



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

**Alternativa de aprovechamiento de los residuos de café
(bagazo de café y película
plateada).**

TRABAJO MONOGRÁFICO DE ACTUALIZACIÓN

**PARA OBTENER EL TÍTULO DE
QUÍMICA**

PRESENTA:

DANIA ESMERALDA SÁNCHEZ NAVARRO CHÁVEZ



CIUDAD UNIVERSITARIA, CDMX

AÑO 2016



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: BENJAMÍN RUIZ LOYOLA
VOCAL: JOSÉ MANUEL MENDEZ STIVALET
SECRETARIO: JOSÉ ANTONIO WUOTTO RAMOS
1er. SUPLENTE: CARLOS MAURICIO CASTRO ACUÑA
2° SUPLENTE: ANA ADELA SÁNCHEZ MENDOZA

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

Gerencia de Estrategia de Comercialización de Hidrocarburos y Servicios, SADH PEMEX.

ASESOR DEL TEMA:

M. en I. José Antonio Wuotto Ramos

SUSTENTANTE:

Dania Esmeralda Sánchez Navarro Chávez

Contenido

Capítulo I: Introducción	I
I.1 Objetivo	III
I.2 Hipótesis	III
I.3 Planteamiento	III
I.4 Metodología del Trabajo monográfico de actualización	III
Capítulo II: Antecedentes	1
II.1 Generalidades del café	1
II.2 Transformación de la cereza de café a bebida	3
II.3 Contaminación por desperdicios de comida	5
Capítulo III. Conceptos fundamentales	8
III.1 Biomasa	8
III.2 Biocombustibles	8
III.2.1 Fuentes	9
III.2.2 Tipos	9
III.3 Biodiesel	11
III.3.1 Materias primas para obtención de biodiesel.....	11
III.3.2 Técnicas de producción de biodiesel	14
III.3.3 Factores que influyen en la reacción de la transesterificación	23
III.3.4 Ventajas y desventajas del biodiesel	24
III.3.5 Parámetros de calidad del biodiesel	25
III.4 Bioetanol	31
III.4.1 Materias primas para la obtención de bioetanol	32
III.4.2 Técnicas de producción de bioetanol.....	37
III.4.3 Parámetros de calidad del bioetanol.....	46
Capítulo IV: Propuesta de aplicación de los residuos de café	50
IV.1 Desechos generados por la industria del café	50
IV.2 Usos de los residuos del café tostado (película plateada y del bagazo de café)	54
IV.2.1 Uso del bagazo de café como materia prima para obtener biodiesel ...	57

IV.2.2	Uso del bagazo de café como materia prima para obtener bioetanol...	61
IV.2.3	Uso del bagazo de café como materia prima de carbón activado	67
IV.2.4	Uso de la película plateada como fuente de fibra dietética	72
Capítulo V: Conclusiones.....		75
VI: Bibliografía		78
VII: Apéndice.....		86
	Índice de figuras.....	86
	Índice de tablas.....	86
	Índice de Diagramas	86
	Índice de Gráficas	87



Capítulo I: Introducción

En Europa se produce cada año 90 millones de toneladas de residuos, de los cuales el 38 % es producido directamente por la industria alimenticia; se ha visto que en su cadena de producción se generan una gran cantidad desperdicios de alimentos, debido a que partes del alimento no se emplean o simplemente son desechados. Estos desperdicios en general son ricos en carbohidratos, lípidos y proteínas que se pueden emplear para la generación de biocombustibles (bioalcoholes, biodiesel, composta, digestión anaeróbica entre otras), dependiendo de la composición química del desperdicio.

En México se produce al año una gran cantidad de desechos orgánicos que pueden ser aprovechados para la obtención de biocombustibles, por ejemplo los desechos del agave, aguacate, maíz y café.

En el caso particular del café su producción el ciclo 2013-2014 fue de más de un millón de toneladas de los cuales se exportó el 60 % y el restante se empleó para consumo interno; sus desechos no son aprovechados.

Durante la transformación de las cerezas de café a la bebida que se consume, se generan desechos propios de la industria. Los dos más grandes son la película plateada y el bagazo de café que se obtiene después de la preparación de la bebida. En las cafeterías de la ciudad de México el bagazo de café en su mayoría es enviado directamente a la basura, o bien, son usados como abono de jardines particulares.

La película plateada se obtiene después del proceso de tostado del café oro, que contiene una alta cantidad de fibra soluble dietética (alrededor del 86%), antioxidantes, celulosa, proteínas y monosacáridos como: xilosa, arabinosa, galactosa y manosa.



Del bagazo del café se pueden obtener compuestos fenólicos, producción de biodiesel, pellets, H₂ y obtención de etanol. También se ha encontrado que es una excelente materia prima para el cultivo de hongos ya que tiene un alto contenido de proteínas y humedad. Mediante el uso de la levadura *Saccharomyces cerevisiae* se obtiene etanol que puede utilizar como bebida destilada con sabor agradable al paladar. En el área ambiental se ha encontrado como un excelente adsorbente barato para la eliminación de colorantes en aguas residuales.

I.1 Objetivo

Buscar y analizar los últimos avances que se han realizado sobre el aprovechamiento del bagazo del café y película plateada; para su empleo en los biocombustibles, productos de valor agregado y la industria alimenticia. Mediante la revisión bibliográfica de artículos científicos de arbitraje internacional.

I.2 Hipótesis

El bagazo de café que se genera en las cafeterías y la película plateada desperdiciada en el proceso del tostado, pueden ser empleados para la generación de biocombustibles, bebidas alcohólicas, obtención de carbohidratos y carbón activado; ayudando a disminuir el volumen de basura generada por la industria cafetalera

I.3 Planteamiento

Partiendo del bagazo de café y película plateada como fuente de materia primaria para la generación de biocombustibles, carbohidratos y carbón activado principalmente.

I.4 Metodología del Trabajo monográfico de actualización

La investigación bibliográfica para este trabajo se realizara empleando como fuentes de información distintas bases de datos electrónicas como SciFinder¹, scopus², ScienDierct³ y en tesis de la UNAM. Empleándose como palabras clave

¹ <http://www.cas.org/products/scifinder>

² <https://www-scopus-com.pbidi.unam.mx:2443/>



de búsqueda: bagazo de café, residuos de café, biodiesel de café, película plateada y bioetanol de café; así como las composiciones químicas de los residuos que se generan en la industria del café, propiedades fisicoquímicas del biodiesel y bioetanol generado por el bagazo del café. Se buscaron las técnicas de producción del biodiesel y del bioetanol, factores que afectan el proceso de obtención y sus parámetros de calidad.

El criterio de selección de la información se basó principalmente en artículos de los últimos cinco años, aunque se revisó hasta un mayor lapso de tiempo, tomando en cuenta la información más relevante y verificando las referencias de los artículos consultados.

Se consultaron sitios electrónicos serios de organizaciones oficiales (FAO, ICO PEMEX, entre otras) informes de instituciones tanto nacionales como internacionales, tesis generadas en la UNAM a nivel licenciatura y maestría.

³<http://www.sciencedirect.com.pbidi.unam.mx:8080/>

Capítulo II: Antecedentes

II.1 Generalidades del café

El cafeto, planta de donde proviene el café, pertenece a la familia *Rubiacea*, la cual tiene más de 60 especies; el género *Coffea* se divide en dos grupos de acuerdo con el número cromosómico. El primer grupo cuenta con 22 cromosomas de los cuales se encuentran: *C. canefora*, *C. liberica*, *C. stenophylla* y *C. racemosa*; el otro grupo cuenta con 44 cromosomas siendo la especie que más se consume la *C. arabica*. (Regalado Ortiz, 2006)

La planta es un arbusto cuyo tallo varía entre los 2 a 5 metros de altura formado de un tallo central, cuyas hojas miden entre 12 a 25 cm de largo por 5 a 12 cm de ancho variando su forma de eclíptica a lanceolada, presenta yemas florales de 1 a tres ejes que necesita ciertas condiciones para que florezca. El fruto (figura 1) es una drupa, que está formado por la pulpa (mesocarpio), cascara (exocarpio) pergamino (endocarpio), película plateada (testa), la semilla (endospermo) contiene dos semillas de entre 10 a 17 mm que varía su color de amarillo a rojo al madurar y el embrión. (Alvarado Soto & Rojas Cuberto, 2007)

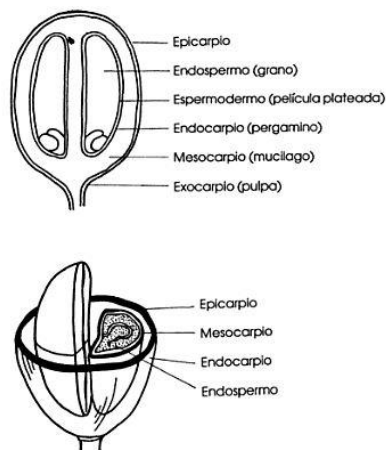


Figura 1 Partes del fruto del café

El cultivo del cafeto se ve ligado a factores climatológicos como la latitud geográfica que determina la mayor o menor inclinación con que caen los rayos del sol y altitud del lugar sobre el nivel del mar ya que las capas atmosféricas varían las temperatura, humedad y turbulencia. Estos factores determinan la calidad del café. En su mayoría el cafeto se desarrolla en una franja que rodea a todo el planeta, entre los trópicos de Cáncer y Capricornio.

Una forma de clasificar la calidad del café es por la altitud en que se cultiva:

- Estrictamente altura: Se produce arriba de 1200 metros sobre el nivel del mar, acepta el 1.0 % de mancha o 10 defectos.
- Altura: Se da en alturas mayores de 950 metros sobre el nivel del mar , acepta el 1.5% de manchas y 13 defectos
- Extra prima lavado: Su producción es de 850 metros sobre el nivel del mar, tiene 2.5% de mancha o 18 defectos.
- Prima lavado: Se produce en alturas de 650 a 950 metros sobre el nivel del mar , tiene 3.5% de mancha o 26 defectos
- Bueno lavado: Se cosecha en alturas de 250 a 650 metros sobre el nivel del mar, llega a tener hasta un 3.5% de defecto o 26 defectos.

México cuenta con doce estados en donde se concentra la producción de café, donde el 92% corresponde a Chiapas, Veracruz, Oaxaca y Puebla, el resto a Nayarit, Colima, Hidalgo, Jalisco, Querétaro, Tabasco y San Luis Potosí. La altitud oscila entre 250 y 1,500 metros sobre el nivel del mar y el mayor porcentaje de las plantaciones se ubica arriba de los 700 metros, generalmente se les cultiva a 900 metros sobre el nivel del mar, donde puede alcanzar los niveles de calidad para exportación. Las especies de café que se cultivan en México son *C.arabica* y *C. canephora* (figura 2 y 3); donde la primera tiene mayor importancia económica y se cultiva el 98% de la tierra cultivable, mientras que la otra especie es de baja calidad y se emplea para la elaboración de café soluble (Regalado Ortiz, 2006).



Figura 2 Arbusto de *C. Robusta*



Figura 3 Arbusto de *C. Arábica*

Las variedades de los café árabes se deben a las mutaciones o hibridaciones , ya sea de entre variedades de la misma especie o entre especies diferentes; las principales variedades árabes que se cultivan en México son : *typica, bourbón, caturra, mundo novo, garnica, catuai , catimor, maragoipe, pacamara, villasarchi, sarchimor ,san Bernardo, san ramón y villalobos* (Alvarado Soto & Rojas Cuberto, 2007).

Nuestro país se encuentra entre los 10 primeros países productores de café, (SAGARPA, 2015) para el ciclo 2014-2015 se produjeron 3.9 millones de sacos de café verde (cada saco es de 60 kg); es decir 234,000 toneladas (ICO, 2015) , de los cuales el 60% se destina a la exportación.

II.2 Transformación de la cereza de café a bebida

La recolección de las cerezas del cafeto se hace manualmente (donde el fruto debe de estar 100 % maduro) después pasa al beneficiado que es un proceso industrial que transforma la cereza en café verde u oro; los métodos para el beneficio son dos: húmedo y seco.

El beneficio húmedo transforma la cereza a café verde con 12 % de humedad, el cual tiene las siguientes fases: recepción de la cereza, despulpe, remoción del mucilago o fermentación, lavado del café y secado; la mayoría de los beneficios húmedos tienen un gran desperdicio de agua, pergamino y de pulpa (Regalado Ortiz, 2006). El beneficio húmedo es un foco de contaminación tanto para el ambiente, fauna y a la salud de las personas; debido a la acumulación de desperdicios orgánicos (Pelupessy, 2003). Tan solo con la pulpa del café, por su contenido de cafeína, fenoles y polifenoles son tóxicos para procesos biológicos (Murthy & Naidu, 2012). Este proceso se realiza en casi todo el país (Chanakata & De Alwis, 2004).

El pergamino se llega a emplear como fuente de combustible para el mismo proceso del beneficio, la pulpa se deja podrir y el agua se desecha completamente.

El beneficio seco deja la cereza en un patio o planta hasta obtener una sobremaduración, limpieza del pergamino, morteadado, clasificación del grano desmanche (eliminar la cascara), pesado, envasado y almacenado y secado parcial (entre el 11 al 13 %) haciendo que la recolección sea de una sola vez. (Alvarado Soto & Rojas Cuberto, 2007)

Ya obtenido el café verde sigue el tostado, que es un proceso que depende del tiempo y temperatura, donde el café verde presenta una pérdida de masa gracias a la liberación de bióxido de carbono, agua y ácidos clorogénicos por la pirolisis. El tostado se inicia a los 200°C donde los granos adquieren un tono marrón oscuro mientras los aceites empiezan a salir a la superficie. En este punto se va variando tanto el tiempo y la temperatura del tueste según el tipo de café tostado que se desee, dando así características únicas de sabor al café.

Por último sigue la molienda del café tostado, que es necesaria para permitir la infusión de su contenido soluble por hervor. En la práctica el método que se emplea para la extracción dicta el grado de molienda que se va a necesitar. Después de esto los residuos son básicamente desechados. (Regalado Ortiz, 2006)

II.3 Contaminación por desperdicios de comida

Se considera como desperdicio alimenticio a todo desecho orgánico generado tanto por la industria alimenticia, cocinas caseras y comerciales. La FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura) estimó que 1.6 giga toneladas de desperdicios de comida son tirados anualmente, representando cerca del 27% de la producción agrícola (Uçkun Kiran, Trzcinski, Jern Ng, & Liu, 2014). Esto representa pérdidas económicas de 1 trillón de dólares por año. Peor aún la comida que es producida y no consumida produce graves daños al medio ambiente y a la biodiversidad (FAO, 2014).

El ciclo de producción-consumo de alimentos para la ingesta humana es la responsable de entre un 19 a un 29 % de las emisiones de gases de efecto invernadero, 70% del consumo de agua potable y 38% de la ocupación de las tierras. Gran cantidad de alimentos se pierden y se desperdician entre la producción agrícola y el consumo final en el hogar; es decir que se pierde alrededor del 24% de agua potable, 23% de las tierras agrícolas, 23% de fertilizantes y una gran cantidad de energía empleada para producir, almacenar y transportar alimentos es desperdiciada (Song, Li, Semakula, & Zhang, 2015).

Los desperdicios de alimentos contribuyen al aumento de los gases de efecto invernadero mediante el transporte de los alimentos de las granjas a las zonas de consumo, almacenamiento y su disposición final en rellenos sanitarios (liberación de metano no controlado). También dañan al ambiente agotando recursos naturales como el suelo, agua, energía y alteración ciclos naturales debido a las actividades agrícolas intensivas que agotan los nutrientes del suelo (Giroto, Alibardi , & Cossu, 2015).

El desperdicio de alimentos en términos económicos provoca:

- 3.5 Gt de CO₂ de gases de efecto invernadero. Causando daños por 394 mil millones de dólares por año.

- Aumento en la escasez de agua por aumento de los cultivos, en particular en las regiones secas. Representando globalmente 164 billones de dólares por año.
- La erosión de la tierra por falta de agua se estima en daños en 35 mil millones de dólares por año a través de la pérdida de nutrientes, provocando producciones más bajas y pérdidas biológicas.
- Riesgo de pérdida de biodiversidad debido al incremento de los pesticidas, la eutrofización del nitrato y del fosforo, pérdida de los polinizadores y a la sobreexplotación de la pesca. Costo 32 millones de dólares por los daños.
- Conflictos generados por la pérdida de suelos cultivables por la erosión del suelo, generando un gasto de 396 millones de dólares.
- Perdida del medio de vida para los agricultores por la erosión del suelo, causando daños por 333 mil millones de dólares.
- La exposición prolongada a las pesticidas provoca daños a la salud por 153 mil millones de dólares al año (FAO, 2014).

Generalmente los desperdicios de comida se eliminan incinerándolos, desperdiciando carbohidratos (almidón, celulosa y hemicelulosa), lignina, proteínas, lípidos y ácidos orgánicos. Se estima que los desperdicios de comida pueden llegar a tener entre un 35 a un 69% de azúcares y entre 3.9 a 21.9% de proteínas. Empleando hidrólisis en los carbohidratos se puede generar monosacáridos y poligosacáridos que sean más susceptibles a la fermentación. También se han empleado estos desperdicios como materia prima microbiana para el desarrollo de bioproductos de valor agregado, incluyendo metano, hidrogeno, etanol, enzimas, ácidos orgánicos, biopolímeros y bioplásticos. También se ha visto su empleo como biomasa para la generación de biocombustibles y de alimento para animales (Uçkun Kiran, Trzcinski, Jern Ng, & Liu, 2014).

Con el empleo de la biomasa de los residuos de comida se pasa por alto que este tipo de desperdicio es un reservorio de productos químicos de valor agregado. Estudios recientes sugieren que la producción de productos químicos de valor

agregado es 3.5 más rentable que la conversión a biocombustibles. A raíz de esto surge el concepto de biorefinería, en donde se sugiere que todo tipo de biomasa puede convertirse en diferentes tipos de biocombustibles y de productos químicos de valor agregado a través de varios tipos de procesos de conversión (Ravindran & Jaiswal, 2016)

Capítulo III. Conceptos fundamentales

III.1 Biomasa

Se le conoce como biomasa a cualquier materia orgánica que provenga de animales o vegetales, no importa que este viva o muerta (FAO, 2015). Es considerada como la cuarta fuente de mayor energía en el mundo, ayuda a la reducción del uso del petróleo y disminuye la cantidad de gases de efecto invernadero; (Al-Hamamre, Foerster, Hartmann, Kröger, & Kaltschmitt, 2012) .

México es el tercer país más grande en Latinoamérica en términos de producción agrícola, teniendo un área de cultivo de 21.7 millones de hectáreas con una producción de 270 millones de toneladas; donde el residuo de biomasa generado por el cultivo se emplea como forraje para los animales, combustible y composta.

Actualmente en nuestro país se tiene capacidad de producción de bioenergía de 548 MW, de los cuales 40 MW provienen de biogás y el restante del bagazo de biomasa. Se ha estimado que México puede producir entre 2635 y 3371 PJ por año de bioenergía, donde el 77.9% vendría de los residuos agroindustriales, residuos sólidos de biomasa y desperdicios de cultivos, el 2.1% de líquidos bioenergéticos (caña de azúcar, aceites de la *Jatropha* y de palma) y el 2% del biogás. (S.Alemán-Nava, y otros, 2014)

III.2 Biocombustibles

Los biocombustibles son aquellos combustibles producidos a través de la biomasa; hasta el momento se han clasificado en cuatro generaciones:

III.2.1 Fuentes

- Primera Generación: Los insumos son de origen agrícola y está compuesto de partes de la planta que tienen un alto contenido de almidón, azúcares y aceites (Rico, 2012). Se suele emplear las grasas de origen animal, aceites de desecho de las cocinas y desperdicios de sólidos orgánicos. Siendo combustibles derivados de insumos agrícolas presentan el dilema del empleo de tierras de cultivo que son indispensables para la alimentación de la población.
- Segunda Generación: Emplea biomasa lignocelulósica que provenga de biomasa que no emplee tierras de cultivo e incluye los residuos agrícolas o forestales. También se emplean residuos orgánicos que provengan de las industrias que se encuentren principalmente compuesto por celulosa, una gran ventaja es que no se emplea terreno de cultivo para su síntesis; es decir que haya una desviación de alimentos para crear biocombustibles.
- Tercera generación: Se usan vegetales que no se utilicen para alimento que sean de crecimiento rápido y con gran cantidad de energía almacenada, entre los cuales están las algas verdes y verde azules. La ventaja a comparación con las dos anteriores generaciones es que en la producción de insumos se va consumiendo CO₂.
- Cuarta generación: En esta emplean microbios genéticamente modificados que consumen los desperdicios de CO₂ en presencia de la luz del sol. Esta generación sigue en desarrollo, ya que una de sus mayores desventajas es el control del organismo genéticamente modificado (Liew, Hassim, & Ng, 2014).

III.2.2 Tipos

Los biocombustibles que se han desarrollado:

- Bioetanol (bioalcoholes): Desarrollado a partir de biomasa rica en azúcares y en almidones, que es fermentada usando microorganismos. A través de este proceso es posible obtener etanol con una pureza del 12 %, después

de eso los microorganismos empiezan a morir ya que el etanol que ellos producen como desecho se vuelve venenoso para ellos. Después el alcohol es concentrado mediante destilación (Towler, 2014).

- Biodiesel: Es biocombustible obtenido a través de aceites vegetales o animales que mediante la reacción de transesterificación se obtiene metil-esteres (biodiesel) y glicerina. Generalmente se usa mezclándolo con el diésel petroquímico en diferentes proporciones (Ugurlu & Oztuna, 2015). Más adelante se hablara con detalle sobre este biocombustible.
- Biogás: Mediante una digestión anaerobia las bacterias convierten los desechos orgánicos en biogás bajo circunstancias anaeróbicas a través de cuatro diferentes etapas: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis. (Divya, Gopinath, & Christy, 2015)
- DMF (**2,5-dimetilfurano**): Se obtiene de productos de alta fructosa, es un biocombustible apto para los motores de combustión interna ya que a comparación del etanol tiene una mayor capacidad calórica en un 40 %, mayor número de cetano, punto de ebullición más elevado y no absorbe la humedad del ambiente. Para su síntesis se pueden emplear insumos de bajo costo como la fructosa. (Gogoi, y otros, 2015)
- Biohidrógeno: El hidrógeno se puede encontrar en pequeñas cantidades libre en la tierra. Aunque se puede producir de una gran variedad de materias primas. Desde los recursos fósiles como el gas natural , petróleo y carbón ; así como los recursos naturales con el empleo de la biomasa , mediante la fermentación de desechos orgánicos usando baterías, y la electrolisis del agua (Singh, y otros, 2015). Se puede emplear el hidrógeno como combustible ya que presentas características que sobrepasan a los otros tipos de biocombustibles como el alto número de cetanos, una alta temperatura de ignición, cero producción de CO y CO₂ y tiene un calor de combustión que sobrepasa hasta el diésel (119.93 kJ/g) . (Ugurlu & Oztuna, 2015)

III.3 Biodiesel

El biodiesel, es definido como un combustible compuesto por esteres monoalquílicos de cadena larga que es sintetizado de triglicéridos (Brunschwig, Moussavou, & Blin, 2012); proviene ya sea de la extracción de aceite de plantas, aceite de origen animal o grasa, que son convertidos en ácidos grasos de metilesteres “biodiesel” en presencia de alcoholes de cadena corta y de un catalizador (ácido, alcalino o enzimático); un subproducto es el glicerol (Al-Hamamre, Foerster, Hartmann, Kröger, & Kaltschmitt, 2012).

III.3.1 Materias primas para obtención de biodiesel

Entre las desventajas que tiene el biodiesel es su alto costo de producción, ya que el 75% del costo total de la producción se va en la materia prima; además del dilema que surge por la producción del biodiesel compita con los recursos empleados para la alimentación humana. Una posible solución para bajar los precios de los biocombustibles, es buscar materias primas baratas y que no sean para el consumo humano. (Kwon, Yi, & Jae Jeon, 2013)

Los aceites y grasas son triésteres de ácidos grasos y glicerol; cuya consistencia varía según la temperatura; se le denomina aceite cuando a temperatura ambiente es un líquido y grasa cuando es un sólido. Los triglicéridos representan el 95% de la mayoría de las grasas y aceites. Lo restante son monoglicéridos, ácidos grasos libres, esteroides, alcoholes grasos y vitaminas liposolubles. Los ácidos grasos libres son aquellos ácidos grasos que no se encuentran unidos a la glicerina o a otro tipo de molécula en el aceite o grasa y que se encuentra en grandes cantidades en los aceites no refinados. (Rico, 2012)

El interés del empleo de los aceites como combustibles viene desde finales del siglo XIX, cuando Rudolph Diesel desarrolló el primer biocombustible usando aceite vegetal en base de cacahuete para su motor de combustión interna. Hasta Diesel pensó que los motores podrían ser exclusivamente alimentados con aceite vegetal y ayudar al desarrollo de la agricultura. Para los años veinte se dejaron de

emplear los aceites vegetales ya que el petróleo tenía un menor costo y mayor contenido energético (Brunschwig, Moussavou, & Blin, 2012)

El problema actual que se tiene con el uso directo de aceites en los motores es que debido a su alta viscosidad da una baja atomización que resulta en una combustión incompleta y genera sedimentos de carbono en el motor; también que son poco volátiles y su carácter polinsaturado. (Sharma, Singh, & Upadhyay, 2008)

A pesar de que los motores no aceptan mezclas al 100% de biodiesel, se ha visto que se pueden emplear mezclas sin ningún problema.

Aceites comestibles

El 95 % del biodiesel que se produce está hecho de aceite comestible, donde el 84% está hecho de aceite de canola, seguido por el aceite de girasol (13%), palma (1%) y aceite de soya (2%). Aunque son excelentes materias primas para la elaboración de biodiesel, sin embargo se debe de dar preferencia de su empleo al consumo humano para evitar una competencia entre su uso como alimento así como materia prima para la producción del biodiesel. También para evitar el aumento de la demanda de tierra de cultivo e impedir que haya una deforestación. (Gui, Lee, & Bhatia, 2008)

Aceites no comestibles

En general son aceites provenientes de semillas que no se usan para el consumo humano ya que llegan a contener sustancias tóxicas o desagradables al paladar. Hasta el momento se han reportado cerca de 300 especies de árboles que tienen semillas oleaginosas, siendo esta una alternativa para no emplear semillas que se necesitan para el consumo humano y una fuente barata de materia prima para el biodiesel. Además que suelen ser semillas que tienen altos rendimientos de aceite: *J. curcas* (jatrofa), *P. pinnata* (Karanja), *C. inophyllum* (Nag champa), *R. communis* (ricino), *Argemone mexicana* (amapola espinosa mexicano), *C. Odollam* (árbol suicida), *H. brasiliensis* (árbol del caucho), *Melia azedarach*

(cinamomo) entre otros. Muchas de estas plantas se encuentran en países en vías de desarrollo. (Kumar & Sharma, 2015)

Aceites usados de cocina

Son los desechos de aceites de origen animal o vegetal empleados en la preparación de alimentos que ya no son adecuados para el consumo humano. Este tipo de desperdicio ha llegado a ser un gran problema en Japón y en Estados Unidos, ya que no se puede desechar por el drenaje. Si se llegase a tirar por el drenaje puede provocar bloqueos en el drenaje, olores indeseables y la pérdida de fuentes de agua potable. A pesar de que es una materia prima que ayuda al reciclaje su desventaja es la alta cantidad de ácidos grasos libres que tengan. (Gui, Lee, & Bhatia, 2008)

Otros

Se ha visto que en Europa se produce cada año 90 millones de toneladas de residuos, de los cuales el 38 % es producido directamente por la industria alimenticia. La FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura) estima que un tercio de la comida que se emplea para el consumo humano es desechado cada año. Los residuos alimenticios desechados llegan a contener recursos químicos como flavonoides ceras, azúcares, biopolímeros, lípidos, aminoácidos, antioxidantes y ácidos grasos. Por lo tanto se pueden emplear como materia prima para la generación de electricidad (a través de la digestión anaeróbica), generar combustibles (transesterificación para biodiesel o generar bioetanol). Los residuos de comida son una excelente fuente de materia prima barata para la generación de biodiesel y que ayuda a la disminución de residuos que afectan al medio ambiente. (Pfaltzgraff, De bruyn, Cooper, Budarin, & Clark, 2013)

III.3.2 Técnicas de producción de biodiesel

El uso directo de aceites tales como combustible para motores llega a tener resultados desagradables debido a la alta viscosidad, cantidad de ácidos grasos libres, formación de gomas, oxidación y polimerización durante el proceso de almacenaje y combustión (Salvi & Panwar, 2012). Hay muchas maneras de transformar los aceites vegetales en biodiesel, pero en general se dividen en tres: transesterificación, fluido supercrítico y pirolisis (Aransiola, Ojumu, Oyekola, Madzimbamuto, & Ikhu-Omoregbe, 2014).

III.3.2.1 Transesterificación

La transesterificación es una reacción entre un éster y el alcohol en presencia de un catalizador y se obtiene un glicerol y otro éster. La reacción es más fácil usando alcoholes alifáticos de no más de 8 átomos de carbono. Donde el etanol es uno de los alcoholes preferidos ya que se puede obtener de la biomasa; sin embargo el más empleado es el metanol debido a su bajo costo. La transesterificación se clasifica en homogénea, heterogénea y enzimática, todo dependiendo del tipo de catalizador empleado. (Aransiola, Ojumu, Oyekola, Madzimbamuto, & Ikhu-Omoregbe, 2014).

Transesterificación catalítica homogénea

Este método emplea el catalizador disuelto ya sea alcalino o ácido. Lo más importante es la creación de un alcóxido a partir del alcohol que servirá como nucleófilo para atacar la parte electrofílica del triglicérido. (Aransiola, Ojumu, Oyekola, Madzimbamuto, & Ikhu-Omoregbe, 2014)

La ruptura del triglicérido requiere de tres pasos (ver figura 4):

1. Producir un intermediario tetraédrico.

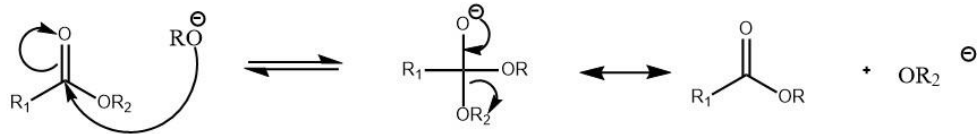
2. La ruptura del intermediario tetraédrico para genera un ion diglicérido y un ácido graso metílico.

3. Recuperación del catalizador por transferencia de protón.

Y estos tres mecanismos se repiten hasta que se haya generado el glicerol y los respectivos tres ácidos grasos metílicos. Se consideran que son una serie de reacciones reversibles consecutivas (ver Figura 5).

En la industria se emplea más la catálisis homogénea, siendo la metodología más convencional.

a)



b)

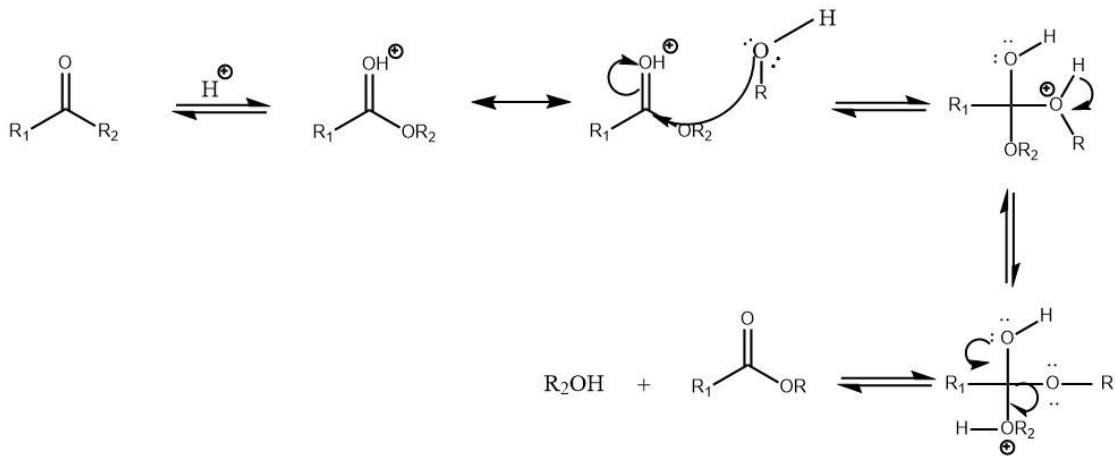


Figura 4 a)Transesterificación básica b) Transesterificación ácida

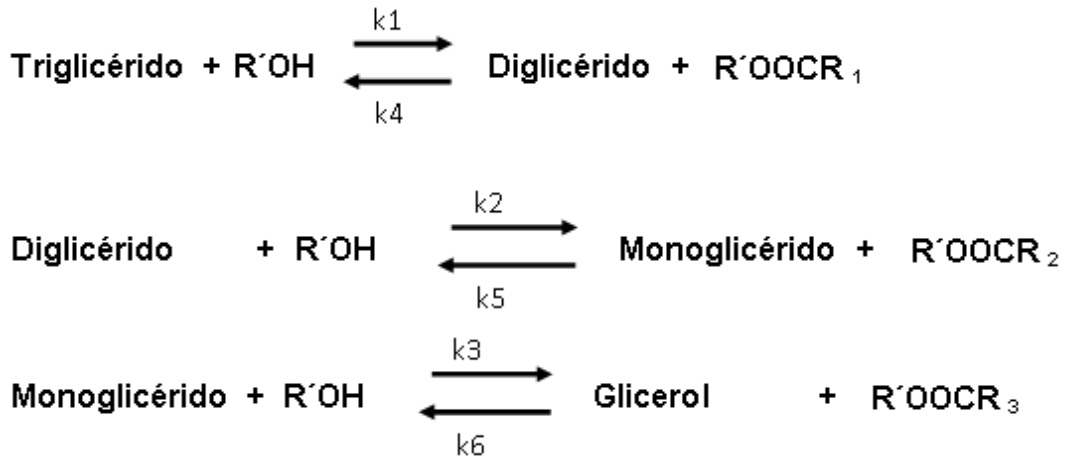


Figura 5 Mecanismo cinético de la reacción de transesterificación

Transesterificación catalítica homogénea ácida

Se emplea cuando los aceites o grasas tienen una gran cantidad de ácidos grasos libres, se emplea generalmente como catalizadores ácidos de Bronsted como: ácido sulfúrico, ácido clorhídrico, ácido sulfúrico y fosfórico. A pesar de dar excelentes resultados con los biodiesel este método es muy sensible a la presencia de agua ya que favorece la saponificación en presencia de ácidos grasos libres en condiciones alcalinas. La reacción es lenta, no necesita de una alta temperatura, requiere de una alta concentración de catalizador y una alta proporción de alcohol. El proceso de separación purificación pesado. (Aransiola, Ojumu, Oyekola, Madzimbamuto, & Ikhu-Omoregbe, 2014)

Transesterificación catalítica homogénea básica

Es el método más empleado tanto en los laboratorios como en la industria. Este proceso usa como catalizadores los alcóxidos, hidróxidos metálicos y carbonatos de sodio y potasio. Entre las ventajas de este método es el bajo costo del catalizador y altos rendimientos en poco tiempo. Es necesario que el aceite o grasa tenga una baja cantidad de ácidos grasos libres, también requiere una gran cantidad de energía para la reacción y el agua interfiere en la reacción. La

recuperación de la glicerina es un poco difícil y las aguas de los lavados necesitan neutralización. (Aransiola, Ojumu, Oyekola, Madzimbamuto, & Ikhu-Omoregbe, 2014)

Transesterificación de dos pasos

Tomando en cuenta que muchos de los aceites o grasas no son factibles para su transformación en biodiesel, algunos autores manejan que es menor a 3% aproximadamente 4 mg de KOH por muestra. Se puede emplear un proceso de transesterificación por dos pasos, donde se combinan los dos procesos anteriores. En esta técnica, el primer paso es una reacción de esterificación de los ácidos grasos libres a ácidos grasos metílicos; seguidos por una transesterificación básica. Se ha llegado a reportar que este método da altos rendimientos de biodiesel. Aunque se ha reportado que en el proceso de dos pasos también se puede usar catalizadores alcalinos. (Aransiola, Ojumu, Oyekola, Madzimbamuto, & Ikhu-Omoregbe, 2014)

Transesterificación catalítica heterogénea

Aquí se emplea un catalizador sólido que en general es una espinela que mezcla un óxido con dos metales, que puede ser recuperado y reusado muchas veces; también muestra una mejor separación del producto final, minimizando el costo de producción, reduciendo el tiempo y costo de los pasos de lavado con agua y neutralización. Los catalizadores son una mezcla de un óxido con dos metales que en su mecanismo de reacción muestra muchas similitudes con los catalizadores homogéneos, también entre sus catalizadores algunos muestran propiedades ácidas o básicas. Una ventaja en producir biodiesel por este método es que tiene una vida más prolongada en almacenamiento. (Aransiola, Ojumu, Oyekola, Madzimbamuto, & Ikhu-Omoregbe, 2014)

Transesterificación catalítica heterogénea ácida

Los catalizadores ácidos heterogéneos tiene la capacidad de hacer una reacción de transesterificación como una esterificación simultáneamente, esto es importante para cuando se emplean materias primas de baja calidad. Los catalizadores empleados son menos corrosivos, menos tóxicos y generan menos problemas ambientales .Se ha visto que tienen tanto propiedades de los ácidos de Bronsted o Lewis y pueden emplearse tanto temperaturas altas como bajas .Para la transesterificación de los aceites vegetales se emplean la zirconias sulfatadas, zeolitas, resinas de intercambio iónico y óxidos metálicos mixtos como: ZnO/I_2 , TiO_2/SO_4^{2-} o $VOPO_4 \cdot 2H_2O$.

Transesterificación catalítica heterogénea básica

El empleo de los catalizadores heterogéneos alcalinos llegan a simplificar la producción y la purificación del proceso; también disminuye la cantidad de residuos de los lavados de agua. Pero también presenta los mismos problemas con un catalizador homogéneo alcalino con la alta cantidad de ácidos grasos libres y con la presencia de agua. Se emplean frecuentemente CaO , $Ca(OCH_2)$, zeolitas alcalinas, SrO o Al_2O_3/K .

Transesterificación enzimática

Se emplea las enzimas como catalizador, donde los pasos de pretratamientos, separación y purificación son aliviados. Las enzimas empleadas para la reacción son las lipasas que son producidas por microorganismos, animales y plantas. Hay dos tipos de lipasas: extracelulares e intracelulares. Estas últimas brindan la ventaja que eliminan el proceso de purificación y separación; también muestra una alta capacidad de selectividad, eficiencia y altos rendimientos, también la recuperación de la glicerina es más fácil. Entre las desventajas son el alto costo para su producción a gran escala y los tiempos de reacción. (Aransiola, Ojumu, Oyekola, Madzimbamuto, & Ikhu-Omoregbe, 2014)

Transesterificación heterogénea por catalizadores nanoestructurados

Se conoce como nanomateriales a aquellos materiales en donde una de sus dimensiones son menores a 100 nm. Esto ayuda en el área de la catálisis ya que se pueden desarrollar catalizadores que tengan la propiedad de controlar la formación de sitios activos, así como de obtener materiales altamente activos y selectivos en determinados procesos (Hernández Hipólito, 2015)

III.3.2.2 Fluido supercrítico

En este método la reacción ocurre en condiciones supercríticas, donde la mezcla se vuelve homogénea y ocurren al mismo tiempo tanto reacciones de esterificación de los ácidos grasos libres como la transesterificación de los triglicéridos sin la necesidad de un catalizador; siendo un excelente método para cualquier tipo de materia prima y en especial para los que tienen una alta cantidad de ácidos grasos libres. Aquí las condiciones que se suelen emplear son de 280-400°C y presiones entre 10-30MPa. (Aransiola, Ojumu, Oyekola, Madzimbamuto, & Ikhu-Omoregbe, 2014)

III.3.2.3 Pirólisis

La producción del biodiesel es a través de los residuos de las grasas animales empleando la pirólisis; donde los triglicéridos se descomponen entre los 360-390 °C. Los ácidos grasos son generados por la ruptura del enlace con el éster, los hidrocarburos de cadena corta y los ácidos grasos de cadena corta se generan por la ruptura de los enlaces insaturados de la cadena del hidrocarburo. Cuando el tiempo se amplía con una temperatura de 420°C los ácidos grasos se descarboxilan. Una de las ventajas de este método es que el producto obtenido tiene propiedades fisicoquímicas similares a combustibles basados en petróleo, pero el equipo que se necesita es muy caro y en el proceso se remueve el oxígeno quitando beneficios al medio ambiente a comparación de las otras técnicas (Salvi & Panwar, 2012)

III.3.2.4 Otros

Hay otras técnicas que se están probando aparte de las tres primeras que se han mencionado, entre las cuales se encuentran el ultrasonido, microondas, membranas, microemulsiones, columna de destilación reactiva y co-solventes BIOX.

Microemulsiones

La microemulsificación es la formación de microemulsiones entre aceite vegetal con un dispersante, líquidos inmiscibles (alcoholes) y anfífilos no iónicos. Se considera esta técnica como una solución viable para resolver el problema de los aceites de alta viscosidad (Bhuiya, Rasul, Khan, Ashwath, & Azad, 2015). Estas microemulsiones no necesitan agitación para permanecer en una sola fase, el biodiesel se mantiene traslucido a temperatura y presión constantes ya que son termodinámicamente estables. También se ha encontrado que a comparación del diésel petroquímico las microemulsiones de grasa animal con etanol emiten una cantidad muchísimo menor de humo, óxido nítrico y monóxido de carbono (Adewale, Dumont, & Ngadi, 2015).

Ultrasonido

La técnica de ultrasonido incrementa la velocidad de reacción de transesterificación. Se basa principalmente en la emulsificación de los reactivos líquidos, que son inmiscibles, por microturbulencia generada por el movimiento radial de las burbujas de cavitación. Este método reduce el tiempo de reacción por 30 minutos o más, además de que tiene un buen rendimiento de reacción (Kapilan & D Baykov, 2014).

Microondas

Las ondas electromagnéticas con frecuencias entre 0.3 GHz a 300 GHz (Kapilan & D Baykov, 2014), irradia directamente energía a los reactivos que el caso del

biodiesel acelera la transesterificación. Las microondas juegan un papel muy importante ya que dan energía a la reacción en forma más eficiente a los reactivos, manteniéndola a la temperatura deseada y disminuyendo el tiempo de la reacción (Shuit, Ong, Lee, Subhash, & Tan, 2012).

Otra de las ventajas de la producción de biodiesel por este método es que la separación del biodiesel y la glicerina toma entre 30 a 60 minutos y las propiedades del biodiesel obtenido son similares a la forma tradicional de producirlo (Kapilan & D Baykov, 2014).

Membrana

El reactor de membrana es definido por la IUPAC como un dispositivo que combina tanto la reacción como la separación en una sola unidad (Shuit, Ong, Lee, Subhash, & Tan, 2012). Donde se lleva a cabo una reacción y una separación simultáneamente en la membrana (Aransiola, Ojumu, Oyekola, Madzimbamuto, & Ikhu-Omoregbe, 2014)

Se ha visto que los reactores de membrana tienen grandes ventajas sobre los reactores convencionales, ya que tienen un proceso de transesterificación continua, la separación sucede en la misma cámara y elimina productos no deseados provocando rendimientos altos (Oh, Lau, Chen, Chong, & Choo, 2012).

Columna de destilación reactiva

La columna de destilación reactiva es un método híbrido que combina tanto la reacción química como la separación de los productos en una sola unidad; en otras palabras es un aparato de destilación que simultáneamente lleva a cabo la transesterificación y la destilación de separación de los productos. El Objetivo principal de este método es la separación de reactivos y productos para impulsar la conversión y selectividad, rompiendo las restricciones de equilibrio de reacción (Oh, Lau, Chen, Chong, & Choo, 2012).

Además tiene otras ventajas sobre otros métodos como: menos tiempo de reacción, mayor rendimiento, no se necesita exceso de alcohol, se necesita un capital de inversión menor a otros métodos y no es necesario la neutralización de los catalizadores homogéneos (Aransiola, Ojumu, Oyekola, Madzimbamuto, & Ikhu-Omoregbe, 2014).

Co-solventes BIOX

Cambia el sistema de producción a través de la selección de co-solventes que generen un sistema rico de aceite en una sola fase. El sistema se realiza en dos pasos:

1. Baja el contenido de ácidos grasos libres hasta un 10%, a través de una esterificación ácida.
2. Luego se emplea la transesterificación para los triglicéridos con la adición de los co-solventes haciendo que el sistema sea de una sola fase. Manejando presiones atmosféricas continuas, temperaturas cercanas al ambiente y con tiempos de reacción cercanas a los 90 minutos.

El proceso emplea ya sea tetrahidrofurano (THF) o t-butil-metil-éter (MTBE) como un co-disolvente para generar un sistema de una sola fase. El THF se elige ya que tiene un punto de ebullición cercano al del metanol; sin embargo se requiere que el sistema trabaje a temperaturas por debajo a los 30 °C.

El co-disolvente se puede reutilizar después del proceso, ayudando a que pueda ser más competitivo ante el diésel petroquímico y que el proceso se pueda emplear con cualquier tipo de aceite o grasa ya sea de origen animal o vegetal (Bhuiya, Rasul, Khan, Ashwath, & Azad, 2015).

III.3.3 Factores que influyen en la reacción de la transesterificación

La calidad del biodiesel está en función de ciertas condiciones que deben de ser cuidadas durante la reacción: calidad de la materia prima, relación molar entre alcohol/aceite, temperatura y el tiempo de la reacción.

Materia prima

El rendimiento en la síntesis del biodiesel varía de acuerdo a la calidad del aceite o grasa empleado. Éstos al ser una mezcla de triglicéridos, ácidos grasos libres y agua, los cuales tienen un efecto negativo en la transesterificación (Juárez Flores, 2013).

Mientras mayor sea la cantidad de ácidos grasos libres en el aceite, el rendimiento del biodiesel bajará ya que se necesitara de una saponificación para neutralizar. Haciendo que se incremente la viscosidad de la materia prima y tome la consistencia de un gel (emulsificación), que interfiere con la reacción y la posterior separación del producto (Bustamante García, 2014).

Relación molar alcohol/aceite

La reacción de transesterificación es reversible por lo general se emplea un exceso de alcohol para desplazar el equilibrio de la reacción hacia la formación de productos. Estequiométricamente, la relación molar corresponde a 3:1 alcohol: aceite. Esta relación molar ayuda en la separación del glicerol del biodiesel ya que aumenta la solubilidad de la mezcla (Bustamante García, 2014).

En la producción de biodiesel, la parte hidrofílica del metanol se pone en contacto con la parte hidrofóbica del triglicérido generando una interfase, ocasionando que haya una resistencia a la transferencia de masa. Las emulsiones son provocadas por la formación de monoglicéridos y diglicéridos siendo agentes activos surfactantes. La emulsión formada por el metanol es más fácil y rápida de romper

a comparación del etanol o de alcoholes de mayor número de carbonos (Juárez Flores, 2013).

Tiempo de reacción

La reacción es lenta al principio debido al proceso de mezclado y dispersión del alcohol en el aceite, pero conforme va aumentando el tiempo de reacción va incrementándose la cantidad de triglicéridos a ácidos grasos metílicos. El rendimiento del diésel alcanza un máximo, pero al dejar durante más tiempo del necesario a la reacción provoca una disminución en la calidad del biodiesel gracias a la formación de jabones (Hernández Hipólito, 2015).

Temperatura de reacción

Afecta tanto la difusión como la velocidad de la reacción, ya que al incrementarse se aumenta la velocidad en que se forman los esteres y aumenta la solubilidad del aceite. Pero si la temperatura aumenta más allá del nivel óptimo, la calidad del biodiesel disminuye provocando la formación de jabones (Hernández Hipólito, 2015).

III.3.4 Ventajas y desventajas del biodiesel

El biodiesel presenta muchas ventajas al ser un combustible amigable con el medio ambiente, es biodegradable entre otras. Los motores de diésel actuales no son muy compatibles con el biodiesel, donde solo se da garantía para los motores para mezclas hasta B30; esto debido a que las piezas que componen el motor tienen partes de hierro, cobre y elastómeros que se corroen y se degradan en contacto con el biodiesel.

Las partes del motor generalmente tienen problemas de degradación en contacto con el biodiesel, que pueden ser sustituidas por otros materiales más compatibles; usualmente el biodiesel suele acarrear problemas debido al alto contenido de ácidos grasos libres, inestabilidad térmica, oxidación y polimerización; que van

variando dependiendo de la materia prima empleada. (Haseeb, Fazal, Jahirul, & Masjuki, 2011)

La siguiente tabla resume las ventajas y desventajas tanto del biodiesel como del diésel fósil:

Tabla 1. Ventajas y desventajas del diésel y el biodiesel

Biodiesel		Diesel	
Ventajas	Desventajas	Ventajas	Desventajas
Se puede emplear solo o en mezcla de biodiesel	Emite NO _x	Bajo precio	Aumenta la emisión de gases de efecto invernadero
No altera ciclo del Carbono	Alto Precio	Alta potencia y velocidad	Altera ciclo del C
Renovable	Mayor viscosidad	Almacenable	No renovable
No inflamable	Baja potencia y velocidad		Inflamables
No explosivo	Degradación en periodos altos de almacenaje		Explosivo
Alto número de cetanos			
No contiene sulfuros ni aromáticos			
Biodegradable			
Puede emplear desechos			

III.3.5 Parámetros de calidad del biodiesel

Como se ha mencionado antes el empleo de los aceites y grasas directamente en los motores tienen consecuencias, así que se ha establecido que la materia prima debe de tener ciertos parámetros de calidad para que pueda ser transformado en biodiesel, entre los más importantes se encuentran: índice de acidez, densidad, tipo y cantidad de ácidos grasos. Como el empleo directo de biodiesel afecta el motor, se emplea mezclas de biodiesel y diésel, generalmente se indica la cantidad de biodiesel utilizado expresado en porcentaje seguido de una letra “B”

En México no se cuenta con una legislación para el control de calidad del biodiesel, pero se pueden tomar como referencia la American Society for Testing and Materials (ASTM) Y el Comité Europeo de Normalización (CEN). (Rico, 2012)

La siguiente tabla resume los parámetros de calidad de biodiesel y sus mezclas, según las normas Europeas y Norteamericanas

Tabla 2. Especificaciones internacionales de biodiesel ⁴

Parámetro	Biodiesel (B100)					Mezclas B6-B20	
	ASTM(D6751-08)		EN 14214			ASTM (D7467)	
	Método	Limite	Método	Max.	Min	Método	Limite
Agua y sedimento (V%, máx.)	D2709	0.05				D2709	0.05
Contaminación total (mg/Kg ,máx.)			EN 12662	24			
Cenizas sulfatadas (M%)	D874	0.02	ISO 3987	0.02			
Cenizas totales						D482	0.01
Azufre total (ppm)	D5453	0.05	EN 20846	10		D5453	0.05
Densidad 15°C (Kg/m ³)			EN ISO 3675	900	860		
Corrosion a lamina de cobre	D130	No. 3	EN 2160	Clase 1		D130	No. 3
Viscosidad cinemática a 40 °C (mm2/sec)	D445	6-1.9	EN 310	5	3.5	D445	4.1-1.9
Punto de inflamación (°C)	D93	93	EN 2719		101	D93	52
Número de cetano (min)	D613	47	EN 5165	51		D613	40
Punto de niebla (°C)	D2500	*	EN 23015	*		D2500	*
Residuos de carbón (M%)	D4530	0.05	EN 10370	0.3 **		D524	0.35**
Número de acidez (mg de KOH/ g)	D664	0.5	EN 14104	0.5		D664	0.3
Total de glicerina (M%)	D6584	0.24	EN 14105	0.25			
Glicerina libre	D6584	0.02	EN 14105	0.02			
Contenido de fósforo (ppm)	D 4951	10	EN 14107	4			
Destilación 90% recuperado (°C) ***	D 1160	360	EN3405	350****		D86	343
Residuos de Ca y Mg (ppm)	EN 14538	5	EN 14538	5			
Residuos de K y Na (ppm)	EN 14538	5	EN 14108/14109	5			
Estabilidad de oxidación (horas)	EN 14112	3	EN 14112	6		EN15751	6
Contenido de Metanol (V%)	EN 14110	0.2	EN 14110	0.2			
Agua (mg/Kg)			EN ISO 12937	500			
Contenido de esteres (M%)			EN 14103		96.5		
Monoglicerido (M%)			EN 14105	0.8			
Diglicerido (M%)			EN 14105	0.2			
Trigliceridio (M%)			EN 14105	0.2			
Linoleato de metilo (M%)			EN 14103	12			
Ésteres metílicos polinsaturados (M%)			EN 15779	1			
Índice de yodo (g I ₂ /100 g)			EN 14111	120			
Lubricidad a 60 °C (µm)	D6079	520	ISO 12156-1	460		D6079	520

* Debe de reportar el proveedor

** El límite se basa en la fracción inferior al 10% del combustible

*** atmosférica equivalente T-90

**** Recuperado al 85%

⁴ http://www.afdc.energy.gov/fuels/biodiesel_specifications.html

-https://www.dieselnet.com/tech/fuel_biodiesel_std.php

Dominik Rutz y Rainer Janssen Overview and Recommendations on Biofuel Standards for Transport in the EU 2006 Germanyg

III.4.5.1 Densidad relativa

La densidad es una de las propiedades más importante ya que afecta directamente el rendimiento del motor. También está directamente relacionado con el número de cetanos, calor de combustión y la viscosidad (Alptekin & Canakci, 2009). La densidad se encuentra afectada por el grado de insaturación y la longitud de la cadena (Rico, 2012); es decir a mayor grado de insaturación aumenta la densidad del biodiesel y a mayor longitud de la cadena disminuye la densidad del biodiesel. Esto afecta directamente al motor ya que la variación de la densidad del biodiesel modifica la potencia de salida del motor y la cantidad de combustible que se consume, ya que la inyección de combustible al motor se mide en volumen y no en masa. (Haseeb, Fazal, Jahirul, & Masjuki, 2011)

III.4.5.2 Índice de acidez

Indica la cantidad de ácidos grasos libres que tiene el biodiesel y el aceite (Rico, 2012); se expresa como la cantidad de miligramos de hidróxido de potasio que se necesitan para neutralizar los ácidos que se encuentran en la muestra. A pesar de que formalmente esta prueba no se emplea para evaluación de la estabilidad oxidativa del biodiesel, pero ayuda a evaluar la calidad de almacenamiento del biodiesel. (Yaakob, Narayanan, Padikkaparambil, & UnniK., 2014)

Se debe de buscar que el biodiesel no supere 0.25% que corresponde a 0.5 mg KOH/g de muestra (Alleman, Fouts, & Chupka, 2011), en caso de lo contrario puede provocar el aumento en la degradación del biodiesel, corrosión y generación depósitos al motor y un; también la presencia de ácidos inorgánicos (Haseeb, Fazal, Jahirul, & Masjuki, 2011). En caso del aceite si supera el 2%, es decir 4.0 mg de KOH/g de muestra hace difícil el proceso de obtención de biodiesel por la formación de emulsiones. (Sharma, Singh, & Upadhyay, 2008)

III.4.5.3 Número de Cetanos

El número de cetanos es un medio para determinar la calidad de ignición del combustible, encender rápidamente después de que se inyecta. El bajo contenido de cetanos puede provocar que la ignición en el motor sea ruda, una operación áspera, ruido (cascabeleo) y altas emisiones de hidrocarburos (PEMEX, 2015). El biodiesel tiene mayor número de cetanos que el diésel convencional (Rico, 2012). Sin embargo el número de cetanos depende de la longitud de la cadena y el número de dobles enlaces; es decir que al aumentar el largo de la cadena del ácido graso se incrementa y disminuye al incrementarse la cantidad de dobles enlaces el número de cetanos. Este parámetro es considerado como uno de los más importantes para la calidad del biodiesel. (Lapuerta, Rodríguez Fernández, & Font de Mora, 2009)

III.4.5.4 Índice de Yodo

La determinación del índice de yodo (IY) en el biodiesel sirve para medir el grado de total de insaturación (dobles y triples enlaces) que los ácidos grasos métilicos tienen. La prueba está basada en la reactividad de los dobles enlaces, si hay un incremento de (IY) en el biodiesel indica la posibilidad de una degradación y que baje la calidad de lubricación. (Yaakob, Narayanan, Padikkaparambil, & UnniK., 2014) Esta prueba se encuentra expresada los gramos de yodo (I_2) necesarios para saturar la molécula o absorbidos por cada 100 gramos de muestra (Lapuerta, Rodríguez Fernández, & Font de Mora, 2009) A mayor cantidad de insaturación en el biodiesel se puede mantener en estado líquido a bajas temperaturas ($3^{\circ}C$) (Rico, 2012)

III.4.5.5 Viscosidad cinemática

Es la medida de la resistencia de un líquido a fluir (Rico, 2012). Para los motores es una propiedad importante ya que afecta la atomización del combustible en el inyector. A mayor viscosidad es menor la cantidad del combustible que se quema.

La viscosidad de los aceites es mayor que la de sus respectivos biodiesel y a la vez el diésel de petróleo es menor que el biodiesel (Knothe & Steidley, 2005). En general la viscosidad del biodiesel se ve incrementada por el tamaño de la cadena ya sea parte del ácido graso o de la parte proveniente del alcohol. También se ve afectado por la instauración y la posición en que se encuentre en la cadena, donde la posición *cis* da menor viscosidad que la *trans*. (Knothe, 2005)

La temperatura también es factor que afecta la viscosidad del biodiesel, ya que si hay una alta viscosidad y una baja temperatura puede resultar en un problema en la transferencia del combustible del tanque al motor. (Knothe & Steidley, 2007)

III.4.4.6 Calor de combustión

Determina la cantidad de energía del combustible por unidad de energía (Rico, 2012), donde los calores de combustión de los ácidos grasos metílicos y los triglicéridos de C8-C22 varían entre los 1300 kg cal/mol a 3500 kg cal/mol. Donde se incrementan el calor de combustión por el largo de la cadena. Comparando el calor de combustión del biodiesel con el diésel petroquímico el primero es 10% menor a comparación del segundo. (Knothe, 2005)

III.4.4.7 Punto de inflamación (flash point)

Es la temperatura mínima necesaria para que un material inflamable desprenda vapores mezclados con el aire se incendien en presencia de una llama. Donde la volatilidad es inverso al punto de ignición y generalmente se emplea este parámetro para el biodiesel para evitar residuos de metanol provenientes de la reacción. (Alleman, Fouts, & Chupka, 2011)

III.4.4.8 Punto de niebla (Cloud point) y punto de fluidez

El punto de niebla es la temperatura donde el combustible empieza a formar cristales de ceras que rápidamente se aglomeran y es empleado para predecir su funcionalidad en climas fríos y que pueda obstruir el motor. (Alleman, Fouts, &

Chupka, 2011) Mientras que el punto de fluidez es la temperatura mínima a la cual el biodiesel deja de fluir y generalmente primero se encuentra la temperatura para el punto de niebla que el de fluidez. Cuanto más baja la temperatura, habrá mayor formación de cristales y el biodiesel se acercará más a su punto de congelación y a la temperatura en la que dejara de fluir.

Los ácidos grasos metílicos saturados presentan puntos de fusión más altos que los insaturados y que cuando se encuentran en mezclas también presentan un punto de niebla más alto que los insaturados. Con esto los biodiesel que derivan de los aceites y grasas presentan altos puntos de niebla y de fluidez. Esto es importante ya que el biodiesel se mezcla con el diésel petroquímico haciendo que sus propiedades finales cambien (Knothe, 2005).

III.4.5.9 Residuo carbonoso

Es la tendencia del combustible a formar residuos de carbón, se mide en ppm (partes por millón).

III.4.5.10 Corrosión al cobre

Determina la presencia de ácidos o sulfuros que puede provocar corrosión al motor.

III.4.5.11 Cenizas sulfatadas

Pueden provocar desgaste prematuro en el inyector, la bomba de inyección, pistones, aros y formación de depósitos en el motor.

III.4.5.12 Glicerina libre

Determina la cantidad de glicerina libre dentro del combustible. Un alto contenido puede bloquear los inyectores y obstruir los conductos de combustible.

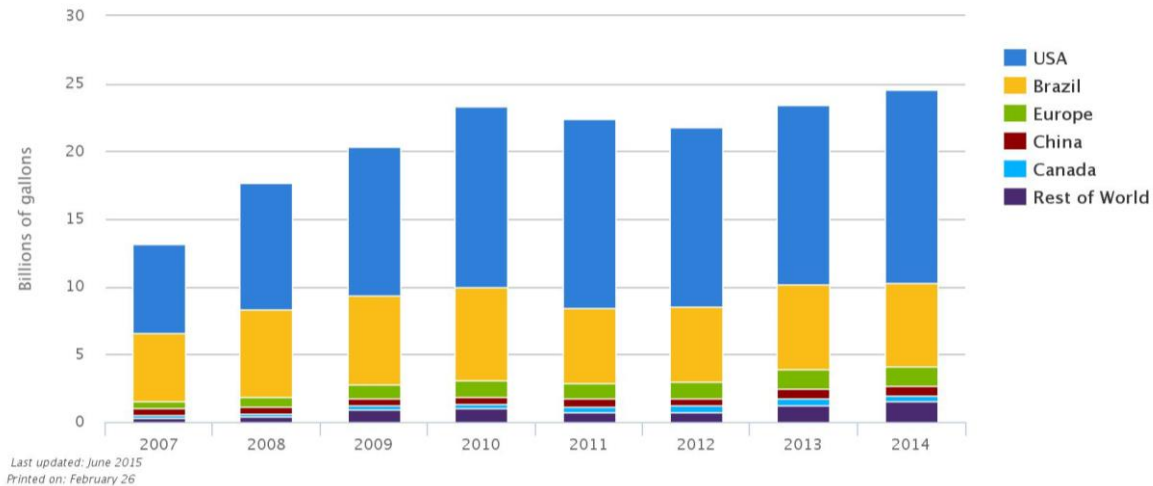
III.4.5.13 Glicerina total

Determina el total de glicerina en el combustible. Un bajo nivel de glicerina asegura que ha habido una alta conversión de aceites o grasas en ésteres monoalquílicos. Un alto contenido de mono, di y triglicéridos puede bloquear los inyectores y afectar la funcionalidad en climas fríos (Aguirre Hernández & Rodríguez Alvear, 2009).

III.4 Bioetanol

El etanol obtenido de residuos de desperdicios de biomasa o de recursos renovables es llamado bioetanol y puede ser empleado como combustible, disolvente para la industria y como materia prima química (Domínguez Bocanegra, Torres Muñoz, & Aguilar López, 2014).

La producción de biodiesel se ha incrementado año con año, tan solo en el 2014 se produjeron 24, 570 millones de galones de etanol (ver gráfica 1). Se estima que Estados Unidos tendrá una producción de 36, 000 millones de galones para el año 2022. Los dos países que tienen la mayor producción de etanol en el mundo son Estados Unidos con 14,300 millones de galones y Brasil con 6,190 millones de galones, empleando como materia prima la caña de azúcar y el maíz (Towler, 2014), (Domínguez Bocanegra, Torres Muñoz, & Aguilar López, 2014) y (RFA, 2016).



Gráfica 1 Producción mundial de etanol

El bioetanol es considerado el biocombustible más empleado por el sector del transporte en todo el mundo (Domínguez Bocanegra, Torres Muñoz, & Aguilar López, 2014). Puede ser usado directamente en carros diseñados para que funcionen únicamente con el etanol o en mezcla con gasolina para motores normales sin la necesidad de que sean modificados; siendo necesario que el etanol empleado sea anhídrido para ser mezclando con la gasolina (Demirbas, Balat, & Balat, 2011).

Se considera el etanol como el combustible más limpio, ya que reduce las emisiones de gases de efecto invernadero, puede ser empleado en mezclas con gasolina debido a que es un excelente antidetonante de la gasolina y no necesita que los motores sufran de modificaciones para su empleo (Cruz Tamayo, 2015).

III.4.1 Materias primas para la obtención de bioetanol

El bioetanol puede ser producido de diferentes fuentes de biomasa, pero la podemos dividir en tres fuentes sin importar cuál sea su origen: almidones, glucosa y lignocelulosa.

Glucosa (sacarosa)

La caña de azúcar contiene aproximadamente el 15% de sacarosa, un disacárido que contiene una molécula de glucosa y una de fructosa. El enlace químico en la sacarosa es fácil de romper, pudiéndose obtener fácilmente glucosa disponible para la obtención de etanol (Arshadi & Grundberg, 2014).

La sacarosa presenta una gran solubilidad en el agua, ésta se incrementa considerablemente con el aumento de la temperatura, es por ello que se obtienen grandes rendimientos por la fermentación de la sacarosa en solución (Cruz Tamayo, 2015).

Uno de los mayores productores de caña de azúcar es Brasil (aproximadamente el 27%) y no es de extrañar que sea uno de los mayores productores de bioetanol en el mundo (Arshadi & Grundberg, 2014).

Almidones

El almidón es la principal fuente de almacenamiento de energía de las plantas, se pueden encontrar desde los granos de los cereales (65-75% de almidón en peso seco), tubérculos y semillas de leguminosas. La concentración del almidón llega a variar con el estado de madurez de los mismos (Hernández Medina, Torruco Uco, Chel Guerrero, & Betancour Ancona, 2008).

Existe una amplia gama de aplicaciones en la industria alimentaria, farmacéutica, textil, papelera y en la actualidad se estudia su potencial para la producción de bioetanol (Cruz Tamayo, 2015).

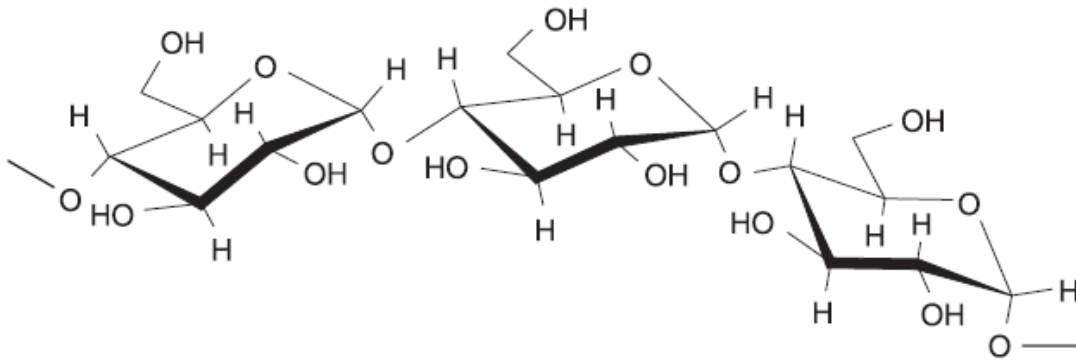


Figura 6 Estructura del almidón

La composición del almidón es de dos polisacáridos: la amilosa y la amilopectina (ver figura 6).

La amilosa es un polímero lineal de glucosas unidas por enlaces α (1-4); no es soluble en agua fría (Hernández Medina, Torruco Uco, Chel Guerrero, & Betancour Ancona, 2008), pero se solubiliza en agua caliente formándose una suspensión coloidal (Cruz Tamayo, 2015).

La amilopectina es un polímero de unidades de glucosa unidas entre un 94-96% por enlaces α (1-4) y las unidades de glucosa ramificadas entre un 4-6% con uniones α (1-6). Las ramificaciones se suelen encontrar entre cada 15 a 25 unidades de glucosa. Es parcialmente soluble en agua caliente (Hernández Medina, Torruco Uco, Chel Guerrero, & Betancour Ancona, 2008) y es una molécula irregular de alto peso molecular (Cruz Tamayo, 2015).

Lignocelulosa

La materia lignocelulosa constituye aproximadamente el 90 % del peso seco de las plantas y es el componente de biomasa más abundante que producen las plantas durante la fotosíntesis (Cruz Tamayo, 2015). La lignocelulosa se puede dividir en tres componentes: celulosa (30-50%), hemicelulosa (15-35%) y lignina (10-25%), esta composición varía dependiendo de la planta y de su crecimiento (Limayem & Ricke, 2012).

Celulosa

Es el componente fundamental de la pared celular de las plantas, constituyendo el esqueleto de los tallos, ramas y troncos. El contenido de celulosa varía en las distintas especies vegetales, en base al contenido y de la pureza de la misma; la celulosa de mayor peso molecular y pureza que hay en el reino vegetal es el algodón (Cruz Tamayo, 2015).

La celulosa es un polímero lineal de glucosas que se encuentra unidos por enlaces $\beta(1-4)$ (ver figura 7), que pueden alcanzar varios miles de miles de unidades de glucosa haciendo que la cadena sea muy larga. Los numerosos enlaces de hidrógenos entre las moléculas llevan a una fuerte estructura cristalina (Limayem & Ricke, 2012).

Dos glucosas unidos por un enlace $\beta(1-4)$ se le denomina como celobiosa (Arshadi & Grundberg, 2014), siendo este el disacárido que forma el polímero de la celulosa. El enlace $\beta(1-4)$ necesita una mayor cantidad de energía para romperlo o hidrolizarlo a comparación de un enlace tipo α , haciendo que la celulosa tenga una forma plana y que las cadenas se acoplen de tal manera que forman micelas cristalinas, las cuales se van alternando formando cristales (Cruz Tamayo, 2015). Las cadenas de celulosa que se mantienen unidos por los puentes de hidrógeno formando lo que se llama fibrillas y la unión de varias fibrillas forman la fibra de celulosa real (Arshadi & Grundberg, 2014).

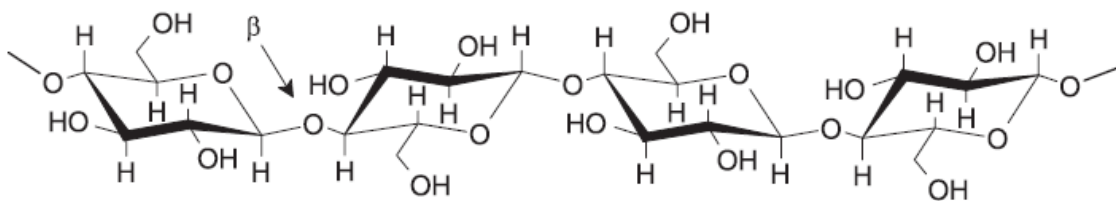


Figura 7 Estructura de la celulosa

Hemicelulosa

Tiene una estructura amorfa y variable formada de diferentes polímeros de hexosas (D-glucosa, D-galactosa y D-manosa), pentosas (D-xylosa y L-arabinosa) y hasta puede contener ácidos hexurónicos (ácido glucorónico, metilglucorónico y

galacturónico) (Limayem & Ricke, 2012). Al no encontrarse formado exclusivamente de glucosa el tamaño de la cadena de la hemicelulosa es menor tamaño que la celulosa y al ser ramificada, hace que sea más fácil de hidrolizar (Cruz Tamayo, 2015).

La cadena principal de la hemicelulosa está conformada por xilano $\beta(1-4)$ que son la unión entre D-xilosa (90%) y L-arabinosa (10%); esto en maderas duras. Mientras que en maderas suaves la hemicelulosa está compuesta glucomanos. Debido a la variedad de carbohidratos que se encuentran en la hemicelulosa se requiere una amplia gama de enzimas para poder hidrolizar a monómeros libres (Limayem & Ricke, 2012).

Lignina

No hay composición exacta de la lignina (ver figura 8), ya que es un polímero muy variable. Su composición principal es de derivados de fenilpropanoides como el alcohol colifenérico, cumárico y sinapílico. Los monómeros que más se han encontrado en la lignina son el alcohol sinapílico, alcohol colifenérico, derivados acetilados y p-cumaroilados y sus aldehídos correspondientes.

La Lignina se encuentra en su mayor parte en la corteza media de los árboles, proporciona rigidez a la pared celular (se encuentra enlazada de forma covalente a la celulosa y hemicelulosa), protege a la planta del ataque de microorganismos, transporte de metabolitos y nutrientes en la planta (Cruz Tamayo, 2015).

No llega a contener tanto oxígeno a comparación de la celulosa y de la hemicelulosa, por lo tanto tiene mayor la cantidad de energía que las dos anteriores. La celulosa y la hemicelulosa tienen un valor calorífico de 17MJ/Kg, mientras que la lignina llega tener un valor hasta de 25 MJ/Kg. Aunque la lignina sólo represente el 25% de peso seco en la madera el 40% de su valor calorífico proveniente de la misma (Arshadi & Grundberg, 2014).

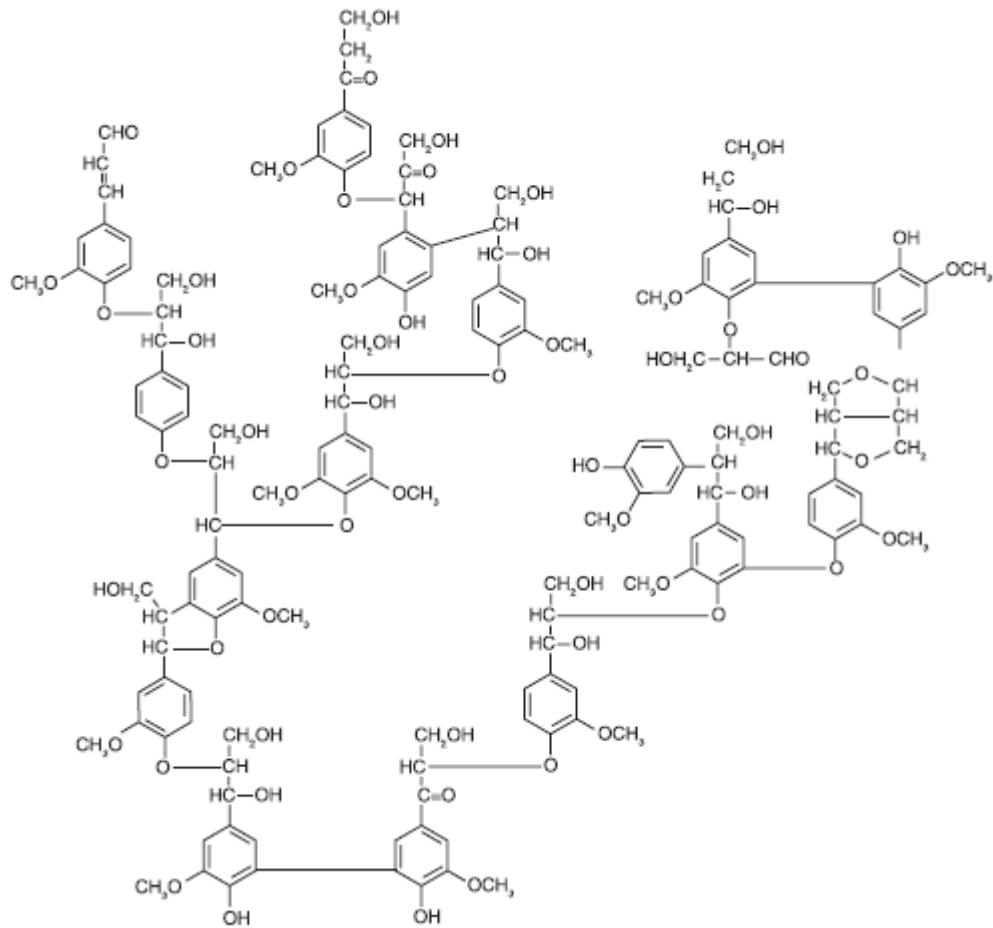


Figura 8 Estructura de la lignina

III.4.2 Técnicas de producción de bioetanol

Hay algunas diferencias en las técnicas de producción de bioetanol, dependiendo de la materia prima que se empleó. En este trabajo se enfocara en la materia prima de segunda generación (bagazo) y en las técnicas de producción empleadas para la generación de bioetanol de biomasa de desperdicios.

La producción de etanol independiente de la materia prima, tiene tres puntos en común:

1. Extracción de los azúcares fermentables.
2. Conversión de los azúcares a etanol por fermentación.
3. Separación del etanol y su purificación.

La materia prima que se emplea para la obtención de bioetanol de segunda generación, proviene de desperdicios agrícolas y alimenticios que contienen una alta cantidad de lignocelulosa, haciendo necesario que haya un pretratamiento para poder obtener los azúcares necesarios (Vohra, Manwar, Manmode, Padgilwar, & Patil, 2014).

Los pretratamientos tienen como objetivo remover y alterar la estructura de aquellos compuestos que impidan la hidrólisis, para la obtención de azúcares fermentables (Cruz Tamayo, 2015). Los pretratamientos se pueden clasificar por métodos físicos, métodos químicos y microbiológicos (Limayem & Ricke, 2012).

Métodos físicos

- **Explosión de vapor o auto hidrólisis:** Proceso de fragmentación de la biomasa separando las fibras individuales con una mínima pérdida del material; se somete la muestra en un extrusor a condiciones de vapor saturado a una temperatura de 160-260°C y a una presión entre 0.69-4.83 MPa, en donde la celulosa y la hemicelulosa se fragmentan y se agrega ácido para incrementar la cantidad de carbohidratos provenientes de la hemicelulosa (Cruz Tamayo, 2015). Este método permite el ahorro hasta de un 70 % de energía a comparación de la trituración mecánica (Balat, Balat, & Oz, 2008).
- **Método de explosión de fibra de amoníaco (AFEX):** Este método en donde la materia lignocelulosa debe de tener una humedad de entre el 15-30%, se coloca en una cámara de presión con amoníaco líquido, con una concentración de amoníaco 1-2 Kg NH₃ / Kg de biomasa seca. Cuya presión máxima es de 12 atm a temperatura ambiente (Balat, Balat, & Oz, 2008). El tiempo de proceso es de 30 minutos, los rendimientos pueden llegar hasta un 90% con bajo contenido de lignina. En este proceso se descristaliza la celulosa, se hidroliza la hemicelulosa, despolimeriza la lignina y se incrementa la porosidad de la pared celular (Cruz Tamayo, 2015). Para que sea económicamente viable es necesario la recuperación del amoníaco vía evaporación (Balat, Balat, & Oz, 2008).

- **Fragmentación o disminución de tamaño de partícula:** Se emplea para facilitar la hidrólisis enzimática empleando molinos especializados de alto corte y generalmente se reduce la biomasa a partículas de entre 0.2 y 2 mm (Cruz Tamayo, 2015).

Métodos químicos

▪ Pretratamiento con ácidos

Los pretratamientos que emplean ácidos generalmente llegan a tener altos rendimientos en la obtención de azúcares de la biomasa lignocelulósica. Hay muchos tipos de ácidos que se emplean en este método como: ácido sulfúrico, ácido paracético, ácido nítrico, ácido fosfórico e incluso el ácido clorhídrico (Balat, Balat, & Oz, 2008). Los ácidos hidrolizan eficazmente los carbohidratos, pero en altas concentraciones son tóxicos, corrosivos y deben de ser recuperados después del proceso. Por lo que se ha optado por diluir el ácido para su empleo como pretratamiento; una ventaja con este método es que se pueden obtener las xilosas intactas de la hemicelulosa y emplearse como producto de valor agregado (Arshadi & Grundberg, 2014).

El proceso ácidos concentrados se han empleado concentraciones superiores al 65% de ácido sulfúrico presentando rendimientos altos, pero se necesitan equipos resistentes a la corrosión. La hidrólisis de la celulosa se ve influenciada por la concentración del ácido y la temperatura de la reacción, por ejemplo empleando ácido sulfúrico al 0.04% con temperatura de 245 °C se obtienen rendimientos hasta de un 95%. Este método no es tan rentable por la cantidad de reactivos que se emplean para neutralizar el medio (Cruz Tamayo, 2015).

Principalmente hay dos tipos de pretratamiento por ácido diluido:

1. Bajo contenido de sólidos (5-10% m/m) con una temperatura alta (mayor a 170°C) con agitación constante.

2. Alto contenido de sólidos (10-40% m/m) con temperatura menor a los 170 °C con agitación constante.

El empleo de altas temperaturas en este pretratamiento baja los tiempos de reacción, el rendimiento de la xilosa soluble recuperada es más alta y la digestión enzimática de la celulosa aumenta. Dependiendo del sustrato y las condiciones que se empleen, entre el 80 al 95 % de los azúcares de la hemicelulosa se pueden recuperar; haciendo que sea el pretratamiento por ácido diluido el método más empleado para el pretratamiento de biomasa lignocelulósica (Balat, Balat, & Oz, 2008).

El pretratamiento por ácido diluido es el más empleado ya que requiere menor cantidad de reactivos para neutralizar el medio o no se necesitan ya que las enzimas que soportan el pH al que se lleva a cabo la hidrólisis ácida, este proceso consta de dos etapas (Cruz Tamayo, 2015):

- Primera etapa: Ácido sulfúrico al 0.7% se trabaja a una temperatura de 190 °C con el fin de solubilizar la hemicelulosa (Cruz Tamayo, 2015). La hemicelulosa hidrolizada se transforma en xilosa y otros azúcares, si se continúa con la reacción, la xilosa se rompe para convertirse en furfural (Balat, Balat, & Oz, 2008).
- Segunda etapa: Se aumenta la temperatura de reacción a 215°C para hidrolizar la celulosa que presenta una mayor resistencia a hidrólisis ácida, obteniéndose glucosa (Cruz Tamayo, 2015).

- **Pretratamiento alcalino**

Este método provoca que la biomasa lignocelulósica se hinche, aumentando su área superficial interna, disminuye en el grado de cristalinidad y altera la estructura de la lignina (Balat, Balat, & Oz, 2008). Es decir que los enlaces ésteres que unían la xilosa de la hemicelulosa, celulosa y la lignina son rotos mediante la saponificación (Cruz Tamayo, 2015).

El hidróxido de sodio (NaOH), hidróxido de potasio (KOH), hidróxido de calcio ($\text{Ca}[\text{OH}]_2$), y el amoníaco, son las sustancias más empleadas para este pretratamiento. Comparado con otros pretratamientos opera a menor temperatura y no requiere reactores complejos; por otro lado tiene tiempos largos de reacción (horas a días) y la necesidad de neutralizar la sustancia pre tratada (Haghighi Mood, y otros, 2013). Otra característica de este método es que puede remover la lignina sin afectar a otros componentes de la biomasa (Balat, Balat, & Oz, 2008).

- **Pretratamiento con CO_2 supercrítico**

Es método muy parecido al de AFEX y al de explosión de vapor, ya que el CO_2 tiene un tamaño similar al del agua y al amoníaco haciéndolo capaz de introducirse en los poros de la lignocelulosa destruyéndola. Por otro lado el CO_2 supercrítico necesita menor temperatura de operación, es menos costoso y que no requiere sustancias tóxicas o explosivas para su operación a los otros dos pretratamientos mencionados.

En condiciones supercríticas el CO_2 (T_c de 31°C y P_c de 7.4 MPa) mantiene propiedades similares al de un pretratamiento ácido, catalizada por la formación del ácido carbónico cuando el CO_2 se disuelve en agua, y es menos corrosivo (Haghighi Mood, y otros, 2013).

- **Pretratamiento con ozono**

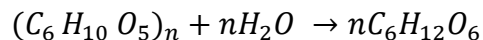
El ozono es empleado como oxidante que rompe la lignina y la hemicelulosa e incrementa la biodegradación de la celulosa. A parte de romper la lignina también libera compuestos solubles con menor peso molecular como el ácido acético y el fórmico; la mayor ventaja de este método es la ausencia de sustancias que al degradarse afectan a la hidrólisis y que se puede operar a condiciones ambientales. Por otro lado el costo de ozono empleado durante esta técnica (Haghighi Mood, y otros, 2013).

Métodos biológicos

Se usan hongos para solubilizar la lignina; es decir la degradación biológica de la lignina por medio de microorganismos (Balat, Balat, & Oz, 2008). En comparación a otros pretratamientos, éste no requiere una alta inversión en capital o en operación, ya que emplea tanto hongos blancos, café y de putrefacción para romper la lignina y mejorar la hidrólisis enzimática de la biomasa lignocelulósica. Una ventaja es que es amigable con el ambiente al no tener necesitar ningún requerimiento químico para operar y bajo consumo de energía (Haghighi Mood, y otros, 2013); por otra parte tienen tiempos de proceso lentos y rendimientos bajos si no se monitorean correctamente los microorganismos (Balat, Balat, & Oz, 2008).

Hidrólisis (sacarificación)

Cuando el tratamiento es terminado, lo que continúa es la ruptura del polisacárido en monosacáridos. Tres métodos son empleados para hidrolizar la celulosa y obtener la glucosa: hidrólisis con ácidos diluidos, con ácidos concentrados y enzimas (Vohra, Manwar, Manmode, Padgilwar, & Patil, 2014).



- **Ácido diluido:** Se realiza en dos etapas por las diferencias que hay en la degradación entre la hemicelulosa y la celulosa; la primera etapa se considera como pretratamiento; el fraccionamiento de la celulosa se realiza a altas temperaturas para optimizarla (Viñals-Verde, Bell García, Michelena Álvarez, & Ramil Mesa, 2012). Como condiciones de trabajo se emplea $H_2SO_4 < 1\%$ a $215\text{ }^\circ C$ durante 3 minutos (Vohra, Manwar, Manmode, Padgilwar, & Patil, 2014). Como ventaja es su poco tiempo de reacción facilitando que el proceso se continuo y su desventaja es su bajo rendimiento en azúcares (Balat, Balat, & Oz, 2008).
- **Ácido concentrado:** Este proceso provee una rápida y completa conversión de la celulosa a glucosa y de hemicelulosa a azúcares de 5 carbonos con poca degradación (Balat, Balat, & Oz, 2008). Aquí se

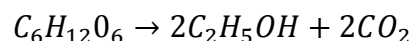
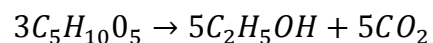
emplea el H₂SO₄ con una concentración entre un 30-70%, temperatura hasta los 40°C, tiempos de 10 a 12 horas y rendimientos hasta 90% (Sánchez & Cardona, 2008). Con estas condiciones, en especial la baja temperatura y presión minimizan la degradación de los azúcares. Para que este método sea económicamente viable es necesario que sea recuperado el ácido y reconcentrarlo. (Balat, Balat, & Oz, 2008).

- **Enzimas:** La biomasa lignocelulósica pretratada implica reacciones enzimáticas que transforman la celulosa en glucosa, hemicelulosa en pentosa (xilosa y arabinosa) y hexosas (glucosa, galactosa y manosa). Donde la celulosa y la hemicelulosa está catalizada por la *celulasa* y *hemicelulasa* (Vohra, Manwar, Manmode, Padgilwar, & Patil, 2014). Las condiciones en que se trabajan son un pH de 4.5-5 necesitando un buffer de acetatos y con una temperatura de trabajo de 50°C durante 48 horas (Cruz Tamayo, 2015)

Los factores más importantes que se toman en cuenta en son: el tiempo de reacción, pH, cantidad de la enzima y la carga del sustrato (Sánchez & Cardona, 2008).

Fermentación

La fermentación implica que un microorganismo usa los azúcares para su metabolismo y generando principalmente etanol y otros subproductos. Estos microorganismos emplean azúcares de 6 carbonos como la glucosa. El rendimiento máximo teórico que se puede obtener de 1 kg de biomasa (glucosa o xilosa) es de 0.51 kg de bioetanol y 0.49 kg de dióxido de carbono (Balat, Balat, & Oz, 2008).



Los microorganismos que se pueden emplear para la fermentación pueden ser mejor descritos en término de sus parámetros: rango de temperatura, pH,

tolerancia de alcohol, tasa de crecimiento, especificidad, estabilidad genética, tolerancia al inhibidor, compatibilidad con los procesos y equipos (Sánchez & Cardona, 2008).

Tradicionalmente el método que se emplea para la fermentación de la biomasa hidrolizada implica un proceso secuencial en donde la hidrólisis de la celulosa y su fermentación se realizan en dos partes diferentes; conocida hidrólisis y fermentación separadas (SHF en inglés). La otra propuesta es la sacarificación y fermentación simultánea (SSF en inglés) donde el proceso se realiza en una sola parte. Por lo general se emplea como microorganismo para la fermentación de la biomasa lignocelulósica hidrolizada *S. cerevisiae*, que puede fermentar las hexosas pero no tiene mucho éxito con las pentosas (Sánchez & Cardona, 2008). Existen organismos que pueden fermentar pentosas como: *Pichiastipitis*, *Pachysolentannophilus* y *Candida shehatae* pero tienen bajos rendimientos a comparación de *S. cerevisiae* (Vohra, Manwar, Manmode, Padgilwar, & Patil, 2014)

- **Sacarificación y fermentación simultánea**

Las enzimas empleadas para la hidrólisis y los microorganismos son agregados al mismo proceso, permitiendo que la glucosa formada en la hidrólisis enzimática sea consumida inmediatamente por los microorganismos que los convierte en etanol (Sánchez & Cardona, 2008). Entre sus ventajas se encuentran: aumento de la tasa de conversión de los azúcares que inhiben a la *celulasa*, se necesita menos cantidad de la enzima, mayores rendimientos del producto, ya no se necesita que la glucosa sea estéril y se produzca directamente el bioetanol y menos tiempo del proceso. Entre sus desventajas es el empleo de diferentes temperaturas que se necesitan para la sacarificación y la fermentación. Un pH menor a 5 y una temperatura mayor a los 40°C llega a ser favorable para la hidrólisis, pero llega a ser desfavorable para la levadura (Balat, Balat, & Oz, 2008).

Este proceso ha sido mejorado incluyendo la co-fermentación de múltiples sustratos azucarados; esta variante es conocida como SSCF (sacarificación y co-fermentación simultánea) (Viñals-Verde, Bell García, Michelena Álvarez, & Ramil Mesa, 2012). Entre sus objetivos se encuentra la completa asimilación del microorganismo de todos los azúcares que se liberaron durante la hidrólisis de la biomasa lignocelulósica y durante el pretratamiento. Se emplea cultivos mixtos de levaduras que asimilan tanto hexosas y pentosas; el detalle es que el crecimiento de los microorganismos que consumen las hexosas es más rápido que el de las pentosas y por consecuencia la conversión de hexosa a etanol es más elevada. Otra variante es que use un solo microorganismo que sea capaz de asimilar tanto las hexosas como las pentosas y que permita un alto rendimiento a la hora de convertirlo en etanol. Aunque existen en la naturaleza estos microorganismos, se puede obtener altos rendimientos en la conversión a etanol por medio de la modificación genética de las levaduras o las bacterias que se encuentren ya adaptados a la fermentación etanólica (Vohra, Manwar, Manmode, Padgilwar, & Patil, 2014).

- **Hidrólisis y fermentación separadas:**

El proceso es secuencial, la biomasa lignocelulósica pretratada se somete a hidrólisis. Donde la biomasa tiene la celulosa libre y lista para los ácidos o las enzimas, una vez terminada la hidrólisis, la materia hidrolizada se fermenta y se convierte en etanol. La mayor ventaja de este método es que cada paso del proceso puede realizarse en óptimas condiciones de operación (Sánchez & Cardona, 2008).

Destilación

Durante la fermentación es de importancia separar el etanol que se produce del fermentado ya que los microorganismos no pueden sobrevivir a una alta concentración de etanol (más de 15-20%). Aunque también es importante los residuos sólidos (Arshadi & Grundberg, 2014).

Un sistema de destilación separa el etanol del agua de la fase líquida, ya que el contenido de etanol de esta fase es del 80% aproximadamente. Para separar el

agua del alcohol se requiere una gran cantidad de energía para lograr concentrar el etanol al 95.6%(mezcla azétopia de etanol con agua). Industrialmente se utiliza una columna de destilación que separa la mayor parte del bioetanol a partir del agua creando dos corrientes una de sólidos con agua y otra de bioetanol (Balat, Balat, & Oz, 2008).

III.4.3 Parámetros de calidad del bioetanol

México no cuenta con una legislación o norma para determinar los parámetros de calidad del bioetanol, pero se puede emplear como referencia la ASTM, NRB (Norma brasileña) y la ABNT (Assoiação Brasileira de Normas Técnicas) (Duarte Pasa, 2006).

Para la legislación brasileña hay dos tipos de bioetanoles para su empleo en motores de combustión interna con ignición a chispa (ciclo Otto). El alcohol etílico anhidro combustible (AEAC) que debe de contener del 0.48 % de agua y el alcohol etílico hidratado combustible (AEHC) donde el agua está en un rango entre 4.02% al 4.87% (Santis Espinoza, 2011)

La siguiente tabla resume los parámetros de calidad del alcohol etílico anhidro, según las normas brasileñas y norteamericanas:

Tabla 3 Parámetros de calidad del bioetanol anhidro⁵

Parámetro	Método		Límite
	ASTM	ABNT/NBR	
Acidez total como ácido acético(mg/L)	D 1613		30 máx.
Conductividad eléctrica (µS/m)	D 1125	10547	500 máx.
Densidad (g/mL)	D 4052	5992	0.792
Grado Alcohólico (%v.)	D 5501	5992	99.30 min.
Cobre (mg/Kg)	-	11331	0.07 máx.
Ion cloruro (mg/Kg)	D 512	10894/10895	1.10
Aspecto	-	Visual	Limpio y sin impurezas
Color	-	Visual	Incoloro
Sodio (mg/Kg)	-	10422	2.20 máx.
Hierro (mg/Kg)	-	113331	5.50 máx.
Ion sulfato (mg/Kg)	-	10894/12120	4.30 máx.
Octanaje RON (Research Octane Number)	-	-	102-130
Octanaje MON (Motor Octane Number)	-	-	89-96

- **Conductividad eléctrica:**

Propiedad directamente relacionada con la cantidad de iones que hay en el etanol, a mayor cantidad de iones su conductividad será mayor y puede ser más corrosivo a los materiales del circuito de distribución del combustible en el auto (Duarte Pasa, 2006) y (Gracida Rodríguez & Perez, 2014).

- **Grado Alcohólico:**

Indica la pureza del bioetanol y permite saber si hay presencia de agua ya que ésta aumenta la densidad del combustible (Duarte Pasa, 2006).

- **Octanaje:**

Se toma como una medida de calidad y capacidad antidetonante de las gasolinas para que no haya detonaciones y explosiones en las máquinas de

⁵ - Duarte Pasa, V. M. (2006). Especificaciones de la calidad del etanol carburante del gasohol (mezcla de gasolina y etanol) y normas técnicas para la infraestructura. CEPAL.

- Gracida Rodríguez, J. N., & Pérez, D. B. (2014). Factores previos involucrados en la producción de bioetanol, aspectos a considerar. Rev. Int. Contam. Ambie., 30(2), 213-227.

- Santis Espinoza, L. F. (2011). Desarrollo y caracterización de un fermentador-Destilador para la producción de bioetanol. México: TESIS UNAM.

combustión interna. Para determinar este parámetro se emplean dos pruebas diferentes:

-Research Octane Number (RON): Donde al motor se le hace una corrida a una velocidad de 600 rpm y a una temperatura de entrada de aire a 51.7°C.

-Motor Octane Number (MON): El motor es operado a una velocidad de 900 rpm y a una temperatura de entrada de aire de 149°C.

Para propósitos de comercialización y distribución de gasolinas se debe determinar el octanaje comercial, como el promedio de las dos pruebas anteriores (Barroso Castillo, s.f.).

- **Grado de iones cloruro, sulfato, hierro y sodio:**

Aumentan la conductividad en el bioetanol y por lo tanto qué tan corrosivo es. El ion cloruro es muy agresivo al acero empleado en el motor. El hierro muestra la presencia de óxido de hierro que puede causar obstrucciones en las partes móviles del motor. El alto contenido de sodio es debido a su empleo para neutralizar el ácido sulfúrico para nivelar el pH de la fermentación (Duarte Pasa, 2006).

- **Densidad:**

También se encuentra como masa específica, indica la presencia de agua en forma indirecta en el bioetanol; si la densidad es alta la presencia de agua es alta y si la densidad es baja hay una presencia de metanol y aldehídos en el biocombustible (Santis Espinoza, 2011).

- **Grados de iones cobre:**

Debido a que la gran mayoría de los equipos de fermentación y destilación están diseñados con cobre, que fácilmente es jalado por el etanol. Pero al combinarse con la gasolina el cobre es un catalizador para la formación de gomas que puede obstruir filtros y la distribución del combustible (Duarte Pasa, 2006).

- **Aspecto y color:**

El color indica el grado de oxidación del biodiesel causado por la oxidación de aldehídos y alcoholes. También la identificación de impurezas que pueden causar en filtros depósitos e inyectores (Santis Espinoza, 2011)



Capítulo IV: Propuesta de aplicación de los residuos de café

IV.1 Desechos generados por la industria del café.

La industria del café es considerada como una de las que genera mayor cantidad de desperdicios en el mundo. En nuestro país la mayor parte de los beneficios son por vía húmeda y no cuentan con sistemas de tratamiento eficientes de los desechos que producen. La situación se agrava debido a que los beneficios húmedos se encuentran frecuentemente en zonas montañosas, donde el ecosistema es más frágil y el proceso de beneficio se realiza durante los meses de sequía. Provocando que se aumente la concentración de contaminantes en los ríos.

El grano de café representa solo el 25% del volumen total de la fruta, siendo el otro 75% del volumen se considera como desecho (Cedillo Martínez, 2012). Los desechos que se generan mediante el beneficio húmedo son pulpa, mucilago y pergamino (ver diagrama 1); a continuación una breve descripción de estos:

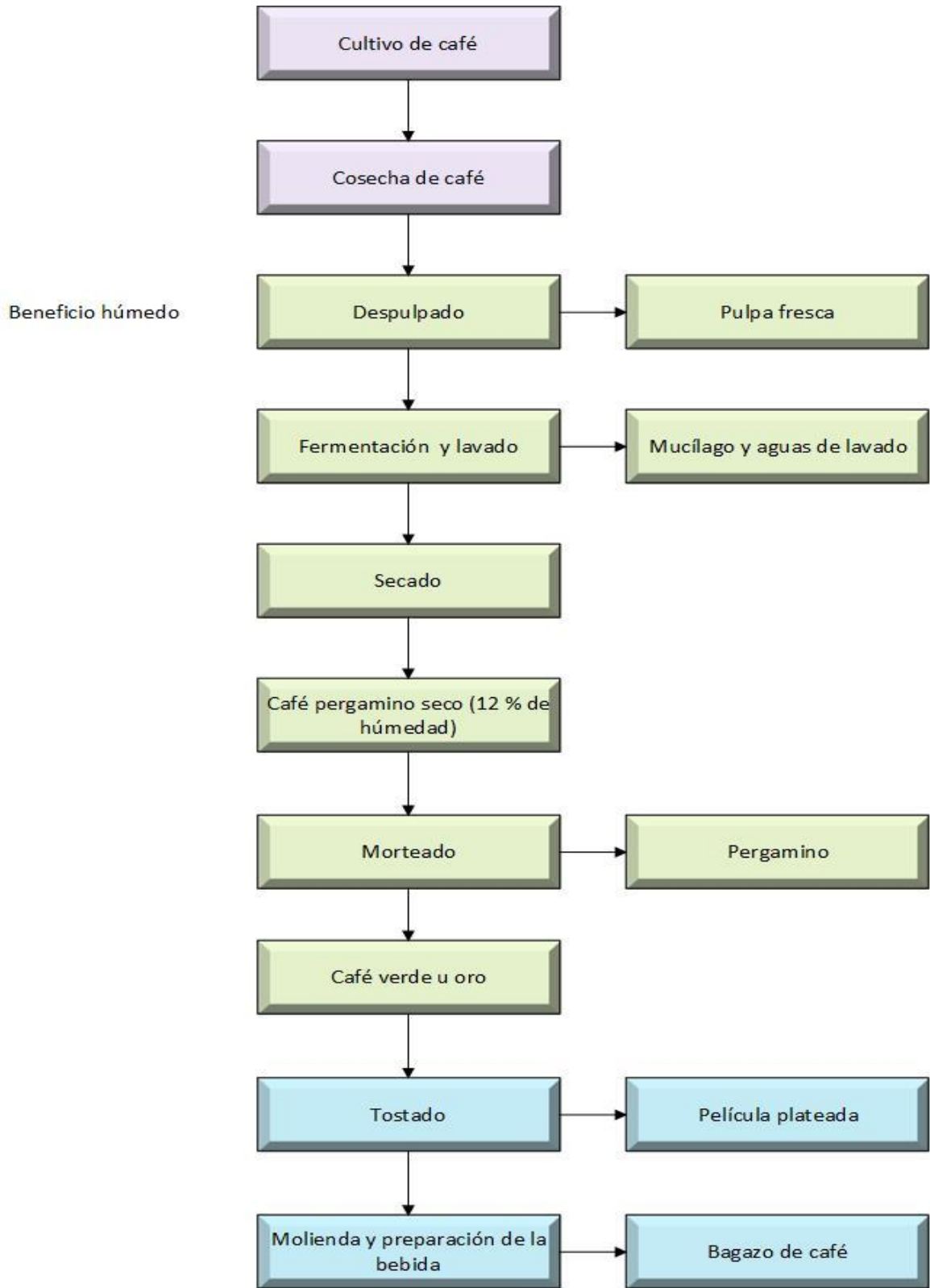


Diagrama 1 Desechos que se generan en la industria del café



- **Pulpa**

La pulpa representa el 43.58% del fruto del café, su composición es variable (Cedillo Martínez, 2012), pero se resume en la siguiente tabla:

Tabla 4 Composición química de la pulpa de café

Sustancia	% en seco
Cafeína	0.95
Sustancias orgánicas	55.00
Celulosa	18.30
Lignina	19.30
Proteína bruta	13.30
Minerales	9.70
Azúcar total	4.10
Polifenol	2.90
Grasa total	1.73
Potencial calorífico (KJ/Kg)	15.90

- **Mucilago**

El mucílago del café es un líquido viscoso que se obtiene en la fermentación que se desecha directamente al agua sin tratamiento alguno (Pérez Sariñana, 2015). Las sustancias que generalmente llegan a presentarse son 50% carbohidratos, ≈ 17% celulosa y 33% pectina.

En el proceso de la fermentación, el mucilago se descompone en ácido acético, ácido láctico y alcohol. Generalmente en este proceso el pH se baja a 4, en este momento los granos de café se lavan y se generan las aguas mieles (Cedillo Martínez, 2012). Se ha visto que se puede emplear el mucilago como materia prima para la generación de biocombustibles (bioetanol y biogás), alimento para animales y para la obtención de peptinas (Pérez Sariñana, 2015).



- **Pergamino**

El pergamino representa el 4.20 % del fruto seco y tiene buenas propiedades como combustible (17.9 MJ/Kg), generalmente empleado como combustible para el secado de café; también se ha empleado como sustrato para el cultivo de hongos (Cedillo Martínez, 2012).

- **Bagazo de café y película plateada**

Durante la transformación de las cerezas de café a la bebida de café que se consume, se generan desechos propios de la industria. Los dos más grandes son la película plateada y el bagazo de café que se obtiene después de la preparación de la bebida.

La película plateada es una piel que cubre al grano de café y que se obtiene como subproducto del tostado del grano (Murthy & Naidu, 2012), contiene una alta cantidad de fibra soluble dietética (alrededor del 86%), antioxidantes, celulosa, proteínas y monosacáridos como: xilosa, arabinosa, galactosa y manosa. El bagazo de café a comparación de la película plateada es más rica en azúcares (Mussatto S. , Machado, Martins, & Teixeira, 2011).

Tomando en cuenta los compuestos que se pueden obtener del bagazo de café y de la película plateada (ver tabla 5), la industria cafetalera los desecha y si los llegan a emplear es como fuente de combustible o como materia prima de composta para las tierras de cultivo. Siendo desaprovechados los compuestos químicos que se pueden obtener y generar así nuevos ingresos para la industria cafetalera.



Tabla 5 Composición química de la película plateada y del bagazo de café.⁶

Sustancia	Película plateada %	Bagazo de café %
Celulosa	17.80	8.60
Hemicelulosa	13.10	36.70
Proteínas	18.60	13.60
Grasas	2.20	15.00
Fibras totales	62.40	-
Polifenoles totales	1.00	1.50
Total de azúcares	6.70	8.50
Sustancias pécticas	0.02	0.01
Lignina	1.00	0.05
Ácidos Clorogénicos	3.00	2.30
Cafeína	0.03	0.02

IV.2 Usos de los residuos del café tostado (película plateada y del bagazo de café)

La película plateada como se ha mencionado antes se ha empleado como combustible para eliminar este residuo, pero se ha visto que tiene potencial para que se le extraigan compuestos fenólicos a través de cultivos con cepas de hongos usando *Penicillium purpurogenum*, *Aspergillus niger* AA20, *Neurospora crassa*, y *Mucor*.

También se han encontrado compuestos antioxidantes, así como la producción de α -amilasa por una *Neurospora crassa* CFR 308. Se ha visto que en ciertas condiciones de hidrólisis ácida se puede liberar de la película plateada azúcares de la hemicelulosa (xilosa, arabinosa, galactosa y manosa) y pudiéndose emplear como sustrato para procesos de fermentación. Incluso se encuentra como una

⁶ Murthy, P., & Naidu, M. (2012). Sustainable management of coffee industry by-products and value addition—A review. *Resources, Conservation and Recycling*(66), 45-58.



excelente fuente de nutrientes para la producción de *β -fructofuranosidasa* y *fructooligosacáridos* por *Aspergillus japonicus*.

Para el bagazo del café también se pueden obtener compuestos fenólicos con los hongos *Penicillium*, *Neurospora* y *Mucor*. En la industria se emplean como combustible en las calderas ya que tiene un alto calor de combustión de aproximadamente de 5 000 Kcal/kg. También se puede emplear como forraje para animales de granja, pero se encuentra limitado por su alto contenido de lignina (~25%).

Se ha demostrado su potencial para la producción de biodiesel, pellets, H₂ y obtención de etanol. También se ha hallado que es una excelente materia prima para el cultivo de hongo mediante fermentación debido a su alto contenido de proteínas y humedad. Mediante el uso de la levadura *Saccharomyces cerevisiae* se obtiene etanol que puede utilizar como bebida destilada con propiedades organolépticas agradables al paladar. En el área ecológica se ha encontrado como un excelente adsorbente barato para la eliminación de colorantes catiónicos en aguas residuales. (Mussatto S. , Machado, Martins, & Teixeira, 2011)

El aceite extraído del bagazo de café puede ser empleado como materia prima para la producción de polihidroxibutirato (PHB). Este polímero tiene propiedades mecánicas similares al polipropileno y al polietileno, además de ser un compuesto biodegradable, presentando una alternativa a los polímeros sintéticos. Pudiéndose obtener 0.88g de PHB por cada gramo de aceite de café. El aceite de café también puede ser empleado, dependiendo de su calidad, para la industria cosmética y farmacéutica pudiéndose ser usada como fuente de cafeína y esteroides; como se emplea el aceite de café verde (Campos Vega, Loarca Piña, Vergara Castañeda, & Oomah, 2015).

El diagrama 2 resume los productos de valor agregado y los procesos con lo que se llevarían a cabo a partir de la celulosa obtenida del bagazo del café y de la película plateada; dando así un bosquejo de una biorefinería. El diagrama 3 sintetiza las aplicaciones de la hemicelulosa extraída del bagazo y de la película plateada.

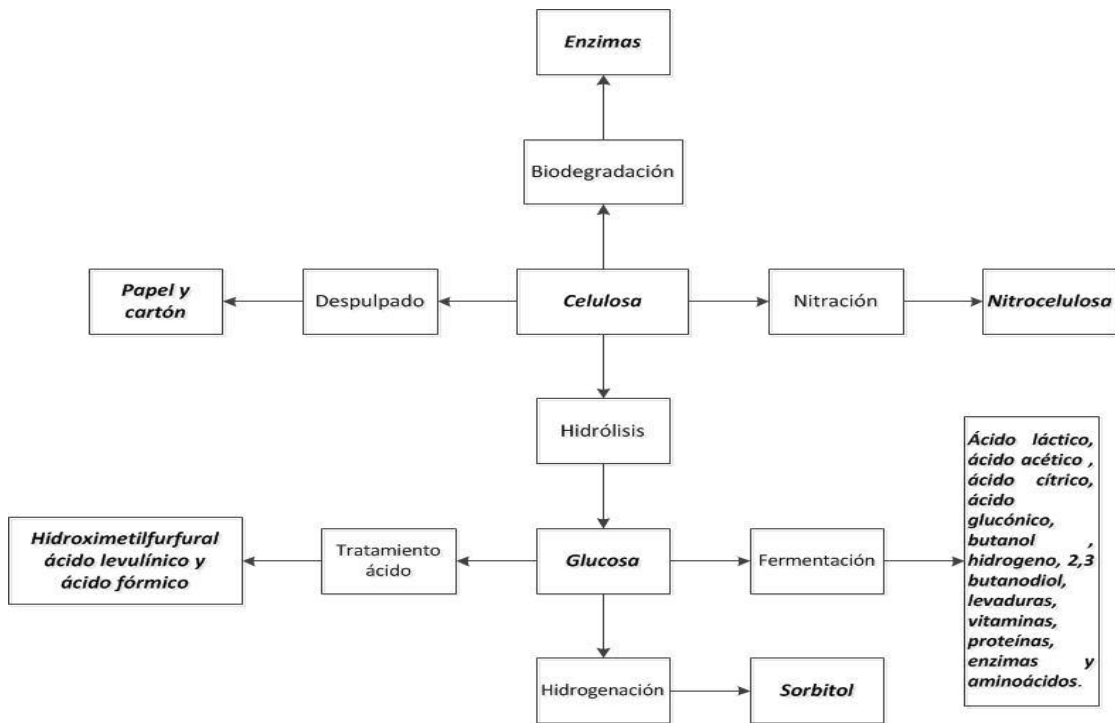


Diagrama 2 Posibles aplicaciones de la celulosa extraído de la película plateada y del bagazo del café

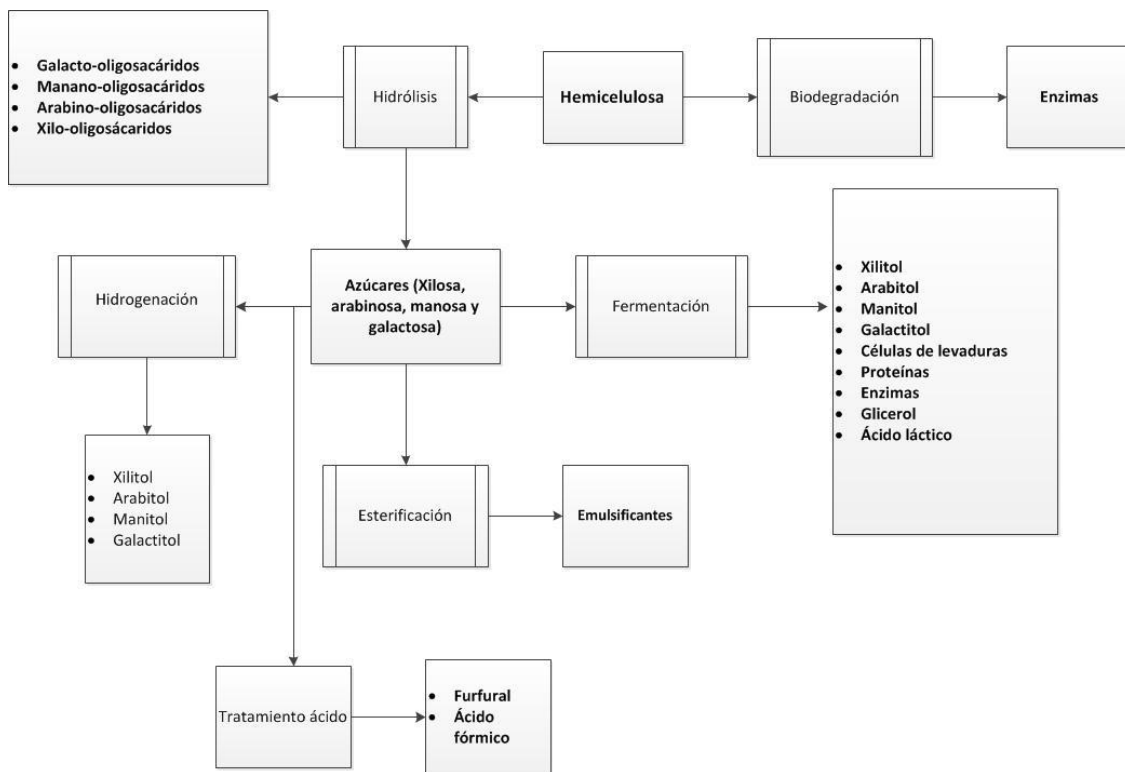


Diagrama 3 Posibles aplicaciones de la hemicelulosa de la película plateada y del bagazo del café



IV.2.1 Uso del bagazo de café como materia prima para obtener biodiesel

El café es uno de los productos agrícolas que más es empleado en la preparación de bebidas, de acuerdo a la Organización Internacional del Café (IOC) la producción mundial de café verde en el 2014 fue de 8,511,000 toneladas. El contenido de aceite es de entre 11 al 20% dependiendo del tipo de café. (Kondamudi, Mohapatra, & Misra, 2008)

El residuo de café en las cafeterías, generalmente se desecha, se puede emplear para la generación de biocombustible, carbón activado, y producción de etanol (Al-Hamamre, Foerster, Hartmann, Kröger, & Kaltschmitt, 2012). El bagazo de café tiene un gran potencial para producir biodiesel ya que se puede obtener entre un 10-16% de aceite (Kondamudi, Mohapatra, & Misra, 2008); ahora si suponemos que en promedio se extrae el 14 % de aceite de los residuos, se podrían obtener aproximadamente 1, 191,540 toneladas de biodiesel (Kwon, Yi, & Jae Jeon, 2013).

De las ventajas que tiene su aceite es que es muy estable ya que tiene un alto contenido de antioxidantes haciendo que no se descomponga tan rápido, que tenga bajos niveles de saponificación y que no se congele tan fácilmente (Al-Hamamre, Foerster, Hartmann, Kröger, & Kaltschmitt, 2012).

El proceso por el cual se obtendría el biodiesel del café se resume en tres pasos: extracción de la parte lipídica, transesterificación y lavados o purificación del biodiesel crudo. El diagrama 4 muestra desde la obtención del bagazo, la extracción hexánica del residuo, los productos que se obtiene y posible uso de los residuos desengrasado del café para que no sea un residuo que se vaya directamente a la basura.

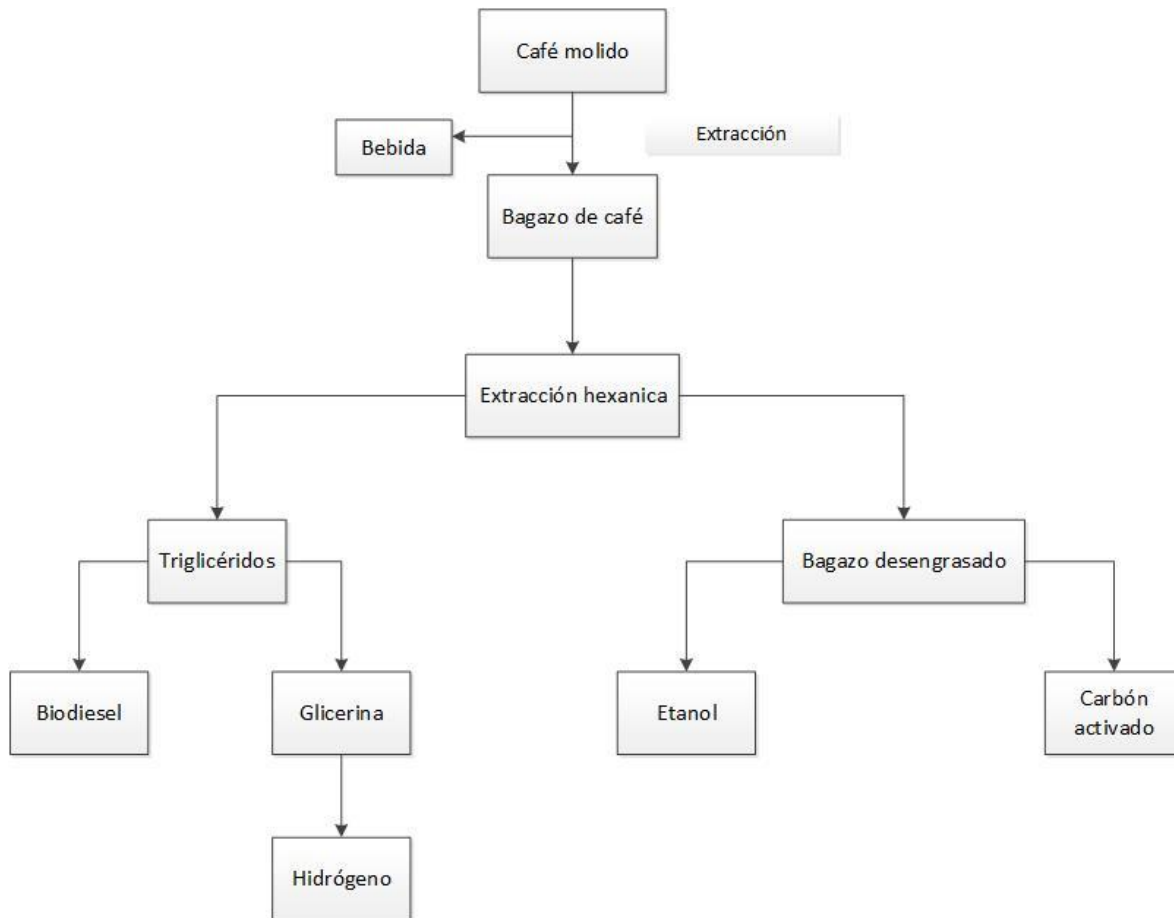


Diagrama 4 Producción de biodiesel y otros productos energéticos a través del bagazo de café

A partir de este punto se estarán haciendo análisis de los datos obtenidos, metodologías de trabajo y comparaciones entre de los artículos consultados, a través de tablas para comprender mejor la información.

La tabla 6 muestra las propiedades y el rendimiento de la extracción del aceite de café a partir del bagazo de café. El método de extracción del aceite empleado por todos los autores fue Soxhlet y se observa que los rendimientos de extracción van desde el 13% al 21.5%, la diferencia viene del tipo de disolvente empleado para la extracción del aceite, siendo la mezcla de 50% - 50% de hexano isopropanol la que brinda mayor rendimiento; pero se usa más el hexano por relación costo y recuperación del disolvente.



Caetano indica en su investigación que la cantidad de ácidos grasos libres del aceite es de 118.4 mg KOH/g, superando los 4 mg KOH/g para poder hacer una transesterificación directa y se necesite un pretratamiento previo, igualmente Al-Hamamre tiene una acidez que le impide lo mismo; que el índice de acidez este tan variado de un autor a otro es debido al origen y a la calidad del café que se utilizó. También esto se puede ver con el calor de combustión del aceite aunque no varía tanto como es el caso del índice de acidez. Dependiendo la calidad del aceite empleado es la calidad de biodiesel que se producirá.

Tabla 6 Comparación de calidad y rendimiento del aceite de café⁷

Parámetro	Abdullah	Caetano	Al-Hamamre
Rendimiento de extracción %	13.00	21.50	15.28
Índice de acidez(mg KOH/g muestra)	-	118.40	7.30
Índice de yodo (g I ₂ /100 de aceite)	-	54.30	-
Calor de combustión de aceite(KJ/g)	43.20	36.40	38.20
Disolvente empleado	hexano	50/50 v/v (hexano/ isopropanol)	hexano
Densidad a 15°C (g/mL)	-	9.17	-
Densidad a 25°C (g/mL)	0.89	-	1.10
Viscosidad cinemática a 40°C (mm ² /s)	-	22.23	55.47

La forma en que se trabajó el aceite de café se dividen en dos formas (ver tabla 7) dependiendo el tipo de catalizador empleado: NaOH y KOH. Tanto Al-Hamamre como Kondamundi emplearon KOH como catalizador, observándose que obtuvieron rendimientos hasta el 99% lo único que varía entre sus experimentos es el tiempo de reacción y la temperatura que emplearon. Siendo que Kondamundi empleo mayor temperatura y logró la reacción en menos tiempo, pero no brindan mayores datos sobre la calidad del biodiesel obtenido, desconociéndose si realmente es apto para los motores de diesel.

⁷ -Al-Hamamre, Z., Foerster, S., Hartmann, F., Kröger, M., & Kaltschmitt, M. (2012). Oil extracted from spent coffee grounds as a renewable source for fatty acid methyl ester manufacturing. *Fuel*, 96, 70-76.

-Caetano, N., Silva, V., & Mata, T. (2012). Valorization of Coffee Grounds for Biodiesel Production. *Chemical Engineering Transaction*, 26.

- Abdullah, M., & Koc, A. (2013). Oil removal from waste coffee grounds using two-phase solvent extraction. *Renewable Energy*(50), 965-970.



Por el otro lado Oliveira y Caetano emplearon como catalizador NaOH, obteniendo rendimientos similares pero menores a Al-Hamamre y a Kondamundi; también redujeron la cantidad de catalizador factor decisivo en la reacción. También se observa que emplearon distintas temperaturas y tiempos de reacción; aunque aquí no se ve que a mayor temperatura sea menor el tiempo de reacción. Aunque en cuanto los parámetros de calidad, ambos autores no realizaron todas las pruebas.

Caetano indica que su biodiesel es de 2.14 mg KOH/g que es superior para los parámetros de la ASTM y de la norma europea (0.5 mgKOH/g), pudiendo ser un factor que dañe al motor (ver tabla 2). Para el índice de yodo y la viscosidad cinemática se encuentra fuera de las normas. Mientras Oliveira reporta que su biodiesel tiene una viscosidad que se encuentra baja según la norma europea pero en la norteamericana entra perfectamente en el rango y es el único que realizó la determinación del calor de combustión, que se encuentra entre los parámetros del biodiesel superándolo un poco (35 KJ/g).

Tabla 7 Comparación de calidad y rendimiento del biodiesel de café⁸

Parámetro	Oliveira	Caetano	Al-Hamamre	Kondamundi
Rendimiento %	60.40	60.50	99.00	99.00
Índice de acidez(mg KOH/g muestra)	-	2.14	-	-
índice de yodo (g I ₂ /100 de biodiesel)	-	46.5	-	-
Calor de combustión de aceite(KJ/g)	38.94	-	-	-
Viscosidad cinemática a 40°C (mm ² /s)	3.10	12.88	-	5.84
Densidad a 25°C (g/mL)	8.92	9.10	-	-
Temperatura de reacción °C	55.0	60.00	60.00	70.00
Tipo de catalizador	NaOH	NaOH	KOH	KOH
Cantidad de catalizador %	1.00	1.00	1.50	1.50
Tiempo de reacción (h)	1.00	2.00	6.00	2.00
MeOH % (p/p)	-	40.00	-	40.00
Aceite: MeOH (proporción molar)	01:06	-	01:06	-

⁸- Al-Hamamre, Z., Foerster, S., Hartmann, F., Kröger, M., & Kaltschmitt, M. (2012). Oil extracted from spent coffee grounds as a renewable source for fatty acid methyl ester manufacturing. *Fuel*, 96, 70-76.

-Caetano, N., Silva, V., & Mata, T. (2012). Valorization of Coffee Grounds for Biodiesel Production. *Chemical Engineering Transaction*, 26.

- Kondamudi, N., Mohapatra, S., & Misra, M. (2008). Spent Coffee Grounds as a Versatile Source of Green Energy. *Journal of agricultural and Chemistry*, 56, 11757–11760.

-Oliveira, L., Franca, A., Camargos, R., & Ferraz, V. (2008). Coffee oil as a potential feedstock for biodiesel production. *Bioresource Technology*(99), 3244–3250.



Ahora bien estos parámetros de calidad varían debido a la calidad de la materia prima que se ha empleado ya que si de origen el bagazo es muy ácido o esta echado a perder, la calidad del biodiesel será inferior. Si se emplea el bagazo desde un principio y no se deja que se degrade se puede obtener un buen biodiesel que cumpla los parámetros de calidad que solicita la EN 14214 y la ASTM.

IV.2.2 Uso del bagazo de café como materia prima para obtener bioetanol

El bagazo de café es rico en azúcares que están polimerizados en la estructura de la hemicelulosa y celulosa, que corresponde casi al 45.3 % del peso seco del desperdicio. El bagazo de café llega a contener 46.8% de manosa, 30.4% galactosa, 19% de glucosa y 3.8% de arabinosa (Campos Vega, Loarca Piña, Vergara Castañeda, & Oomah, 2015). Otros autores reportan otros porcentajes de carbohidratos 45.8 % (Choi, Wi, Kim, & Bae, 2012) y hasta un 58.4% (Kwon, Yi, & Jae Jeon, 2013); La tabla 8 muestra las diferencias de composición química del bagazo de café debido a la variedad de los granos de café y el proceso de tostado que son sometidos (Campos Vega, Loarca Piña, Vergara Castañeda, & Oomah, 2015).

Tabla 8 Composición de azúcares del bagazo de café⁹

	Mussato	Choi	Know
Glucosa	19.00%	30.13%	0.68%
Manosa	46.50%	47.16%	68.49%
Galactosa	30.40%	17.90%	29.11%
Arabinosa	3.80%	4.80%	1.71%

⁹ Choi, I., Wi, S., Kim, S.-B., & Bae, H.-J. (2012). Conversion of coffee residue waste into bioethanol with using popping pretreatment. *Bioresource Technology*(125), 132–137.

-Mussatto, S., Machado, E., Martins, S., & Teixeira, J. (2011). Production, Composition, and Application of Coffee. *Food Bioprocess Technoly*, 4, 661–672.

-Kwon, E., Yi, H., & Jae Jeon, Y. (2013). Sequential co-production of biodiesel and bioethanol with spent coffee grounds. *Bioresource Technology*, 136, 475-480.



Con los porcentajes de azúcares anteriormente mencionados, el bagazo de café es una materia prima rica en azúcares fermentables que se pueden emplear para la producción de bioetanol (Choi, Wi, Kim, & Bae, 2012). Además que se puede emplear el residuo que se genera en el proceso de obtención del biodiesel (Rocha, y otros, 2014).

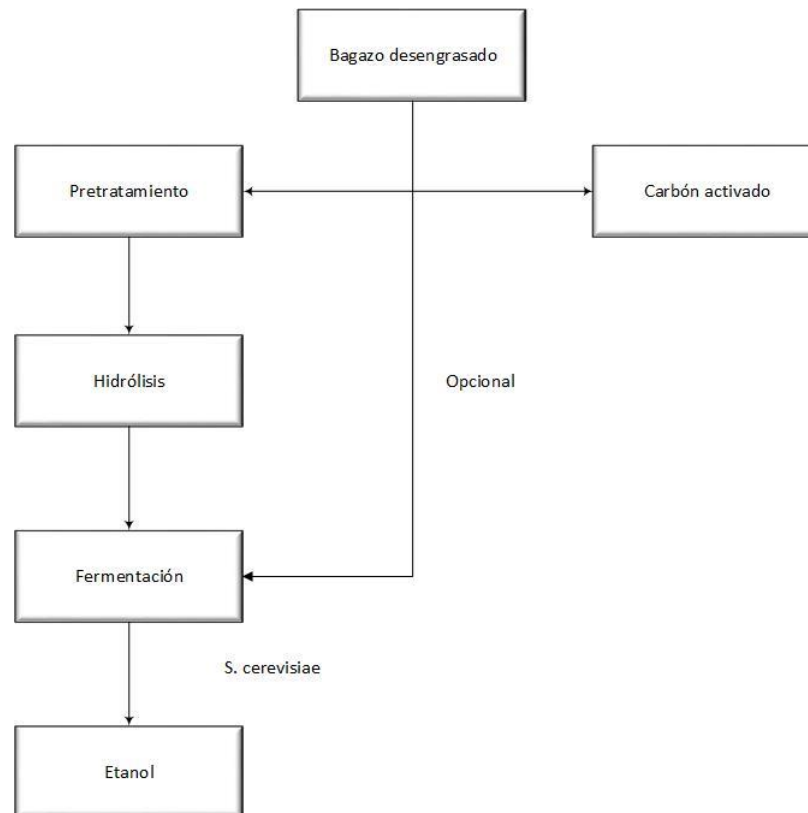


Diagrama 5 Uso del bagazo desengrasado como materia prima para el bioetanol

La producción de etanol empleando el bagazo de café es atractivo debido a su bajo costo, su abundancia y que no emplea ni alimentos ni tierras de cultivo para su desarrollo. Otro punto a favor es que el bagazo de café tiene un alto contenido de lignina siendo un factor limitante para su empleo como alimento de animales (Mussatto S. , Machado, Carneiro, & Teixeira, 2012).

La investigación sobre la obtención de bioetanol empleando como materia prima el bagazo de café es limitada (Mussatto S. , Machado, Carneiro, & Teixeira, 2012). Mussatto hace su investigación empleando del bagazo del café como materia



prima para la producción del bioetanol, usando distintas levaduras para su fermentación. Entre las levaduras empleadas fue *Saccharomyces cerevisiae*, *Pichia stipitis* y *Kluyveromyces fragilis*. Concluyendo que la *Saccharomyces cerevisiae* era la mejor levadura ya que se obtenían 0.26 g de etanol por g de materia fermentable en 24 horas a comparación de la *Pichia stipitis* donde se obtenía el mismo rendimiento pero durante 30 horas.

Mussatto concluye que la *Saccharomyces cerevisiae* es la levadura más eficiente para fermentar los azúcares del bagazo de café. A partir de aquí las siguientes investigaciones se dedican a la búsqueda del pretratamiento y las condiciones ideales de fermentación para obtener el máximo rendimiento. La tabla 9 Muestra los distintos tipos de pretratamientos que se emplearon para la obtención de las hexosas de la materia prima.

Los autores muestran distintas formas de obtener los azúcares fermentables del bagazo de café. Kwon realiza un tratamiento con ácido sulfúrico y después una hidrólisis enzimática, siendo el único que realiza este tipo de ruta, los demás realizan un solo tipo de pretratamiento. Como se observa de la tabla anterior tres de los cinco autores hicieron un hidrólisis con ácido sulfúrico, donde el único que no reporto la concentración de ácido empleado fue Mussatto, a cambio reporta una relación de 10 g de ácido sulfúrico por gramo de bagazo de café; Rocha por su parte reporta que las condiciones de trabajo con pretratamiento ácido es de 0.4 mol/L de ácido sulfúrico en un Autoclave a condiciones de temperatura iguales que Kwon.

Por su parte Choi realiza un pretratamiento empleando el Popping, el cual se basa en la ruptura de la lignocelulosa por cambio de presión y temperatura, de ahí realiza una sacarificación y fermentación simultaneas. Tehrani nada más realizo una cocción del bagazo para obtener los azúcares fermentables para después proceder a la fermentación.



Tabla 9 Tipos de pretratamientos y condiciones de trabajo empleados para obtención de azúcares del bagazo de café¹⁰

Tipo de pretratamiento	Condiciones de trabajo	Kwon	Rocha	Choi	Mussatto	Tehrani
Pretratamiento (H₂SO₄)	Concentración de H ₂ SO ₄	1.00%	0.4 mol/L	-	-	-
	Tiempo pretratamiento (min.)	60.00	15.00	-	45.00	-
	Temperatura (°C)	121.00	121.00	-	163.00	-
	pH ajuste	5.00	5.00	-	5.50	-
Hidrólisis enzimática	Enzima	<i>Celulosa (CTec2)</i>	-	-	-	-
	Tiempo tratamiento (h)	24.00	-	-	-	-
	Temperatura (°C)	50.00	-	-	-	-
	Agitación	200.00 rpm	-	-	-	-
	Rendimiento de extracción de glucosa	50.00 g/L	-	-	-	-
Popping	Presión (MPa)	-	-	1.47	-	-
	Temperatura (°C)	-	-	150.00	-	-
	Tiempo (min)	-	-	10.00	-	-
	Rendimiento de extracción de azúcares fermentables	-	-	34.40 g/L	-	-
Cocción	Temperatura (°C)	-	-	-	-	95.00
	Tiempo (min.)	-	-	-	-	30.00

Otra cosa que se observa en estas investigaciones es como Kwon experimenta con el aceite del bagazo de café para obtener bioetanol, obteniendo un rendimiento ligeramente menor (0.43 g_{etanol} /g_{glucosa}) a comparación del bagazo. En cambio Rocha emplea el bagazo de café desengrasado para la obtención de bioetanol como una propuesta de coproducción de biodiesel y bioetanol de la misma materia prima.

Rocha y Kwon solo los únicos que exploran una coproducción del biodiesel y del bioetanol, usando el bagazo del café desengrasado para la síntesis del bioetanol. Por otro lado Tehrani explora el empleo del bagazo para la producción de bioetanol y de carbón activado en forma paralela proponiendo así una biorefinería.

¹⁰ - Choi, I., Wi, S., Kim, S.-B., & Bae, H.-J. (2012). Conversion of coffee residue waste into bioethanol with using popping pretreatment. *Bioresource Technology*(125), 132–137.

- Kwon, E., Yi, H., & Jae Jeon, Y. (2013). Sequential co-production of biodiesel and bioethanol with spent coffee grounds. *Bioresource Technology*, 136, 475-480.

- Mussatto, S., Machado, E., Carneiro, L., & Teixeira, J. (2012). Sugars metabolism and ethanol production by different yeast strains from coffee industry wastes hydrolysates. *Applied Energy*(92), 763–768.

- Rocha, M., Lima de Matos, L., Pinto de Lima, L., Silva Figueiredo, P., Lucena, I., Fernandes, F., & Barros Gonçalves, L. (2014). Ultrasound-assisted production of biodiesel and ethanol from spent coffee grounds. *Bioresource Technology*(167), 343–348.

- Tehrani, N., Aznar, J., & Kiros, Y. (2015). Coffee extract residue for production of ethanol and activated carbons. *Journal of Cleaner Production*(91), 64-70.

Tabla 10 Condiciones de trabajo y rendimientos del bioetanol¹¹

Técnica de obtención de etanol	Condiciones de trabajo	Kwon	Rocha	Choi	Tehrani	Mussatto
Fermentación	Levadura	<i>S. cerevisiae</i> (KTCT 7226)	<i>S. cerevisiae</i>	-	<i>S. cerevisiae</i>	<i>S. cerevisiae</i> (RL-11)
	Concentración de la levadura	10%	10 g/L	-	30.00 mg/g desperdicio	1.00 g/L
	Temperatura (°C)	30.00	30.00	-	30.00	30.00
	Tiempo (h)	40.00	10.00	-	48.00	48.00
	Rendimiento	0.46 (g etanol/g glucosa)	0.50 (g etanol/g glucosa)	-	0.13 (g etanol/g de desperdicio)	0.26 (g etanol/g azúcares fermentables)
Sacarificación y fermentación simultaneas	Levadura	-	-	<i>S. cerevisiae</i> (KTC7906)	-	-
	Enzima	-	-	Celulasa (Cellulclast 1.5L)	-	-
	Concentración de la enzima	-	-	18.30 mg/g Residuo	-	-
	Temperatura (°C)	-	-	37.00	-	-
	Tiempo (h)	-	-	96.00	-	-
	Rendimiento (g etanol/g azúcares fermentables)	-	-	0.44	-	-

Las técnicas de trabajo se dividieron en dos: fermentación directa después del pretratamiento y la Sacarificación y fermentación simultánea. La tabla 10 resume tanto las condiciones de trabajo y los rendimientos obtenidos, cabe destacar que en ningún artículo se realizaron pruebas sobre la calidad del bioetanol obtenido; desconociéndose si este combustible ya sea solo o en mezcla puede perjudicar al motor de los coches. También que no está homogenizado el parámetro de rendimiento el cual reportan ya que algunos lo hacen con respecto al etanol obtenido de la glucosa otros con azúcares fermentables y otros directamente de la materia prima.

¹¹ - Choi, I., Wi, S., Kim, S.-B., & Bae, H.-J. (2012). Conversion of coffee residue waste into bioethanol with using popping pretreatment. *Bioresource Technology*(125), 132–137.

- Kwon, E., Yi, H., & Jae Jeon, Y. (2013). Sequential co-production of biodiesel and bioethanol with spent coffee grounds. *Bioresource Technology*, 136, 475-480.

- Mussatto, S., Machado, E., Carneiro, L., & Teixeira, J. (2012). Sugars metabolism and ethanol production by different yeast strains from coffee industry wastes hydrolysates. *Applied Energy*(92), 763–768.

- Rocha, M., Lima de Matos, L., Pinto de Lima, L., Silva Figueiredo, P., Lucena, I., Fernandes, F., & Barros Gonçalves, L. (2014). Ultrasound-assisted production of biodiesel and ethanol from spent coffee grounds. *Bioresource Technology*(167), 343–348.

- Tehrani, N., Aznar, J., & Kiros, Y. (2015). Coffee extract residue for production of ethanol and activated carbons. *Journal of Cleaner Production*(91), 64-70.



Como se mencionó anteriormente el rendimiento máximo teórico era de 0.51Kg etanol / Kg glucosa (Balat, Balat, & Oz, 2008), tomando este rendimiento y la forma en que se expresan sus unidades son dos autores que son: Kwon y Rocha, con rendimientos cercanos al máximo teórico (ver tabla 10). Cabe destacar que aunque sus rendimientos son muy próximos, su tiempo de reacción fue menor de este Rocha y además de que empleo solamente un pretratamiento ácido y una levadura comercial para realizar la fermentación. Mientras de Kwon además del pretratamiento ácido hace uso de enzimas y obtiene un rendimiento menor al de Rocha.

Choi reporta 0.44 g etanol / g azúcares fermentables y Mussatto 0.26 g etanol / g azúcares fermentable , la diferencia resalta por los tratamientos empleados para la disponer de los azúcares fermentables y del tipo de fermentación que se empleó. Mussato emplea solamente la levadura, mientras que Choi usa al mismo tiempo la levadura y la enzima para elevar el rendimiento de etanol. Tehrani sólo coció el bagazo de café y no hidrolizando la celulosa y hemicelulosa para liberar las hexosas y que fueran aprovechadas por la levadura.

En la tabla 8 se vio que el bagazo de café no sólo contiene glucosa sino que también otras hexosas, así que lo correcto sería reportar con azucares fermentables.

Otra aplicación del etanol obtenido del bagazo es de un licor que presenta el aroma característico del café; dando como resultado del análisis sensorial como una bebida agradable con olor, sabor a café y con una calidad aceptable para el consumo humano. Aunque se considera esta bebida agradable al paladar, es descrito como ligeramente picante y puede mejorar el sabor mediante el envejecimiento del destilado. Los azucares fermentables son obtenidos por un proceso hidrotermal con el fin de conservar el aroma de café, la desventaja es que obtiene un menor rendimiento (3.5 g/L) de extracción de azucares a comparación de un tratamiento con el uso de ácido sulfúrico. La fermentación emplea la misma levadura que se usa para la obtención del bioetanol (Sampaio, Dragone, Vilanova, & Oliveira, 2013).



IV.2.3 Uso del bagazo de café como materia prima de carbón activado

El carbón activado es una serie de carbonos preparados artificialmente a través de un proceso de carbonización, para que tengan un alto grado de porosidad y una alta superficie interna (Luna, Gonzalez, Gordon, & Martin, 2007). Está conformado por estructuras microcristalinas que difiere con el grafito por el espacio entre las capas y la orientación desordenada de éstas. La estructura interna del carbón activado es desarrollada y caracterizada por poros de diferentes tamaños y formas (Rocha Lay, 2011); haciéndolo accesible para los procesos de adsorción (Luna, Gonzalez, Gordon, & Martin, 2007)

El carbón activado es considerado como un producto versátil ya que tiene diferentes aplicaciones, desde adsorbente de residuos, control de contaminantes, purificación de agua, empleado en sistemas electroquímicos como baterías y capacitadores, alimentos y bebidas y hasta en la industria del acero (Tehrani, Aznar, & Kiros, 2015). Es fabricado a partir de una amplia gama de materiales carbonáceos desde el carbón mineral, madera, cáscara de coco y huesos de residuos agroindustriales (Rocha Lay, 2011); básicamente biomasa con alto contenido de carbono y que sea desperdicio puede ser empleado como materia para la producción de carbón activado (Reffas, Bernardet, David, Reinert, & Bencheikh Lehocineb, 2010).

Las propiedades del carbón activado dependen del proceso de activación y de la materia prima que se emplee (Lamine, y otros, 2014). Los principales procesos de fabricación del carbón activado se dividen en dos (diagrama 6):

- Activación física: Carbonización de la materia prima en una atmósfera inerte (400-800 °C), seguido de una gasificación parcial con aire, vapor de agua o dióxido de carbono (800-1000°C) (Rocha Lay, 2011). La porosidad es el resultado de la gasificación de la materia prima a altas temperaturas, que durante la carbonización se eliminan elementos como hidrógeno y el oxígeno para que quede un esqueleto carbonoso. En la gasificación la atmósfera es oxidante que elimina los productos volátiles y átomos de



carbono; así aumentado el volumen de poros y área superficial. (Luna, Gonzalez, Gordon, & Martin, 2007)

- Activación química: La materia prima es impregnado por un agente químico (H_3PO_4 o $ZnCl_2$), después es pasa a por un tratamiento térmico (500-700°C) y posteriormente lavado para eliminar el agente químico (Rocha Lay, 2011). La porosidad es obtenida por reacciones de deshidratación (Luna, Gonzalez, Gordon, & Martin, 2007) del agente químico y retardan la formación de alquitrans durante el proceso de activación y carbonización (Lamine, y otros, 2014).

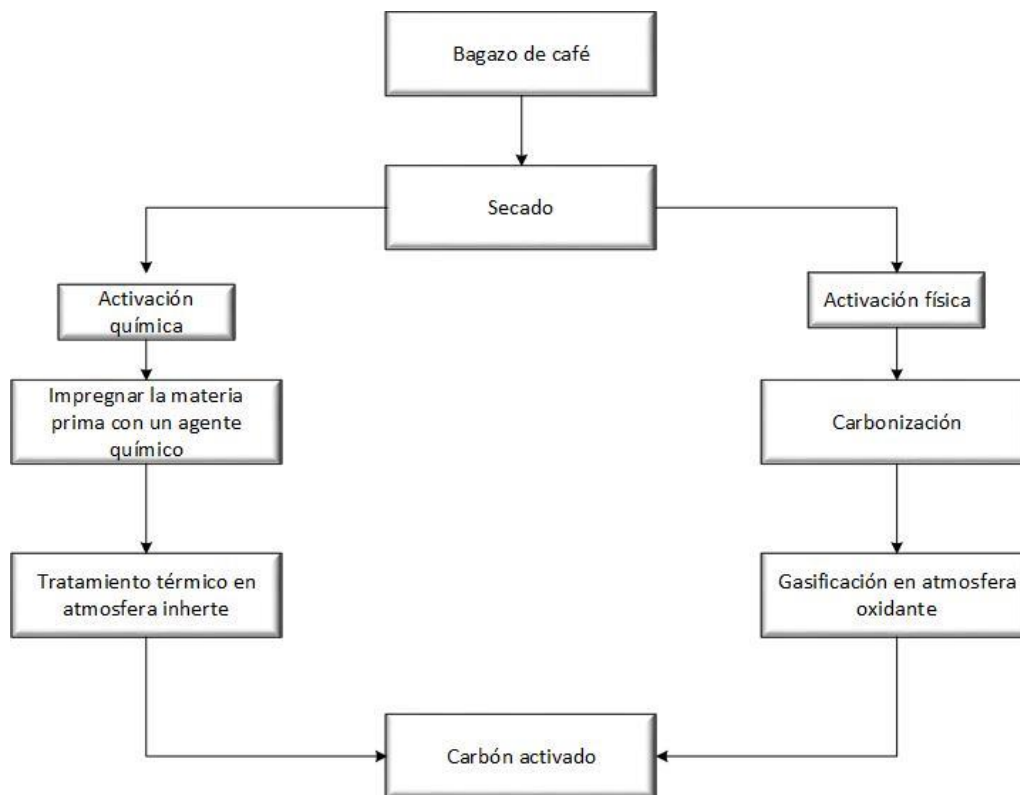


Diagrama 6 Procesos de activación del carbón activado

Durante la activación química el paso de carbonización y de activación se realiza en un sólo paso, necesita menos temperatura, da mejores rendimientos, menos tiempo de activación y da una alta proporción de mesoporos en el área superficial (Reffas, Bernardet, David, Reinert, & Bencheikh Lehocineb, 2010); aunque se puede emplear diferentes agentes químicos en función de las características deseadas para el carbón activado (Lamine, y otros, 2014).La activación física



permite obtener un carbón activado con mayor proporción de microporos y son adecuados para la remoción de microcontaminantes, compuestos de olor y sabor (Rocha Lay, 2011).

Casi el 80% del carbón activado que se emplea en México es de importación siendo los principales abastecedores: Estados Unidos, Países Bajos, Reino Unido, Alemania, Canadá y Francia. A pesar de que la materia prima que se emplea es barata los carbones activados tienen un alto costo que va desde los \$1200 dólares hasta los \$ 1400 dólares por tonelada (Luna, Gonzalez, Gordon, & Martin, 2007).

Ya sea que la calidad del bagazo no sea óptima para su empleo como materia prima para la obtención de bioetanol y del biodiesel o que se emplee el residuo del café después de la obtención de los biocombustibles anteriormente mencionados; se puede emplear para la generación de carbón activado. Distintos autores han empleado el bagazo de café como materia prima de bajo costo para la captación de contaminantes provenientes de la industria textil y hasta de fenoles (ver tabla 11).

Los autores prefirieron hacer activación química debido a que no emplean altas temperaturas, menor tiempo y que pueden obtener tanto mesoporos como microporos variando desde la temperatura de carbonización agente químico y la concentración del mismo. Tehrani fue el único que empleó ambas técnicas de activación de carbón activado para el bagazo del café, concluyendo que la activación física había una mayor cantidad de microporos con un área superficial menor a la activación química; no determinó cuál era de las dos mejor si no da alternativas para la creación de carbonos activados de distintas calidades. Aunque el área superficial obtenida fue mucho menor a la obtenida por otros autores.

Reffas determinó que conforme se iba aumentando la impregnación del ácido fosfórico la estructura porosa y el área superficial pueden ser controladas, llegando a tener un carbón activado con una alta área superficial siendo así un excelente adsorbente para moléculas contaminantes orgánicas de tamaño medio y un volumen de poro similar al carbón activado comercial. El autor empleó este carbón activado para determinar si era apto para adsorber el Rojo de nylosan, que



es un colorante empleado en para teñir el nylon. También se observa que la temperatura de carbonización es de las menores.

Tabla 11 Condiciones de trabajo y parámetros de calidad del carbón activado a partir del bagazo de café¹²

	Ma	Reffas	Tehrani	Kante	C.A comercial
Condiciones de trabajo					
T. Secado (°C)	50.00	50.00	120.00	120.00	-
T. Secado (h)	-	48.00	24.00	48.00	-
Activación	H ₃ PO ₄	180% H ₃ PO ₄	40 % H ₃ PO ₄	1:1 ZnCl ₂	-
T. Activación (°C)	450.00	450.00	600.00	800.00	-
ΔT (°C/min)	-	10.00	-	10.00	-
Parámetros de calidad					
Rendimiento (%)	-	32.00	34.90	-	-
S _{BET} (m ² /g)	1110	925	696	905	1440
T. poro (Å)	1.20	-	33.70	[10-30]	-
V. poro (cm ³ /g)	-	0.70	0.59	0.49	0.71

Ma no menciona en el artículo la concentración de ácido fosfórico que empleó para impregnar el bagazo de café, pero a comparación de otros no dejó la materia prima con el ácido reposando sino que aplicó ultrasonido seguido de la carbonización. Dando como resultado un carbón activado que tiene un área superficial muy similar al comercial y menciona que puede adsorber el n-butano.

Los tres anteriores autores emplean como agente químico el ácido fosfórico ya que se ha encontrado que no tiene carácter contaminante (ver tabla 11), puede recuperarse y reciclarse; este agente químico puede generar tanto microporos y mesoporos con una área superficial específica dependiendo de la temperatura de la activación (Reffas, Bernardet, David, Reinert, & Bencheikh Lehocineb, 2010).

¹² - Kante, K., Nieto Delgado, C., Rangel Mendez, J., & Bandosz, T. (2012). Spent coffee-based activated carbon: Specific surface features and their importance for H₂S separation process. *Journal of Hazardous Materials*, 141– 147.

- Ma, X., & Ouyang, F. (2013). Adsorption properties of biomass-based activated carbon prepared with spent coffee grounds and pomelo skin by phosphoric acid activation. *Applied Surface Science*(268), 566– 570.

- Reffas, A., Bernardet, V., David, B., Reinert, L., & Bencheikh Lehocineb, M. (2010). Carbons prepared from coffee grounds by H₃PO₄ activation: Characterization and adsorption of methylene blue and Nylosan Red N-2RBL. *Journal of Hazardous Materials*(175), 779–788.

- Tehrani, N., Aznar, J., & Kiros, Y. (2015). Coffee extract residue for production of ethanol and activated carbons. *Journal of Cleaner Production*(91), 64-70.



Kante emplea el cloruro de zinc como agente químico, ya que buscaba generar un carbón activado con poros con diámetro entre 10-30 nm, para poder albergar la oxidación del sulfuro de hidrógeno acuoso. Ya que este compuesto químico que es un subproducto de muchos procesos industriales (Facultad de Química UNAM, 2016).

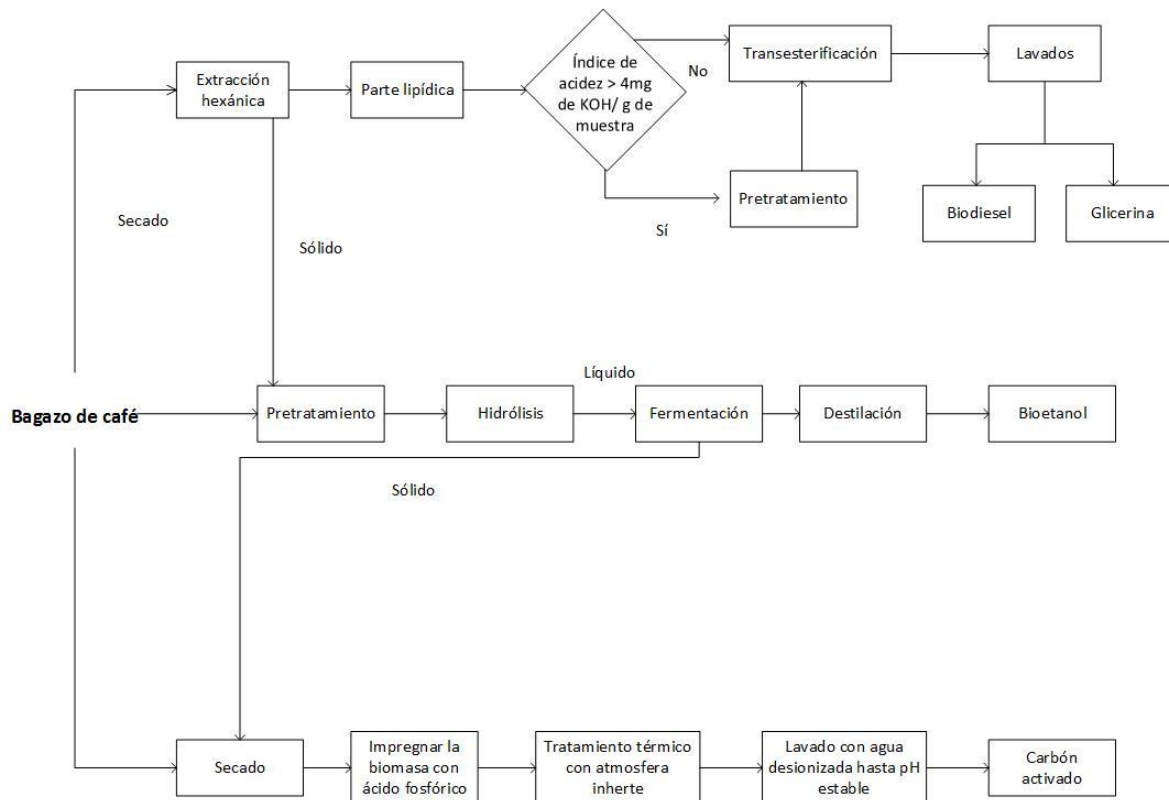


Diagrama 7 Diagrama de bloques para el aprovechamiento del bagazo de café

El diagrama 7 es la propuesta de aprovechamiento de bagazo de café, la cual muestra como desde el bagazo recién obtenido pasa por el proceso de obtención de biodiesel, el residuo sólido que se generó es aprovechado para generar bioetanol y a su vez el residuo sólido que sale del proceso es destinado a convertirse en carbón activado. En caso de que la materia prima no esté en buenas condiciones para ser usada como biodiesel, se podría emplear para la creación de bioetanol y seguir la cadena del proceso hasta la formación del carbón activado.



IV.2.4 Uso de la película plateada como fuente de fibra dietética

La FAO define la fibra dietética como componentes de origen vegetal, que son resistentes a las enzimas digestivas del hombre y químicamente son la suma de polisacáridos (Pak, 2016). También es definida como “todos los polisacáridos intrínsecos de la pared celular” (Cedillo Martínez, 2012). Se puede clasificar de acuerdo a que tan solubles es en agua: fibra soluble (gomas, ceras, celulosas modificadas, mucílagos, polisacáridos de algas, ciertas hemicelulosas y celulosa) y fibra insoluble (celulosa, hemicelulosa y lignina) (Pak, 2016). Tener una dieta alta en fibra dietética tiene sus ventajas como: la reducción de los niveles de colesterol y glucosa en la sangre, laxante y una sensación de saciedad (Cedillo Martínez, 2012).

La película plateada considerada como el único desecho que se genera en el proceso del tostado, puede ser fácilmente recolectada en gran cantidad de las tostadoras de café, siendo un recurso que puede ser aprovechado por su alto contenido de fibra dietética. Como se mencionó anteriormente la película plateada tiene un alto contenido de fibra dietética (50- 60%), donde el 15 % es de fibra dietética soluble y el 85 % de fibra insoluble, y no varían estos rendimientos por tipo o variedad de café. También se ha encontrado que la fibra dietética de la película plateada se encuentra en mayor abundancia comparación de alimentos como la manzana y la avena (Narita & Inouye, 2014).

(Narita & Inouye, 2014) menciona que el consumo la película plateada puede ser eficaz para la prevención y el tratamiento de diabetes, ya que la fibra insoluble es capaz de controlar el tiempo de absorción de los carbohidratos. Las investigaciones todavía no se encuentran lo suficientemente avanzadas ya que muchos de los resultados se encuentran in vitro y no en vivo. Tampoco se han hecho los suficientes estudios para comprobar la toxicidad de la ingesta directa de la película plateada.

Aprovechando la fibra dietética de la película plateada, se planteó la posibilidad de usarla como fuente para enriquecer de la harina de pan Barbari (pan Iraní); ya que



buscaban obtener productos horneados con baja cantidad en calorías y un alto contenido de fibra dietética. Para esto no se empleó directamente la película plateada sino que recibió un pretratamiento con peróxido de hidrogeno para la ruptura de la lignina y la hemicelulosa que impedía que la película plateada se hidratara y se hinchara, debilitando así la masa dando una textura arenosa y una pobre apariencia al producto obtenido.

El siguiente diagrama resume tanto la metodología que se empleó para la obtención del pan así como sus condiciones de trabajo. El resultado fue un pan con mayor cantidad de fibras dietéticas totales (2.95 g) a comparación del que no fue enriquecido con la película plateada pretratada (0.47 g); empleando 5 g de película plateada pretratada por cada 100 g de harina de trigo para hornear el pan.

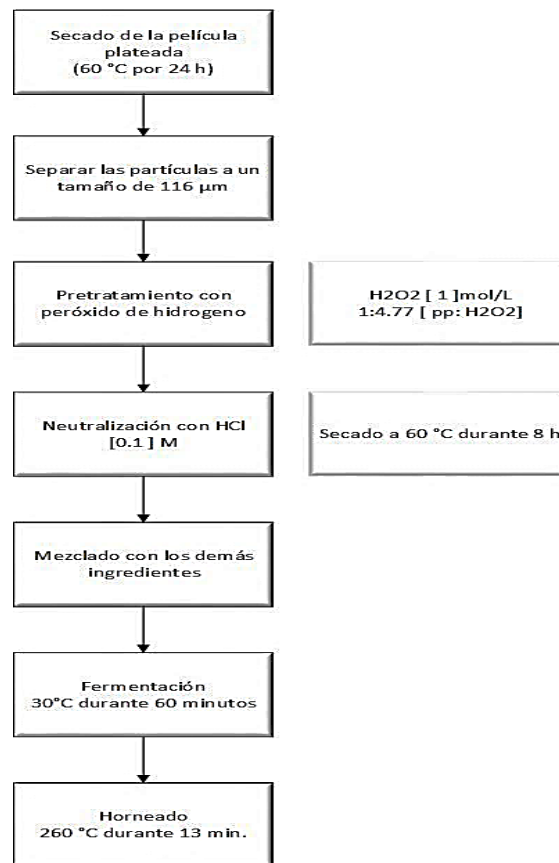


Diagrama 8 Metodología y condiciones de trabajo para la obtención de pan enriquecido con la película plateada



Con esto se puede emplear la película plateada pretratada con hidróxido de sodio para enriquecer la harina con fibras dietéticas. El empleo del hidróxido de sodio podría ser la solución para que se amplíe más el uso de la película plateada en alimentos y no se vea limitada por la hemicelulosa y la lignina (Pourfarzad, Mahdavian-Mehr, & Sedaghat, 2013).

Capítulo V: Conclusiones.

En función de los artículos revisados se tienen las siguientes conclusiones:

- I. En México no se han hecho estudios suficientes sobre el aprovechamiento de los residuos del café. México se encuentra entre los primeros lugares en producción de café, así mismo los residuos que se generan. Estos al no ser aprovechados generan contaminación y pérdidas económicas al no ser utilizados.
- II. En la última década, se han realizado distintas investigaciones sobre el aprovechamiento del bagazo de café. Se encontraron varios artículos enfocados en el empleo del bagazo, como materia prima para la producción del biodiesel, del bioetanol, que pueden satisfacer una demanda actual de nuevas fuentes de energía y no contaminantes para el transporte, del carbón activado para purificación de contaminantes en el agua y como bebida alcohólica.
- III. Con respecto a la utilización del bagazo de café como materia prima para la producción del biodiesel, el bagazo al ser un desperdicio en primera instancia, es una fuente barata para la generación de biodiesel que permiten reducir los costos de producción. Es importante resaltar, que los resultados de los análisis recopilados acerca del biodiesel, son variados por distintos factores, entre ellos el índice de acidez del aceite de café que hace forzoso el uso de un pretratamiento y el rendimiento de la reacción el cual depende del tipo de catalizador empleado, tiempo de reacción y la relación metanol-catalizador. Por otra parte en sus investigaciones no se realizaron todos estudios y análisis necesarios para la determinación de los parámetros de calidad del biodiesel que establecen las normas europeas y norteamericanas. Por lo anterior, si existiera interés para llevar a cabo este tipo de proyectos en México, sería necesario un estudio preliminar de las características y propiedades del aceite del bagazo de café mexicano.

- IV. El empleo del bagazo de café para la obtención de alcohol se divide en dos vertientes , la primera para el uso como combustible y el otro como bebida alcohólica, usos factibles de obtener etanol del bagazo por su alto contenido de azúcares fermentables (45.6%).
- V. Para la obtención del bioetanol todos los autores emplean *Saccharomyces cerevisiae* como la levadura más eficiente, aunque algunos usaron variantes de esta levadura, así como distintos tipos de técnicas de fermentación. En este punto se observa que la mayoría de los autores redactaban sus rendimientos en distintas formas sin que hubiese un criterio unificado, tampoco se observó que se hayan realizado estudios para la determinación de la calidad del bioetanol puro o en mezcla.
- VI. Se encontró que de bebida alcohólica obtenida del bagazo del café, es descrita como una bebida agradable con olor, sabor a café y con una calidad aceptable para el consumo humano, con un rendimiento de 3.5 gramos por litro empleándose la misma levadura que se usó en la obtención del bioetanol con un alto potencial para la generación de una nueva industria.
- VII. No se hace mención de la disposición final del residuo generado después de la obtención de los biocombustibles, que estos pueden ser empelados como materia prima para la obtención de carbón activado para la captación de contaminante provenientes de la industria textil. Se puede emplear como agente químico el ácido fosfórico ya que se ha encontrado que no tiene carácter contaminante puede recuperarse y reciclarse; este agente químico puede generaran tanto microporos y mesoporos con una área superficial específica dependiendo de la temperatura de la activación.
- VIII. Este documento da las bases para la implementación de una biorefinería en el cual aprovechamiento del bagazo sea íntegro y no de manera aislada; es decir que no nada más de este desecho se aproveche para obtener alguno de estos productos sino que se obtengan más de uno a través en una sola cadena de producción y que sea más rentable. Dándose las condiciones de reacción así como pretratamientos que fueron empleados para obtener el

biodiesel, bioetanol y carbón activado. Es necesario complementar estas investigaciones estudiando el bagazo del café mexicano así como los parámetros de calidad del biodiesel y del bioetanol para que no afecten a los motores de combustión interna.

- IX. En la película plateada se encuentran distintas sustancias que pueden ser aprovechadas, pero la fibra dietética es la de mayor rendimiento y fácil de obtener a comparación de los antioxidantes.
- X. La fibra dietética obtenida de la película plateada puede ser eficaz para la prevención y el tratamiento de diabetes, ya que la fibra insoluble es capaz de controlar el tiempo de absorción de los carbohidratos y puede ser empleada para enriquecer la harina de pan.

VI: Bibliografía

- Abdullah, M., & Koc, A. (2013). Oil removal from waste coffee grounds using two-phase solvent extraction. *Renewable Energy*(50), 965-970.
- Adewale, P., Dumont, M.-J., & Ngadi, M. (2015). Recent trends of biodiesel production from animal fat wastes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*(45), 574–588.
- Aguirre Hernández, O. R., & Rodríguez Alvear, O. (2009). *Estudio de reacciones catalíticas importantes en la producción de biodiesel: esterificación y transesterificación*. México: Tesis UNAM.
- Al-Hamamre, Z., Foerster, S., Hartmann, F., Kröger, M., & Kaltschmitt, M. (2012). Oil extracted from spent coffee grounds as a renewable source for fatty acid methyl ester manufacturing. *Fuel*, 96, 70-76.
- Alleman, T., Fouts, L., & Chupka, G. (2011). *Quality Parameters and Chemical Analysis for Biodiesel Produced in the United States in 2011*. National Renewable Energy Laboratory.
- Alptekin, E., & Canakci, M. (2009). Characterization of the key fuel properties of methyl ester–diesel fuel blends. *Fuel*, 88, 75-80.
- Alvarado Soto, M., & Rojas Cuberto, G. (2007). *El cultivo y beneficiado del café*. Costa Rica: Estatal a Distancia.
- Aransiola, E., Ojumu, T., Oyekola, O., Madzimbamuto, T., & Ikhu-Omoregbe, D. (2014). A review of current technology for biodiesel. *bio mass and bio energy*, 61, 276-297.
- Arshadi, M., & Grundberg, H. (2014). 9 – Biochemical production of bioethanol. En *Handbook of Biofuels Production*. Cambridge, Reino Unido: Woodhead Publishing.
- Balat, M., Balat, H., & Oz, C. (2008). Progress in bioethanol processing. *Progress in Energy and Combustion Science*(38), 551–573.

- Barroso Castillo, J. (s.f.). *¿Qué es el octanaje?* Recuperado el 06 de Junio de 2016, de <http://www.ref.pemex.com/octanaje/que.htm>
- Bhuiya, M., Rasul, M., Khan, M., Ashwath, N., & Azad, A. (2015). Prospects of 2nd generation biodiesel as a sustainable fuel Part: 1 selection of feedstocks, oil extraction techniques and conversion technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- Brunschwig, C., Moussavou, W., & Blin, J. (2012). Use of bioethanol for biodiesel production. *Progress in Energy and Combustion Science*, 38, 283-301.
- Bustamante García, J. I. (2014). *Estudio cinético de la reacción de transesterificación de aceite de soya con metanol en presencia de catalizador heterogéneo*. México: Tesis UNAM.
- Caetano, N., Silva, V., & Mata, T. (2012). Valorization of Coffee Grounds for Biodiesel Production. *Chemical Engineering Transaction*, 26.
- Campos Vega, R., Loarca Piña, G., Vergara Castañeda, H. A., & Oomah, B. D. (2015). Spent coffee grounds: A review on current research and future prospects. *Trends in Food Science & Technology*(45), 24-36.
- Cedillo Martínez, M. K. (2012). *Posibles usos de los residuos y subproductos del café en alimentación humana. Fuente de fibra y de antioxidantes*. México: Unam.
- Chanakata, H., & De Alwis, A. (2004). Environmental issues and management in primary coffee processing. *Process Safety and Environmental Protection*, 82(4), 291-300.
- Choi, I., Wi, S., Kim, S.-B., & Bae, H.-J. (2012). Conversion of coffee residue waste into bioethanol with using popping pretreatment. *Bioresource Technology*(125), 132–137.
- Cruz Tamayo, R. F. (2015). *Estado del arte de la conversión de materiales vegetales para la producción de biodiesel*. México: UNAM.
- Demirbas, M., Balat, M., & Balat, H. (2011). Biowastes-to-biofuels. *Energy Conversion and Management*(52), 1815–1828.
- Divya, D., Gopinath, L., & Christy, P. (2015). A review on current aspects and diverse prospects for enhancing. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*(42), 690-699.

- Domínguez Bocanegra, A. R., Torres Muñoz, J. A., & Aguilar López, R. (2014). Production of Bioethanol from agro-industrial wastes. *Fuel*(149), 85-89.
- Duarte Pasa, V. M. (2006). *Especificaciones de la calidad del etanol carburante del gasohol (mezcla de gasolina y etanol) y normas técnicas para la infraestructura*. CEPAL.
- Facultad de Química UNAM. (19 de Julio de 2016). Obtenido de <http://www.quimica.unam.mx/IMG/pdf/19sulfuroh.pdf>
- FAO. (2014). *Food wastage footprint full-cost accounting final report*. FAO.
- FAO. (11 de Agosto de 2015). Obtenido de <http://www.fao.org/docrep/007/ae156s/ae156s03.htm>
- Giroto, F., Alibardi, L., & Cossu, R. (2015). Food waste generation and industrial uses: A review. *Waste Management*, 45, 31-41.
- Gogoi, B., Raj, A., Alrefaai, M., Stephen, S., Anjana, T., Pillai, V., & Bojanampati, S. (2015). Effects of 2,5-dimethylfuran addition to diesel on soot nanostructures. *Fuel*(159), 766–775.
- Gracida Rodríguez, J. N., & Perez, D. B. (2014). Factores previos involucrados en la producción de bioetanol, aspectos a considerar. *Rev. Int. Contam. Ambie.*, 30(2), 213-227.
- Gui, M., Lee, K., & Bhatia, S. (2008). Feasibility of edible oil vs. non-edible oil vs. waste edible oil as. *Energy*, 33, 1646– 1653.
- Haghighi Mood, S., Hossein Golfeshan, A., Tabatabaei, M., Salehi Jouzani, G., Hassan Najafi, G., Gholami, M., & Ardjmand, M. (2013). Lignocellulosic biomass to bioethanol, a comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*(27), 77-93.
- Haseeb, A., Fazal, M., Jahirul, M., & Masjuki, H. (2011). Compatibility of automotive materials in biodiesel: A review. *Fuel*, 90, 922–931.
- Haseeb, A., Fazal, M., Jahirul, M., & Masjuki, H. (2011). Compatibility of automotive materials in biodiesel: A review. *Fuel*, 90, 922–931.
- Hernández Hipólito, P. (2015). *Desarrollo de nuevos catalizadores nanoestructurados para la producción de biodiesel*. México: Tesis Unam.
- Hernández Medina, M., Torruco Uco, J. G., Chel Guerrero, L., & Betancour Ancona, D. (2008). Caracterización fisicoquímica de almidones de

- tubérculos cultivados en Yucatán , México. *Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 3(28), 718-726.
- ICO. (5 de Junio de 2015). Obtenido de <http://www.ico.org/historical/1990%20onwards/PDF/1a-total-production.pdf>
- Juárez Flores, N. (2013). *Síntesis, caracterización y evaluación de titanatos metálicos nanoestructurados en la producción de biodiesel*. México: Tesis UNAM.
- Kante, K., Nieto Delgado, C., Rangel Mendez, J., & Bandosz, T. (2012). Spent coffee-based activated carbon: Specific surface features and their importance for H₂S separation process. *Journal of Hazardous Materials*, 141– 147.
- Kapilan, N., & D Baykov, B. (2014). A review on new methods used for the production of biodiesel. *Petroleum & Coal*(56), 62-73, 2014.
- Knothe, G. (2005). Dependence of biodiesel fuel properties on the structure of fatty acid alkyl esters. *Fuel Processing Technology*, 86, 1059– 1070.
- Knothe, G., & Steidley, K. (2005). Kinematic viscosity of biodiesel fuel components and related compounds. Influence of compound structure and comparison to petrodiesel fuel components. *Fuel*, 84, 1059–1065.
- Knothe, G., & Steidley, K. (2007). Kinematic viscosity of biodiesel components (fatty acid alkyl esters) and related compounds at low temperatures. *Fuel*, 86, 2560–2567.
- Kondamudi, N., Mohapatra, S., & Misra, M. (2008). Spent Coffee Grounds as a Versatile Source of Green Energy. *Journal of agricultural and Chemistry*, 56, 11757–11760.
- Kumar, A., & Sharma, S. (2015). Potential non-edible oil resources as biodiesel feedstock: An Indian perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 1791–1800.
- Kwon, E., Yi, H., & Jae Jeon, Y. (2013). Sequential co-production of biodiesel and bioethanol with spent coffee grounds. *Bioresourse Technology*, 136, 475-480.
- Lamine, S., Ridha, C., Mahfoud, H.-M., Mouad, C., Lotfi, B., & Al-Dujaili, A. (2014). Chemical activation of an Activated carbon Prepared from coffee residue. *Energy Procedia*(50), 393 – 400.

- Lapuerta, M., Rodríguez Fernández, J., & Font de Mora, E. (2009). Correlation for the estimation of the cetane number of biodiesel fuels and implications on the iodine number. *Energy Policy*, 37, 4337-4344.
- Liew, W., Hassim, M., & Ng, D. (2014). Review of evolution, technology and sustainability assessments. *Journal of Cleaner Production*, 71, 11-29.
- Limayem, A., & Ricke, S. (2012). Lignocellulosic biomass for bioethanol production: Current perspectives, potential. *Progress in Energy and Combustion Science*(38), 449-467.
- Luna, D., Gonzalez, A., Gordon, M., & Martin, N. (2007). Obtención de carbón activado a partir de la cáscara de coco. *ContactoS*(64), 39-48.
- Ma, X., & Ouyang, F. (2013). Adsorption properties of biomass-based activated carbon prepared with spent coffee grounds and pomelo skin by phosphoric acid activation. *Applied Surface Science*(268), 566– 570.
- Murthy, P., & Naidu, M. (2012). Sustainable management of coffee industry by-products and value addition—A review. *Resources, Conservation and Recycling*(66), 45-58.
- Mussatto, S., Machado, E., Carneiro, L., & Teixeira, J. (2012). Sugars metabolism and ethanol production by different yeast strains from coffee industry wastes hydrolysates. *Applied Energy*(92), 763–768.
- Mussatto, S., Machado, E., Martins, S., & Teixeira, J. (2011). Production, Composition, and Application of Coffee. *Food Bioprocess Technol*, 4, 661–672.
- Narita, Y., & Inouye, K. (2014). Review on utilization and composition of coffee silverskin. *Food Research International*(16), 16-22.
- Negro, S., Alkemade, F., & Hekkert, M. (2012). Why does renewable energy diffuse so slowly? *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 3836-3846.
- Oh, P., Lau, H., Chen, J., Chong, M., & Choo, Y. (2012). A review on conventional technologies and emerging process intensification (PI) methods for biodiesel production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 5131–5145.
- Oliveira, L., Franca, A., Camargos, R., & Ferraz, V. (2008). Coffee oil as a potential feedstock for biodiesel production. *Bioresour Technol*(99), 3244–3250.

- Pak, N. (1 de Agosto de 2016). *Análisis de la fibra dietética*. Obtenido de <http://www.fao.org/docrep/010/ah833s/AH833S18.htm>
- Pelupessy, W. (2003). Environmental issues in the production of beverages: global coffee chain. En *Environmentally-Friendly Food Processing* (págs. 95-115).
- PEMEX. (29 de Mayo de 2015). Obtenido de <http://www.ref.pemex.com/octanaje/24DIESEL.htm>
- Pérez Sariñana, B. Y. (2015). *Estudio de la producción integral de bioetanol y biogas a partir del mucílago de café*. México: UNAM.
- Pfaltzgraff, L., De bruyn, M., Cooper, E., Budarin, V., & Clark, J. (2013). Food waste biomass: a resource for high-value chemicals. *Green Chemistry*, 15, 307-3014.
- Pourfarzad, A., Mahdavian-Mehr, H., & Sedaghat, N. (2013). Coffee silverskin as a source of dietary fiber in bread-making: Optimization of chemical treatment using response surface methodology. *LWT - Food Science and Technology*(50), 599-606.
- Ravindran, R., & Jaiswal, A. (2016). Exploitation of Food Industry Waste for High-Value Products. *Trends in Biotechnology*, 24(1), 58-69.
- Reffas, A., Bernardet, V., David, B., Reinert, L., & Bencheikh Lehocineb, M. (2010). Carbons prepared from coffee grounds by H3PO4 activation: Characterization and adsorption of methylene blue and Nylosan Red N-2RBL. *Journal of Hazardous Materials*(175), 779–788.
- Regalado Ortiz, A. (2006). *¿Qué es la calidad en el café?* México: Universidad Autónoma Chapingo.
- RFA. (26 de Febrero de 2016). *Renewable Fuels Assosiation*. Obtenido de <http://www.ethanolrfa.org/resources/industry/statistics/#1454098996479-8715d404-e546>
- Rico, G. H. (2012). *Aprovechamiento Sustentable de las semillas de guanábana (Annona Muricata) en la obtención de biodiesel*. México: UNAM.
- Rocha Lay, D. R. (2011). *Remoción de la materia orgánica natural del agua de la presa Madín mediante procesos fisicoquímicos* . México: Tesis Unam.
- Rocha, M., Lima de Matos, L., Pinto de Lima, L., da Silva Figueiredo, P., Lucena, I., Fernandes, F., & Barros Gonçalves, L. (2014). Ultrasound-assisted

- production of biodiesel and ethanol from spent coffee grounds. *Bioresource Technology*(167), 343–348.
- Rocha, M., Lima de Matos, L., Pinto de Lima, L., Silva Figueiredo, P., Lucena, I., Fernandes, F., & Barros Gonçalves, L. (2014). Ultrasound-assisted production of biodiesel and ethanol from spent coffee grounds. *Bioresource Technology*(167), 343–348.
- S.Alemán-Nava, G., Casiano Flores, V., Cárdenas Chávez, D., Díaz Chavez, R., Scarlat, N., Mahlkecht, J., . . . Parra, R. (2014). Renewable energy research progress in Mexico: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32, 140-153.
- SAGARPA. (8 de Junio de 2015). *Fomenta SAGARPA calidad de café con convocatoria para segunda edición del Certamen Taza de Excelencia México*. Obtenido de <http://www.sagarpa.gob.mx/saladeprensa/2012/Paginas/2013B017.aspx>
- Salvi, B., & Panwar, N. (2012). Biodiesel resources and production technologies – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 3680-3689.
- Sampaio, A., Dragone, G., Vilanova, M., & Oliveira, J. (2013). Production, chemical characterization, and sensory profile of a novel spirit elaborated from spent coffee ground. *LWT - Food Science and Technology*(54), 557-563.
- Sánchez, Ó., & Cardona, C. (2008). Trends in biotechnological production of fuel ethanol. *Bioresource Technology*(99), 5270–5295.
- Santis Espinoza, L. F. (2011). *Desarrollo y caracterización de un fermentador-Destilador para la producción de bioetanol*. México: TESIS UNAM.
- Sharma, Y., Singh, B., & Upadhyay, S. (2008). Advancements in developmet and Characterization of biodiesel. *Fuel*, 87, 2355-2373.
- Shuit, S., Ong, Y., Lee, K., Subhash, B., & Tan, S. (2012). Membrane technology as a promising alternative in biodiesel production: A review. *Biotechnology Advances*(30), 1364–1380.
- Singh, S., Jain, S., PS, V., Tiwari, A., Nouni, M., Pandey, J., & Goel, S. (2015). Hydrogen: A sustainable fuel for future of the transport sector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51, 623–633.
- Song, G., Li, M., Semakula, H. M., & Zhang, S. (2015). Food consumption and waste and the embedded carbon, water and ecological footprints of households in China. *Science of The Total Environment*, 529, 191-197.

- Tehrani, N., Aznar, J., & Kiros, Y. (2015). Coffee extract residue for production of ethanol and activated carbons. *Journal of Cleaner Production*(91), 64-70.
- Towler, B. (2014). *The Future of Energy*. Australia: Elsevier.
- Uçkun Kiran, E., Trzcinski, A., Jern Ng, W., & Liu, Y. (2014). Bioconversion of food waste to energy : A review. *Fuel*, 134, 389–399.
- Ugurlu, A., & Oztuna, S. (2015). A comparative analysis study of alternative energy. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40, 11178–11188.
- Viñals-Verde, M., Bell García, A., Michelena Álvarez, G., & Ramil Mesa, M. (2012). Obtención de etanol a partir de biomasa lignocelulósica. *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, 46(1), 7-16.
- Vohra, M., Manwar, J., Manmode, R., Padgilwar, S., & Patil, S. (2014). Bioethanol production: Feedstock and current technologies. *Journal of Environmental Chemical Engineering*(2), 573–584.
- Yaakob, Z., Narayanan, B., Padikkaparambil, S., & Unnik., S. (2014). A review on the oxidation stability of biodiesel. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 35, 136-153.

VII: Apéndice

Índice de figuras

Figura 1 Partes del fruto del café	1
Figura 2 Arbusto de C. Robusta Figura 3 Arbusto de C. Arábica	3
Figura 4 a)Transesterificación básica b) Transesterificación ácida	15
Figura 5 Mecanismo cinético de la reacción de transesterificación	16
Figura 6 Estructura del almidón.....	34
Figura 7 Estructura de la celulosa	35
Figura 8 Estructura de la lignina.....	37

Índice de tablas

Tabla 1. Ventajas y desventajas del diésel y el biodiesel	25
Tabla 2. Especificaciones internacionales de biodiesel	26
Tabla 3 Parámetros de calidad del bioetanol anhidro	47
Tabla 4 Composición química de la pulpa de café	52
Tabla 5 Composición química de la película plateada y del bagazo de café.	54
Tabla 6 Comparación de calidad y rendimiento del aceite de café	59
Tabla 7 Comparación de calidad y rendimiento del biodiesel de café.....	60
Tabla 8 Composición de azúcares del bagazo de café	61
Tabla 9 Tipos de pretratamientos y condiciones de trabajo empleados para obtención de azúcares del bagazo de café	64
Tabla 10 Condiciones de trabajo y rendimientos del bioetanol	65
Tabla 11 Condiciones de trabajo y parámetros de calidad del carbón activado a partir del bagazo de café	70

Índice de Diagramas

Diagrama 1 Desechos que se generan en la industria del café	51
Diagrama 2 Posibles aplicaciones de la celulosa extraído de la película plateada y del bagazo del café	56
Diagrama 3 Posibles aplicaciones de la hemicelulosa de la película plateada y del bagazo del café	56
Diagrama 4 Producción de biodiesel y otros productos energéticos a través del bagazo de café.....	58
Diagrama 5 Uso del bagazo desengrasado como materia prima para el bioetanol	62
Diagrama 6 Procesos de activación del carbón activado	68
Diagrama 7 Diagrama de bloques para el aprovechamiento del bagazo de café .	71
Diagrama 8 Metodología y condiciones de trabajo para la obtención de pan enriquecido con la película plateada	73

Índice de Gráficas

Gráfica 1 Producción mundial de etanol..... 32