndolas resistentes a la despolimerización, y con una estructura altamente cristalina (Mosier y cols., 2005). La hemicelulosa es otro componente del carbohidrato que tiene una estructura amorfa, ramificada y aleatoria que incluye azúcares de cinco o seis carbonos (Rezania y cols., 2017).

La lignina es el segundo polímero natural más abundante de la biomasa lignocelulósica (BLC), tiene una estructura tridimensional y altamente entrelazada, y su naturaleza estable e insoluble en agua actúa como un “pegamento” para conectar a la celulosa y a la hemicelulosa (Watkins y cols., 2015).

Mediante el uso del método apropiado de pretratamiento se puede mejorar la eficiencia de todo el proceso mediante el incremento de las concentraciones de los azúcares fermentables después de la sacarificación enzimática (Figura 17, Tabla 2) (Maurya y cols., 2015). Debe hacerse énfasis en que la eficiencia del pretratamiento es un factor importante para obtener una gran producción de combustible. Los objetivos más importantes de la etapa de pretratamiento son expandir el área superficial de la biomasa, disolver la hemicelulosa y/o la lignina y reducir el tamaño de partícula de la biomasa (Figura 17, Tabla 2). Esto puede ser logrado mediante la modificación de la estructura de la BLC usando métodos químicos o físicos (Kumari y Singh, 2018).

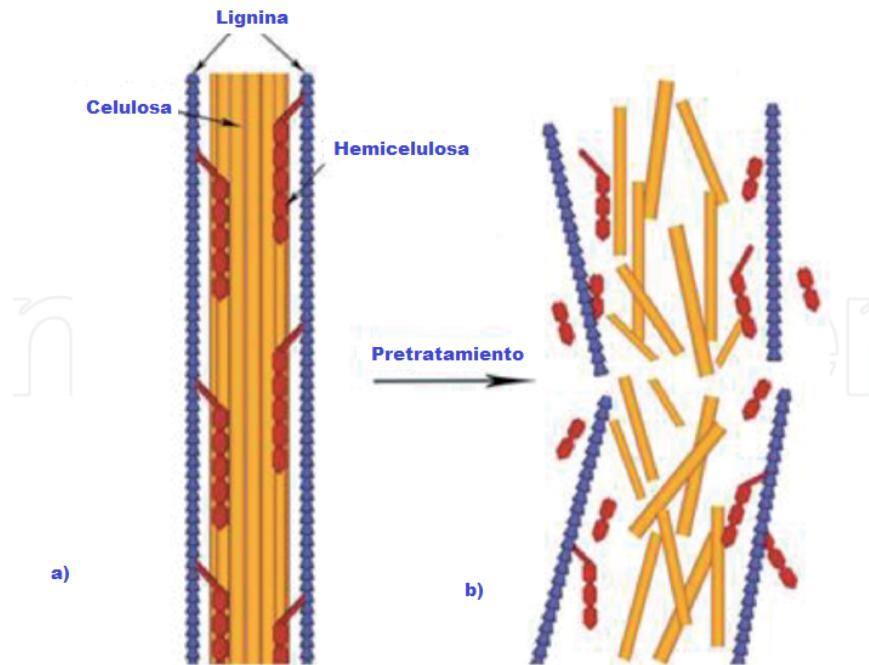


Figura 17. Efectos del pretratamiento en la biomasa lignocelulósica. (a) biomasa lignocelulósica antes del pretratamiento, (b) biomasa lignocelulósica después del pretratamiento.

Tabla 2. Diferentes métodos de pretratamiento y su impacto en la materia lignocelulósica.

Pretratamiento	Ejemplos	Mayor impacto	Referencias
Físico	<ul style="list-style-type: none"> • Extrusión • Congelamiento • Irradiación • Microondas • Sonificación 	<ul style="list-style-type: none"> • Disminuye el grado de polimerización. • Reduce la estructura cristalina de la celulosa. • Incrementa el área superficial. • Reduce el tamaño de partícula. 	<ul style="list-style-type: none"> • (Zheng y cols.; 2014) • (Mood y cols.; 2013) • (Tahezadeh y cols.; 2007)
Termoquímico	<ul style="list-style-type: none"> • Alcalino • Ácido diluido • Líquidos iónicos • Órgano-solventes • Oxidativos • Ozono 	<ul style="list-style-type: none"> • Modifica la estructura de la lignina. • Disminuye el grado de polimerización • Reduce la estructura cristalina de la celulosa. • Hidroliza la hemicelulosa. • Hidroliza parcialmente la celulosa. • Solubiliza la hemicelulosa 	<ul style="list-style-type: none"> • (Alvira y cols.; 2010) • (Zheng y cols.; 2014) • (Tahezadeh y cols.; 2007)
Biológico	<ul style="list-style-type: none"> • Ensilaje • Enzimático • Hongos • Microbiano 	<ul style="list-style-type: none"> • Altera la estructura de la lignina. • Reduce el grado de polimerización de la hemicelulosa y de la celulosa. • Solubiliza la celulosa. 	<ul style="list-style-type: none"> • (Zheng y cols.; 2014) • (Tahezadeh y cols.; 2007)
Otros métodos híbridos	<ul style="list-style-type: none"> • Expansión de fibra catalizada con vapor de amoníaco. • Explosión • Oxidación húmeda • Explosión de vapor • Agua líquida caliente. 	<ul style="list-style-type: none"> • Altera la estructura de la lignina. • Disminuye el grado de polimerización. • Reduce la cristalinidad de la celulosa. • Incrementa el área superficial. • Reduce el tamaño de partícula. • Reduce el grado de polimerización de la hemicelulosa y la celulosa. 	<ul style="list-style-type: none"> • (Alvira y cols.; 2010) • (Mood y cols.; 2013) • (Tahezadeh y cols.; 2007) • (Menon y cols.; 2012)

2.4.3.1.1 Métodos químicos

a) *Pretratamiento alcalino*

La remoción selectiva de lignina sin pérdida de azúcar reducido ni de carbohidratos, aumentando la porosidad y el área superficial de la biomasa, y por lo tanto, mejorando la hidrólisis enzimática, son las ventajas más importantes del método alcalino (Kim y cols., 2016). Entre sus principales desventajas es que los tiempos de reacción son muy largos (desde algunas horas hasta un día completo (Bali y cols., 2015).

Se usan diferentes tipos de soluciones alcalinas como hidróxido de sulfito de sodio, hidróxido de amonio y cal (Tabla 3). Se reporta en la literatura que el hidróxido de sodio es la solución alcalina más usada debido a su efectividad para la deslignificación y que además puede trabajar bajo diversas condiciones (Chen y cols., 2013).

Se reporta en la literatura que, usando el pretratamiento alcalino, por ejemplo, se obtienen 7.27 g/L de bagazo de caña de azúcar usando NaCO_3 al 5% (Nosratpour y cols., 2018), y con NaOH al 15% se obtienen 8.8 g/L a partir de esta misma biomasa (Carvalho y cols., 2016). La paja de arroz, con NaOH al 1% produce 83.1 g/L (Molaverdi y cols., 2019), mientras que la paja de trigo con NaOH/ H_2O_2 produce 31.1 g/L (Yuan y cols., 2018).

Tabla 3. Producción de bioetanol con diferentes tipos de pretratamiento alcalino.

Material biomasa	Tipo de alcalino	Condición en el pretratamiento	Producción de bioetanol (g/L)	Referencia
Bagazo de caña de azúcar	Na ₂ CO ₃ (5%)	140°C; 1 h	7.27	(Nosratpour y cols.; 2018)
Paja de arroz	NaOH	50 a 90°C	0.032 g/g	Ahmed y cols. ; 2017)
Paja de arroz	Na ₂ CO ₃	93°C, 3 a 10 h	83.1	(Molaverdi, 2019)
Paja de trigo	Na ₂ CO ₃ (11%)	75°C; 10 a 85 min	65	(Yuan y cols.; 2018)
Paja de trigo	NaOH/H ₂ O ₂	50°C, 3 a 15 h	31.1	(Yuan y cols.; 2018)

b) Pretratamiento con ácidos

El pretratamiento de la biomasa lignocelulósica (BLC) con ácido mejora la degradación de la hemicelulosa. Los tipos de ácidos más comunes usados en este método son el ácido fosfórico, el ácido ascético, y el ácido sulfúrico (Tabla 4) (Mosier y cols., 2005).

En este método, la hemicelulosa se convierte en azúcar soluble cambiando la estructura de la BLC. Aumentando la temperatura se puede incrementar la velocidad de la conversión de la hemicelulosa en el pretratamiento del ácido diluido (Putro y cols., 2016).

Utilizando dicho procedimiento, se crea una condición idónea para recubrir los azúcares monoméricas a partir de la biomasa (Loow y cols., 2016). Comparado con un ácido concentrado, la hidrólisis con ácido diluido aventaja con un menor consumo de ácido mientras que se requiere una más alta temperatura para alcanzar una producción razonable de glucosa a partir de la celulosa cristalina (Rabemanolontsoa & Saka, 2016).

La estructura de la biomasa se rompe con el pretratamiento con ácido y la cristalinidad disminuye debido a la división de la estructura de la lignina (Rezania y cols., 2018).

Usando el pretratamiento ácido, por mencionar algunos casos, con la paja de trigo con H₂SO₄ al 2% se obtienen 0.44 g/L de bioetanol (Prasad y cols., 2018), la paja de arroz con H₂SO₄ produce 2.3 g/L de biocombustible (Lin y cols., 2016), el maíz con este mismo ácido genera 99.3 g/L de alcohol (Yu y cols., 2019).

Tabla 4. Producción de bioetanol con diferentes tipos de pretratamiento ácido

Material biomasa	Tipo de ácido	Condiciones de pretratamiento	Producción de bioetanol (g/L)	Referencia
Paja de trigo	H ₂ SO ₄ (2%)	180°C; 10 min	0.44	(Prasad, 2018)
Paja de arroz	H ₂ SO ₄	100°C; 120 min	40.6	(Zhu, 2015)
Maíz y rastrojo de maíz	H ₂ SO ₄	160°C; 10 min	99.3	(Yu y cols.; 2019)
Paja de arroz	H ₂ SO ₄	200°C; 1 min	2.3	(Lin, 2016)
Centeno	H ₂ SO ₄	121°C; 60 min	20.63	(Mikulski, 2018)

c) Pretratamiento con líquido iónico (LI)

El pretratamiento con líquido iónico (LI) aumenta la deslignificación enzimática manteniendo la actividad y estabilidad de la celulasa (Tabla 5). Aún más, la temperatura y la carga de la biomasa afectan la velocidad de la hidrólisis durante el pretratamiento con este método (Elgharbawy y cols., 2016).

Su gran potencial se basa en la ruptura de los enlaces de éter para extraer lignina y tiene un notorio efecto en la despolimerización de dicho compuesto (Asim, cols., 2019). Sus desventajas son: a) altos requerimientos de energía para reciclar al líquido iónico (LI), b) altos costos y c) generación de grandes cantidades de desperdicios difíciles de recuperarse (Zavrel y cols., 2009).

Adicionalmente, la velocidad de la hidrólisis enzimática de la biomasa con pretratamiento con LI es 4.7 veces más alta que el de la biomasa con pretratamiento con ácido sulfúrico diluido (Mohan y cols., 2018).

Se reporta en la literatura que, con este tipo de pretratamiento, usando el bagazo de caña de azúcar con BMIMCl y PEG se obtiene una producción de bioetanol de 84% (Nasirpour & Mousavi, 2018) y con el triticale (híbrido de trigo y centeno) se obtienen 10.64 g/dm³ (Smuga-Kogut y cols., 2019).

Tabla 5. Producción de bioetanol con diferentes tipos de pretratamiento con líquido iónico

Material biomasa	Tipo de LI	Condición de pretratamiento	Producción de Bioetanol	Referencias
Bagazo de caña de azúcar	BMIMCl; PEG	154.6°C; 1 h y 5 (% w/w) de PEG	84%	(Nasirpour & Mousavi, 2018)
Paja de triticale	Acetato de 1-etil-3-metilimidazolio	120°C; 2h	10.64 g/dm ³	(Smuga-Kogut, 2019)
Bagazo de azúcar	Cloruro 1-butil-3-metilimidazolio [Bmim]Cl); tensoactivo (PEG-8000)	90°C; 2h	0.117 g/g	(Sharma, 2019)

d) Pretratamiento con solventes orgánicos

El pretratamiento con solventes orgánicos tiene varias ventajas como la habilidad para fraccionar la biomasa lignocelulósica (BLC) en celulosa, hemicelulosa y lignina con una alta pureza, fácil recuperación del solvente y reutilización de este (Shuai & Luterbacher, 2016).

En este tipo de pretratamiento de BLC, se usan una amplia variedad de solventes orgánicos, como el alcohol, el fenol, los ésteres, el ácido propiónico, la

acetona, el dioxano de formaldehído y las aminas con o sin catalizador (Zhao y cols., 2009).

El pretratamiento con órgano-solventes utiliza solventes orgánicos y acuosos a temperaturas en un rango de entre 100 a 250°C (Tabla 6). Las dos principales ventajas de este método son la separación de celulosa con alta pureza con una menor degradación y el fraccionamiento de hemicelulosa con alta eficiencia. Además, se obtienen coproductos con alto valor económico como lignina de alta pureza y productos químicos derivados de la lignina, así como coproductos con alto valor económico derivados del pretratamiento orgánico (Zhang y cols., 2016).

Por ejemplo, usando paja de arroz con un solvente basado en cloruros se obtienen 36.7 g/L de bioetanol (Kumar y cols., 2016), con paja de trigo con solventes eutécticos (formados por la mezcla de otros componentes sólidos en condiciones normales de temperatura, físicamente constituyen un líquido) se obtiene una producción de 88.9% (Zhao y cols., 2018), con los tallos de algodón con órgano-solventes se obtiene una producción de 52% (Dimos y cols., 2019), y con bagazo de sorgo con órgano-solventes se obtienen 61.9 g/L (Teramura y cols., 2018).

Tabla 6. Producción de bioetanol con diferentes tipos de pretratamiento usando solventes orgánicos

Material biomasa	Tipo de pretratamiento	Condición de pretratamiento	Producción de Bioetanol	Referencias
Paja de arroz	Solvente basado en cloruro de colina	60-121°C	36.7 g/L	(Kumar y cols.; 2016)
Tallos de algodón	Órgano-solvente	80°C, 1 h	52%	(Dimos y cols.; 2019)
Bagazo de sorgo	Órgano-solvente	200°C, 1 h	61.9 g/L	(Teramura, 2018)
Paja de trigo	Solventes eutécticos	70°C, 9 h	89.8%	(Zhao, 2018)

2.4.3.1.2 Métodos físicos

Los métodos físicos y/o mecánicos para el pretratamiento de la biomasa lignocelulósica (BLC) son capaces de abrir su estructura disolviendo su estructura superficial y reduciendo el tamaño a 10-30 mm usando fuerzas de corte o de compresión (Tasapekos, 2017).

Las características de la biomasa y el tamaño final de partícula son los factores que más influyen al elegir el pretratamiento físico (Seidl y Goulart, 2016).

Hay varios tipos de pretratamientos mecánicos como la molienda, la homogenización a alta presión, la radiación con rayos electrónicos, la compresión térmica y la fotocatalisis (Jiang y cols., 2016; Bak y cols., 2009; Song y cols., 2019; Yang y cols., 2018).

a) El método de la molienda

En este método se incrementa la hidrólisis enzimática y la digestibilidad; podemos mencionar dentro de este proceso a la molienda con martillo, con disco, con canica y la molienda vibratoria (Taherzadeh & Karimi, 2008).

Todos estos métodos reducen el tamaño de la biomasa en un rango de 110 a 230 μm lo que resulta en un incremento del área superficial para la acción de la enzima. Además, la reducción del tamaño de la biomasa puede incrementar la cantidad de glucosa en un rango de 29-44%, lo que muestra que la molienda de alta velocidad y la molienda con aire son pretratamientos de alta eficiencia (Gu y cols., 2019).

Aunque la molienda de biomasa lignocelulósica (BLC) mejora la producción de biocombustible en más del 22% y disminuye los tiempos de espera durante la digestión anaerobia (DA) al romper la estructura de los materiales en dos fases, no es muy eficiente en cuanto a los costos debido a su elevado consumo de energía (Dahunsi, 2019).

b) Pretratamiento térmico

Este método se considera un tipo de pretratamiento físico el cual se basa en el calentamiento de la BLC a una cierta temperatura y presión en el rango de entre 50°C a 240°C. Las propiedades físicoquímicas de la biomasa después del pretratamiento muestran una remoción significativa de la lignina con pérdidas mínimas del contenido de celulosa y hemicelulosa (Rajput y cols., 2018).

c) Pretratamiento con microondas

Este es uno de los métodos más usados para la BCL y trabaja mediante la radiación (Li y cols., 2016). Usando el calentamiento con microondas, la ruptura de las estructuras recalcitrantes de la BCL ocurre mediante la penetración de la radiación dentro de las estructuras rígidas de la biomasa (Chen y cols., 2011; Mikulski y cols., 2019). Algunos ejemplos se muestran en la Tabla 7.

Este método puede mejorar la producción de bioetanol debido a la remoción de los metales alcalinos durante el pretratamiento. En el caso del pretratamiento con microondas con CaCl_2 se incrementó la degradación de la hemicelulosa en un 85.80% y el área superficial específica en un 168.93% comparado con otros tratamientos (Li & Xu, 2013).

Para ilustrar lo anterior, mencionaremos a la paja de trigo, que con este método produce 6.82g/L (Tsegaye, 2019), la paja de arroz produce 1.38 g/L (Zhang, 2018), el bagazo de azúcar genera 6.38 g/L (Kandasamy y cols., 2017), y el maíz produce 8.73 g/L (Aguilar-Reynosa, 2017).

d) Pretratamiento con explosión de vapor

Este método es un proceso termofísico-químico, el cual provee deconstrucción mecánica de la BLC mediante la combinación de varios pasos de rompimiento usando vapor y descompresión explosiva (Tabla 8) (Maniet y cols., 2017). En este proceso, la biomasa se somete a vapor saturado de alta presión en corridas cortas rápida, las cuales se mide en minutos. Después, súbitamente se libera la presión, causando rompimiento de la estructura de la pared celular y solubilizando principalmente la hemicelulosa y fracciones de lignina (Bonfiglio y cols., 2019).

Tabla 7. Producción de bioetanol con diferentes tipos de pretratamiento con microondas

Material biomasa	Tipo de pretratamiento	Condición de pretratamiento	Producción de Bioetanol (g/L)	Referencias
Paja de trigo	Microonda asociada, NaOH	160°C, 15 min	6.82	(Tsegaye, 2019)
Paja de arroz	Microonda asistida con CaCl ₂	60°C, 25 min	1.383	(Zhang, 2018)
Elote	Microondas asistido con H ₂ SO ₄	50°C, 20min	0.511	(Mikulski y cols.; 2019)
Tallos de algodón	Microondas asistido con H ₂ SO ₄	210°C, 10 min	15.9	(Dimos y cols.; 2019)
Bagazo de caña de azúcar	Ultrasonido	120°C, 30 min	6.38	(Kandasamy, 2019)
Maíz	Microondas	160-200°C; 10-15 min	8.73	(Aguilar-Reynosa y cols.; 2017)

Algunos de los beneficios del pretratamiento con vapor son la descomposición de la estructura de la lignina, la desfibrilación, la despolimerización de los componentes de la lignina, la hidrolización de la fracción de la hemicelulosa, el impacto ambiental mínimo y la alta eficiencia energética (Mosier y cols, 2005; Alvira y cols., 2010). Sin embargo, podemos mencionar entre sus desventajas la remoción incompleta de la lignina y la producción de algunos químicos tóxicos durante el proceso (Tabka y cols., 2006).

Algunos datos para este tipo de proceso son los siguientes: con el tallo de maíz se producen 7.8% de bioetanol (Katsimpouras y cols., 2017), con el sorgo dulce se obtiene hasta 90% de producción del biocombustible (Damay y cols., 208), y con la paja de trigo se obtienen 55 g/L (Yuan y cols., 2018).

Tabla 8. Producción de bioetanol con pretratamiento usando explosión de vapor

Material biomasa	Condición de pretratamiento	Producción de Bioetanol	Referencias
Paja de triticale	200°C, 5-10 min	84.7%	(Kossatz y cols.; 2017)
Paja de cebada	180°C, 3.5 min	0.34 g/g	(Oliva, 2017)
Paja de maíz	200°C, 10 min	78.3%	(Katsimpouras, 2017)
Sorgo dulce	25°C, 16 h	90%	(Damay y cols.; 2018)
Paja de trigo	151°C, 16 min	55 g/L	(Yuan y cols.; 2018)

e) Explosión de fibra con amoniaco (EXFA)

Es cuando la biomasa se hincha, lo que incrementa el área superficial disponible, así como la ruptura de las fibras, la descristalización de la celulosa y el rompimiento de los enlaces de los carbohidratos de la lignina (Behera y cols., 2014 Kumar y cols., 2009).

Durante este proceso, la hemicelulosa se degrada en azúcares oligoméricos y es desacetilada, mientras que la lignina reacciona con el amoniaco acuoso, causando la despolimerización de la lignina y la división de las uniones lignina-carbohidrato (Mathew y cols., 2016).

f) Pretratamiento hidrotérmico

En este método, se usa agua caliente a alta presión para mantener su forma líquida para incrementar la degradación de la matriz lignocelulósica a temperaturas entre 160 y 240°C (Mosier y cols., 2005). Adicionalmente, no requiere el uso de agentes químicos. Esto es notorio en términos de costos en la totalidad del proceso de la producción, mientras que las desventajas de este métodos son el alto consumo de energía y de agua, la obtención de bajas concentraciones de azúcar, así como

la producción de inhibidores de la fermentación (Behera y cols., 2014; Yuan y cols., 2018).

El mecanismo de este proceso consiste en la remoción de la mayoría de la hemicelulosa y parte de la lignina degradándolas en fracciones solubles, lo que resulta en la ruptura de la estructura de las paredes celulares recalcitrantes (Cybulska, 2013). Esto sucede cuando se transfieren los componentes estructurales de la fase insoluble en agua a la fase soluble. Sin embargo, puede formarse inhibidores de los microorganismos durante la digestión anaeróbica (DA) debido a la toxicidad de los productos degradados (Wang y cols., 2018). Algunos ejemplos citados en la literatura los encontramos en la Tabla 9.

Con tallos de maíz, por ejemplo, se obtiene 90.8% de producción (Lü y cols.; 2017), con bagazo de caña de azúcar se obtiene una producción de 60.8% (Gurgel, 2016).

Tabla 9. Producción de bioetanol con pretratamiento usando agua líquida caliente

Material biomasa	Condición de pretratamiento	Producción de hidrólisis (%)	Referencias
Pasto	180°C; 60 min	92	(Yu y cols.; 2016)
Elote	190°C; 30 min	76	(Michelin & Teixeira, 2016)
Rastrojo de maíz	140-200°C; 0-90 min	90.8	(Lü y cols.; 2017)
Paja de trigo	180°C; 40 min	84.15	(Huang y cols.; 2016)
Bagazo de caña de azúcar	180°C; 20 min	60.8	(Gurgel y cols.; 2016)

2.4.3.1.3 Métodos biológicos

Estos métodos consisten en el uso de cadenas de bacterias o de hongos o de sus enzimas (Saha y cols., 2016; Vasco-Correa y cols., 2016 Da Silva y cols., 2016).

El principal objetivo del pretratamiento biológico es crear la estructura de celulosa más susceptible a un ataque enzimático o microbiano a través de la ruptura de la estructura cristalina, rompiendo el empaque de la lignina, y minimizando las pérdidas de carbohidratos. La celulosa y la hemicelulosa normalmente se hidrolizan en azúcares monoméricos (Wagner y cols., 2018).

Los beneficios más importantes de los métodos biológicos incluyen que no es necesario el reciclado de sustancias químicas después del pretratamiento, bajos costos de procesamiento, mínima formación de inhibidores, operación simple y bajo consumo de energía (Sindhu y cols., 2016; Millati y cols., 2011). Sin embargo, la tasa extremadamente baja de hidrólisis es el principal obstáculo para el desarrollo de los métodos biológicos (Maurya y cols., 2015). Por ejemplo, para la paja de arroz con *T. reesei* se obtienen 2.17 g/L de etanol (Tabla 10) (Wu X, 2016), este mismo compuesto con *S. cerevisiae* produce 0.24 g/L (Fonseca y cols., 2018), y la paja de trigo con *I. lacteus* produce 12.5 g/L (García-Torreiro y cols., 2016).

Tabla 10. Producción de bioetanol con pretratamiento usando métodos biológicos

Material biomasa	Tipo de pretratamiento	Condición de pretratamiento	Producción de Bioetanol (g/L)	Referencias
Paja de arroz	<i>T. reesei</i> Aq-5b y <i>T. viride</i> NSW- XM	28°C; 2-4 días	2.17	(Wu y cols.; 2016)
Paja de arroz	<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	25°C; 30 min	0.24	(Fonseca y cols.; 2018)
Paja de trigo	Hongo rojiblanco <i>Irpex lacteus</i>	121°C; 20 min	12.5	(García-Torreiro y cols.; 2016)

Paja de arroz	<i>Trametes hirsuta</i> MTCC 136	30°C	0.86	(Arora, 2016)
----------------------	-------------------------------------	------	------	---------------

2.4.4 La hidrólisis o sacarificación y fermentación

Después de la etapa de pretratamiento se llevan a cabo las etapas de hidrólisis y destilación. Para la hidrólisis, existen varios tipos de procesos, entre los que podemos mencionar al bioproceso consolidado (BPC), la fermentación e hidrólisis separadas (FHS) y la fermentación y sacarificación simultáneas (FSS) (Conde-Mejía, 2012).

El éxito de cada proceso depende de la configuración para la hidrólisis, y la fermentación depende de los componentes químicos y la proporción correcta de los componentes usados en cada etapa (Ojeda y cols., 2011).

En la fermentación e hidrólisis separadas (FHS), la hidrólisis del sólido pretratado y la fermentación del azúcar liberado de este proceso, se llevan a cabo en recipientes separados (Loaces y cols., 2017), con lo que se pueden alcanzar valores óptimos de pH y temperatura para los parámetros de ambos procesos (Cotana y cols., 2015).

Por otra parte, en la fermentación y sacarificación simultáneas (FSS), la hidrólisis enzimática y la fermentación se llevan a cabo en un solo recipiente simultáneamente (Loaces, 2017), lo que implica que la glucosa producida en el proceso de la hidrólisis se transforma inmediatamente en bioetanol mediante la fermentación realizada por los microorganismos contenidos en el depósito. Este método tiene la ventaja de que se evita la inhibición de la actividad de la celulasa ya que hay una utilización continua del azúcar liberado en la etapa previa (Mithra, 2018).

Entre las ventajas del proceso FSS es que la producción de bioetanol es mayor debido a que la velocidad de la hidrólisis es mayor que en el proceso FHS, sin embargo, uno de sus desafíos es la incapacidad de los organismos fermentadores para procesar la pentosa (Szambelan y cols., 2018). Para superar este problema, se ha desarrollado la sacarificación y co-fermentación simultánea

(SCFS), en la que los dos procesos ocurren simultánea e invariablemente en el mismo recipiente, lo que crea una etapa separada para la fermentación de la pentosa o esta se utiliza para la fabricación de biogás (Pandey y cols., 2019).

Otro método para la hidrólisis es el bioproceso consolidado (BC), comenzando con la producción de celulasa, la hidrólisis y la fermentación, todo se lleva a cabo dentro de un solo reactor. Este método, también conocido como Conversión Microbiana Directa (CMD) utiliza ya sea un solo microorganismo o sus consorcios para la fermentación directa de celulosa a etanol (Hamelinck y cols., 2005; Lynd y cols., 2005).

Microorganismos para la fermentación.

La selección de los microorganismos que llevarán a cabo el proceso de fermentación depende de la composición de los azúcares que se van a fermentar. Para la producción de bioetanol, los microorganismos más usados son el hongo *Saccharomyces cerevisiae* y la bacteria *Zymomonas mobilis*; ambos producen altas cantidades de etanol, alta tolerancia al etanol y fermentan un amplio rango de hexosas y de disacáridos. Se considera que *Z. mobilis* es mejor ya que desperdicia menos biomasa (Branco y cols., 2019; Zabed y cols., 2016; Zabed y cols., 2017), pero ninguno es capaz de fermentar pentosas (Aditiya y cols., 2016) lo que es un gran problema ya que la mayor parte de la biomasa lignocelulósica contiene más de 25% de pentosas, principalmente xilosas (Dos Santos y cols., 2016).

En algunos estudios se han mencionado algunas levaduras que pueden fermentar pentosas aun en presencia de hexosas, como *Candida shehatae*, *Scheffersomyces stipitis*, y *Pachysolan tannophilus*; sin embargo, la más usada en procesos a escala industrial es la *S. stipitis* debido a su alta producción de bioetanol (Aditiya y cols., 2016).

Además, se han propuesto cepas recombinantes de *S. cerevisiae* con un plásmido con el fin de sobre expresar los genes cuyo objetivo es el de producir enzimas para metabolizar la xilosa, la que fue exitosa en la co-fermentación de xilosa y glucosa en condiciones anaeróbicas (Goncalves y cols., 214).

2.4.5 Destilación

Además del pretratamiento, la otra gran preocupación es el consumo de energía en la destilación (Oliveira y cols., 2016). Frecuentemente es difícil obtener un mínimo de 40 g/L o más en la concentración de bioetanol en los procesos autónomos 2G, mientras que se puede obtener una concentración de 80-115 g/L a partir del caldo fermentado de un proceso 1G (Della-Bianca y cols., 2013).

Debido a las bajas concentraciones de azúcar, no se obtienen altas concentraciones de etanol en la fermentación de 2G, a causa de las dificultades por el manejo de altas cargas de sustratos. Por el contrario, se obtienen grandes concentraciones y producción de etanol en la fermentación 2G debido a la ausencia de productos de degradación del azúcar que podrían inhibir el proceso de fermentación, y a la presencia de altas concentraciones de azúcar. La demanda de energía para la destilación es baja en los procesos 1G debido a la alta concentración de etanol (cerca de 80-120 g/L) en la fermentación. Es posible combinar los dos caldos derivados de los procesos (1G2G), lo que proporcionará una mayor concentración de etanol que el mínimo requerido de 40 g/L para hacer el proceso económicamente viable (Bamidele y cols., 2020).

2.4.6 Biorrefinerías

Los modelos de biorrefinerías se basan en el uso de varios tipos de materia biomásica, como la lignocelulosa, las algas, y numerosos tipos de desechos, integrándolos en los procesos de generación de tecnología 1G y 2G (Santos y cols., 2018).

Las biorrefinerías pertenecen a dos categorías: a) biorrefinerías bottom-up y, a) biorrefinerías top-down. Las primeras se caracterizan por expandir las facilidades para producir un amplio rango de productos, con el fin de maximizar el uso de material pima. En contraparte, el modelo top-down se caracteriza por el uso de todo tipo de desechos agrícolas para obtener productos de valor agregado (Melendez y cols., 2022).

Como ejemplo, podemos citar a una biorrefinería basada en el procesamiento de cártamo, compuesta de tallo (79.6% en peso) y de semillas de aceite (20.4% en peso). Según el estudio en cuestión, de este material se obtuvieron 97.2 g de

estanol, 22.4 L de metano y 46.6 g de biodiesel equivalente a 0.168 L de gasolina por kg de cárcamo (Hashemi y cols., 2020).

2.4.7 Producción de bioetanol de tercera generación

En años recientes se ha encontrado que las microalgas son un material prometedor para la producción de bioenergía (Tabla 11), ya que tiene un alto contenido de carbohidratos que pueden ser usados para la obtención de bioetanol y de biobutanol (Chea y cols., 2016).

Se ha determinado, por ejemplo, que, con el alga café, a partir de 50 g/L de azúcar se producen de 7.0 a 9.8 g/L de etanol, siendo la duración del proceso de fermentación de 40 horas (en medio ácido). En el caso de hidrólisis ácida de la microalga verde (Ulva), se obtienen 15.2 g azúcar/L dando una producción media de biobutanol de 4 g/L (Kim y cols., 2011). A diferencia de las plantas que no crecen en un ambiente acuático, las microalgas no tienen biopolímeros como la lignina y la hemicelulosa en su estructura química (FAO, 2010; U.S.D.O.E., 2010, Chisti, 2010).

Algunos investigadores afirman que se puede obtener una producción de bioetanol de entre 0.240-0.888 g etanol/ g sustrato, a temperaturas de entre 25-30°C (Zhu, 2014) (John, 2011) (Debowski, 2013).

Se estima que, en un año, se pueden producir de 5,000-15,000 galones de etanol/acre (46,760 -140,290 L / ha) a partir de las microalgas (Patidar y cols., 2017).

Sin embargo, el alto costo de conversión es el principal obstáculo para que el bioetanol de tercera generación (3G) triunfe en el mercado como ha sido proyectado previamente. Para lograrlo, es vital mejorar los procesos de conversión a bioetanol, con lo que esta fuente de bioenergía podría ser usada comercialmente (Tan, 2020).

Otros de los retos para la producción de bioetanol de 3G son: la cosecha de las microalgas para la biomasa es complicada ya que su ciclo de vida es muy corto, además de que representa el 20-30% del costo total de la producción de bioetanol (Melendez y cols., 2020).

Tabla 11. Producción de bioetanol a partir de diferentes especies de algas y de microalgas

Materia prima	Biobutanol	Referencia
<i>Chlorococcum infusioenum</i>	260 g etanol/kg alga	(Harun y cols.; 2010)
<i>Spirogyra</i>	80 g etanol/kg alga	(Eshaq y cols.; 2011)
<i>Chlorococcum humicola</i>	11.73 etanol g/L	(Choi y cols.; 2012)
<i>Chlamydomonas reinhardtii</i>	29.2 %	(Nguyen, 2012)
<i>Chlamydomonas fasciata</i>	19.4 g/L	Asada y cols.; 2012)
<i>Chlorella vulgaris</i>	11.66 % etanol g/L	(Ho y cols.; 2013)
<i>Arthrospira platensis</i>	16% g etanol/ g de biomasa seca	(Ho y cols.; 2013)

2.5 Perspectivas del uso de la biomasa a nivel global

En el año 2018, los combustibles fósiles dominaron el abastecimiento global de energía con 81% del total del suministro de energía primaria, la cual incluye producción, importación y exportación por medio de carbón, petróleo crudo y gas natural. Las tecnologías de energías renovables, solar, eólica, hidráulica, biomasa y geotérmica tuvieron una participación de 13.8% en el suministro de energía primaria en ese mismo año (World Bioenergy Association, 2020).

El sector transporte participa en cerca del 27% de toda la energía consumida globalmente. El petróleo crudo y sus derivados contribuyeron con el 92% de las necesidades energéticas en dicho sector. Los biocombustibles líquidos y el biogás son las opciones ideales y más sustentables para el sector transporte en este momento. Los biocombustibles tienen una participación de más del 3% y han

crecido en 13%, casi 6 veces más que las necesidades de energía en el sector transporte (World Bioenergy Association, 2020).

En 2018, el suministro doméstico de la biomasa fue de 55.6 EJ globalmente. De este suministro, el 85% fue de fuentes de biomasa sólida que incluyen astillas de madera, pellets de madera y fuentes tradicionales de biomasa. Los biocombustibles líquidos proporcionaron el 7%, los sectores de desechos municipales e industriales suministraron el 5% seguido del biogás con el 3%. En 2019, se produjeron globalmente 1.9 billones de m³ de combustible de madera. África y América tuvieron la mayor participación en la producción de combustible de madera con una contribución del 36% y 37% respectivamente. Los pellets de madera son de los sectores de más rápido crecimiento en el sector bioenergético. Se estima que, en 2019, se produjeron globalmente 38.9 millones de toneladas de pellets. Otro producto clave del sector bioenergético producido globalmente con significativos volúmenes es el carbón vegetal proveniente de la madera. En 2019, se produjeron 53.1 toneladas de dicho combustible globalmente, siendo África la que proporcionó el 65% de la producción global (World Bioenergy Association, 2020).

En 2018, se produjeron globalmente 160 billones de litros de biocombustibles. El bioetanol es el biocombustible más abundante a nivel mundial con una participación del 62% seguido por el biodiesel, ésteres metílicos de ácidos grasos (FAME, por sus siglas en inglés) con el 26%. El resto de los biocombustibles incluyendo aceite vegetal hidrogenado (AVH) diésel renovable, etanol celulósico, etc., tuvieron una participación del 12%. Norteamérica y Sudamérica en conjunto producen globalmente el 75% de todos los biocombustibles, con la participación de Europa del 14%. En este mismo año, se produjeron a nivel mundial 59.3 billones de m³ de biogás con un contenido energético equivalente de 1.36 EJ. Durante el periodo de 2000 a 2018, el sector biogás experimentó un crecimiento anual de 9%, mientras que el de los biocombustibles creció 13% (Figura 18) (World Bioenergy Association, 2020).

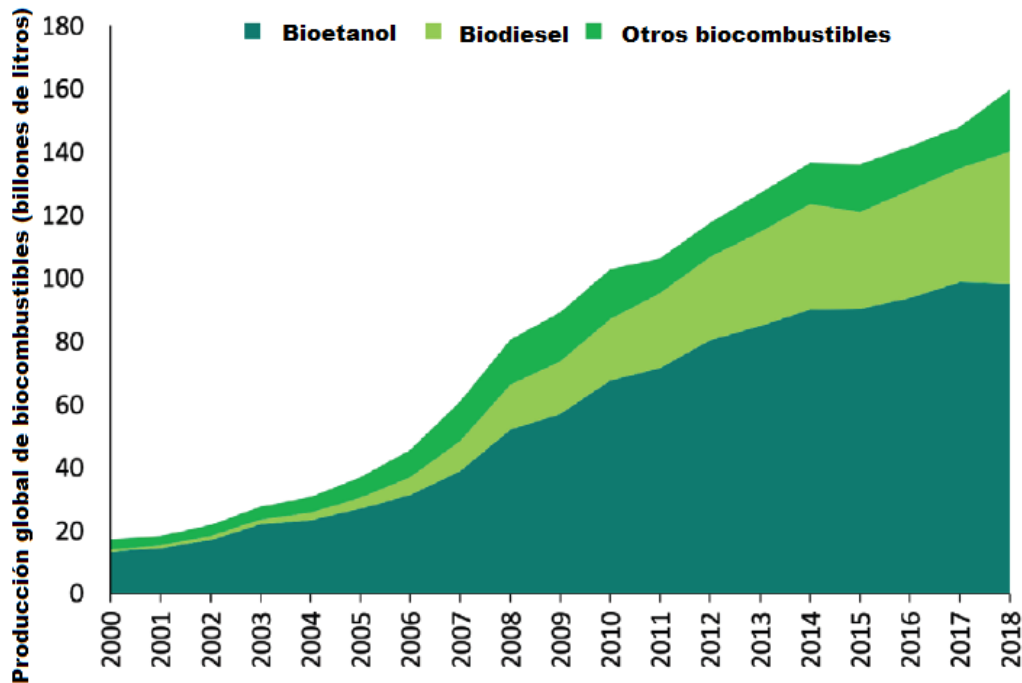


Figura 18. Producción global de biocombustibles líquidos.

2.6. Perspectivas del uso de la biomasa en México

El sistema energético mexicano se basa en el consumo de combustibles fósiles, los cuales proveen el 84.06% de la energía primaria (56.32% de petróleo, 2.08% de condensados y 25.67% de gas natural), además de 2.83% de carbón natural (SENER, 2020).

En 2019, la participación en el suministro de la energía primaria en México suministrada por fuentes de energía renovables fue de 11.25%, la mayor parte de la biomasa con 6.34% (bagazo de caña y leña) (SENER, 2020). Una gran cantidad de esta biomasa se usa para cocinar, sobre todo en áreas rurales, pero también en industrias a pequeña escala, así como en talleres, por ejemplo, donde se elabora carbón para usos residenciales y comerciales, elaboración de tabiques, mezcal, panaderías, tortillerías, y otros usos (Maserá y cols., 2006).

Debido a las recomendaciones para reducir las emisiones en el largo y corto plazo, se han propuesto objetivos plasmados en la Ley de Transición Energética y la Ley General del Cambio Climático. En la generación eléctrica, se ha establecido una participación mínima del 35% de energías limpias para el 2024 y del 50% para 2050. Sin embargo, los combustibles fósiles dominan la generación eléctrica en

México, con una participación de más del 70% (229.3 TWh) en 2020 (SENER, 2021).

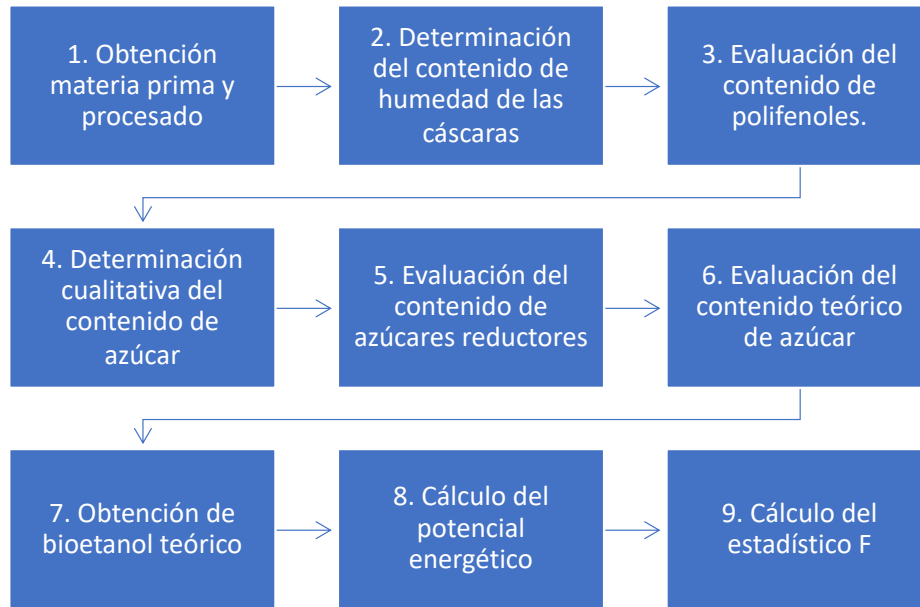
Ríos y Kaltschmitt propusieron que el país tiene un potencial medio de energía de 2,228 PJ/año, que puede ser obtenido a partir de residuos de biomasa. Los mismos autores calcularon una generación eléctrica teórica de 169.7 TWh/año a partir de desechos orgánicos (Ríos, 2013).

Flores *et al.* han indicado que el potencial de energía de los residuos forestales es aproximadamente de 45.96 PJ/año (Flores y cols., 2017). El Atlas Nacional Mexicano de Biomasa del Inventario Nacional de Energías Limpias (ANBIO) muestra a las fuentes generadoras de biomasa primaria que pueden ser usadas para generación de energía, con una cantidad aproximada de 278 ton/año de desechos en todo el país, con un potencial de 2,980 PJ/año para la generación de energía (SENER, 2018).

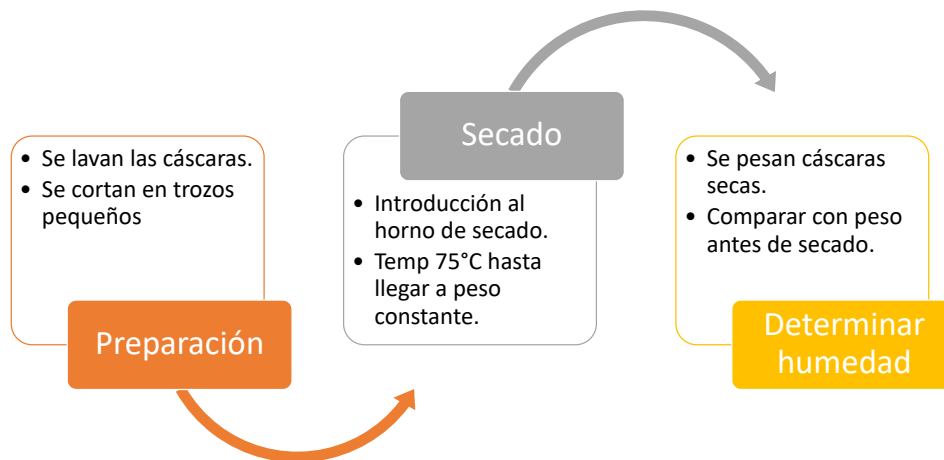
En el área de la energía renovable en México, la atención se ha centrado en los biocombustibles líquidos para el transporte, pero hay otras tecnologías que se han desarrollado como los biocombustibles procesados sólidos (astillas y perdigones, carbón vegetal) los cuales pueden ser usados para producir electricidad, calefacción industrial y doméstica, y materiales cerámicos, entre otros usos (García, y cols., 2015).

CAPÍTULO III. Metodología

3.1 Esquema general de la metodología



3.2 Obtención de materia prima y procesamiento.



a) Naranja (*Citrus sinensis*). Se adquirieron 2 kg de naranja valencia en el mercado local de Santa Matha Acatitla, Iztapalapa, Ciudad de México, correspondiente a 20 piezas. Las naranjas fueron lavadas para posteriormente retirar la cáscara. Una vez pesada cada pieza se le retiro a cáscara y se pesó por

separado. El secado se realizó empleando un secador de túnel, a 55°C, hasta llegar a peso constante. Finalmente se procesaron en un molino túrmix para su posterior análisis.

b) Mandarina (*Citrus reticulata*). Se adquirieron en el mismo mercado local de Santa Martha, Iztapalapa, CdMx, aproximadamente 2.4 kg de mandarina correspondiente aproximadamente a 19 piezas. Las unidades fueron procesadas de la misma manera que las Naranjas.

c) Toronja (*Citrus paradisi*). Se adquirieron 2 kg de toronja aproximadamente 11 piezas, las cuales se procesaron de manera similar a las naranjas.

d) Mango (*Mangifera indica*). Se adquirieron aproximadamente 2 kg de mango correspondiente a 7 piezas en el mercado local de Santa Martha, Iztapalapa, las cuales se procesaron de manera similar a las naranja.

e) Piña (*Ananas comosus*). Se adquirió aproximadamente 1.8 kg de piña correspondiente a 1 pieza, las cuales se procesaron de manera similar a las naranja.

3.3 Obtención del contenido de humedad y materia seca

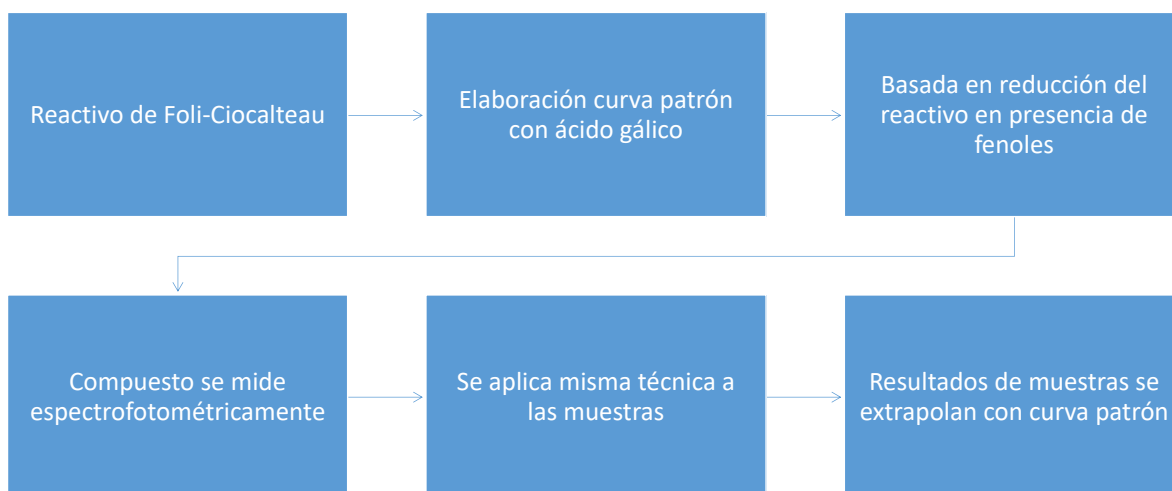
Para determinar el contenido de humedad, las cáscaras de cada fruta, previamente pesadas, se cortaron en trozos pequeños, luego se colocaron en una cama para ser llevadas al horno a 75°C, hasta obtener peso constante. La cual se determinó mediante la siguiente formula:

$$\% \text{ Humedad} = 100 \times \left[1 - \left(\frac{\text{peso de la cáscara fresca} - \text{cáscara seca}}{\text{peso de la cáscara fresca}} \right) \right]$$

$$\% \text{ Materia seca} = 100 \left(\frac{\text{cáscara seca}}{\text{cáscara fresca}} \right)$$

3.4 Caracterización química

3.4.1 Contenido de polifenoles totales



El contenido de polifenoles totales se determinó mediante el reactivo de Folin-Ciocalteu, de acuerdo con el método descrito por Singleton & Amp (1965). Esta técnica espectrofotométrica se basa en la reducción del reactivo Folin-Ciocalteu en presencia de fenoles. Al llevarse a cabo la reacción, se produce una coloración azul debido a la producción de molibdeno de tungsteno. El producto se mide espectrofotométricamente a 760 nm (Bareiro, y otros, 2019).

Se empleó una curva de calibración de ácido gálico como referencia (Figura 19); los datos se reportaron como mg de ácido gálico por g de cáscara seca (mg g de compuesto/g CS).

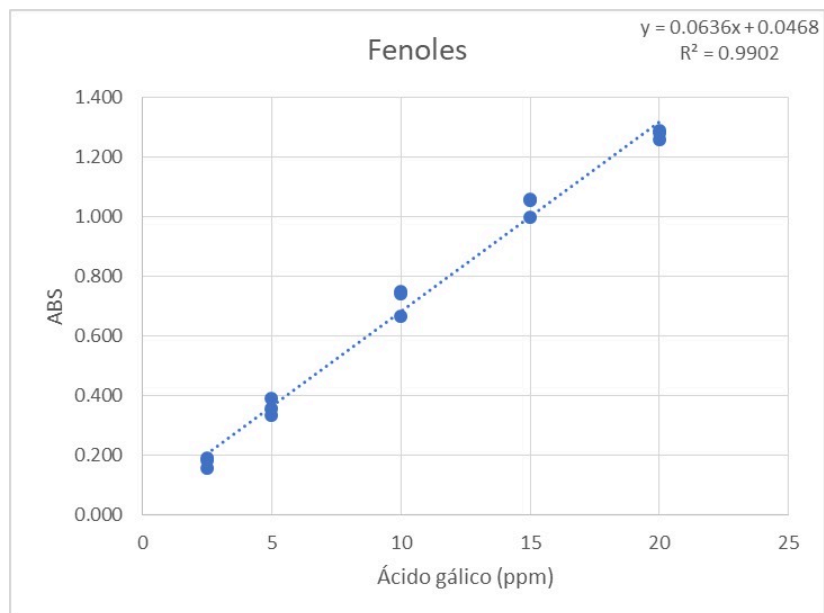


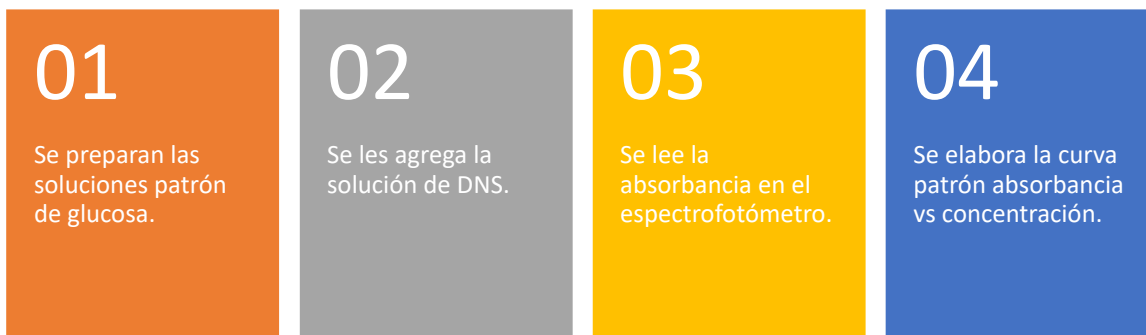
Figura 19. Curva patrón del contenido de polifenoles con ácido gálico
Elaboración propia con datos obtenidos del laboratorio

3.4.2 Evaluación cualitativa del contenido de azúcar

3.4.2.1 *Determinación de sacarosa mediante grados Brix.*

Se tomaron 0.5 g de muestra en 3 mL de agua a 60°C. Cada muestra se agita durante 15 segundos, posteriormente se les agrega 1 mL más de agua (en total, 4 mL), se ponen en baño María, se deja que cada muestra se enfríe. Se determinaron los grados Brix de cada muestra por quintuplicado para determinar la media y la desviación estándar, en el brixómetro.

3.4.3 Cuantificación de azúcares reductores



Se empleó el método de Miller que permite cuantificar la cantidad de azúcares reductores en una muestra, mediante la reducción del ácido 3,5-dinitrosalicílico (DNS) en presencia de calor, por lo que la solución desarrolla un cambio de color parecido al café, el cual puede ser determinado por lecturas de densidad óptica, leídas por espectrofotometría a una determinada longitud de onda, (en nuestro caso, a 490 nm de longitud). La concentración de azúcares reductores totales liberados en la muestra se determina haciendo una interpolación en la curva patrón del azúcar utilizado, graficando la absorbancia en función de la concentración. Para preparar el reactivo DNS, se disolvieron 0.8 g de NaOH en agua destilada, luego se adicionan 15 g de tartrato de sodio y potasio tetrahidratado y 0.5 de DNS (ácido 3,5-dinitrosalicílico). Esta mezcla se afora a 50 mL con agua destilada y se almacena en un frasco ámbar a 4°C.

Una vez construida la curva patrón se aplicó el método DNS a cada una de las muestras, para ello se mezclaron 0.5 mL de cada una de las muestras con 0.5 mL del reactivo DNS, se colocan a ebullición por 5 min en baño María e inmediatamente se sumergen en agua con hielo para determinar la reacción. Se le agrega a cada muestra 5 mL de agua destilada para reconstruirla, se agitan, se dejan en reposo por 15 min, y se determina su absorbancia. Mediante esta absorbancia, se determina la concentración de azúcares reductores. Para determinar el promedio y la desviación estándar se hacen tres réplicas de cada muestra.



Se toma una muestra de 0.5 mL de la solución tomada de las cáscaras.



Se agrega la solución estandarizada de DNS.



Se mide la absorbancia en el espectrofotómetro.



Se relaciona con la curva patrón y se determina la cantidad de azúcares reductores presentes en la muestra.

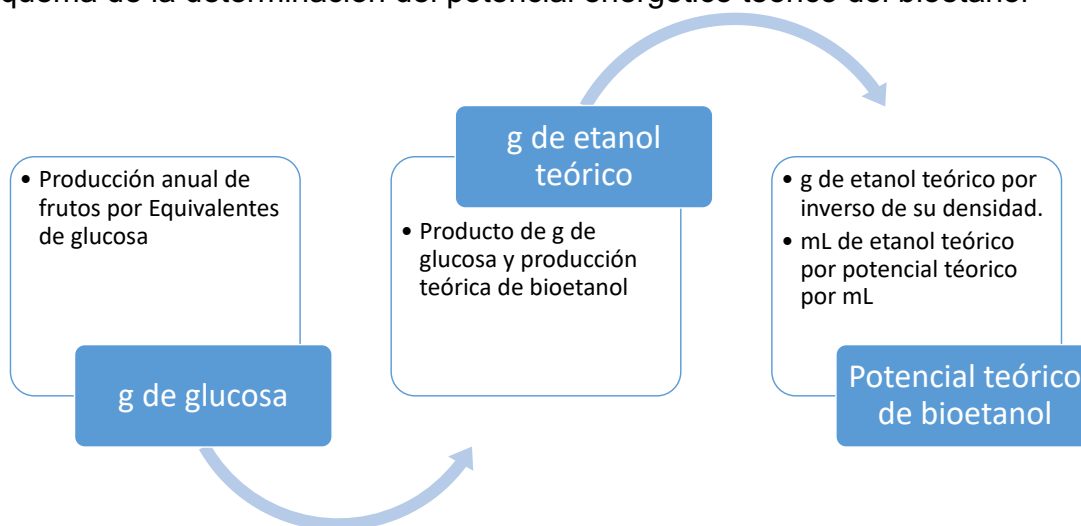
Tabla 12. Curva patrón de glucosa método de Miller

Muestra	Concentración (ppm)	Cantidad glucosa (μL)	Cantidad H_2O (μL)
1	100	200	1800
2	250	500	1500
3	500	1000	1000
4	750	1500	500
5	1000	2000	0

3.4.4 Determinación de la capacidad oxidante

Se determinó empleado el radical ABTS^+ [2,2'-azino-bis(3-etilbenzotiazolina-6-ácido sulfónico)], utilizando la metodología reportada por Ponce y col. en 2023

Esquema de la determinación del potencial energético teórico del bioetanol



3.5 Determinación teórica del contenido de alcohol obtenido por fermentación

La cuantificación teórica del contenido de etanol se calculó con base en la presencia de azúcares reductores, empleando la relación publicada por Ramírez Zoila Flor en 2022 para cáscara de naranja (Mendoza-Espinoza, y otros, 2022).

3.6 Análisis del potencial energético

Se determinó con base en la producción anual de cáscaras multiplicada por la relación de cáscara seca/ fruto, para obtener la cantidad total que se podría obtener de cáscara seca; luego, se multiplicó esta cantidad por la cantidad de equivalentes de glucosa de cada material biológico para obtener la cantidad, en gramos de glucosa que se puede obtener de cada tipo de cáscara. Este último valor se multiplicó por el potencial energético de la glucosa, lo que nos proporciona la cantidad de gramos de alcohol que se puede obtener de cada cáscara; esta cantidad se multiplicó por la densidad del alcohol para que la tuviéramos en mL de alcohol, finalmente, se realizó la conversión a metros cúbicos para obtener la cantidad de bioetanol que se puede obtener a nivel nacional.

Una vez que obtuvimos la cantidad de etanol disponible teóricamente, se realizó el producto de este último valor con el potencial energético del bioetanol para que nos proporcionara la cantidad de energía de que podemos disponer con esa cantidad de bioetanol teórica (en GJ).

CAPÍTULO IV. Resultados y discusión

4.1 Evaluación química y física de las cáscaras estudiadas

Para determinar el contenido de humedad de las cáscaras, así como el porcentaje de cáscara seca, se aplicó la metodología antes descrita, obteniendo los resultados que se muestran en la Tabla 13, donde observamos que el material que contiene la mayor cantidad de humedad es el plátano, con 88.89%, seguido por la piña, con 78.84%, y la cáscara que menos humedad contiene es la mandarina, con 65.32%, por lo tanto, en relación a peso seco la mandarina es la mejor fuente de materia prima, sin embargo este resultado se tiene que valora en relación a la producción anual y al contenido de azúcares fermentables, estos datos los discutiremos más adelante. Es importante mencionar que la fruta fue colectada en octubre de 2023 por lo cual por la temporada de corte puede existir una variación pero por experiencia de los productores no se espera mayor al 10%, este dato debe ser considerado en los cálculos posteriores.

Tabla 13. Determinación del porcentaje de humedad de las cáscaras de diversas frutas

Material biológico	n	Peso cáscara fresca (g)	Peso cáscara seca (g)	% humedad	% Cáscara seca
Naranja	20	35.87 ± 7.97	11.53 ± 2.39	67.20 ± 5.75 (A)	32.79 ± 5.75
Mandarina	19	19.11 ± 4.30	6.61 ± 1.49	65.32 ± 2.11 (A)	34.67 ± 2.11
Toronja	11	33.18 ± 8.16	10.27 ± 2.94	69.10 ± 3.37 (A)	30.89 ± 3.37
Mango	7	40.24 ± 8.09	12.13 ± 2.56	69.90 ± 1.25 (A)	30.09 ± 1.25
Plátano	15	74.93 ± 4.00	5.98 ± 0.51	88.89 ± 0.42 (B)	11.10 ± 0.42
Piña	1	397	84	78.84	21.15

El análisis estadístico de la tabla 13 nos indica que no hay diferencia entre las varianzas del porcentaje de humedad de la naranja, la mandarina, la toronja y el mango, pero si hay diferencia entre estas y el plátano, lo que se indica con el estadístico de prueba (anexo 1). Con respecto a la mandarina comparada con la toronja, el mango y el plátano, el análisis de las varianzas indica que si hay

diferencia en la humedad entre estas cuatro cáscaras de frutas. Con respecto a la prueba de varianza de la toronja comparada con el mango, no se encontró diferencia en la humedad de ambas cáscaras, lo cual si ocurrió al comparar la varianza de la humedad entre la toronja y el plátano. Finalmente, la prueba de varianza nos indica que si hay diferencia en la humedad de las cáscaras del mango y plátano.

4.2 Evaluación cualitativa del contenido de sólidos solubles de las cáscaras de las frutas estudiadas

La determinación cualitativa del contenido de sólidos solubles que son equivalentes a sacarosa en las muestras de las cáscaras de las frutas, se realizó mediante la técnica de °Brix, los resultados se muestran en la Tabla 14. En la determinación se observó el efecto de la sonificación, encontrando que cuando las muestras son sonificadas la cantidad de °Brix aumenta, lo que significa que se liberan más sólidos al medio, fisiológicamente este se puede explicar por el rompimiento de membradas en las muestras sonificadas, esto indica que es necesario plantear procesos de pretratamiento para mejorar la liberación de sólidos solubles al medio.

Algunos resultados que podemos señalar son, la cáscara de mandarina es en la que se determinó la mayor cantidad de sólidos soluble (1.63 °Brix), y la matriz en la que menos contenido de sólidos solubles encontramos fue naranja (1.00 °Brix). Es importante mencionar que este valor es bajo al compararlo con un jugo de fruta, ya que el jugo de manzana puro contiene aproximadamente 30°Bx, mientras que los jugos concentrados de naranja presentan valores de alrededor de 70°Bx (Kruss Optronic). Sin embargo no hay que perder de vista que estamos dando valor agregado a la cáscaras de los frutos además de ayudar a disminuir la huella de carbono a dar una utilidad distinta a este recurso considerado desecho, el cual al fermentarse en condiciones anaeróbicas da origen a uno de los gases de invernadero más preocupante que es el gas metano, por otro lado la cantidad que se produce de este tipo de materiales sobrepasa las miles de toneladas por año, que analizaremos más adelante.

Tabla 14. Determinación cuantitativa del contenido de azúcar en las cáscaras de diversas frutas.

Material biológico	n	°BRIX	
		Sonicadas	Sonicadas, filtradas, con baño maría
Naranja	5	0.92 ± 0.04	1.00 ± 0.00
Mandarina	5	1.00 ± 0.00	1.63 ± 0.05
Toronja	5	1.14 ± 0.05	1.48 ± 0.04
Mango	5	1.40 ± 0.00	1.33 ± 0.14
Plátano	5	1.06 ± 0.05	1.40 ± 0.09
Piña	5	1.00 ± 0.00	1.53 ± 0.08

En la determinación cualitativa del contenido de azúcares por medio de la determinación de °Brix, para muestras sonicadas, filtradas y tratadas en baño María, en la tabla 14 nos indica que, según el análisis de varianzas, si hay diferencia en el contenido de sólidos solubles entre la naranja y las cáscaras de mandarina, toronja, mango, plátano y piña; en cuanto a la comparación de contenido de azúcares en las casacaras de mandarina y las de toronja, mango, plátano y piña, el análisis de varianza indica que si hay diferencia entre dichas cáscaras; en cuanto a la comparación entre la toronja y las cáscaras de mango, plátano y piña, el análisis de varianzas no indicó diferencia en el contenido de azúcar de dichas cáscaras; al comparar el contenido de azúcares entre mango y piña, si se encontró diferencia entre la varianzas de éstas cáscaras, pero no entre mango y plátano; finalmnete, la prueba de varianzas entre las cáscaras de plátano y piña, indica que si hay diferencias en el contenido de azúcares, como se indica en los resultados del anexo 2.

4.3 Evaluación del contenido de los compuestos polifenólicos totales

Para la evaluación del contenido de compuestos polifenólicos en las cáscaras de frutas, se usó el reactivo de Folie-Ciocalteau, en el que se debe elaborar una curva patrón con ácido gálico, la que se muestra en la Figura 19. Es importante señalar que la correlación encontrada es mayor a 0.99 lo que indica un buen grado de ajuste. Este tipo de valores semicuantitativos de la presencia de polifenoles relacionan con la capacidad antioxidante y nos da la pauta para que este tipo de sustancias puedan usarse como aditivos alimentarios. Este ajuste de correlación se publicó como parte de los aportes del trabajo de investigación que aquí se presenta. En relación a los resultados obtenidos (Tabla 15), podemos señalar que la mayor cantidad de este tipo de compuestos es la mandarina (2.58 mg compuesto/g CS), mientras que la piña es la que presenta la menor cantidad de fenoles totales (0.59 mg compuesto/g CS).

Tabla 15. Evaluación del contenido de compuestos polifenólicos

Material biológico	n	Contenido de fenoles totales^a
Naranja	6	2.04 ± 0.00
Mandarina	6	2.58 ± 0.02
Toronja	6	2.58 ± 0.01
Mango	6	2.74 ± 0.01
Platano	6	0.95 ± 0.00
Piña	6	0.59 ± 0.00

^aContenido de compuestos fenólicos. Expresado como mg equivalentes de ácido gálico por g de cáscara seca (mg de compuesto/g CS)

El análisis estadístico de las varianzas de la evaluación del contenido de compuestos polifenólicos de la tabla 15 nos indica que si hay diferencia entre las

varianzas de la naranja y la mandarina, en la naranja y la toronja, la naranja y el mango, la naranja y el plátano, la naranja y la piña, la mandarina y el mango, la mandarina y el plátano, la mandarina y la piña, la toronja y el mango, la toronja y el plátano, la toronja y la piña, el mango y el plátano, el mango y la piña, el plátano y la piña, y no se observa diferencia estadística entre las varianzas de la mandarina y la toronja (Anexo 3).

4.4 Determinación del contenido de azúcar en las muestras

Para evaluar el contenido teórico de azúcar se utilizó el método de Miller con DNS, para lo cual primero se elaboró una curva patrón empleando glucosa para la obtención de los equivalentes. En esta curva patrón se correlacionó la concentración de azúcar en ppm contra la absorbancia, obtenidos un coeficiente de correlación superior al 0.99 lo que indica un buen grado de ajuste (Figura 20). Los resultados indicaron que la cáscara de piña seguida de plátano, mango, mandarina, toronja y naranja (Figura 20), estos resultados no concuerdan con lo encontrado en el análisis por grados Brix, sin embargo este ensayo es el que correlaciona mejor con el análisis de azúcares fermentables, y los grados Brix solo lo correlacionan con la sacarosa.

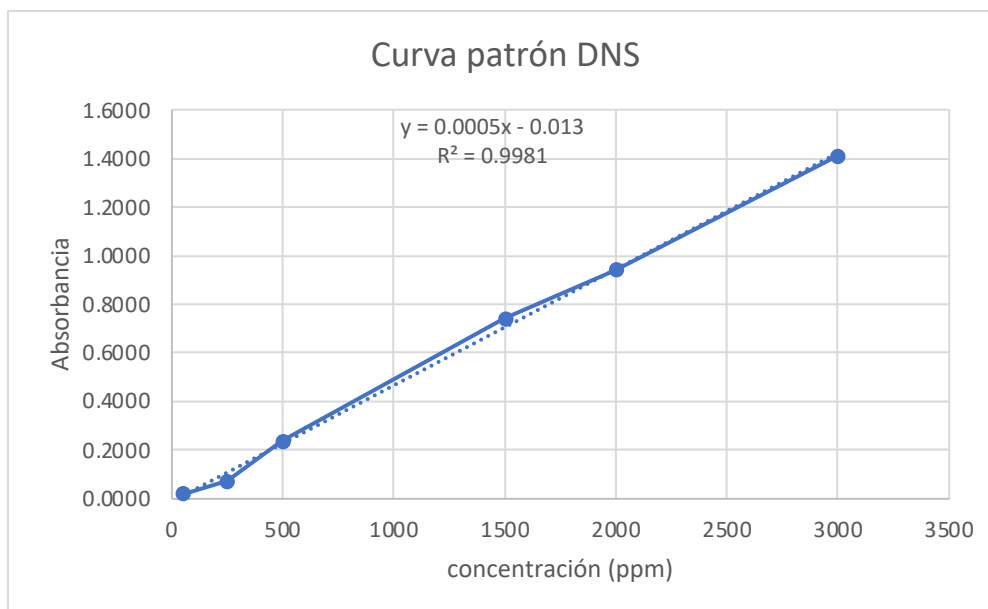


Figura 20. Curva patrón para obtener los equivalentes de azúcares reductores

Tabla 16. Contenido de azúcar en las muestras de cáscaras

Material biológico	Equivalentes de glucosa ^a	Producción anual (ton)	Relación cáscara/fruto (%)	Bioetanol teórico (m ³)	Potencial energético (GJ)
Naranja	7.8	2,398, 878 (SIAP, 2022)	32.79	39663.67	8.96E+05
Toronja	7.8	488, 380 (SIAP, 2023)	30.89	7607.30	1.71E+05
Mandarina	15.0	238, 000 (SIAP, 2022)	34.67	8001.38	1.80E+05
Mango	15.1	2, 085, 751 (SIAP, 2023)	30.09	61273.35	13.8E+05
Piña	22.2	1, 209, 000 (SIAP, 2021)	21.15	36708.05	8.29E+05
Plátano	20.8	2, 593, 024 (SIAP, 2023)	11.10	38720.08	8.75E+05

^ag equivalentes de glucosa en 100 g de cáscara seca

Fuente: resultados obtenidos en el laboratorio

4.5 Determinación teórica del bioetanol obtenido y potencial energético

El reactivo limitante en la producción de bioetanol es el azúcar fermentable, diversos estudios indican que de un gramo de glucosa es posible obtener 0.51 g de alcohol, si empleamos esta relación y tomamos en cuenta la producción anual y el contenido de materia seca, encontramos que la cáscara de mango es la materia prima con la cual se prospecta la obtención del mayor contenido de bioetanol, con 61,273.35 m³ de este biocombustible, seguidos por la naranja, el plátano, y la piña, en ese orden. Asimismo, la cantidad total de bioetanol obtenido, usando todas las cáscaras de las frutas en este estudio, es de 191,973.87 m³. Sin embargo hay que considerar en este trabajo que no se emplearon pretratamientos para mejorar la cantidad de azúcares fermentables, lo que puede plantearse como perspectiva.

En cuanto al potencial energético de las cáscaras usadas en este estudio, y tomando en cuenta el potencial energético del etanol encontrado en la literatura (22.6 GJ/mL), el material biológico que proporciona la mayor cantidad de energía,

si pudiéramos disponer de toda su producción nacional, es el mango, que provee $13.8E+05$ GJ (0.896 PJ), seguida por el plátano y la naranja. El total de energía que podemos obtener con todas las cáscaras usadas en el estudio es de $43.31E+05$ GJ (4.331 PJ).

En México, en el año 2022 el consumo total de energía en el ramo del transporte fue de 2,670.78 PJ (SENER, 2020), por lo que se podrían cubrir solamente una pequeña parte de las necesidades energéticas de este sector si se produjera bioetanol usando todos los desechos de cáscaras de la producción nacional de estos frutos.

4.6 Proyección y posible impacto en el costo de producción de bioetanol

Es muy complicado calcular el costo de las cáscaras de manera específica, pero si es posible hacer una proyección del impacto en el mercado de los biocombustibles el cual se calcula en 112.29 mil millones de litros en 2024, y se espera que alcance 144.34 mil millones de litros en 2029, creciendo a una tasa compuesta anual del 5.15% durante el período previsto (2024-2029), por lo que las cáscaras podrían aportar el 0.13% de la proyección marcada en el mercado mundial (Mordor Intelligence, s.f.) Otro punto interesante es el análisis de costos donde se estima que más del 70% del costo por mL producido de bioetanol corresponde a los insumos básicos principalmente la materia prima como se muestra en la Tabla 17, lo que significaría que el uso de material de desecho abarataría el costo de producción en más del 70% (Moreno, 2017), sin embargo hay que considerar que la cantidad de azúcar en las matrices obtenidas es menor, por lo que es posible que no se alcance la reducción de un 70% sumado a esto el valor del transporte que no puede ser cuantificado (Tabla 17), pero sí muy cercano ya que un dato a favor es que el producto ya generó la venta de la pulpa como un ingreso primario, al ser consumido como fruta o en la elaboración de jugo.

Otro punto a favor es que el material biológico utilizado en este estudio son cáscaras, es decir, desechos agrícolas, que tienen poco valor económico, ya que no son consumidas como alimento, y sólo en algunos casos, se usan como forraje, por lo que se obtendrían a bajo costo.

Tabla 17. Costo en porcentaje por concepto en la producción por litro de etanol (pesos/litro).

Concepto	Caña de azúcar	Sorgo grano	Sorgo dulce
Insumos básicos	81.93	79.32	75.88
Otros insumos	2.68	3.49	3.58
Mano de obra	5.25	4.97	7.00
Costos de producción	3.44	2.71	4.59
Gastos de operación	0.18	0.24	0.24
Amortizaciones	4.41	6.92	5.89
Otros gastos	2.09	2.35	2.80

Conclusiones

Se desarrolló una metodología para la determinación de glucosa en seis cáscaras de diferentes frutas para su conversión en bioetanol.

Se determinó que el material biológico que más cáscara seca proporciona es la mandarina, seguido de la naranja, lo que nos puede dar un indicio de a partir de cual cáscara se puede obtener más glucosa. Esto fue confirmado al hacerse la determinación cuantitativa de azúcares mediante los grados Brix, cuyos resultados arrojaron un mayor valor para la mandarina, seguida, en este caso, de la piña. La cáscara con menos grados Brix fue la de naranja. Asimismo, la mandarina fue la que dio una mayor cantidad de compuestos fenólicos.

En cuanto a la determinación de azúcares reductores en las muestras, la cáscara de piña es la que proporciona más equivalentes de glucosa por cada 100 g de cáscara seca, sin embargo, las cáscaras que más potencial energético tienen son el mango y el plátano, dejando a la piña en el cuarto lugar.

La cáscara de mango, sin embargo, es la materia prima mas adecuada para la fermentacion en cuando al rendimiento de azucares reductores, obteniendo un contenido teórico de bioetanol de 62.4 mL, sin sumar un costo de insumos al precio total por mL.

Perspectivas

1. Evaluar de manera experimental el rendimiento de la producción de bioetanol y correlacionar con el contenido teórico.
2. Evaluar el proceso de deslignificación para aumentar el contenido de azúcares reductores, ya que en este trabajo solo se observaron a los azúcares reductores, liberados mediante maceración directa.
3. Probar otros métodos de secado y de molienda de la cáscara de las frutas, para determinar si hay variación en el rendimiento de azúcares reductores.

ANEXOS

ANEXO 1. Analisis estadístico del porcentaje de humedad

1. Naranja vs mandarina

Las varianzas no son iguales (Prueba de F)

Hipotesis alternativa:

$$\mu_1 \neq \mu_2$$

Estadístico de prueba, t: 1.36842

Valor crítico t: ± 2.79445

Valor P: 0.18372

Grados libertad: 24.25366

Intervalo de confianza 99%:

$$-1.95914 < \mu_1 - \mu_2 < 5.71914$$

2. Naranja vs toronja

Las varianzas no son iguales (Prueba de F)

Hipótesis alternativa:

$$\mu_1 \neq \mu_2$$

Estadístico de prueba, t: -1.15941

Valor crítico t: ± 2.04584

Valor P: 0.25581

Grados de libertad: 28.79995

Intervalo de confianza 95%:

$$-5.25267 < \mu_1 - \mu_2 < 1.45267$$

3. Naranja vs mango:

Las varianzas no son iguales (Prueba de F)

Hipótesis alternativa:

$$\mu_1 \neq \mu_2$$

Estadístico de prueba, t: -1.97110

Valor crítico t: ± 2.06796

Valor P: 0.06079

Grados de libertad: 23.14133

Intervalo de confianza 95%:

$$-5.53268 < \mu_1 - \mu_2 < 0.13268$$

4. Naranja vs plátano:

Las varianzas no son iguales (Prueba de F)

Hipótesis alternativa:

$$\mu_1 \neq \mu_2$$

Estadístico de, t: -16.80999

Valor crítico t: ± 2.09104

Valor P: 0.00000

Grados de libertad: 19.26996

Intervalo de confianza 95%:

$$-24.38808 < \mu_1 - \mu_2 < -18.99192$$

5. Mandarina vs toronja

Las varianzas no son iguales (Prueba de F)

Hipótesis alternativa:

$$\mu_1 \neq \mu_2$$

Estadístico de prueba, t: -3.35849

Valor crítico t: ± 2.13609

Valor P: 0.00444

Grados de libertad: 14.63543

Intervalo de confianza 95%:

$$-6.18418 < \mu_1 - \mu_2 < -1.37582$$

6. Mandarina vs mango

Las varianzas no son iguales (Prueba de F)

Hipótesis alternativa:

$$\mu_1 \neq \mu_2$$

Estadístico de prueba, t: -6.77101

Valor crítico t: ± 2.09736

Valor P: 0.00000

Grados de Libertad: 18.43669

Intervalo de confianza 95%:

$$-5.99868 < \mu_1 - \mu_2 < -3.16132$$

7. Mandarina vs plátano

Las varianzas no son iguales (Prueba de F)

Hipótesis alternativa:

$$\mu_1 \neq \mu_2$$

Estadístico de prueba, t: -47.51388

Valor crítico t: ± 2.08740

Valor P: 0.00000

Grados de libertad: 19.78801

Intervalo de confianza 95%:

$$-24.60549 < \mu_1 - \mu_2 < -22.53451$$

8. Toronja vs mango

Las varianzas no son iguales (Prueba de F)

Hipótesis alternativa:

$$\mu_1 \neq \mu_2$$

Estadístico de prueba, t: -0.71393

Valor crítico t: ± 2.14886

Valor P: 0.48724

Grados de libertad: 13.72239

Intervalo de confianza 95%:

$$-3.20793 < \mu_1 - \mu_2 < 1.60793$$

9. Toronja vs plátano

Las varianzas no son iguales (Prueba de F)

Hipótesis alternativa:

$$\mu_1 \neq \mu_2$$

Estadístico de prueba, t: -19.36657

Valor crítico t: ± 2.22142

Valor P: 0.00000

Grados de Libertad: 10.22816

Intervalo de confianza 95%:

$$-22.05999 < \mu_1 - \mu_2 < -17.52001$$

10. Mango vs plátano

Las varianzas no son iguales (Prueba de F)

Hipótesis alternativa:

$$\mu_1 \neq \mu_2$$

Estadístico de prueba, t: -39.17552

Valor crítico t: ± 2.39079

Valor P: 0.00000

Grados de Libertad: 6.64097

Intervalo de confianza 95%:

$$-20.14892 < \mu_1 - \mu_2 < -17.83108$$

Anexo 2. Análisis estadístico de la determinación cualitativa del contenido de azúcar en las cáscaras de diversas frutas mediante grados Brix.

1. Naranja vs mandarina

Las varianzas no son iguales (Prueba de F)

Hipótesis alternativa:

$$\mu_1 \neq \mu_2$$

Estadístico de prueba, t: -28.16882

Valor crítico t: ± 2.77557

Valor P: 0.00001

Grados de libertad: 4.00320

Intervalo de confianza 95%:

$$-0.69208 < \mu_1 - \mu_2 < -0.56792$$

2. Naranja vs toronja

Las varianzas no son iguales (Prueba de F)

Hipótesis alternativa:

$$\mu_1 \neq \mu_2$$

Estadístico de prueba, t: -26.82443

Valor crítico t: ± 2.77508

Valor P: 0.00001

Grados de Libertad: 4.00500

Intervalo de confianza 95%:

$$-0.52966 < \mu_1 - \mu_2 < -0.43034$$

3. Naranja vs mango

Las varianzas no son iguales (Prueba de F)

Hipótesis alternativa:

$$\mu_1 \neq \mu_2$$

Estadístico de prueba, t: -5.27060

Valor crítico t: ± 2.77634

Valor P: 0.00621

Grados de libertad: 4.00041

Intervalo de confianza 95%:

$-0.50383 < \mu_1 - \mu_2 < -0.15617$

4. Naranja vs plátano

Las varianzas no son iguales (Prueba de F)

Hipótesis alternativa:

$\mu_1 \neq \mu_2$

Estadístico de prueba, t: -9.93747

Valor crítico t: ± 2.77618

Valor P: 0.00058

Grados de Libertad: 4.00099

Intervalo de confianza 95%:

$-0.51175 < \mu_1 - \mu_2 < -0.28825$

5. Naranja vs piña

Las varianzas no son iguales (Prueba de F)

Hipótesis alternativa:

$\mu_1 \neq \mu_2$

Estadístico de prueba, t: -14.81279

Valor crítico t: ± 2.77611

Valor P: 0.00012

Grados de Libertad: 4.00125

Intervalo de confianza 95%:

$-0.62933 < \mu_1 - \mu_2 < -0.43067$

6. Mandarina vs toronja

Las varianzas no son iguales (Prueba de F)

Hipótesis alternativa:

$\mu_1 \neq \mu_2$

Estadístico de prueba, t: 5.23823

Valor crítico t: ± 2.32549

Valor P: 0.00091

Grados de Libertad: 7.63224

Intervalo de confianza 95%:

$0.08341 < \mu_1 - \mu_2 < 0.21659$

7. Mandarina vs mango

Las varianzas no son iguales (Prueba de F)

Hipótesis alternativa:

$$\mu_1 \neq \mu_2$$

Estadístico de prueba T, t: 4.51243

Valor crítico t: ± 2.56995

Valor P: 0.00631

Grados de Libertad: 5.00407

Intervalo de confianza 95%:

$0.12914 < \mu_1 - \mu_2 < 0.47086$

8. Mandarina vs plátano

Las varianzas no son iguales (Prueba de F)

Hipótesis alternativa:

$$\mu_1 \neq \mu_2$$

Estadístico de prueba, t: 4.99528

Valor crítico t: ± 2.42299

Valor P: 0.00219

Grados de Libertad: 6.25438

Intervalo de confianza 95%:

$0.11844 < \mu_1 - \mu_2 < 0.34156$

9. Mandarina vs piña

Las varianzas no son iguales (Prueba de F)

Hipótesis alternativa:

$$\mu_1 \neq \mu_2$$

Estadístico de prueba, t: 2.37023

Valor crítico t: ± 2.38540

Valor P: 0.05111

Grados de Libertad: 6.71129

Intervalo de confianza 95%:

$$-0.00064 < \mu_1 - \mu_2 < 0.20064$$

10. Toronja vs mango

Las varianzas no son iguales (Prueba de F)

Hipótesis alternativa:

$$\mu_1 \neq \mu_2$$

Estadístico de prueba, t: 2.30361

Valor crítico t: ± 2.63012

Valor P: 0.07342

Grados de Libertad: 4.64874

Intervalo de confianza 95%:

$$-0.02126 < \mu_1 - \mu_2 < 0.32126$$

11. Toronja vs plátano

Las varianzas no son iguales (Prueba de F)

Hipótesis alternativa:

$$\mu_1 \neq \mu_2$$

Estadístico de prueba, t: 1.81631

Valor crítico t: ± 2.49931

Valor P: 0.12349

Grados de Libertad: 5.52090

Intervalo de confianza 95%:

$$-0.03008 < \mu_1 - \mu_2 < 0.19008$$

12. Toronja vs piña

Las varianzas no son iguales (Prueba de F)

Hipótesis alternativa:

$$\mu_1 \neq \mu_2$$

Estadístico de prueba, t: -1.25000

Valor crítico t: ± 2.45882

Valor P: 0.25873

Grados de Libertad: 5.88235

Intervalo de confianza 95%:

$$-0.14835 < \mu_1 - \mu_2 < 0.04835$$

13. Mango vs plátano

Las varianzas no son iguales (Prueba de F)

Hipótesis alternativa:

$$\mu_1 \neq \mu_2$$

Estadístico de prueba, t: -0.94047

Valor crítico t: ± 2.37706

Valor P: 0.37907

Grados de Libertad: 6.82384

Intervalo de confianza 95%:

$$-0.24693 < \mu_1 - \mu_2 < 0.10693$$

14. Mango vs piña

Las varianzas no son iguales (Prueba de F)

Hipótesis alternativa:

$$\mu_1 \neq \mu_2$$

Estadístico de prueba, t: -2.77350

Valor crítico t: ± 2.41368

Valor P: 0.03038

Grados de Libertad: 6.36056

Intervalo de confianza 95%:

$$-0.37405 < \mu_1 - \mu_2 < -0.02595$$

15. Plátano vs piña

Las varianzas no son iguales (Prueba de F)

Hipótesis alternativa:

$$\mu_1 \neq \mu_2$$

Estadístico de prueba, t: -2.41404

Valor crítico t: ± 2.31154

Valor P: 0.04265

Grados de Libertad: 7.89153

Intervalo de confianza 95%:

$$-0.25448 < \mu_1 - \mu_2 < -0.00552$$

Anexo 3. Análisis estadístico de la evaluación del contenido de compuestos polifenólicos

1. Naranja vs mandarina

Las varianzas no son iguales (Prueba de F)

Hipótesis alternativa:

$$\mu_1 \neq \mu_2$$

Estadístico de prueba, t: -66.13621

Valor crítico t: ± 2.57058

Valor P: 0.00000

Grados de Libertad: 5.00000

Intervalo de confianza 95%:

$$-0.56099 < \mu_1 - \mu_2 < -0.51901$$

2. Naranja vs toronja

Las varianzas no son iguales (Prueba de F)

Hipótesis alternativa:

$$\mu_1 \neq \mu_2$$

Estadístico de prueba, t: -132.27238

Valor crítico t: ± 2.57058

Valor P: 0.00000

Grados de Libertad: 5.00001

Intervalo de confianza 95%:

$$-0.55049 < \mu_1 - \mu_2 < -0.52951$$

3. Naranja vs mango

Las varianzas no son iguales (Prueba de F)

Hipótesis alternativa:

$$\mu_1 \neq \mu_2$$

Estadístico de prueba, t: -171.46420

Valor crítico t: ± 2.57058

Valor P: 0.00000

Grados de libertad : 5.00001

Intervalo de confianza 95%:

$-0.71049 < \mu_1 - \mu_2 < -0.68951$

4. Naranja vs plátano

Las varianzas no son iguales (Prueba de F)

Hipótesis alternativa:

$\mu_1 \neq \mu_2$

Estadístico de prueba, t: 188793.53803

Valor crítico t: ± 2.22814

Valor P: 0.00000

Grados de Libertad: 10.00000

Intervalo de confianza 95%:

$1.08999 < \mu_1 - \mu_2 < 1.09001$

5. Naranja vs piña

Las varianzas no son iguales (Prueba de F)

Hipótesis alternativa:

$\mu_1 \neq \mu_2$

Estadístico de prueba, t: 251147.36710

Valor crítico t: ± 2.22814

Valor P: 0.00000

Grados de Libertad: 10.00000

Intervalo de confianza 95%:

$1.44999 < \mu_1 - \mu_2 < 1.45001$

6. Mandarina vs toronja

Las varianzas no son iguales (Prueba de F)

Hipótesis alternativa:

$\mu_1 \neq \mu_2$

Estadístico de prueba, t: 0.00000

Valor crítico t: ± 2.34181

Valor P: 1.00000

Grados de Libertad: 7.35294

Intervalo de confianza 95%:

$-0.02138 < \mu_1 - \mu_2 < 0.02138$

7. Mandarina vs mango

Las varianzas no son iguales (Prueba de F)

Hipótesis alternativa:

$\mu_1 \neq \mu_2$

Estadístico de prueba, t: -17.52712

Valor crítico t: ± 2.34181

Valor P: 0.00000

Grados de Libertad: 7.35294

Intervalo de confianza 95%:

$-0.18138 < \mu_1 - \mu_2 < -0.13862$

8. Mandarina vs plátano

Las varianzas no son iguales (Prueba de F)

Hipótesis alternativa:

$\mu_1 \neq \mu_2$

Estadístico de prueba, t: 199.63339

Valor crítico t: ± 2.57058

Valor P: 0.00000

Grados de Libertad: 5.00000

Intervalo de confianza 95%:

$1.60901 < \mu_1 - \mu_2 < 1.65099$

9. Mandarina vs piña

Las varianzas no son iguales (Prueba de F)

Hipótesis alternativa:

$$\mu_1 \neq \mu_2$$

Estadístico de prueba, t: 243.72420

Valor crítico t: ± 2.57058

Valor P: 0.00000

Grados de Libertad: 5.00000

Intervalo de confianza 95%:

$$1.96901 < \mu_1 - \mu_2 < 2.01099$$

10. Toronja vs mango

Las varianzas no son iguales (Prueba de F)

Hipótesis alternativa:

$$\mu_1 \neq \mu_2$$

Estadístico de prueba, t: -27.71281

Valor crítico t: ± 2.22814

Valor P: 0.00000

Grados de Libertad: 10.00000

Intervalo de confianza 95%:

$$-0.17286 < \mu_1 - \mu_2 < -0.14714$$

11. Toronja vs plátano

Las varianzas no son iguales (Prueba de F)

Hipótesis alternativa:

$$\mu_1 \neq \mu_2$$

Estadístico de prueba, t: 399.26663

Valor crítico t: ± 2.57058

Valor P: 0.00000

Grados de Libertad: 5.00001

Intervalo de confianza 95%:

$$1.61951 < \mu_1 - \mu_2 < 1.64049$$

12. Toronja vs piña

Las varianzas no son iguales (Prueba de F)

Hipótesis alternativa:

$$\mu_1 \neq \mu_2$$

Estadístico de prueba, t: 487.44822

Valor crítico t: ± 2.57058

Valor P: 0.00000

Grados de Libertad: 5.00001

Intervalo de confianza 95%:

$$1.97951 < \mu_1 - \mu_2 < 2.00049$$

13. Mango vs plátano

Las varianzas no son iguales (Prueba de F)

Hipótesis alternativa:

$$\mu_1 \neq \mu_2$$

Estadístico de prueba, t: 438.45844

Valor crítico t: ± 2.57058

Valor P: 0.00000

Grados de Libertad: 5.00001

Intervalo de confianza 95%:

$$1.77951 < \mu_1 - \mu_2 < 1.80049$$

14. Mango vs piña

Las varianzas no son iguales (Prueba de F)

Hipótesis alternativa:

$$\mu_1 \neq \mu_2$$

Estadístico de prueba, t: 526.64003

Valor crítico t: ± 2.57058

Valor P: 0.00000

Grados de Libertad: 5.00001

Intervalo de confianza 95%:

$2.13951 < \mu_1 - \mu_2 < 2.16049$

15. Plátano vs piña

Las varianzas no son iguales (Prueba de F)

Hipótesis alternativa:

$\mu_1 \neq \mu_2$

Estadístico de prueba, t: 62353.82907

Valor crítico t: ± 2.22814

Valor P: 0.00000

Grados de Libertad: 10.00000

Intervalo de confianza 95%:

$0.35999 < \mu_1 - \mu_2 < 0.36001$

Referencias

- Lü H, S. X. (2017). Multi-objective regulation in autohydrolysis process of corn stover by liquid hot water pretreatment. *Chin J Chem Eng*, 499-506.
- Abbasi, T., & Abbasi, S. (2017). Biomass energy and the environmental impacts associated with its production and utilization. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 830-845.
- Achinas S, E. G. (2016). Consolidated briefing of biochemical ethanol production from lignocellulosic biomass. *Electron J Biotechnol.*, 44–53.
- Aditiya, H. M. (2016). Second generation bioethanol production: a critical review. *Renew Sustain Energy Rev*, 631–53.
- Aguilar-Reynosa A, R. A.-J. (2017). Comparison of microwave and conduction-convection heating autohydrolysis pretreatment for bioethanol production. *Bioresour Technol*, 273-83.
- Aguilar-Reynosa, A., & Romani A, R.-J. R. (2017). Comparison of microwave and conduction-convection heating autohydrolysis pretreatment for bioethanol production. *Bioresour Technol*, 273-83.
- Ahmed, M. R.-H.-I. (2017). Optimization of twin gear-based pretreatment of rice straw for bioethanol production. *Energy Convers Manag*, 120-5.
- Alvira P, T.-P. E. (2010). Pretreatment technologies for an efficient bioethanol production process based on enzymatic hydrolysis: a review. *Bioresour Technol*, 4851–4861.
- Alvira P, T.-P. E. (2010). Pretreatment technologies for an efficient bioethanol production process based on enzymatic hydrolysis: a review. *Bioresour Technol*, 4851-61.
- Arapoglou, D., Varzakas, T., Vlyssides, A., & Israilides, C. (2010). Ethanol production from potato peel waste (PPW). *WasteManage.*, 30.
- Arismendy, A., Felissia, F., Mendieta, C., Chamorro, E., & Area, M. (2020). Improvement of bioethanol production from rice husks. *Cellul. Chem. Technol.*, 689–698.
- Arismendy, A., Villa Retrepo, A., Alcaraz, W., Chamorro, E., & Area, M. (2019). Optimization of enzymatic hydrolysis of rice husk. *RECYT*, 64–70.
- Arora, A. P. (2016). Evaluating biological pretreatment as a feasible methodology for ethanol production from paddy straw. *Biocataly Agri Biotech*, 66-72.
- Asada, C., Doi, K., Sasaki, C., & Nakamura, Y. (2012). Efficient extraction of starch from microalgae using ultrasonic homogenizer and its conversion into ethanol by simultaneous saccharification and fermentation. *Nat. Resour.*, 175–179.
- Asim AM, U. M. (2019). Acidic ionic liquids: promising and cost-effective solvents for processing of lignocellulosic biomass. *J Mol Liq*.
- Bak JS, K. J.-G. (2009). Improved enzymatic hydrolysis yield of rice straw using electron beam irradiation pretreatment. *Bioresour Technol*, 1285-90.

- Balat M, B. H. (2008). Progress in bioethanol processing. *Prog Energy Combust Sci.*, 551–73.
- Bali G, M. X. (2015). The effect of alkaline pretreatment methods on cellulose structure and accessibility. *ChemSusChem*, 275-9.
- Bamidele, V. A., May, A. A., & Siti, I. M. (2020). An overview of integration opportunities for sustainable bioethanol production from first- and second-generation sugar-based feedstocks. *Journal of Cleaner Production*.
- Banerjee, S. E. (2010). Commercializing lignocellulosic bioethanol : technology bottlenecks and possible remedies. *Biofuel, Bioprod. Biorefining*, 77-93.
- Behera S, A. R. (2014). Importance of chemical pretreatment for bioconversion of lignocellulosic biomass. *Renew Sustain Energy Rev*, 91-106.
- Behera, S., & Arora R, N. N. (2014). Importance of chemical pretreatment for bioconversion of lignocellulosic biomass. *Renew Sustain Energy Rev*, 91-106.
- Bildirici, M. (2013). Economic growth and biomass energy. *Biomass Bioenergy*, 19-24.
- Bonfiglio F, C. M. (2019). Pretreatment of switchgrass by steam explosion in a semi-continuous pre-pilot reactor. *Biomass Bioenergy*, 41-7.
- BP Statistical. (2014). *BP*. Obtenido de Statistical review of world energy. BP: <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>
- BP. (2020). *BP Statistical Review of World Energy 2020*. Londres: BP.
- Branco R, S. L. (2019). Second generation bioethanol production: on the use of pulp and paper industry wastes as feedstock. *Fermentatio*.
- Bundesministerium für Bildung und Forschung. (2012). *Biorefineries Roadmap, German Federal Government action plans for the material and energetic utilisation of renewable raw materials*. BMBF.
- Bustamante, D., Tortajada, M., Ramón, D., & Rojas, A. (2020). Production of D-Lactic Acid by the Fermentation of Orange Peel Waste Hydrolysate by Lactic Acid Bacteria. *Fermentation*, 6.
- Carvalho DMd., Q. J. (2016). Assessment of alkaline pretreatment for the production of bioethanol from eucalyptus, sugarcane bagasse and sugarcane straw. *Ind Crop Prod*, 932-41.
- Chandel, A. K. (2018). Advances in sugarcane biorefinery technologies , commercialization , policy issues and paradigm shift for bioethanol and by-products. *Advances in Sugarcane Biorefinery*, 197-212.
- Chea, W. L. (2016). Cultivation in wastewaters for energy: a microalgae platform. *Appl. Energy*, 609-625.
- Chen W-H, T. Y.-J.-K. (2011). Disruption of sugarcane bagasse lignocellulosic structure by means of dilute sulfuric acid pretreatment with microwave-assisted heating. *Appl Energy*, 2726-34.

- Chen Y, S. M. (2013). Understanding of alkaline pretreatment parameters for corn stover enzymatic saccharification. *Biotechnol Biofuels*.
- Cherubini F., S. A. (2011). Principles of biorefining. *Biofuels – Alternative feedstocks and conversion processes.*, 3-24.
- Chisti, Y. (2010). Fuels from microalgae. *Biofuels*, 233-235.
- Choi, W., Han, J., Lee, C., Song, C., Kim, J., Seo, Y. L., . . . Cho, J. (2012). Bioethanol production from *Ulva pertusa* Kjellman by high-temperature liquefaction. *Chemical and Biochemical Engineering Quarterly*, 15-21.
- Citrus Industry. (10 de Febrero de 2021). *Citrus Industry*. Obtenido de Orange Production to See Global Increase: <https://citrusindustry.net/2021/02/10/orange-production-sees-global-increase/>
- Conde-Mejía, C. J.-G.-H. (2012). A comparison of pretreatment methods for bioethanol production from lignocellulosic materials. *Process Saf. Environ.*, 189e202.
- Corinne Le Quéré, R. M. (2015). Global Carbon Budget 2018. *Earth System Science Data*, 2141-2194.
- Cotana, F. C. (2015). A comparison between SHF and SSSF processes from cardoon for ethanol production. *Ind. Crops Prod.*, 424-432.
- Cybulska I, B. G. (2013). Hydrothermal pretreatment of lignocellulosic biomass. *Green biomass pretreatment for biofuels production* (págs. 87-106). Dordrecht, Netherlands: Springer.
- da Silva Machado A, F. A. (2017). Biological pretreatment of sugarcane bagasse with basidiomycetes producing varied patterns of biodegradation. *Bioresour Technol*, 17-22.
- Dahunsi, S. (2019). Mechanical pretreatment of lignocelluloses for enhanced biogas production: methane yield prediction from biomass structural components. *Bioresour Technol*, 18-26.
- Dale BE, K. S. (2010). Biomass refining global impact - The biobased economy of the 21st century. *Biorefineries – Industrial processes and products (Status quo and future directions).*, 41-66.
- Damay J, B. I.-Z.-M. (2018). A novel hybrid first and second generation hemicellulosic bioethanol production process through steam treatment of dried sorghum biomass. *Bioresour Technol*, 103-111.
- Damay, J. B. (2018). A novel hybrid first and second generation hemicellulosic bioethanol production process through steam treatment of dried sorghum biomass. *Bioresour. Technol.*, 103-111.
- Damay, J. B.-Z.-M. (2018). A novel hybrid first and second generation hemicellulosic bioethanol production process through steam treatment of dried sorghum biomass. *Bioresour Technol*, 103-111.

- Das, P., Stoffel, R., Area, M., & Ragauskas, A. (2019). Effects of one-step alkaline and two-step alkaline/dilute acid and alkaline/steam explosion pretreatments on the structure of isolated pine lignin. *Biomass Bioenergy*, 350–358.
- Debowski, M. Z. (2013). Algae biomass as an alternative substrate in biogas production technologies Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 596-604.
- Della-Bianca, B. B. (2013). What do you know about the yeast strains from Brazilian fuel ethanol industry? *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 979-991.
- Demirbas, A. (2008). *Biofuels: green energy and technology*. Springer.
- Demirbas. (2009). Political, economic and environmental impacts of biofuels: a review. *Appl Energy*, 108-117.
- Dias MOS, L. D. (2018). Chapter 10 - techno-economic analysis of cogeneration of heat and electricity and second-generation ethanol production from sugarcane. *Advances in sugarcane biorefinery*. Elsevier, 197-212.
- Dimos K, P. T. (2019). Effect of various pretreatment methods on bioethanol production from cotton stalks. *Fermentatio*.
- Dimos, K. P. (2019). Effect of various pretreatment methods on bioethanol production from cotton stalks. *Fermentatio*.
- Dimos, K., & Paschos T, L. A. (2019). Effect of various pretreatment methods on bioethanol production from cotton stalks. *Fermentatio*.
- Dos Santos L.V., d. B.-N. (2016). Second-generation ethanol: the need is becoming a reality. *Ind Biotechnol*, 40–57.
- Dutta, K. D. (2014). Evolution retrospective for alternative fuels : first to fourth generation. *Renew. Energy*, 114-122.
- Edeh, I. (2020). Bioethanol Production: An Overview. *Chapter*.
- EESI. (22 de July de 2021). *Environmental and Energy Study Institue (EESI)*. Obtenido de Fossil Fuels : <https://www.eesi.org/topics/fossil-fuels/description>
- EIA. (28 de Septiembre de 2022). *US Energy Information Administratio*. Obtenido de Biofuels Explain: Bioethanol: <https://www.eia.gov/energyexplained/biofuels/ethanol.php>
- Elgharbawy AA, A. M. (2016). Ionic liquid pretreatment as emerging approaches for enhanced enzymatic hydrolysis of lignocellulosic biomass. *Biochem Eng J*, 252-67.
- Ellabban, O., Abu-Rub, H., & Blaabjerg, F. (2014). Renewable energy resources: Current status, future prospects and their enabling technology. *Renew. sustain. Energy Rev.*, 748-764.
- EPA. (25 de 02 de 2022). *Global Greenhouse Gas Emissions*. Obtenido de Greenhouse Gas Emissions: <https://www.epa.gov/ghgemissions/global-greenhouse-gas-emissions-data>

- EPA. (25 de 02 de 2022). *Greenhouse Gas Emissions*. Obtenido de Global Greenhouse Gas Emissions Data: <https://www.epa.gov/ghgemissions/global-greenhouse-gas-emissions-data>
- Erdei, B. H. (2013). SSF of steam-pretreated wheat straw with the addition of saccharified or fermented wheat meal in integrated bioethanol production. *Biotechnol. Biofuels*.
- Eshaq, F., Ali, M., & Mohd, M. (2011). Production of bioethanol from next generation feed-stock alga *Spirogyra* species. *Int. J. Eng. Sci. Technol.*, 1749-55.
- Esparza, I., Jiménez-Moreno, N., Bimbela, F., Ancín-Azpilicueta, C., & Gandía, L. (2020). Fruit and vegetable waste management: Conventional and emerging approaches. *J. Environ. Manage.*, 265.
- FAO. (2010). *Algae-based biofuels: A Review of Challenges and Opportunities for Developing Countries*. FAO.
- Finkbeiner, M. (2014). Indirect land use change e help beyond the hype? *Biomass bioenergy*, 218-221.
- Flores, U. D. (2017). Bioenergy potential and utilization costs for the supply of forest woody biomass for energetic use at a regional scale in Mexico. *Energies (Basel)*.
- Fonseca BG., M. S. (2018). Biotreatment optimization of rice straw hydrolyzates for ethanolic fermentation with *Scheffersomyces stipitis*. *Biomass Bioenergy*, 19-28.
- Fonseca, B., & Mateo S, M. A. (2018). Biotreatment optimization of rice straw hydrolyzates for ethanolic fermentation with *Scheffersomyces stipitis*. *Biomass Bioenergy*, 19-28.
- Fontaras, G. e. (2012). Integrated environmental assessment of energy crops for biofuel and energy production in Greece. *Renew Energy*, 201-9.
- Friedl, A. (2019). Bioethanol from sugar and starch. *Energy from Organic Materials (Biomass): A Volume in the Encyclopedia of Sustainability Science and Technology*, 905-924.
- García, C., Riegelhaupt, E. G., Skutsch, M., Islas, J., Manzini, F., & Masera, O. (2015). Sustainable bioenergyoptionsforMexico:GHGmitigationandcosts. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 545–552.
- García, E. (28 de Diciembre de 2021). *Energy & Commerce*. Obtenido de Disminuyó el consumo de gasolina en 2021: Pemex: <https://energyandcommerce.com.mx/disminuyo-el-consumo-de-gasolina-en-2021-pemex/>
- García. (2015). Sustainable bioenergy options for Mexico: ghg mitigations and costs. *Renew. Sustain. Energy Review*, 545-552.
- García-Torreiro, M. L.-A., Lu-Chau, T., & Lema, J. (2016). Fungal pretreatment of agricultural residues for bioethanol production. *Ind Crop Prod*, 486-92.
- García-Torreiro, M. L.-A.-C. (2016). Fungal pretreatment of agricultural residues for bioethanol production. *Ind Crop Prod*, 486-92.

- Gavahian, M. M. (2018). Emerging techniques in bioethanol production : from distillation to waste valorization. *Green Chem.*, 1171-1185.
- Gerali, F. (2020). *Engineering and Technology History Wiki*. Obtenido de Fossil fuels: https://ethw.org/Fossil_fuels
- Ghosh S, C. R. (2017). Sustainability of cereal straws for the fermentative production of second generation biofuels: a review of the efficiency and economics of biochemical pretreatment processes. *Appl Energy*, 284-98.
- Goncalves, D. M. (2014). Xylose and xylose/glucose co-fermentation by recombinant *Saccharomyces cerevisiae* strains expressing individual hexose transporter. *Enzym Microb Technol.*, 13–20.
- Gosh, G. &. (2020). Fossil Fuel Consumption Trend and Global Warming Scenario: Energy Overview. *Global Journal of Engineering Sciences*.
- Gu YM, K. S.-I. (2019). Feasibility of continuous pretreatment of corn stover: a comparison of three commercially available continuous pulverizing devices. *Energies*.
- Curdo, N. (2016). *Mejoramiento de la levadura Saccharomyces cerevisiae Y138 por ingeniería evolutiva para la producción de bioetanol de segunda generación*. Lima: Universidad Nacional de San Martín.
- Curdo, N. (Marzo de 2016). Mejoramiento de la levadura *Saccharomyces cerevisiae* Y138 por ingeniería evolutiva para la producción de bioetanol de segunda generación. *Tesis de grado*. Lima, Peru: Universidad de San Martín.
- Gurgel LVA., P. M. (2016). Ethanolwater organosolv delignification of liquid hot water (LHW) pretreated sugarcane bagasse enhanced by highpressure carbon dioxide (HPeCO₂). *Ind Crop Prod*, 942-50.
- Gurgel, L., & Pimenta MTB, C. A. (2016). Ethanolwater organosolv delignification of liquid hot water (LHW) pretreated sugarcane bagasse enhanced by highpressure carbon dioxide (HPeCO₂). *Ind Crop Prod*, 942-50.
- Gustavsson, J., Cederberg, C., Sonesson, U., & R. van Otterdijk, M. A. (2011). *Global food losses and food waste—Extent, causes and prevention*. Roma: FAO.
- Habubackar, N., Keskin, T., Arslan, K., Vural, C., Aksi, D., Yavuzylmaz, D., . . . Azbar, N. (2019). Biohydrogen Production From Solid Wastes. *Int. J. Hydrogen Energy*, 44.
- Halkos, G. &. (2020). Reviewing Usage, Potentials, and Limitations of Renewable Energy Sources. *Energies*.
- Hamelinck, C. G. (2005). Ethanol from lignocellulosic biomass: techno-economic performance in short-, middle- and long-term. *Biomass and Bioenergy*, 384–410.
- Harun, R., Danquah, M., & Forde, G. (2010). Microalgal biomass as a fermentation feedstock for bioethanol production. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 199-203.

- Hashemi S.S., M. S. (2020). Biorefinery development based on whole safflower plant. *Renew Energy*, 399–408.
- Huang, C., & Wu X, H. Y. (2016). Prewashing enhances the liquid hot water pretreatment efficiency of waste wheat straw with high free ash content. *Bioresour Technol*, 583-8.
- IEA. (08 de Marzo de 2022). *IEA*. Obtenido de Global CO2 emissions rebounded to their highest level in history in 2021: <https://www.iea.org/news/global-co2-emissions-rebounded-to-their-highest-level-in-history-in-2021>
- IEA. (2012). *International Energy Agency*. Obtenido de World Energy Outlook: <http://www.worldenergyoutlook.org/weo2012/>
- IEA. (2019). *International Energy Agency*. Obtenido de Key World Energy Statistics 2019: <https://www.iea.org/events/key-world-energy-statistics-2019>
- IEA. (2021). *Key World Energy Statistics 2021*. Obtenido de Producers, net exporters and net importers of crude oil: <https://www.iea.org/reports/key-world-energy-statistics-2021/supply#oil>
- IEA. (2021). *Key World Energy Statistics 2021*. Obtenido de Transformation: <https://www.iea.org/reports/key-world-energy-statistics-2021/transformation#refining>
- IEA. (26 de Octubre de 2022). *Global ethanol production by country (from 3rd to 7th country)*. Obtenido de <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-ethanol-production-by-country-from-3rd-to-7th-country-2016-2026>, IEA. Licence: CC BY 4.0
- Indulekha John, K. M. (2017). A review on the potential of citrus waste for D-Limonene, pectin, and bioethanol production. *International Journal of Green Energy*, 599-612.
- IRENA. (2019). *Bioenergy*. Recuperado el 14 de Septiembre de 2022, de Bioenergy Data: <https://irena.org/bioenergy>
- IRENA. (2019). *Geothermal*. Recuperado el 25 de Julio de 2022, de <https://www.irena.org/geothermal>
- IRENA. (2019). *Hydropower*. Recuperado el 26 de Julio de 2022, de <https://www.irena.org/hydropower>
- IRENA. (2019). *Wind Energy*. Recuperado el 2020 de May de 26, de <https://www.irena.org/wind>
- IRENA. (2019). *Wind energy*. Recuperado el 24 de Julio de 2022, de <https://www.irena.org/wind>
- IRENA. (2022). *Bioenergy for the energy transition: ensuring sustainability and overcoming barriers*. Abu Dhabi: IRENA.
- IRENA. (2022). *Solar Energy*. Obtenido de <https://www.irena.org/solar>
- IRENA. (26 de Mayo de 2020). *Solar Energy*. Obtenido de Retrieved from International Renewable Energy Agency: <https://www.irena.org/solar>

- Jiang Z, F. B. (2016). Pretreatment of bamboo by ultra-high pressure explosion with a high-pressure homogenizer for enzymatic hydrolysis and ethanol fermentation. *Bioresour Technol*, 876-80.
- John R.P., A. G. (2011). Micro and macroalgal biomass: a renewable source for bioethanol. *Bioresource technology*, 186-193.
- Jorquera, C. (28 de 01 de 2020). *Piensa en geotermia*. Obtenido de <https://www.piensageotermia.com/los-10-principales-paises-geotermicos-a-diciembre-de-2019-segun-la-capacidad-de-generacion-instalada-mwe/>
- Kabir, E., Kumar, P., Kumar, S., Adelodun, A., & Kim, K. (2018). Solar Energy: Potential and Future Prospects. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 894-900.
- Kandasamy M, H. I. (2017). Investigation of ethanol production potential from lignocellulosic material without enzymatic hydrolysis using the ultrasound technique. *Energies*.
- Kandasamy, M. H. (2019). Investigation of ethanol production potential from lignocellulosic material without enzymatic hydrolysis using the ultrasound technique. *Energies*.
- Katsimpouras C, Z. M. (2017). Sequential high gravity ethanol fermentation and anaerobic digestion of steam explosion and organosolv pretreated corn stover. *Bioresour Technol*, 1129-36.
- Katsimpouras, C. Z. (2017). Sequential high gravity ethanol fermentation and anaerobic digestion of steam explosion and organosolv pretreated corn stover. *Bioresour Technol*, 1129-36.
- Kavita Sharma Ph.D., N. M. (2017). Converting citrus wastes into value-added products: Economic and environmently friendly approaches. *Nutrition*, 29-46.
- Khanal, S. (2009). *Anaerobic biotechnology for bioenergy production: Principles and applications*. Ames, IA, USA:: Wiley-Blackwell.
- Kim JS, L. Y. (2016). A review on alkaline pretreatment technology for bioconversion of lignocellulosic biomass. *Bioresour Technol*, 42-8.
- Kim, N., Li, H., Jung, K., Chang, H., & Lee, P. (2011). Ethanol production from marine algal hydrolysates using *Escherichia coli* KO11. *Bioresource technology*, 466-7469.
- Klemes, J. V. (2019). Towards Efficient and Clean Process Integration: Utilisation of Renewable Resources and Energy-Saving Technologies. *Energies*.
- Klemes, J., Varbanov, P., Oclón, P., & Chin, H. (2019). Towards Efficient and Clean Process Integration: Utilisation of Renewable Resources and Energy-Saving Technologies. *Energies*.
- Kossatz, H., & Rose SH, V.-B. M. (2017). Production of ethanol from steam exploded triticale straw in a simultaneous saccharification and fermentation process. *Process Biochem*, 10-6.
- Kour D, y. c. (2019). Technologies for Biofuel Production: Current Development, Challenges, and future Prospects. A. Y. Rastegari, *Prospects of Renewable Bioprocessing in Future Energy Systems*, 1-50.

- Kruss Optronic. (s.f.). *Refractómetro: medición Brix en la industria de bebidas y sumos*. Kruss Optronic.
- Kumar AK, P. B. (2016). Cellulosic ethanol production from green solvent-pretreated rice straw. *Biocataly Agri Biotech*, 14-23.
- Kumar P, B. D. (2009). Methods for pretreatment of lignocellulosic biomass for efficient hydrolysis and biofuel production. *Ind Eng Chem Res* 2009, 3713-29.
- Kumar, A., & Parikh BS, S. E. (2016). Cellulosic ethanol production from green solvent-pretreated rice straw. *Biocataly Agri Biotech*, 14-23.
- Kumar, D., & Murthy, G. (2011). Impact of pretreatment and downstream processing technologies on economics and energy in cellulosic ethanol production. *Biotechnology for biofuels*.
- Kumari D, S. R. (2018). Pretreatment of lignocellulosic wastes for biofuel production: a critical review. *Renew Sustain Energy Rev.*, 877-91.
- Lee S, S. J. (2007). *Handbook of alternative fuel technologies*.
- Li H, Q. Y. (2016). Microwave irradiation e a green and efficient way to pretreat biomass. *Bioresour Technol*, 34-41.
- Li H, X. J. (2013). Optimization of microwave-assisted calcium chloride pretreatment of corn stover. *Bioresour Technol*, 112-8.
- Lin T-H, G. G.-L.-S.-L. (2016). The addition of hydrolyzed rice straw in xylose fermentation by *Pichia stipitis* to increase bioethanol production at the pilot-scale. *Biomass Bioenergy*, 204-9.
- Lin, T. H.-L.-S.-L. (2016). The addition of hydrolyzed rice straw in xylose fermentation by *Pichia stipitis* to increase bioethanol production at the pilot-scale. *Biomass Bioenergy*, 204-9.
- Linoj KNV, D. P. (2006). Liquid biofuels in South Asia: Resources and technologies. *Asian Biotechnol Develop Rev.*, 31-49.
- Loaces, I. S. (2017). Ethanol production by *Escherichia coli* from *Arundo donax* biomass under SSF, SHF or CBP process configurations and in situ production of a multifunctional glucanase and xylanase. *Bioresour. Technol.*, 307-313.
- Loow Y-L, W. T. (2016). Typical conversion of lignocellulosic biomass into reducing sugars using dilute acid hydrolysis and alkaline pretreatment. *Cellulose*, 1491-520.
- Lü, H., & Shi X, L. Y. (2017). Multi-objective regulation in autohydrolysis process of corn stover by liquid hot water pretreatment. *Chin J Chem Eng*, 499-506.
- Lynd, L. W. (2005). Consolidated bioprocessing of cellulosic biomass: an update. *Curr. Opin. Biotechnol.*, 577-583.
- Ma, J. S. (2019). Advances in catalytic conversion of lignocellulose to chemicals and liquid fuels. *J. Energy Chem.*, 74-86.

- Maniet G, S. Q. (2017). Effect of steam explosion treatment on chemical composition and characteristic of organosolv fescue lignin. *Ind Crop Prod*, 79-85.
- Masera, O. A. (2006). *La bioenergía en México. Un catalizador para el Desarrollo Sustentable*. México: Grupo Mundi-Prensa.
- Mathew AK, P. B. (2016). An evaluation of dilute acid and ammonia fiber explosion pretreatment for cellulosic ethanol production. *Bioresour Technol*, 13-20.
- Maurya DP, S. A. (2015). An overview of key pretreatment processes for biological conversion of lignocellulosic biomass to bioethanol. *Biotech.*, 597-609.
- Maurya DP., S. A. (2015). An overview of key pretreatment processes for biological conversion of lignocellulosic biomass to bioethanol. *3 Biotech*, 597-609.
- Melendez, J. M. (2022). Perspectives in the production of bioethanol: A review of sustainable methods, technologies, and bioprocesses. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- Mendes, C., Vergara, P., Carbajo, J., Villar, J., dos Santos Rocha, J., & de Sousa, M. (2020). Bioconversion of pine stumps to ethanol: Pretreatment and simultaneous saccharification and fermentation. *Holzforschung*, 212–216.
- Menon V, R. M. (2012). Trends in bioconversion of lignocellulose: biofuels, platform chemicals & biorefinery concept. *Prog Energy Combust Sci*, 522–550.
- Michelin, M., & Teixeira, J. (2016). Liquid hot water pretreatment of multi feedstocks and enzymatic hydrolysis of solids obtained thereof. *Bioresour Technol*, 862-9.
- Mikulski D, K. G.-P. (2019). Microwave-assisted pretreatment of maize distillery stillage with the use of dilute sulfuric acid in the production of cellulosic ethanol. *Bioresour Technol*, 318-28.
- Mikulski, D. K. (2018). Efficiency of dilute sulfuric acid pretreatment of distillery stillage in the production of cellulosic ethanol. *Bioresour Technol*, 424-33.
- Mikulski, D. K.-P. (2019). Microwave-assisted pretreatment of maize distillery stillage with the use of dilute sulfuric acid in the production of cellulosic ethanol. *Bioresour Technol*, 318-28.
- Millati R, S. S. (2011). Biological pretreatment of lignocelluloses with white-rot fungi and its applications: a review. *BioResources*, 5224-59.
- Mithra, M. J. (2018). Comparison of ethanol yield from pretreated lignocellulo-starch biomass under fed-batch SHF or SSF modes. *Heliyon* 4., 1-31.
- Mohan M, D. N. (2018). Ionic liquid and sulfuric acid-based pretreatment of bamboo: biomass delignification and enzymatic hydrolysis for the production of reducing sugars. *Ind Eng Chem Res*, 10105-17.
- Mohtasham, J. (2015). Renewable energies. *Energy Procedia*, 1289-1297.

- Molaverdi M, K. K. (2019). Improvement of dry simultaneous saccharification and fermentation of rice straw to high concentration ethanol by sodium carbonate pretreatment. *Energy*, 654-60.
- Molaverdi, M. K. (2019). Improvement of dry simultaneous saccharification and fermentation of rice straw to high concentration ethanol by sodium carbonate pretreatment. *Energy*, 654-60.
- Mood SH, G. A. (2013). Lignocellulosic biomass to bioethanol, a comprehensive review with a focus on pretreatment. *Renew Sust Energ Rev*, 77–93.
- Mordor Intelligence. (s.f.). *Tamaño del mercado de bioetanol y análisis de participación tendencias de crecimiento y pronósticos (2024-2029)*. Obtenido de Mordor Intelligence: <https://www.mordorintelligence.com/es/industry-reports/bio-ethanol-market>
- Moreno, G. (2017). *Reporte de inteligencia tecnológica: Bioetanol*. Obtenido de SENER: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/296708/IT_Bioetanol_01022018.pdf
- Moriarty, P., & Honnery, D. (2019). Energy accounting for a renewable energy future. *Energies*.
- Moriarty. (2020). Feasibility of a 100% Global Renewable Energy System. *Energies*.
- Mosier N, W. C. (2005). *Features of promising technologies for pretreatment of lignocellulosic biomass*. 673-86: Bioresour Technol.
- Mosier NS, H. R. (2005). Industrial scale-up of pH-controlled liquid hot water pretreatment of corn fiber for fuel ethanol production. *Appl Biochem Biotechnol.*, 77-97.
- Mosier, N., & Wyman C, D. B. (2005). Features of promising technologies for pretreatment of lignocellulosic biomass. *Bioresour Technol*, 673-86.
- Mosier, N., & Wyman C, D. B. (2005). Features of promising technologies for pretreatment of lignocellulosic biomass. *Bioresour Technol*, 673-86.
- Mussatto SI, D. G. (2010). Technological trends, global market, and challenges of bio-ethanol production. *Biotechnol Adv.*, 817-30.
- Naresh Kumar, M. R., & Shankar, M. (2019). Choice of pretreatment technology for sustainable production of bioethanol from lignocellulosic biomass: bottle necks and recommendations. *Waste and Biomass Valorization*, 1693-1709.
- Nasirpour N, M. S. (2018). RSM based optimization of PEG assisted ionic liquid pretreatment of sugarcane bagasse for enhanced bioethanol production: effect of process parameters. *Biomass Bioenergy*, 89-98.
- Nasirpour, N., & Mousavi, S. (2018). RSM based optimization of PEG assisted ionic liquid pretreatment of sugarcane bagasse for enhanced bioethanol production: effect of process parameters. *Biomass Bioenergy*, 89-98.

- Nejat P, J. F. (2015). A global review of energy consumption, CO₂ emissions and policy in the residential sector (with an overview of the top ten CO₂ emitting countries). *Renew Sustain Energy Rev*, 843-62.
- Nguyen, T. (2012). Bioethanol production from marine algae biomass: prospect and troubles. *Journal of Vietnamese environment*, 25-9.
- Nosratpour MJ, K. K. (2018). Improvement of ethanol and biogas production from sugarcane bagasse using sodium alkaline pretreatments. *J Environ Manag*, 329-39.
- Nosratpour MJ., K. K. (2018). Improvement of ethanol and biogas production from sugarcane bagasse using sodium alkaline pretreatments. *J Environ Manag*, 329-39.
- OCDE FAO. (2023). *Perspectivas Agrícolas*. Obtenido de Biocombustibles: <https://www.oecd-ilibrary.org/sites/8d79647e-es/index.html?itemId=/content/component/8d79647e-es#section-d1e22450>
- Ojeda, K. S.-H. (2011). Exergy analysis and process integration of bioethanol production from acid pre-treated biomass: comparison of SHF, SSF and SSCF pathways. *Chem. Eng. J.*, 176-177.
- Okot, D. (2013). Review of small hydropower technology. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 515-520.
- Oliva, J. N. (2017). A sequential steam explosion and reactive extrusion pretreatment for lignocellulosic biomass conversion within a fermentation-based biorefinery perspective. *Fermentatio*.
- Oliveira, C. C. (2016). Improving second generation bioethanol production in sugarcane biorefineries through energy integration. *Appl. Therm.*, 819-827.
- Østergaard, P. D. (2020). Sustainable Development Using Renewable Energy Technology. *Renewable Energy*, 2430-2437.
- Owusu, P., & Asumadu-Sarkodie, S. (2016). A review of renewable energy sources, sustainability issues and climate change mitigation. *Cogent. Eng.* .
- Pandey, A. K. (2019). Evaluation of divergent yeast genera for fermentation-associated stresses and identification of a robust sugarcane distillery waste isolate *Saccharomyces cerevisiae* NGY10 for lignocellulosic ethanol production in SHF and SSF. *Biotechnol. Biofuels* 12, 1-23.
- Panwar, N., Kaushik, S., & Kothari, S. (2011). Role of renewable energy sources in environmental protection: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1513-1524.
- Patidar, J., & S. R. (2017). Microalgae as Sustainable Renewable Energy feedstock for bioethanol production. *Sch. Acad. J. Biosci.*, 536-542.
- PEMEX. (17 de Febrero de 2021). *Pemex comunicados nacionales*. Obtenido de Incrementó PEMEX producción de crudo en el 2020: https://www.pemex.com/saladeprensa/boletines_nacionales/Paginas/2021-050-nacional.aspx#:~:text=Con%20base%20en%20cifras%20definitivas%2C%20Petr%C3%B3leos%20Mexicanos%20informa,diarios%20la%20producci%C3%B3n%20promedio%20anual%20del%20a%C3%B1o%202019.

- Pérez, F., & Venegas, V. (2017). Producción de bioetanol en México: implicaciones socio-económicas. *Revista Internacional Administración & Finanzas*, 13-24.
- Pradhan, A., & Mbohwa, C. (2014). Development of biofuels in South Africa: challenges and opportunities. *Renew. Sustain. Energy Rev*, 1089-100.
- Prasad S, M. M. (2018). Enhancement of bio-ethanol production potential of wheat straw by reducing furfural and 5-hydroxymethylfurfural (HMF). *Bioresour Technol*, 50-6.
- Prasad, S. M. (2018). Enhancement of bio-ethanol production potential of wheat straw by reducing furfural and 5-hydroxymethylfurfural (HMF). *Bioresour Technol*, 50-6.
- Putro JN, S. F.-Y.-H. (2016). Pretreatment and conversion of lignocellulose biomass into valuable chemicals. *RSC Adv*, 46834-52.
- Quintero JA, R. L. (2011). Production of bioethanol from agroindustrial residues as feedstocks. *Alternative feedstocks and conversion processes*, 251–85.
- R. Sindhu, E. G. (2019). Conversion of food and kitchen waste to value-added products. *J. Environ. Manage.*, 619-630.
- Rabemanolontsoa H, S. S. (2016). Various pretreatments of lignocellulosics. *Bioresour Technol*, 83-91.
- Rajcaniova, M. K. (2014). Bioenergy and global land-use change. *Appl Econ*, 3163-79.
- Rajendran, K. D. (2018). Updates on the pretreatment of lignocellulosic feedstocks for bioenergy production- a review. *Biomass Convers.*, 471-483.
- Rajput AA, Z. V. (2018). Effect of thermal pretreatment on chemical composition, physical structure and biogas production kinetics of wheat straw. *J Environ Manag*, 45-52.
- Ranieri, L., Mossa, G., Pellegrino, R., & Digiesi, S. (2018). *Sustainability*.
- Rezania S, D. M. (2017). Review on pretreatment methods and ethanol production from cellulosic water hyacinth. *BioResources*, 2108-24.
- Rezania S, D. M. (2018). Ethanol production from water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) using various types of enhancers based on the consumable sugars. *Waste Biomass Valori*, 939-46.
- Ríos, M. &. (2013). Bioenergy potential in Mexico-status and perspectives on a high spatial distribution. *Biomass conversion and Biorefinery*, 239-254.
- Rivas, B., Torrado, A., Torre, P., Converti, A., & Domínguez, J. (2008). Submerged citric acid fermentation on orange peel autohydrolysate. *J. Agric.Food Chem.*, 56.
- S.H., H., Huang, S., Chen, S., T., s., Kondo, A., & Chang, J. (2013). Bioethanol production using carbohydrate-rich microalgae biomass as feedstock. *Bioresour. Technol.*, 191–198.
- Saha BC, Q. N. (2016). Biological pretreatment of corn stover with white-rot fungus for improved enzymatic hydrolysis. *Int Biodeterior Biodegrad* , 29-35.

- Santos, C. S. (2018). Integrated 1st and 2nd generation sugarcane bio-refinery for jet fuel production in Brazil: techno-economic and greenhouse gas emissions assessment. *Renew Energy*, 733–47.
- Searchinger, T. e. (2008). Use of US croplands for biofuels increases greenhouse gases through emissions from land-use change. *Sci*, 1238-40.
- Searle, S., & Malins, C. (2015). A Reassessment of Global Bioenergy Potential in 2050. *Bioenergy*, 328-336.
- Seidl PR, G. A. (2016). Pretreatment processes for lignocellulosic biomass conversion to biofuels and bioproducts. *Curr Opin Green Sustain Chem*, 48-53.
- SENER. (13 de Septiembre de 2021). *PRODESEN*. Obtenido de Programa de Desarrollo del sistema Eléctrico nacional 2021-2035 PRODESEN 2021: <https://www.gob.mx/cenace/documentos/programa-para-el-desarrollo-del-sistema-electrico-nacional-276178>
- SENER. (2018). *Atlas Nacional de Biomasa*. Obtenido de Metodología Atlas Nacional de Biomasa,: <https://www.gob.mx/sener/articulos/atlas-nacional-de-biomasa>
- SENER. (2020). *Balance Nacional de energía 2020*. México: Secretaria de Energía. Obtenido de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/707654/BALANCE_NACIONAL_ENERGI_A_0403.pdf
- Senthilkumar V, G. P. (2009). Bioethanol from biomass production of ethanol from molasses. *Handbook of plant-based biofuels.*, 73-86.
- Senthilkumar V., G. (2009). Bioethanol from biomass production of ethanol from molasses. *Handbook of plant-based biofuels*, 73-86.
- Sharma, V. N. (2019). Ultrasound and surfactant assisted ionic liquid pretreatment of sugarcane bagasse for enhancing saccharification using enzymes from an ionic liquid tolerant *Aspergillus assiutensis* VS34. *Bioresour Technol*.
- Shortall, R., Davidsdottir, B., & Axelsson, G. (2015). Geothermal energy for sustainable development: A review of sustainability impacts and assessment frameworks. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 391-406.
- Shuai L, L. J. (2016). Organic solvent effects in biomass conversion reactions. *ChemSusChem*, 133-55.
- SIAP. (06 de Mayo de 2023). *Agricultura*. Obtenido de Uncítrico muy joven: toronja: <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/un-citrico-muy-joven-toronja?idiom=es>
- SIAP. (08 de Octubre de 2022). *Gobierno de México*. Obtenido de Secretaria de Agricultura y Desarrollo Rural: <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/mandarina-fruto-que-alegra-la-vida>

- SIAP. (12 de Diciembre de 2023). *Gobierno de México*. Obtenido de Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural : <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/mango-un-deleite-dulce-y-refrescante>
- SIAP. (13 de junio de 2022). *Agricultura*. Obtenido de Escenario Mensual de Productos Agroalimentarios: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/732615/Naranja_Mayo.pdf
- SIAP. (29 de Agosto de 2023). *Gobierno de México*. Obtenido de Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural: <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/manos-que-dan-de-comer-que-hay-detras-de-la-produccion-de-platano#:~:text=Producci3n%20de%20pl3tano%20en%20M3xico,2022%20fue%20de%20%2C593%2C024.74%20toneladas.>
- SIAP. (29 de Marzo de 2021). *Gobierno de México*. Obtenido de Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural: <https://www.gob.mx/agricultura/prensa/crece-16-2-produccion-de-pina-en-mexico-durante-2020?idiom=es>
- Siksnyte-Butkiene, I., Zavadskas, E., & Stremikiene, D. (2020). Multi-criteria decision-making (MCDM) for the assessment of renewable energy technologies in a household: A review. *Energies*.
- Sindhu R, B. P. (2016). Biological pretreatment of lignocellulosic biomass e an overview. *Bioresour Technol*, 76e82.
- Smuga-Kogut M, W. B.-P.-C. (2019). Comparison of bioethanol preparation from triticale straw using the ionic liquid and sulfate methods. *Energies*.
- Smuga-Kogut, M. W.-P.-C. (2019). Comparison of bioethanol preparation from triticale straw using the ionic liquid and sulfate methods. *Energies*.
- Socol CR, F. V.-S. (2011). Lignocellulosic bioethanol: Current status and future perspectives. *Biofuels – Alternative feedstocks and conversion processes.*, 101-22.
- Song B, B.-K. F. (2019). Importance of lignin removal in enhancing biomass hydrolysis in hot-compressed water. *Bioresour Technol*.
- Szambelan, K. N. (2018). Separate hydrolysis and fermentation and simultaneous saccharification and fermentation methods in bioethanol production and formation of volatile by-products from selected corn cultivars. *Ind. Crops Prod.*, 355-361.
- Tabka MG, H.-G. I. (2006). Enzymatic saccharification of wheat straw for bioethanol production by a combined cellulase xylanase and feruloyl esterase treatment. *Enzym Microb Technol*, 897-902.
- Taherzadeh M, K. K. (2008). Pretreatment of lignocellulosic wastes to improve ethanol and biogas production: a review. *Int J Mol Sci*, 1621-51.
- Taherzadeh MJ, K. K. (2007). Enzymatic-based hydrolysis processes for ethanol from lignocellulosic materials: a review. *Bioresources*, 707–738.

- Tan, I. L. (2020). Advances of macroalgae biomass for the third generation of bioethanol production. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 502–517.
- Tasapekos, P. K. (2017). Mechanical pretreatment at harvesting increases the bioenergy output from marginal land grasses. *Renew Energy*, 914-21.
- Teramura H, S. K. (2018). Effective usage of sorghum bagasse: optimization of organosolv pretreatment using 25% 1-butanol and subsequent nanofiltration membrane separation. *Bioresour Technol*, 157-64.
- Teramura, H. S. (2018). Effective usage of sorghum bagasse: optimization of organosolv pretreatment using 25% 1-butanol and subsequent nanofiltration membrane separation. *Bioresour Technol*, 157-64.
- Timilsina, G., Kurdgelashvili, L., & Narbel, P. (2012). Solar Energy: Markets, economics and policies. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 449-465.
- Tomás-Pejó E, A. P. (2011). Pretreatment technologies for lignocellulose-to-bioethanol conversion. *Biofuels – Alternative feedstocks and conversion processes*, 149-76.
- Tsegaye B, B. C. (2019). Optimization of microwave and NaOH pretreatments of wheat straw for enhancing biofuel yield. *Energy Convers Manag*, 82-92.
- Tsegaye, B. B. (2019). Optimization of microwave and NaOH pretreatments of wheat straw for enhancing biofuel yield. *Energy Convers Manag*, 82-92. Obtenido de Energy Convers.
- U.S.D.O.E. (2010). *National Algal Biofuels Technology Roadmap*. U.S. Department of Energy.
- UN. (24 de Junio de 2020). *United Nations (UN)*. Obtenido de World Population Prospects 2019: <https://population.un.org/wpp/>
- Urban, F., & Mitchell, T. (2018). Climate Change, Disasters and Electricity Generation. *Strengthening Climate Resilience*. Recuperado el 2 de Mayo de 2020, de <https://opendocs.ids.ac.uk/opendocs/bitstream/handle/20.500.12413/2504/Climate+Change,+Disasters+and+Electricity+Generation.pdf?sequence=1>
- Vasco-Correa J, G. X. (2016). Biomass fractionation technologies for a lignocellulosic feedstock based biorefinery. *biological pretreatment of lignocellulosic biomass* (págs. 561-85). Amsterdam: Elsevier.
- Vivoda, V. (2012). Japan's energy security predicament post-Fukushima. *Energy Policy*, 135-43.
- Wagner A, L. N. (2018). Biological pretreatment strategies for second-generation lignocellulosic resources to enhance biogas production. *Energies*.
- Wang D, S. F. (2018). Can hydrothermal pretreatment improve anaerobic digestion for biogas from lignocellulosic biomass? *Bioresour Technol*, 117-24.
- Watkins D, N. M.-N. (2015). Extraction and characterization of lignin from different biomass resources. *J Mater Res Technol.*, 26-32.

- World Bioenergy Association. (2020). *Global Bioenergy Statistics 2020*. World Bioenergy Association.
- Wu X, Z. J. (2016). Microbial hydrolysis and fermentation of rice straw for ethanol production. *Fuel*, 679-86.
- Wu, X., & Zhang J, X. E. (2016). Microbial hydrolysis and fermentation of rice straw for ethanol production. *Fuel*, 679-86.
- Yang Y, Y. J. (2018). Pretreatment with concurrent UV photocatalysis and alkaline H₂O₂ enhanced the enzymatic hydrolysis of sisal waste. *Bioresour Technol*, 517-23.
- Yeo, W. (17 de Abril de 2022). *Embrace the Power of Green Energy*. Obtenido de First Generation Biofuels: <https://www.greenenergyhelps.com/first-generation-biofuels/>
- Yu J, X. Z. (2019). Process integration for ethanol production from corn and corn stover as mixed substrates. *Bioresour Technol*, 10-6.
- Yu, J. X. (2019). Process integration for ethanol production from corn and corn stover as mixed substrates. *Bioresour Technol*, 10-6.
- Yu, Q., & Liu J, Z. X. (2016). Liquid hot water pretreatment of energy grasses and its influence of physico-chemical changes on enzymatic digestibility. *Bioresour Technol*, 265-70.
- Yuan Z, L. G. (2018). Enhancement of sugar recovery and ethanol production from wheat straw through alkaline pre-extraction followed by steam pretreatment. *Bioresour Technol*, 194-202.
- Yuan Z, W. Y. (2018). Production of bioethanol and value added compounds from wheat straw through combined alkaline/alkaline-peroxide pretreatment. *Bioresour Technol*, 228-36.
- Yuan Z., L. G. (2018). Enhancement of sugar recovery and ethanol production from wheat straw through alkaline pre-extraction followed by steam pretreatment. *Bioresour Technol*, 194-202.
- Yuan, Z. L. (2018). Enhancement of sugar recovery and ethanol production from wheat straw through alkaline pre-extraction followed by steam pretreatment. *Bioresour Technol*, 194-202.
- Yuan, Z. W. (2018). Evaluation of an organosolv-based biorefinery process to fractionate wheat straw into ethanol and co-products. *Ind Crop Prod*, 294-302.
- Yuan, Z. W. (2018). Production of bioethanol and value added compounds from wheat straw through combined alkaline/alkaline-peroxide pretreatment. *Bioresour Technol*, 228-36.
- Zabed H, S. J. (2016). Fuel ethanol production from lignocellulosic biomass: an overview on feedstocks and technological approaches. *Renew Sustain Energy Rev.*, 48-53.
- Zabed, H. S. (2016). Fuel ethanol production from lignocellulosic biomass: an overview on feedstocks and technological approaches. *Renew Sustain Energy Rev*, 751-74.

- Zabed, H. S. (2017). Bioethanol production from renewable sources: current perspectives and technological progress. *Renew Sustain Energy Rev*, 475–501.
- Zavrel M, B. D. (2009). High-throughput screening for ionic liquids dissolving (ligno-) cellulose. *Bioresour Technol*, 2580-7.
- Zhang H, Z. P. (2018). Comparison of various pretreatments for ethanol production enhancement from solid residue after rumen fluid digestion of rice straw. *Bioresour Technol*, 147-56.
- Zhang K, P. Z. (2016). Organic solvent pretreatment of lignocellulosic biomass for biofuels and biochemicals: a review. *Bioresour Technol*, 21-33.
- Zhang, H. Z. (2018). Comparison of various pretreatments for ethanol production enhancement from solid residue after rumen fluid digestion of rice straw. *Bioresour Technol*, 147-56.
- Zhao X, C. K. (2009). Organosolv pretreatment of lignocellulosic biomass for enzymatic hydrolysis. *Appl Microbiol Biotechnol*.
- Zhao Z, C. X. (2018). Pretreatment of wheat straw using basic ethanolamine-based deep eutectic solvents for improving enzymatic hydrolysis. *Bioresour Technol*, 325-33.
- Zhao, Z. C. (2018). Pretreatment of wheat straw using basic ethanolamine-based deep eutectic solvents for improving enzymatic hydrolysis. *Bioresour Technol*, 325-33.
- Zheng Y, Z. J. (2014). Pretreatment of lignocellulosic biomass for enhanced biogas production. *Prog Energy Combust Sci*.
- Zhu L., H. E. (2014). Microalgal biofuels: Flexible bioenergies for sustainable development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1035-1046.
- Zhu, S. H. (2015). Pretreatment of rice straw for ethanol production by a two-step process using dilute sulfuric acid and sulfomethylation reagent. *Appl Energy*, 190-6.