



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN

**PROPUESTA DE UN TREN DE TRATAMIENTO
DEL AGUA RESIDUAL QUE SE OBTIENE DEL
PROCESO DE FABRICACIÓN DEL BIODIESEL**

TESIS:

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERA QUÍMICA**

PRESENTA

GABRIELA GARCÍA VIÑAS

ASESORA: DRA. FRIDA MARÍA LEÓN RODRÍGUEZ.



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.



**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN
UNIDAD DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR
DEPARTAMENTO DE EXÁMENES PROFESIONALES**

ASUNTO: VOTO APROBATORIO

**DRA. SUEMI RODRÍGUEZ ROMO
DIRECTORA DE LA FES CUAUTITLÁN
PRESENTE**

**ATN: L.A. ARACELI HERRERA HERNÁNDEZ
Jefa del Departamento de Exámenes
Profesionales de la FES Cuautitlán**

Con base en el Art. 28 del Reglamento de Exámenes Profesionales nos permitimos comunicar a usted que revisamos la Tesis:

Propuesta de un tren de tratamiento del agua residual que se obtiene del proceso de fabricación del biodiesel

Que presenta la pasante: Gabriela García Viñas
Con número de cuenta: 407062256 para obtener el Título de: Ingeniera Química

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el **EXAMEN PROFESIONAL** correspondiente, otorgamos nuestro **VOTO APROBATORIO**.

ATENTAMENTE
“POR MI RAZA HABLARA EL ESPÍRITU”
Cuautitlán Izcallí, Méx. a 18 de octubre de 2011.

PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO

	NOMBRE	FIRMA
PRESIDENTE	Dra. Frida María León Rodríguez	
VOCAL	I.Q. Graciela Ruth Delgadillo García	
SECRETARIO	Q.F.B. Claudia Pérez Garrido	
1er SUPLENTE	M. en I. Julio César Morales Mejía	
2do SUPLENTE	Q. Lidia Elena Ballesteros Hernández	

NOTA: los sinodales suplentes están obligados a presentarse el día y hora del Examen Profesional (art. 120).
HHA/pm

AGRADECIMIENTOS

A mis padres:

A quienes la ilusión de su vida ha sido convertirme en una persona de provecho. A quienes nunca podré pagar todos sus desvelos ni aun con las riquezas más grandes del mundo.

Gracias a su apoyo y consejos he llegado a realizar las más grandes de mis metas, la cual constituye, la herencia más valiosa que pudiera recibir.

Deseo de todo corazón que mi triunfo profesional lo sientan como suyo.

A mis hermanos:

David y Alberto

Por darme el valioso consejo de seguir estudiando, por sus cuidados y su apoyo incondicional, por su compañía a lo largo de todos estos años de mi vida.

A los de la generación 34 de I.Q.:

Por la compañía a lo largo de toda la carrera, por aquellos momentos inolvidables de desvelo y de risas, por ser una motivación e inspiración para salir adelante y concluir esta etapa.

A mis amigos incondicionales en especial a Sugey, Jairo, Gabriel y Adalberto y a todos los que conformaron esta inigualable generación.

Ángel:

A ti mi gran compañero, por darme tu apoyo y amor incondicional, por tus consejos, guías y enseñanzas, este logro también es tuyo.

A mi asesora:

Dra. Frida Ma. León, por sus enseñanzas y apoyo a lo largo de este trabajo y por brindarme su confianza.

A mis sinodales:

Por sus consejos, su dedicación y aportación para este trabajo.

A mis profesores:

Por compartir sus conocimientos conmigo, y por enseñarme las grandes cosas que se pueden desarrollar con el poder del intelecto

A la UNAM

En particular a la FES- Cuautitlán

Por ser mi segunda casa, por haberme permitido crecer en sus aulas, por ser la formadora de miles de profesionistas.

ÍNDICE

OBJETIVOS	iv
INTRODUCCIÓN.....	v
CAPÍTULO I: LAS GRASAS, ACEITES Y SOLUCIONES DE TRATAMIENTO DE EFLUENTES ACEITOSOS	
1.1. Grasas y Aceites.....	2
1.2. Propiedades de Aceites y Grasas.....	3
1.2.1. Propiedades Físicas.....	3
1.2.2. Propiedades Químicas.....	4
1.3. Aceite vegetal.....	5
1.3.1. Descripción.....	5
1.3.2. Usos.....	5
1.3.4. Enranciamiento.....	6
1.3.5. Almacenaje y conservación del aceite.....	7
1.4. Clases de Aceites y Grasas en aguas residuales.....	8
1.5. Tratamiento de aguas residuales aceitosas.....	9
1.5.1. Descripción.....	9
1.5.2. Tratamientos físicos.....	10
1.5.3. Tratamientos físico-químicos.....	11
1.5.4. Tratamiento biológico de grasas y aceites.....	14
1.6. Normas Oficiales Mexicanas en materia de descargas de aguas residuales.....	15
1.6.1. Descripción.....	15
1.6.2. Especificaciones.....	16
1.6.3. Tipos de Normas.....	18
CAPÍTULO II: BIODIESEL	
2.1. Qué es biodiesel.....	21
2.2. Antecedentes del biodiesel.....	22
2.3. Situación actual del biodiesel.....	24
2.4. Ventajas y desventajas del biodiesel.....	26
2.4.1. Ventajas.....	26

2.4.2. Desventajas	27
2.6. Factores que afectan el rendimiento de la reacción de transesterificación.....	30
2.6.1. Acidez y humedad.....	30
2.6.2. Tipo de catalizador y concentración.....	31
2.6.3 Relación molar de alcohol / aceite y tipo de alcohol.....	31
2.6.4. Efecto del tiempo de reacción y temperatura.....	32
2.7. Descripción del proceso de elaboración del biodiesel.....	33
2.7.1. Pretratamiento del aceite.....	33
2.7.2. Determinación de acidez del aceite.....	33
2.7.3. Reacción de transesterificación.....	33
2.7.4. Separación.....	34
2.7.5. Lavado de biodiesel.....	34
CAPÍTULO III DESARROLLO EXPERIMENTAL	
Procedimiento experimental.....	36
3.1. Procedimiento experimental para obtener el biodiesel.....	37
3.2. Determinación del rendimiento de la reacción con las diferentes materias primas (aceite vegetal nuevo, aceite vegetal usado, grasa animal y combinación de aceite vegetal usado y grasa animal). 40	
3.3. Pruebas fisicoquímicas.....	42
3.3.1. Determinación de pH.....	42
3.3.2. Determinación de la conductividad.....	42
3.3.3. Determinación de olor.....	43
3.3.4. Determinación de la temperatura.....	43
3.3.5. Determinación de la turbidez.....	44
3.3.6. Determinación de grasas y aceites.....	44
3.3.7. Procedimiento para elegir un coagulante.....	46
3.3.8. Filtración con carbón activado y neutralización.....	47
3.4. Análisis de resultados de las muestras.....	48
3.4.1. Rendimiento del biodiesel con diferentes materias primas.....	48
3.4.2. Pruebas fisicoquímicas aplicadas al agua residual del proceso.....	50
3.5. Propuesta de tren de tratamiento.....	55
3.5.1. Costo del tratamiento:.....	57
3.6. Análisis de resultados después de tratamiento.....	58

CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES

Conclusiones y recomendaciones.....	62
GLOSARIO:	65
BIBLIOGRAFÍA:	68

OBJETIVOS

Objetivo general:

- Proponer un Tren de Tratamiento para el agua del lavado del proceso de fabricación del biodiesel, para disminuir los contaminantes.

Objetivos particulares:

- Producir biodiesel a nivel laboratorio, en el cual la materia prima principal sea aceite vegetal reciclado, para reducir la contaminación del medio ambiente.
- Comparar y determinar el rendimiento de las diferentes materias primas (aceite vegetal nuevo, aceite vegetal usado, grasa animal y combinación de aceite vegetal usado y grasa animal) usadas para la obtención del biodiesel, con el propósito de definir la eficiencia de producción.
- Eliminar las grasas y aceites del agua que se obtiene en el proceso de producción del biodiesel, para mejorar la calidad del agua eliminada.

INTRODUCCIÓN

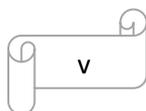
El aceite vegetal, luego de usado resulta un residuo que aunque es biodegradable, presenta dificultades para su destino final, generalmente termina siendo el suelo y el agua a través del alcantarillado. Cuando es vertido al alcantarillado los aceites se adhieren a las paredes de las cañerías contribuyendo a la disminución de sus diámetros con la consecuente pérdida de rendimiento del sistema. Si el receptor final es un pozo absorbente, el aceite facilita la impermeabilización del mismo, es decir se tapan los poros y deja de funcionar; si el receptor final fuera un curso de agua como un arroyo o un río el residuo aportará una mayor carga orgánica, teniendo en cuenta que por litro de aceite se pueden contaminar un millón de litros de agua, llegando a incrementar hasta un 25% los costos de tratamiento en las estaciones depuradoras municipales.

Todos los aceites naturales, tanto de origen vegetal como animal (triglicéridos en general), pueden ser utilizados como materia prima para la elaboración de biodiesel, pero no todos lo producen con el mismo rendimiento.¹

La utilización de aceites vegetales usados como materia prima para la obtención de biodiesel supone una doble ventaja: por un lado se elimina un residuo y por el otro se consigue un combustible eficaz, a bajo costo y respetuoso con el ambiente.

El biodiesel es un biocombustible que puede ser usado en cualquier motor a diesel. En los vehículos más antiguos (modelos anteriores a la mitad de los 90`s), se deben hacer ligeras modificaciones, como por ejemplo: mangueras de goma por mangueras de teflón y cambiar los mecanismos de bronce de algunas viejas bombas inyectoras por acero u otro material que no sea afectado por lo corrosivo del biodiesel.

¹ Juan Sebastián Chiappella “Reciclado de Aceites Vegetales Usados” [en línea]. Agosto de 2008. <<http://www.inta.gov.ar/iir/info/documentos/energía/resbiodiesel.htm>>



Debido al creciente aumento del precio del barril de crudo, la posibilidad de que se agoten las reservas en un futuro mediano y la contaminación que genera el uso de combustibles fósiles, resulta necesario el vuelco hacia el uso de energías renovables. La reducción de los gases de efecto invernadero para mitigar los efectos del cambio climático son una de las tantas causas por las cuales se ha visto que el biodiesel es el combustible del mañana, ya que éste se obtiene a partir de la transesterificación de aceites vegetales.

Actualmente la producción mundial del biodiesel se incrementó notablemente en los últimos años, debido a diversos factores como son el medio ambiente, los problemas del precio y de la no renovabilidad del petróleo, y como alternativa del desarrollo industrial. Este tipo de biocombustible se puede utilizar puro o en mezcla en cualquier tipo de motores, generadores o calderas a diesel.²

Considerando que el material retirado del biodiesel por medio de los lavados contiene trazas de grasas, aceites, catalizador básico, sales, jabones y trazas de glicerol, desde un punto de vista medioambiental, es preciso el tratamiento de esta agua residual; sin embargo, éste no ha sido generalizado ni se tiene un procedimiento claro para su implementación.

² Silvia Falasca, Ana Ulberich “Las especies del género *Jatropha* para producir biodiesel en Argentina”. Revista electrónica. Marzo 2008. [en línea]. <<http://revistavirtual.redesma.org/vol3/pdf/investigacion/Jatropha.pdf>>

CAPÍTULO I
LAS GRASAS, ACEITES Y SOLUCIONES DE
TRATAMIENTO DE EFLUENTES ACEITOSOS

1.1. Grasas y Aceites.

Por definición, los lípidos son componentes biológicos que son solubles en solventes no polares como benceno, cloroformo y éter, y son prácticamente insolubles en agua. Consecuentemente, éstas moléculas son diversas tanto en lo referente a su estructura química como a su función biológica. Se distinguen en ellos los ácidos grasos, las grasas y aceites, los jabones, etc.

La denominación de “grasas y aceites” se refieren únicamente al estado físico sólido o líquido de este tipo de lípidos y no tienen ninguna relación con cualquier otra propiedad; la estructura y la química no varían. Las grasas y aceites son ésteres formados por la condensación (unión) de ácidos grasos con glicerol. En general, las grasas y aceites comestibles o alimenticias (figura 1), están formadas básicamente por triacilglicéridos (TAG), que consisten en mono, di o triésteres; ya que el glicerol es un trialcohol que puede dar origen a los compuestos mencionados.



Figura 1. Grasas y Aceites comestibles.

1.2. Propiedades de Aceites y Grasas.

1.2.1. Propiedades Físicas.

Para las propiedades físicas más relevantes se tiene:

✓ Solubilidad

Las grasas y aceites se caracterizan principalmente por su virtual inmiscibilidad en agua (figura 2), sin embargo son miscibles en muchos solventes orgánicos no polares. La solubilidad depende de las propiedades termodinámicas del soluto y disolvente, y las fuerzas relativas de atracción entre las moléculas. La solubilidad ideal se puede calcular a partir de las propiedades termodinámicas, en todo caso la solubilidad real generalmente presenta desviaciones positivas.



Figura 2. Aceite inmisible en agua.

✓ Tensión superficial e interfacial

En este aspecto las grasas, aceites y ácidos grasos están separados. Los aceites comerciales tienden a tener más baja tensión superficial e interfacial debido a la presencia de componentes polares de superficie activa, tales como monoglicéridos, fosfolípidos y jabones. Los monoglicéridos y jabones pueden reducir la tensión interfacial entre agua y aceite.

✓ Densidad

Los valores de densidad para aceites están, generalmente, en el rango comprendido entre 0,92 a 0,964 g/l. La densidad se incrementa cuando decrece el peso molecular e incrementa con la insaturación. La densidad se incrementa aproximadamente en forma lineal con el incremento de la temperatura. Las densidades de grasas en estado sólido son mucho más altas, aproximadamente el valor de 1 g/l.

1.2.2. Propiedades Químicas.

Muchas de las grasas y aceites tienen solo dos grupos funcionales reactivos: El éster que enlaza el ácido graso al glicerol vertebral y el doble enlace en la cadena del alquil lateral. El doble enlace influye en la reactividad del átomo de carbono alílico, particularmente cuando hay dobles enlaces múltiples presentes. La hidrólisis, metanólisis e interesterificación son las principales reacciones químicas de los Triacilglicéridos.

✓ Hidrólisis

Por acción de los álcalis como NaOH / CH₃OH, se escinde la grasa, resultando como productos glicerol y una sal de ácido graso (jabón) (ver figura 3).

A partir de la sal resultante se obtienen los ácidos grasos libres al ser acidificada, esta reacción es relevante desde el punto de vista analítico.

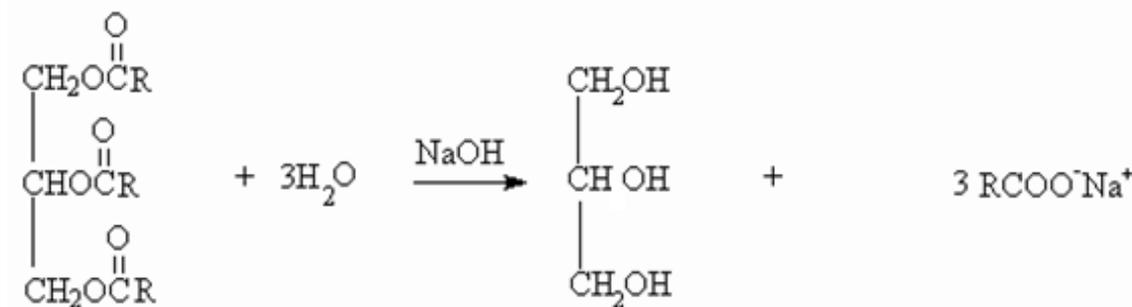


Figura 3. Reacción de la hidrólisis.

1.3. Aceite vegetal.

1.3.1. Descripción.

El aceite vegetal es un compuesto orgánico obtenido a partir de semillas u otras partes de las plantas en cuyos tejidos se acumula como fuente de energía. Algunos no son aptos para consumo humano, como el de castor o algodón.

Como todas las grasas están constituidas por glicerina y tres ácidos grasos (figura 4), el aceite vegetal puede provenir de frutos o semillas como: aceituna, soja, palma y como principal fruto en la actualidad, girasol, maíz, nuez, almendra, colza, entre otros.

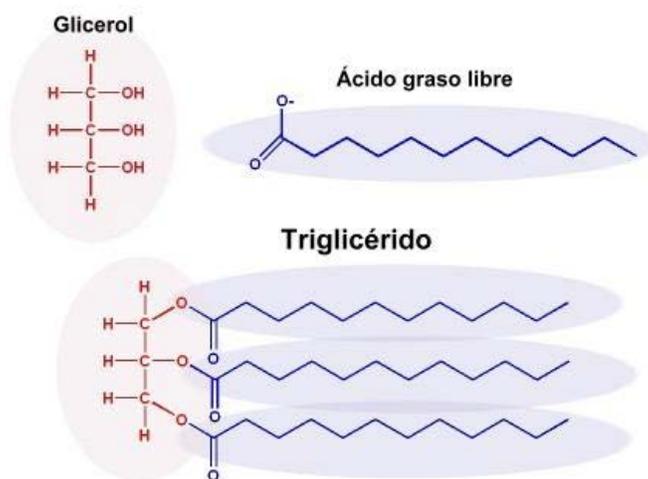


Figura 4. Representación química de las grasas.

1.3.2. Usos.

La mayor parte de los aceites vegetales se usan para alimentar el ganado. El aceite vegetal más usado para consumo humano es el de girasol. El aceite de palma, que es sólido a temperatura ambiente, se usa especialmente para jabones y cosméticos.

La mayor parte del aceite de colza producido en Europa se usa para producción de biodiesel, aunque puede ser producido con otros como el de girasol o el de cáñamo. Aunque también se ha extendido el uso de estos aceites vegetales como combustibles para los motores diesel.

1.3.3. Clasificación de los aceites.

Pueden distinguirse dos tipos de aceite, los vírgenes y los refinados.

- Los vírgenes son los extraídos mediante "prensado en frío" (no más de 27 °C), conservando el sabor de la fruta o semilla de la que son extraídos.
- Los aceites refinados son aquellos que se someten a un proceso (refinado) y desodorizado que permite obtener un aceite que responde a ciertos criterios: organolépticamente es de un sabor neutro, visualmente está limpio y con un color adecuado, y además es seguro alimentariamente y permite una mejor conservación. Esta técnica suele utilizarse para modificar aceites que no son aptos para el consumo humano (aceite lampante, extraído del bagazo de la oliva) o para poder aumentar la producción de determinados productos que si fuesen sometidos a una simple presión en frío para obtener un aceite virgen no resultarían rentables económicamente (semillas de girasol).

1.3.4. Enranciamiento.

Los aceites y las grasas son susceptibles de enranciarse o descomponerse, los mecanismos de la rancidez han sido ampliamente estudiados y existen al menos tres vías más comunes de enranciarse:

- Activación de radicales libres y peroxidación.
- Hidrólisis por la presencia de agua.
- Por medio de microorganismos.

En el primer caso, la activación se inicia por el calor, los radicales que se generan inducen a una absorción de oxígeno del ambiente para formar pre-peróxidos y luego peróxidos propiamente como tal. En este estado el aceite es muy viscoso y se torna venenoso pues su ingestión provoca malestares gastrointestinales graves. Las peroxidaciones muy intensas conducen a un aceite de características organolépticas rechazables.

En el segundo caso, el agua provoca la hidrólisis de los radicales grasos y se restituyen algunas moléculas de ácido original. Esto trae como consecuencia una cadena de reacciones que hacen que el aceite tome un olor y sabor astringente y desagradable.

En el tercer caso, los enlaces alfa de los radicales grasos son atacados por enzimas de hongos y bacterias que secretan lipasas generando una degradación del triglicérido. El olor repulsivo es característico de este mecanismo degradatorio.

1.3.5. Almacenaje y conservación del aceite.

Refinados o no, todos los aceites son sensibles al calor, la luz y la exposición al oxígeno. El aceite rancio tiene un olor desagradable y un gusto acre, y su valor nutricional queda muy menguado. Para retrasar el enranciamiento, suele aplicarse un gas inerte, normalmente nitrógeno, al espacio restante del envase justo tras la producción. Este proceso se denomina inertización.

Lo mejor es almacenar todos los aceites en refrigeración o en un lugar seco y fresco. Los aceites pueden espesar, pero basta con dejarlos reposar a temperatura ambiente para que recuperen la fluidez. Para evitar los efectos negativos del calor y la luz, lo ideal es sacar los aceites del frío el tiempo imprescindible para que vuelvan a licuarse. Los aceites refinados ricos en grasas monoinsaturadas duran hasta un año (si son de oliva, hasta varios años), mientras los ricos en grasa poliinsaturadas se conservan unos seis meses. Los aceites de oliva virgen y extra virgen se conservan un mínimo de nueve meses tras la apertura del envase. Otros aceites monoinsaturados se conservan bien hasta ocho meses, mientras los aceites poliinsaturados sin refinar solo duran aproximadamente la mitad.

1.4. Clases de aceites y grasas en aguas residuales.

Las grasas animales y los aceites vegetales son cuantitativamente el tercer componente de los alimentos. Los tipos de grasas y aceites más frecuentemente presentes en los sistemas de alcantarillado corresponden a aceites de tipo vegetal y grasas de tipo animal. Las grasas y aceites son de los compuestos orgánicos más estables y no son fácilmente biodegradables; sin embargo los ácidos minerales las atacan, dando como resultado la formación de ácidos grasos y glicerina. En presencia de álcalis, tales como el hidróxido sódico, la glicerina se libera y se forman sales alcalinas de los ácidos grasos. También desembocan al alcantarillado, el queroseno y los aceites lubricantes y los procedentes de materiales bituminosos derivados del petróleo, utilizados en la construcción de carreteras.

En su mayoría flotan sobre el agua residual (figura 5), aunque una parte de ellos es arrastrada con el fango por los sólidos sedimentables. Incluso en mayor proporción que las grasas, aceites y jabones, los aceites minerales tienden a recubrir las superficies. Las partículas interfieren con la actividad biológica y causan problemas de mantenimiento.



Figura 5. Grasas y aceites flotando en agua.

1.5. Tratamiento de aguas residuales aceitosas.

1.5.1. Descripción.

La materia grasa en aguas residuales puede ser clasificada de la siguiente forma: materia grasa total, materia grasa separable y materia grasa no separable. Las sustancias grasas en los residuos de la industria alimenticia son en su mayoría parcialmente biodegradables y contribuyen en una importante proporción a la DBO.

Para descargas a sistemas de alcantarillado municipal, generalmente la materia grasa separable origina problemas de bloqueo en éstos, por lo que es recomendable su separación del efluente correspondiente antes de su eventual descarga, condición que no siempre se cumple. En el caso de la materia no separable, altamente dispersada o emulsificada los problemas no se manifiestan hidráulicamente sino a nivel de la etapa del tratamiento depurador.

Los contaminantes grasos y/o aceitosos en influentes pueden ser caracterizados por: la polaridad, biodegradabilidad y características físicas. Los contaminantes polares tienen usualmente un origen vegetal o animal y sus fuentes son principalmente las operaciones industriales de alimentos. Los contaminantes no polares, provienen del petróleo o fuentes minerales, y la fuente principal de este tipo de contaminación es la industria petrolífera y aquellas industrias que consumen los bienes producidos por la primera y generalmente no son biodegradables.

Habiendo establecido las importantes diferencias entre residuos grasos de la industria petrolífera y de alimentos en cuanto a la biodegradabilidad, se debe destacar que esta información acerca de la naturaleza física de la materia grasa es de gran importancia cuando se considera un proceso de purificación.

En ausencia de agentes surfactantes, ya sean naturales o sintéticos y bajas condiciones de agitación es muy probable que la materia grasa no será altamente dispersada y por consiguiente será fácilmente separable por gravedad o flotación. Cuando los influentes

proviene de operaciones de limpieza o de proceso, frecuentemente una mayor proporción de la materia grasa se fija en emulsiones estables y entonces su separación por medio de procesos físicos es más compleja y dificultosa

1.5.2. Tratamientos físicos.

Estos tratamientos se aplican cuando el contenido de materia grasa separable es apreciable y en ese caso es siempre deseable instalar como primera etapa un sistema de separación de grasa-aceite y agua, esto reducirá la carga contaminante que está siendo descargada y también permitirá la recuperación de las grasas y/o aceites potencialmente útil. La eliminación de la materia grasa separable, se lleva a cabo a través de la utilización de trampas de aceite. Para grandes flujos, éstas ocupan grandes áreas de superficie, por lo que se han modificado a través de la introducción de placas paralelas (placas corrugadas y placas separadoras inclinadas), lamelas, especialmente diseñadas, con lo que se ha mejorado la situación hidráulica en estas trampas y a la vez la capacidad de carga.

Una instalación con una modalidad de placa separadora inclinada, ocupa menos del 10% de espacio de una trampa de grasa convencional, para una carga hidráulica equivalente y es de mayor calidad efectiva de separación de materias grasas separables. Las primeras aplicaciones de unidades de placas separadoras inclinadas sobre residuos grasos de la industria alimenticia, presentaron problemas operacionales debido, principalmente, a fallos para reconocer acabadamente la diferente naturaleza de la materia grasa proveniente de la industria alimenticia en relación a la industria petroquímica, estas diferencias han sido consideradas e integradas en el diseño de este tipo de plantas lo que ha tenido como consecuencia que en la actualidad las unidades de placas separadoras inclinadas estén funcionando adecuadamente, por lo que se puede ampliar el uso de este tipo de tecnología en el tratamiento de residuos de la industria de alimentos.

La técnica de flotación se usa en la separación de fluidos inmiscibles o sólidos de fluidos y es de creciente interés en el campo del tratamiento de aguas residuales. Se distinguen flotación por aire disperso, por aire disuelto y por métodos electrolíticos. Una de las alternativas ampliamente usadas y dentro de éstas la más conocida y desarrollada es la

flotación por aire disuelto (DAF), este proceso es mejor que las trampas convencionales para eliminar materias grasas separables de los influentes grasos procedentes de los procesos industriales alimenticios (figura 6).

El proceso de flotación depende de la liberación de aire suficiente de un fluido presurizado cuando la presión es reducida a la presión atmosférica. El gas es liberado como burbuja de dimensiones razonablemente constantes y en número suficiente tal que se obtiene la capa de materia superficial que cubre el recipiente de retención. Las burbujas entonces se adhieren o son absorbidas en el material a ser eliminado y transportado a la superficie a una velocidad más grande que la que habría ocurrido en un sistema dependiente de la gravitación estática.

La eficiencia del proceso mencionado depende de la razón existente entre la cantidad de sólidos presentes a la cantidad de aire liberado y al diámetro de las burbujas de gas. Dependiendo del sistema de flotación usado, el diámetro de las burbujas puede variar de 0,1 mm a 1 mm y, mientras más pequeñas son éstas, más eficiente es el proceso.

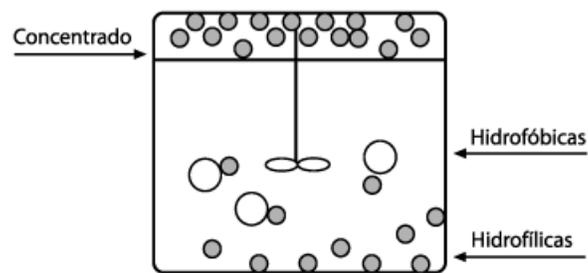


Figura 6. Esquema de celda de flotación

1.5.3. Tratamientos físico-químicos.

Este tipo de tratamiento se aplica a sistemas altamente emulsificados y dispersos, tal que el tamaño de las partículas de materia grasa es menor que 20 micrómetros, donde los procesos de separación por gravedad son absolutamente ineficientes (figura 7).

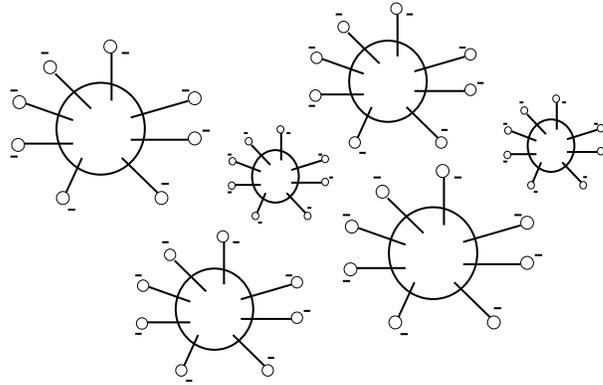


Figura 7. Emulsión aceite en agua.

La estabilidad de los sistemas emulsificados puede ser explicado en términos de las cargas electrostáticas transportadas por las partículas (figura 8). Las sustancias grasas en los influentes de la industria alimenticia son invariablemente cargadas negativamente, por tanto ocurre una repulsión partícula-partícula tal que inhibe la espontánea coagulación. La desestabilización de los sistemas emulsificados se alcanza a través de la neutralización de la carga por ajuste de pH, o la adición de un ión de carga opuesta. La efectividad de agregar iones se incrementa de acuerdo a la valencia que tenga el ión, tal que los iones trivalentes cargados positivamente como el hierro o el aluminio son frecuentemente empleados.

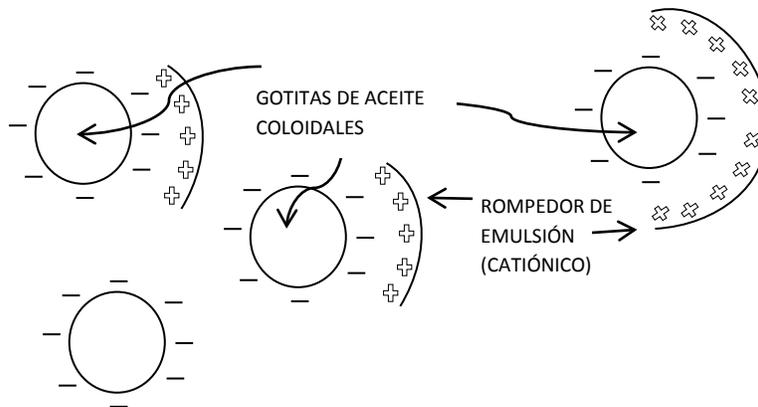


Figura 8. La acción de un rompedor de emulsión catiónica al neutralizar las cargas superficiales

Preferentemente, el sulfato de aluminio se usa en el tratamiento de sistemas emulsificados. A pH's mayores a siete, el aluminio disociado en agua producirá complejos de aluminio cargados positivamente los cuales son usados para neutralizar las partículas de grasas y aceites cargadas negativamente. En presencia de grandes polielectrolitos de aluminio se forman flóculos de grasas y/o aceites y así estos pueden ser separados por flotación o sedimentación. Otros compuestos que son usados para romper las emulsiones de grasas son el cloruro férrico, sulfato ferroso, el aluminato de sodio y la caliza.

El uso de otras sales inorgánicas tales como $AlCl_3$ y $CaCl_2$ para desestabilizar las emulsiones de aceites de corte en agua y con ello iniciar el proceso de coagulación y lograr el proceso de sedimentación de los aceites presentes, muestra resultados satisfactorios en lo relativo a la separación de la fase aceitosa de la fase acuosa, se ha usado como parámetro indicador del nivel de depuración, la turbiedad, disminuyendo ésta desde 900 a 120 NTU, en un tiempo de 80 minutos.

Tabla 1. TIPOS DE ROMPEDORES DE EMULSIÓN.

TIPO PRINCIPAL	DESCRIPCIÓN	CARGA	USO
INORGÁNICO	Sales metálicas polivalentes como: alumbre, $AlCl_3$, $FeCl_3$, $Fe_2(SO_4)_3$	Catiónica	AC/AG
	Ácidos minerales como: H_2SO_4 , HCl, HNO_3	Catiónica	AC/AG y AG/AC
	Adsorbentes (añadiendo sólidos) como: arcilla pulverizada, cal	Ninguna	AC/AG
ORGÁNICO	Poliaminas, poliacrilatos, y sus copolímeros sustituidos	Catiónica	AC/AG
	Ácidos bencensulfónicos sustituidos con alquilo y sus sales	Aniónica	AG/AC
	Resinas alquil fenólicas, polialcoholes sustituidos	No iónica	AG/AC

1.5.4. Tratamiento biológico de grasas y aceites.

Muchas sustancias grasas presentes en influentes son, casi sin excepción, biodegradables y compatibles con un tratamiento biológico. El problema específico de los influentes grasos se relaciona con la liberación de grasas libres en la etapa de aireación, resultando una reducción en la eliminación de DBO y flotación de flóculos en la etapa final de clarificación, estos problemas son comunes tanto a las sustancias grasas polares como a las no polares.

Tradicionalmente, el tratamiento anaeróbico es privilegiado para tratar aguas residuales fuertes con alto contenido orgánico, donde las grasas y aceites son de los sustratos más comunes, provenientes de industrias alimenticias. La evaluación es generalmente hecha sobre factores tales como costos de aireación, tratamiento de lodos y disposición etc., con la presunción que cumpla con las exigencias de materia orgánica para el efluente, esta última consideración es muy importante, para la selección de una tecnología de tratamiento apropiada.

Para tratamientos de efluentes de industrias de aceites vegetales, se ha aplicado tratamiento anaeróbico precedido de un tratamiento aeróbico el cual es afectado por varios problemas tales como el desarrollo de micelas (figura 9), el exceso de biomasa debido a los altos coeficientes de rendimientos etc., por tanto se ve más promisoría la combinación de un pretratamiento fisicoquímico llevado a cabo para remover orgánicos biorecalcitrantes en forma selectiva antes del tratamiento anaeróbico.

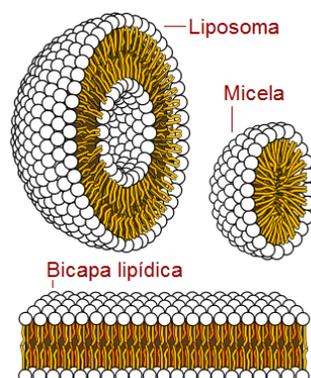


Figura 9. Esquema de micelas de grasas y aceites.

1.6. Normas oficiales mexicanas en materia de descargas de aguas residuales.

1.6.1. Descripción.

Las Normas Oficiales Mexicanas establecen las clasificaciones de las aguas superficiales y costeras de acuerdo a su uso preponderante. Más importante aún, están destinadas a proteger la calidad de estos cuerpos hídricos a través del control de los efluentes líquidos producidos por las diferentes actividades antropogénicas.

Su fin es proteger las cuencas hidrográficas y sus cuerpos receptores de los efluentes líquidos vertidos, tanto desde fuentes puntuales como no-puntuales, por los diferentes sectores de servicios y producción de la sociedad. Estos vertidos tienen el potencial de degradar la calidad de nuestras aguas, y consecuentemente, afectar de forma negativa otros componentes del medio ambiente y la salud humana.

El deterioro del medio acuático tiene serias implicaciones socioeconómicas, higiénicosanitarias, ambientales y estéticas. Por tanto, es imprescindible contar con un instrumento legal que regule las descargas residuales, establezca los estándares de calidad de los cuerpos de agua y sirva de apoyo a la investigación y creación de planes y estrategias que conlleven tanto a la prevención y mitigación de la contaminación de estos cuerpos receptores, como a la reparación de daños causados con anterioridad.

Los potenciales efectos perjudiciales de los vertidos de diferentes orígenes, sólo se mitigarán a través del establecimiento de condiciones de calidad requeridas a todo generador de aguas residuales.

Por otro lado, las descargas representan pérdidas de materiales y energía, por tanto, el control de las emisiones, particularmente cuando se incorporan en el proceso representan una oportunidad de reducir los costos y hacer un uso más eficiente de los recursos como se contempla en el desarrollo sostenible.

La diversidad de usos del agua impone, necesariamente, que para el mantenimiento de su calidad se requiera de una amplia gama de requisitos.

Los requisitos que establece cualquier normativa dependen, principalmente, del tipo de uso actual y/o potencial del cuerpo receptor, y, en menor medida, del origen o procedencia de los vertidos. Éstos pueden variar desde muy específicos hasta generales.

Idealmente, una norma de aguas residuales, para ser efectiva, debe considerar entre otros, varios aspectos importantes:

- Aspectos socio-económicos y culturales, de manera que antes de convertirse en un obstáculo al desarrollo sirva como un instrumento más al servicio de la sociedad.
- Tomar en consideración el concepto de desarrollo sostenible que combina adecuadamente el crecimiento económico y social con la conservación y preservación de los recursos naturales. De esta manera se propicia el necesario desarrollo sin poner en riesgo el futuro usufructo de los recursos naturales por las generaciones venideras.
- La norma debe también ser dinámica en su esencia, de manera que pueda adecuarse, a través del tiempo, a la realidad socio-económica y ambiental del país, así como a los continuos adelantos técnicos y científicos.

Por último, para su correcta implementación, esta norma debe incluir aspectos de seguimiento, control y adecuación que permitan asegurar y facilitar su aplicabilidad. Esta norma será acompañada por normas y reglamentaciones que cubrirán algunos aspectos específicos como son los procedimientos de muestreo, análisis y control, entre otros.

1.6.2. Especificaciones

Los cuerpos receptores de descargas de aguas residuales se clasificarán en cuatro tipos:

- ✓ Cuerpos de aguas superficiales: corrientes (ríos y arroyos), estuarios, lagos, lagunas y embalses.
- ✓ Medio marino-costero.
- ✓ Suelo y subsuelo: zona no-saturada (vadosa) y zona saturada (acuífero-agua subterráneo).

- ✓ Red de alcantarillado sanitario.

Control de fuentes contaminantes:

1. Se prohíbe la descarga de aguas residuales a la red de alcantarillado pluvial, así como la construcción de sistemas de alcantarillado combinados.
2. Se prohíbe la descarga a la red de alcantarillado de aguas residuales industriales sin previo pretratamiento. Al mismo tiempo, se exige el tratamiento de los contaminantes propios de la industria, que puedan afectar el funcionamiento de la planta de tratamiento de aguas residuales municipales, o cuyo tratamiento implique reducida eficiencia o altos costos en la planta de aguas municipales para su depuración debido a la dilución.
3. Se prohíbe el derramamiento a cualquier cuerpo hídrico receptor de los siguientes productos: gasolina, benceno, naftaleno, fuel-oil, petróleo, aceites lubricantes y cualquier otro derivado del petróleo.
4. Se prohíbe la descarga, en los cuerpos hídricos receptores, de desechos sólidos de cualquier tipo incluyendo los sedimentos, lodos, y/o sustancias sólidas provenientes de los sistemas de tratamiento de residuos líquidos. La disposición de éstos deberá cumplir con las normas legales en materia de residuos sólidos.
5. Se prohíbe la descarga, en los cuerpos hídricos receptores, de sustancias inflamables o explosivas, elementos radioactivos y sustancias tóxicas puras o mezcladas, incluyendo especialmente, las señaladas en el Convenio de Basilea.
6. Se prohíbe la dilución de efluentes con aguas ajenas al proceso del establecimiento, como un procedimiento de tratamiento de dicho efluente para cumplir con los límites de concentración establecidos por esta norma.

1.6.3. Tipos de Normas.

- NOM-001-SEMARNAT-1996 que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales vertidas en aguas y bienes nacionales.

Tabla 2. LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE CONTAMINANTES BÁSICOS PARA LA DESCARGA DE AGUAS RESIDUALES VERTIDAS EN AGUAS Y BIENES NACIONALES.

(Private) Límites máximos permisibles para contaminantes básicos																				
Parámetros	Ríos						Embalses naturales y artificiales				Aguas costeras				Suelo		HUMEDALES NATURALES			
	Uso en riego agrícola (A)		Uso público urbano (B)		Protección de vida acuática (C)		Uso en riego agrícola (B)		Uso público urbano (C)		Explotación pesquera, navegación y otros usos (A)		Recreación (B)		ESTUARIOS (B)		Uso en riego agrícola (A)		HUMEDALES NATURALES (B)	
(miligramos por litro, excepto cuando se especifique)	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.
Temperatura °C (1)	N.A	N.A	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	N.A	N.A	40	40
Grasas y Aceites (2)	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25
Materia Flotante (3)	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente
Sólidos Sedimentables (ml/l)	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	N.A	N.A	1	2
Sólidos Suspendedos Totales	150	200	75	125	40	60	75	125	40	60	100	175	75	125	75	125	N.A	N.A	75	125
Demanda Bioquímica de Oxígeno ₅	150	200	75	150	30	60	75	150	30	60	100	200	75	150	75	150	N.A	N.A	75	150
Nitrógeno Total	40	60	40	60	15	25	40	60	15	25	N.A	N.A	N.A	N.A	15	25	N.A	N.A	N.A	N.A
Fósforo Total	20	30	20	30	5	10	20	30	5	10	N.A	N.A	N.A	N.A	5	10	N.A	N.A	N.A	N.A

(1) Instantáneo

(2) Muestra Simple Promedio Ponderado (3) Ausente según el Método de Prueba definido en la NMX-AA-006.

Fuente. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

- NOM-002-SEMARNAT-1996 que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal.

Tabla 3.LIMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PARA DESCARGA DE AGUA RESIDUAL EN ALCANTARILLADOS

LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES			
PARÁMETROS (miligramos por litro, excepto cuando se especifique otra)	Promedio Mensual	Promedio Diario	Instantáneo
Grasas y Aceites	50	75	100
Sólidos Sedimentables (mililitros por litro)	5	7.5	10
Arsénico total	0.5	0.75	1
Cadmio total	0.5	0.75	1
Cianuro total	1	1.5	2
Cobre total	10	15	20
Cromo hexavalente	0.5	0.75	1
Mercurio total	0.01	0.015	0.02
Níquel total	4	6	8
Plomo total	1	1.5	2
Zinc total	6	9	12

Fuente. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

- NOM-003-SEMARNAT-1997 que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público.

Tabla 4.LIMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE CONTAMINANTES PARA LAS AGUAS RESIDUALES TRATADAS QUE SE REUSEN EN SERVICIO PUBLICO.

TIPO DE REUSO	LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE CONTAMINANTES				
	Coliformes Fecales NMP/100 ml	Huevos de Helminto (h/l)	Grasas y Aceites mg/l	DBO ₅ mg/l	SST mg/l
SERVICIOS AL PÚBLICO CON CONTACTO DIRECTO	240	≤ 1	15	20	20
SERVICIOS AL PÚBLICO CON CONTACTO INDIRECTO U OCASIONAL	1,000	≤ 5	15	30	30

Fuente. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Promedio diario (P.D.)

Es el valor que resulta del análisis de una muestra compuesta. En el caso del parámetro grasas y aceites, es el promedio ponderado en función del caudal, y la media geométrica para los coliformes fecales, de los valores que resulten del análisis de cada una de las muestras simples tomadas para formar la muestra compuesta. Las unidades de pH no deberán estar fuera del rango permisible, en ninguna de las muestras simples.

Promedio mensual (P.M.)

Es el valor que resulte de calcular el promedio ponderado en función del caudal, de los valores que resulten del análisis de al menos dos muestras compuestas (Promedio diario).

Instantáneo

Es el valor que resulta del análisis de laboratorio a una muestra de agua residual tomada de manera aleatoria o al azar en la descarga.

CAPÍTULO II

BIODIESEL

2.1. Qué es biodiesel.

El biodiesel es un combustible renovable derivado de aceites o grasas de origen vegetal o animal. El prefijo bio hace referencia a su naturaleza renovable y biológica en contraste con el combustible diesel tradicional derivado del petróleo; mientras que diesel se refiere a su uso en motores de este tipo. Como combustible, el biodiesel puede ser usado en forma pura o mezclado con diesel de petróleo.

El National Biodiesel Board (la asociación de productores norteamericanos de biodiesel) lo define como un combustible compuesto de ésteres mono-alquílicos de ácidos grasos de cadena larga derivados de aceites o grasas, vegetales o animales.

Este biocombustible se obtiene mediante un proceso químico llamado transesterificación, en el cual los aceites orgánicos son combinados con un alcohol y alterados químicamente para formar un éster etílico o metílico, el cual recibe finalmente el nombre de biodiesel. Estas moléculas resultantes están compuestas por un ácido graso de cadena larga y un alcohol.

El biodiesel es un biocombustible líquido que se obtiene a partir de lípidos naturales como aceites vegetales o grasas animales, con o sin uso previo, mediante procesos industriales de esterificación y transesterificación, y que se aplica en la preparación de sustitutos totales o parciales del petrodiesel o gasóleo obtenido del petróleo.



Figura 10. Aspecto del biodiesel.

2.2. Antecedentes del biodiesel.

La idea de usar aceites vegetales como combustible para los motores de combustión interna data de 1895, cuando el Dr. Rudolf Diesel (figura 11) desarrollaba su motor. En la presentación del motor diesel en la Exposición Mundial de París, en 1900, el Ing. Diesel usaría aceite de maní como combustible, o, mejor dicho, como biocombustible.

Años después Diesel fue muy claro al señalar que «el motor diesel puede funcionar con aceites vegetales, esto podría ayudar considerablemente al desarrollo de la agricultura de los países que lo usen así». Hacia 1912 afirmaría que «el uso de los aceites vegetales como combustibles para los motores puede parecer insignificante hoy en día, pero con el transcurso del tiempo puede ser tan importante como los derivados del petróleo y el carbón en la actualidad».

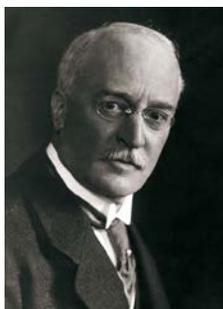


Figura 11. Rudolf Diesel.

Las predicciones de Diesel tomarían su tiempo para empezar a tomar cuerpo y, en este lapso de, más o menos un siglo, los motores diesel evolucionarían y se perfeccionarían utilizando fundamentalmente destilados medios de petróleo con mucha menor viscosidad que los aceites vegetales. La principal razón por la que actualmente no podríamos usar aceites vegetales directamente en los motores es, precisamente, su mayor viscosidad. La química proporciona una solución para disminuir esta viscosidad: la transesterificación.

Este proceso fue desarrollado por los científicos E. Duffy y J. Patrick a mediados del siglo XIX, cuarenta años antes que Diesel desarrollara su motor de combustión interna. Los aceites vegetales (y también las grasas animales) están constituidos por moléculas (ésteres) de ácidos grasos y glicerol. A éste último, los aceites y grasas le deben su elevada

viscosidad. La transesterificación, en sencillo, consiste en reemplazar el glicerol (alcohol trivalente) por un alcohol monovalente («más ligero») usualmente metanol o etanol, formando moléculas más pequeñas (ésteres monoalquílicos, comúnmente denominado biodiesel), con una viscosidad similar a la del combustible diesel derivado del petróleo. Asimismo, se produce glicerina, sustancia que tiene numerosos usos en diversas industrias.

Durante el siglo XX, algunos intentos se realizaron para utilizar aceites como combustible para vehículos. Antes de la segunda guerra mundial se introdujo el uso de aceites transesterificados como combustible en vehículos pesados en el África. Durante la década de los años 40, los franceses trabajaron con el aceite de piñón (*Jatropha curcas*) como combustible sin tener resultados positivos. Posteriormente se realizaron algunos ensayos en la República Federal de Alemania y Austria con aceite de colza (*Brassica napus*); y en Cabo Verde y en Malí también con aceite de piñón, obteniéndose excelentes resultados.

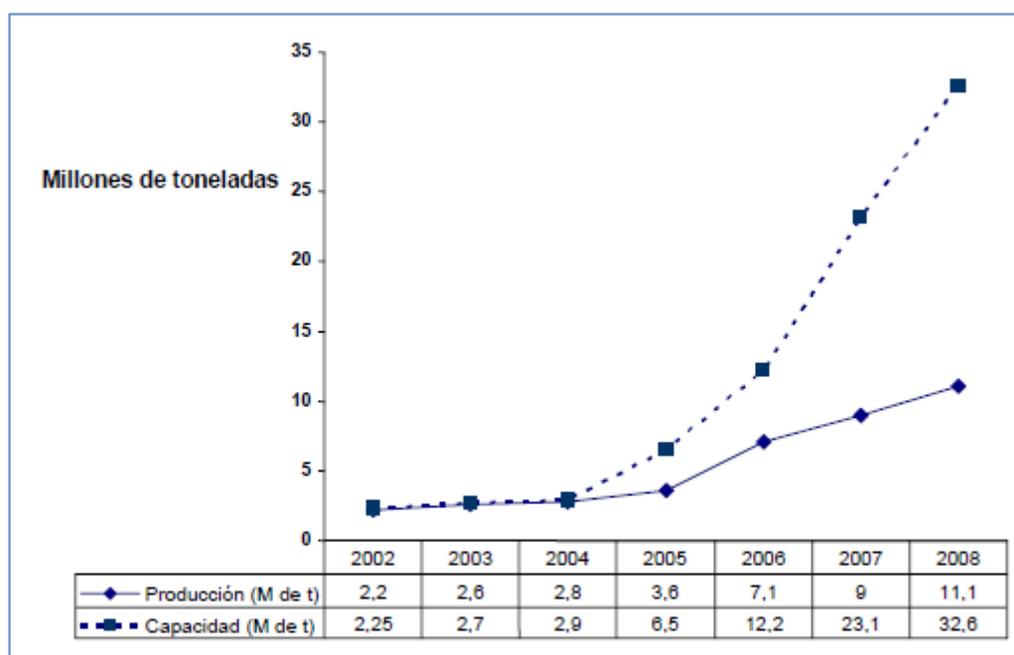
Sin embargo, el resurgimiento de la idea de Diesel, de emplear aceites vegetales en sus motores, empieza a cobrar fuerza nuevamente hacia finales del siglo XX, esta vez bajo la forma de biodiesel, e impulsado, principalmente, por preocupaciones ambientales relacionadas con el cambio climático y la necesidad de encontrar alternativas al uso de combustibles fósiles. Hasta hace pocos años era posible identificar otras motivaciones, además de las ecológicas, para impulsar su uso en diferentes regiones; por ejemplo, los excedentes de la producción de soya en los Estados Unidos, o los excedentes de la producción agraria en Europa que impulsaron la política de poner tierras en descanso para no afectar los precios de los productos agrícolas. En ambos casos, la producción de biodiesel, sea a partir de soya en los Estados Unidos, o de otros cultivos energéticos como la colza o el girasol en Europa, aparecía como excelente alternativa a estas situaciones específicas, a la vez que contribuía con la mitigación del cambio climático. No obstante, requería aún de importantes subsidios o exenciones tributarias para asegurar su viabilidad, ya que los precios de los aceites vegetales eran sustancialmente mayores que los del diesel.

Es con la espectacular subida de los precios del petróleo a partir del 2004, que los precios de los aceites vegetales y las grasas animales se empiezan a equiparar con los del diesel y generan este reciente *boom* de los biocombustibles líquidos a nivel mundial, que incluye

también al bioetanol, que es básicamente etanol o alcohol etílico, que puede utilizarse como complemento o sustituto de la gasolina. Y aquí valdría la precisión, a manera de resumen, que, cuando hablamos de biodiesel, básicamente nos referimos a un complemento o sustituto del diesel, pero producido a partir de aceites vegetales o grasas animales.³

2.3. Situación actual del biodiesel.

La producción mundial de biodiesel se mantuvo relativamente estable entre dos y tres millones de toneladas anuales hasta el 2004, y no es hasta el 2005, cuando la producción se dispara hasta alcanzar en el 2008 las 11,1 millones de toneladas. Con ello se registra una tasa anual de crecimiento de 37%⁴ para el período 2004-08. Ver figura 12.



Fuente: Biodiésel 2020: A Global Market Survey.

Figura 12. Producción actual y capacidad de producción de biodiesel en el mundo, en el período 2002–2008.

³ CASTRO PAULA. Opciones para la producción y uso del biodiesel en Perú. 1^{era} edición, Lima: Soluciones Prácticas-ITDG. 2007.

En la actualidad, la producción mundial de biodiesel se concentra en pocos países. Por ejemplo, del total durante el 2006, alrededor del 75% se produjo en Europa, donde Alemania contribuyó con el 55%, y la mayor parte del 25% restante fue producido por Estados Unidos de América. Estas cifras son muy dinámicas entre los países de América que reportan la producción de biodiesel a cierta escala comercial (como Canadá, Brasil y Argentina), mientras que la mayoría de los demás países informan una producción incipiente o en una escala de prueba.

- *Producción de biodiesel en México.*

La Secretaría de Energía (SENER) ha comenzado a evaluar la posibilidad de desarrollar un programa de fomento al uso de biocombustibles como fuente de energía renovable, de manera que contribuyan a la diversificación del abasto de energéticos y a la reducción del consumo de carburantes fósiles, responsables de la generación de emisiones de gases con efecto invernadero. La intención es fomentar el uso de distintos biocombustibles líquidos, en especial el biodiesel y el bioetanol, elaborado a partir del bagazo de la cosecha de la caña de azúcar o del maíz.

Previo al diseño de un programa de fomento, se han realizado estudios de factibilidad necesarios para analizar el mercado nacional de los posibles insumos, así como la demanda potencial de dichos combustibles.

Como resultado de estos estudios, se ha determinado que la producción de biodiesel a escala comercial puede ser factible en México en el mediano plazo, de realizar acciones integrales que deben incluir aspectos técnicos, económicos y medioambientales, de concertación con el sector agrario y agroindustrial así como un esfuerzo importante en investigación y desarrollo tecnológico (SENER *et al.* 2006).

2.4. Ventajas y desventajas del biodiesel.

2.4.1. Ventajas:

- Desde el punto de vista energético el biodiesel constituye una fuente de energía renovable y su balance energético es positivo; es decir, la energía total contenida en el combustible es mayor que la que se invierte a lo largo de su proceso de fabricación.
- Biodiesel es el único combustible alternativo que funciona en cualquier motor diesel convencional (figura 13).
- Puede almacenarse en cualquier lugar donde el diesel de petróleo se guarda.
- Biodiesel puede usarse puro o mezclarse en cualquier proporción con el combustible diesel de petróleo. La mezcla más común es de 20% de biodiesel con 80% diesel de petróleo, denominado "B20."
- El biodiesel reduce en 90% los riesgos de contraer cáncer.
- Biodiesel contiene 11% de oxígeno en peso y no contiene azufre. El uso de biodiesel puede extender la vida útil de motores porque posee mejores cualidades lubricantes que el combustible de diesel de petróleo, mientras el consumo, encendido, rendimiento, y torque del motor se mantienen prácticamente en sus valores normales.
- El biodiesel puro se destina a usos especiales, como el transporte público (microsculares, recolección de residuos, etc.) y el marino. En éste último caso, se evita la contaminación de los ríos y lagos con derrames de combustibles de petróleo. El biocombustible no daña a los peces, que incluso pueden digerirlo bien.
- El punto de inflamación del biodiesel se encuentra cercano a los 130°C. Al tener un punto de inflamación elevado, y además al no producir vapores explosivos, el biodiesel es mucho más seguro de operar, transportar y almacenar que el diesel convencional, aun utilizando la misma infraestructura y los mismos procedimientos para la manipulación y almacenaje.



Figura 13. Uso del biodiesel en cualquier motor a diesel.

Las ventajas medioambientales que ofrece el biodiesel son:

- Reducción de un 50% de las emisiones de monóxido de carbono.
- Reducción de un 65% de las emisiones de partículas. Reducción de un 50% de las emisiones de hidrocarburo.
- Utilización de un catalizador de oxidación.
- Utilización de aditivos.
- Los olores de la combustión en los motores diesel por parte del diesel de petróleo, son reemplazados por el aroma de las palomitas de maíz o papas fritas.
- Reducción total de las emisiones de óxidos de azufre, ya que los aceites grasa, por su propio origen, no contienen azufre. Esto conlleva a una reducción del fenómeno de la lluvia ácida, del que los óxidos de azufre son los principales causantes.
- Se evita la contaminación de las tierras, de las aguas subterráneas.

2.4.2. Desventajas:

Las principales particularidades a ser consideradas en la utilización de los ésteres metílicos de los aceites vegetales en motores diesel son:

- *Prestaciones:* Se advierte una ligera pérdida de potencia y un leve incremento del consumo debido a un poder calorífico menor que el de los gasóleos, aunque el rendimiento de la combustión es algo superior.

- *Dilución del aceite de lubricación:* En algunos casos se ha detectado una pérdida de viscosidad en el aceite de lubricación, pero siempre en valores inferiores al 5%.
- *En los vehículos más antiguos* (modelos anteriores a la mitad de los 90`s), cuyas mangueras y empaques son de caucho natural y no estén adaptadas al uso de biodiesel pueden sufrir con el uso prolongado del mismo, debido a que el biodiesel puede corroer ciertos tipos de gomas, y se pueden requerir algunas modificaciones en las mangueras de combustible (generalmente baratas y fáciles de realizar).
- *Limitaciones por bajas temperaturas:* Los puntos de enturbiamiento de los ésteres, superiores en algunos casos a los del gasóleo, pueden provocar problemas de funcionamiento en climas fríos. Estas dificultades se obviarían con la utilización de aditivos.
- *Incompatibilidad con materiales:* Los ésteres son más agresivos que el gasóleo y pueden atacar al caucho y a los tipos comunes de pinturas. Para evitar el riesgo de estos ataques, es conveniente utilizar pinturas acrílicas y sustituir las conducciones de caucho por teflón o caucho fluorado.
- *Menor estabilidad y formación de depósitos carbonosos:* Debido a los enlaces insaturados que llevan estas moléculas, presentan una estabilidad menor en almacenamientos prolongados y tienen mayor facilidad para descomponerse en las prereacciones que se producen antes de la combustión.
- *Retardo del punto de inyección del motor:* Esta solución aunque efectiva, supondría la modificación del motor, que reduciría las ventajas del biodiesel.
- *Establece una clara competencia con la tierra cultivable,* desembocando de esta manera a su vez en una competencia con los precios de los alimentos. Es decir que la tierra que antes se utilizaba para el cultivo de alimentos, ahora se utilizaría para el cultivo de biocombustibles (figura 14).



Figura 14. Desventaja del biodiesel.

2.5. Propiedades del biodiesel.

El biodiesel se describe químicamente como compuestos orgánicos de ésteres monoalquílicos de ácidos grasos de cadena larga y corta.

El biodiesel tiene mejores propiedades lubricantes y mucho mayor índice de cetano que el diesel de poco azufre. El agregar en una cierta proporción biodiesel al gasóleo reduce significativamente el desgaste del circuito de combustible y, en baja cantidad y en sistemas de altas presiones, extiende la vida útil de los inyectores que dependen de la lubricación del combustible.

El poder calorífico del biodiesel es 37,27 MJ/L (megajulio por litro) aproximadamente. Esto es un 9% menor que el diesel. La variación del poder calorífico del biodiesel depende de la materia prima usada más que del proceso.

El biodiesel es líquido a temperatura ambiente y su color varía entre dorado y marrón oscuro según el tipo de materia prima usada. Es inmiscible con el agua, tiene un punto de ebullición alto y baja presión de vapor. Su punto de inflamación (superior a 130 °C) es mucho mayor que el del diesel (64 °C) o la gasolina (-40 °C). Tiene una densidad de aproximadamente 0,88 g/cm³, menos que el agua. Tiene pH neutro (pH=7).

2.6. Factores que afectan el rendimiento de la reacción de transesterificación.

Debido a que la obtención del biodiesel se basa en la reacción química de la transesterificación, se debe resaltar que hay variables como la acidez y la humedad, el tipo de catalizador y concentración, la relación molar de alcohol/aceite y tipo de alcohol, el efecto del tiempo de reacción y la temperatura, entre otras que afectan significativamente el proceso, las cuales se describen a continuación.

2.6.1. Acidez y humedad.

Los contenidos de ácidos grasos y de humedad son los parámetros determinantes de la viabilidad del proceso de transesterificación del aceite vegetal. Para que se realice la reacción completa se necesita un valor de ácidos grasos libres menores al 3%. Cuanta más alta es la acidez del aceite, menor es la conversión. Además, tanto el exceso como la deficiencia de catalizador pueden producir la formación de jabón. Como se ha comentado, la presencia de humedad disminuye el rendimiento de la reacción, pues el agua reacciona con los catalizadores formando jabones.

Igualmente, el proceso de catálisis ácida también se puede usar para la esterificación de estos ácidos. Las materias primas usadas como base para el proceso de alcoholisis deben cumplir ciertas especificaciones. Los triglicéridos deben tener un valor ácido bajo y los materiales deben contener baja humedad. La adición de catalizadores de hidróxido de sodio compensa la alta acidez, pero el jabón resultante provoca un aumento de viscosidad o de formación de geles que interfieren en la reacción y en la separación del glicerol. Cuando no se dan estas condiciones los rendimientos de la reacción se reducen sustancialmente.

Actualmente, la mayor parte del biodiesel producido, procede de aceites vegetales al que se le añade metanol y un catalizador alcalino. Sin embargo hay muchos aceites de bajo costo y grasas animales que pueden ser utilizados. Su problema radica en que suelen contener gran cantidad de ácidos grasos que no se pueden convertir en biodiesel usando catalizadores alcalinos. En estos casos es necesario hacer la esterificación en dos etapas: inicialmente debe realizarse un pretratamiento para convertir los ácidos grasos libres en ésteres metílicos

con un catalizador ácido, y en un segundo paso se realiza la transesterificación con un catalizador alcalino, para completar la reacción.

2.6.2. Tipo de catalizador y concentración.

Los catalizadores empleados para la transesterificación de los triglicéridos se pueden clasificar en alcalinos, ácidos, enzimáticos o catalizadores heterogéneos, siendo los básicos y en particular los hidróxidos los más utilizados. Si el aceite usado tiene un alto grado de ácidos grasos y elevada humedad los catalizadores ácidos son los más adecuados. Estos ácidos pueden ser sulfúrico, fosfórico o ácido sulfónico orgánico.

Aunque el proceso de transesterificación, con catalizadores alcalinos, para transformar los triglicéridos en sus correspondientes ésteres metílicos tiene una conversión muy alta en un periodo más corto de tiempo, tiene algunos inconvenientes: el catalizador debe ser separado del producto final, la recuperación del glicerol puede resultar difícil, el agua alcalina resultante del proceso debe ser tratada y los ácidos grasos y el agua afectan a la reacción.

Los catalizadores enzimáticos pueden obtener resultados relevantes en sistemas tanto acuosos como no acuosos. En particular, el glicerol se puede separar fácilmente y los ácidos grasos contenidos en el aceite reutilizado se pueden convertir completamente en esteres alquílicos. En cambio el uso de estos catalizadores enzimáticos tiene un costo superior que el de los alcalinos.

2.6.3 Relación molar de alcohol / aceite y tipo de alcohol.

Una de las variables más importantes que afectan al rendimiento del proceso es la relación molar del alcohol y los triglicéridos. La relación estequiométrica requiere tres moles de alcohol y un mol de triglicérido para producir tres moles de ésteres y un mol de glicerol.

La transesterificación es una reacción de equilibrio que necesita un exceso de alcohol para conducir la reacción al lado derecho (producción ésteres). Para una conversión máxima se debe utilizar una relación molar de 6:1. En cambio un valor alto de relación molar de alcohol afecta a la separación de glicerina debido al incremento de solubilidad. Cuando la

glicerina se mantiene en la solución hace que la reacción revierta hacia la izquierda (reacción reversible), disminuyendo el rendimiento de los ésteres.

La formación de éster etílico comparativamente es más difícil que la de éster metílico, especialmente la formación de una emulsión estable durante la etanólisis es un problema. El etanol y el metanol no se disuelven con los triglicéridos a temperatura ambiente y la mezcla debe ser agitada mecánicamente para que haya transferencia de masa. Durante la reacción generalmente se forma una emulsión, en la metanólisis esta emulsión desciende rápidamente formándose una capa rica en glicerol quedándose en la parte superior otra zona rica en éster metílico (biodiesel). En cambio en la etanólisis esta emulsión no es estable y complica mucho la separación y purificación de los ésteres etílicos. La emulsión está causada en parte por la formación de monoglicéricos y diglicéricos intermedios, que contienen tanto grupos hidróxidos polares como cadenas de hidrocarburos no polares.

2.6.4. Efecto del tiempo de reacción y temperatura.

- ✓ La conversión aumenta con el tiempo de reacción.
- ✓ La transesterificación se puede producir a diferentes temperaturas, dependiendo del tipo de aceite.



Figura 15. Tiempo y Temperatura importantes para el rendimiento de la reacción.

2.7. Descripción del proceso de elaboración del biodiesel.

2.7.1. Pretratamiento del aceite.

- *Filtrado de las impurezas del aceite* (se aplica sólo a los aceites usados)
Filtrar el aceite para quitarle los restos de comida. Es mejor calentarlo hasta 35° C (95° F), aproximadamente, para que esté más fluido y pase bien por el filtro.

- *Eliminación del agua presente en el aceite*

Se suele calentar el aceite, previo al proceso, para quitarle el agua. El aceite que ha sido utilizado para cocinar es el más propenso a contener agua, que hace más lenta la reacción y favorece la saponificación.

Calentar el aceite hasta los 100° C (212° F) y mantener la temperatura mientras el agua se evapora. Agitar constantemente para evitar que se formen burbujas de vapor, que luego explotan salpicando aceite caliente.

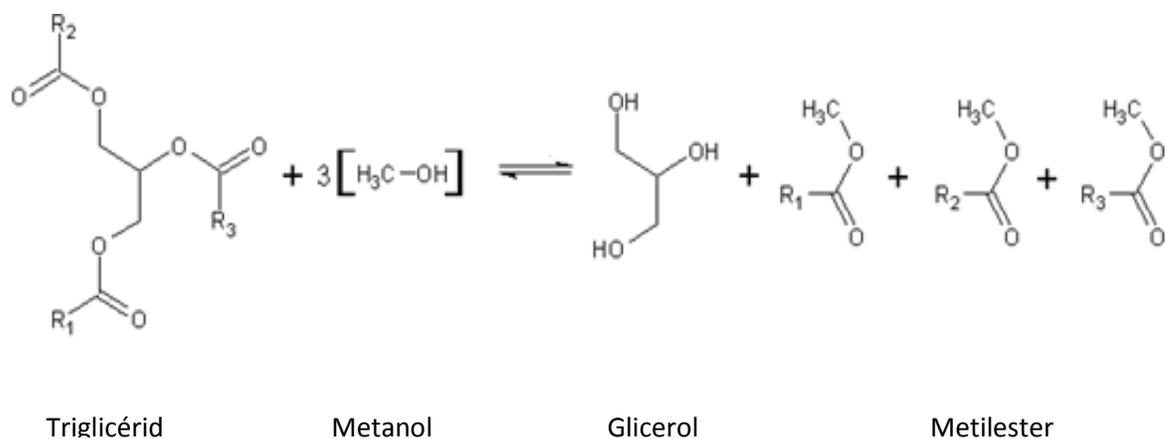
Cuando empiece a salir menos vapor, aumentar la temperatura hasta 130° C (265° F) y mantenerla durante diez minutos. Luego, dejar de calentar y esperar a que se enfríe.

2.7.2. Determinación de acidez del aceite.

Para determinar la acidez del aceite vegetal se realiza un proceso de valoración ácido-base, en el cual se utiliza fenolftaleína como indicador y alcohol isopropílico como disolvente para la muestra.

2.7.3. Reacción de transesterificación.

El proceso de transesterificación consiste en combinar el aceite (normalmente aceite vegetal) con un alcohol ligero, normalmente metanol, y dejar como residuo de valor añadido propanotriol (glicerina) que puede ser aprovechada por la industria cosmética, entre otras.



Reacción de transesterificación.

2.7.4. Separación.

Una vez hecha la reacción se deja enfriar y reposar en la cual se presenta una interface biodiesel-glicerina y se separa la glicerina.

2.7.5. Lavado de biodiesel.

El método de lavado del biodiesel para llevarlo a una calidad óptima para usarlo como combustible consiste en separar los jabones del combustible lavándolo con agua una o varias veces.

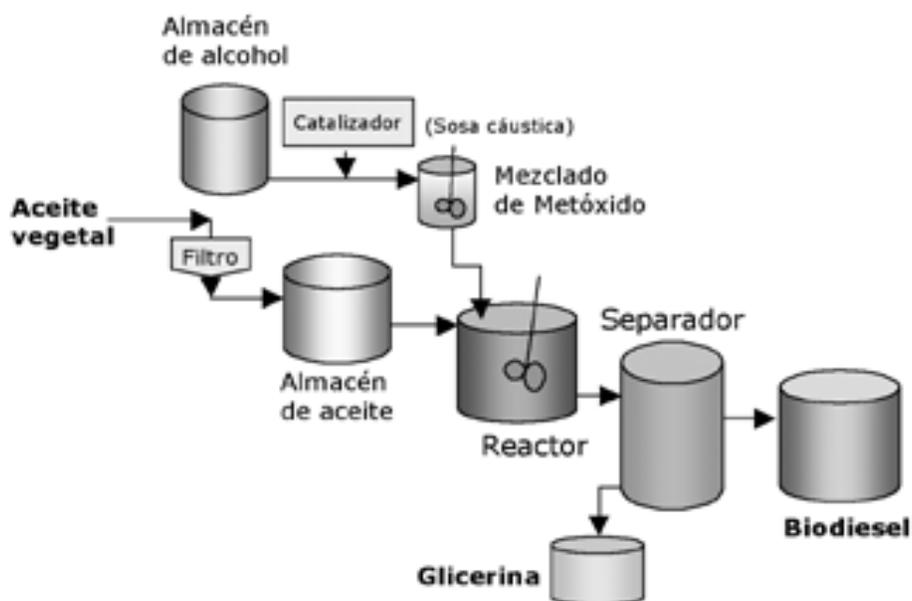


Figura 16. Proceso de producción del biodiesel.

CAPÍTULO III
DESARROLLO EXPERIMENTAL

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.

En primera instancia se pretende producir biodiesel a nivel laboratorio. Durante este trabajo se propusieron diferentes materias primas con las cuales se puede producir el biodiesel, con las cuales se analiza el mejor rendimiento en base a la cantidad de producto.

Además se realizaron análisis fisicoquímicos, con los cuales se pretende caracterizar el agua que sale del proceso de producción del biodiesel y saber la cantidad de grasas y aceites contenidas en las aguas residuales de dichos procesos y poder proponer un tren de tratamiento.

Como el proceso de producción del biodiesel es conocido, se sabe de los contaminantes que tienen las muestras de aguas residuales de dicho proceso, por eso se realizan exclusivamente los siguientes análisis fisicoquímicos: pH, temperatura, turbidez, olor, conductividad, grasas y aceites.

Procedimiento a seguir:

1. Se produce biodiesel con aceite vegetal usado.
2. Con diferentes materias primas se prepara el biodiesel y se calcula el rendimiento.
3. Se recolecta el agua que se obtiene del proceso, en botella de PET con su respectiva etiqueta.
4. Se realizan los análisis fisicoquímicos siguientes: pH, conductividad, olor, temperatura, turbidez, grasas y aceites. De acuerdo a los fundamentos teóricos y técnicos el Standard Methods for the Water and Wastewater que son métodos normalizados internacionalmente.
5. Con la caracterización hecha anteriormente se procedió a ocupar dos tipos de coagulantes y diferentes pH's, para saber cuál era el indicado para el tratamiento y así poder reducir las grasas y aceites contenidas en las aguas obtenidas del proceso.
6. Una vez encontrado el coagulante indicado se procede a proponer un método de tratamiento para el agua residual.
7. Por último se realizaron nuevamente los análisis fisicoquímicos indicados en el punto 3 para ver si las muestras de agua cumplen con las normas.

3.1. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL PARA OBTENER EL BIODIESEL.

Material y Reactivos para preparar 1L de biodiesel:

- Primero se filtra el aceite, ya que trae restos de comida debido a que es reciclado. (Tratamiento preliminar)
- Calentar el aceite hasta los 100° C (212° F) y mantener la temperatura mientras el agua se evapora. Agitar constantemente para evitar que se formen burbujas de vapor, que luego explotan salpicando aceite caliente. (Tratamiento preliminar).
- Se preparan 100 ml de una solución de hidróxido de sodio a 0.025 M.

Cálculo:

$$[100ml] \left[\frac{0.025mol}{L} \right] \left[\frac{40g}{1mol} \right] \left[\frac{1L}{1000ml} \right] = 0.1g NaOH$$

Se tiene que pesar 0.1 g de NaOH y diluir en un matraz volumétrico de 100 ml para tener la concentración requerida.

- Teniendo la solución a 0.025 M se determinará la acidez del aceite, realizando la valoración correspondiente; para determinar la cantidad de hidróxido de sodio que se agregó en la reacción de transesterificación. Con la finalidad de tener mayor seguridad, se repite la valoración tres veces, ya que si hay exceso de hidróxido de sodio la reacción será de saponificación y no se obtendrá el biodiesel.

Se carga la bureta con la solución de hidróxido de sodio a 0.025M

Se preparan las tres muestras en los vasos de precipitado de 50 ml, agregando 1ml de aceite y 10ml de alcohol isopropílico y tres gotas de fenolftaleína como indicador.

Se titula, se agrega la hidróxido de sodio hasta que la solución se torne rosa.

Para determinar la cantidad en gramos de hidróxido de sodio que se agregará a la reacción se realiza el cálculo siguiente:

$$x_{mi} \text{ agregados en la valoración } \left[\frac{1L}{1000ml} \right] \left[\frac{40g}{1mol} \right] 0.025 \frac{mol}{L} = xg \text{ de NaOH}$$

- Pesar la cantidad de hidróxido de sodio que se va utilizar.
- Se mide 1L de aceite y se pone a calentar hasta que llegue a una temperatura de 50°C (temperatura óptima para la reacción).
- Por otro lado se prepara el metóxido que consiste en agregar a 250 ml de metanol y los gramos de hidróxido de sodio que fueron pesados anteriormente. Para que se disuelva bien el hidróxido de sodio en el metanol se pone a calentar.
- Una vez obtenido el metóxido se vierte en el aceite caliente y se lleva a cabo la reacción de transesterificación durante 1 hora y media.
- Pasado el tiempo de reacción se vierte en embudo de separación y se deja reposar para separar por decantación la glicerina (subproducto).



Figura 17. Reposo del biodiesel para decantar glicerina.

- Después de separar bien la glicerina del biodiesel se le hacen los tres lavados. Que consiste en agregar agua en una proporción de un 1/3 del volumen de aceite y agitar suavemente por unos cinco minutos. Esto se hace para que se limpie el biodiesel de restos de glicerina o jabones que pudiera tener.



Figura 18. Lavado del biodiesel.

- Se recolecta el agua que se ocupó para el lavado del biodiesel.



Figura 19. Agua recolectada.

Nota: para preparar biodiesel con aceite vegetal nuevo no se hace el tratamiento preliminar.

3.2. DETERMINACIÓN DEL RENDIMIENTO DE LA REACCIÓN CON LAS DIFERENTES MATERIAS PRIMAS (ACEITE VEGETAL NUEVO, ACEITE VEGETAL USADO, GRASA ANIMAL Y COMBINACIÓN DE ACEITE VEGETAL USADO Y GRASA ANIMAL).

Para obtener el rendimiento que se tiene con las diferentes materias primas, se tomó en cuenta el procedimiento de fabricación de biodiesel mencionado anteriormente.

- Se prepara biodiesel con aceite vegetal nuevo (1), aceite vegetal usado (2), grasa animal (grasa obtenida del pollo rostizado 3) y la combinación de aceite vegetal usado y grasa animal (4).

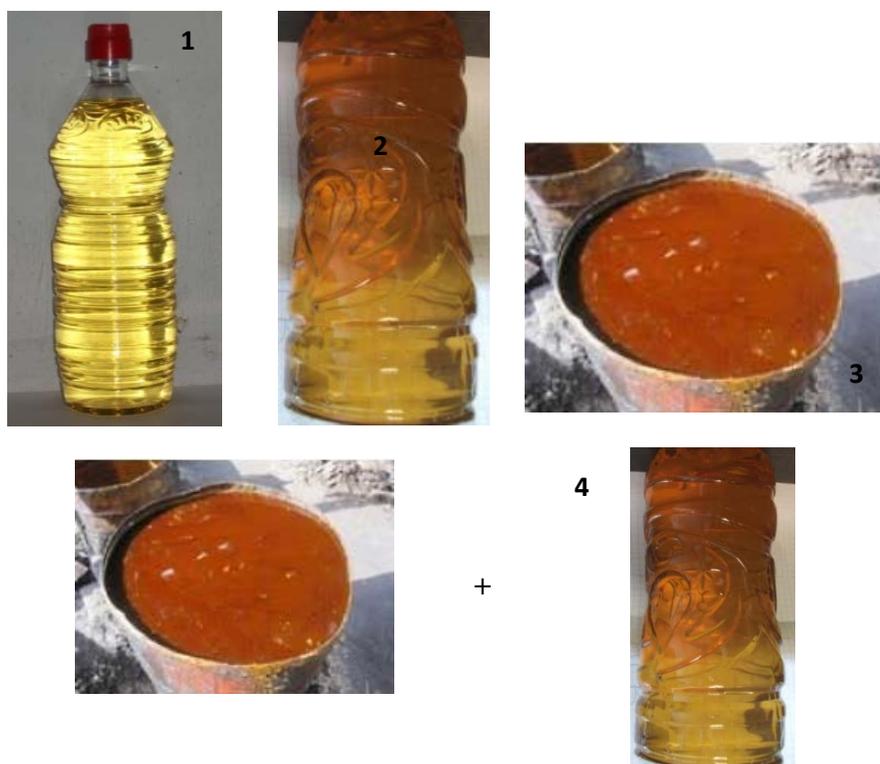
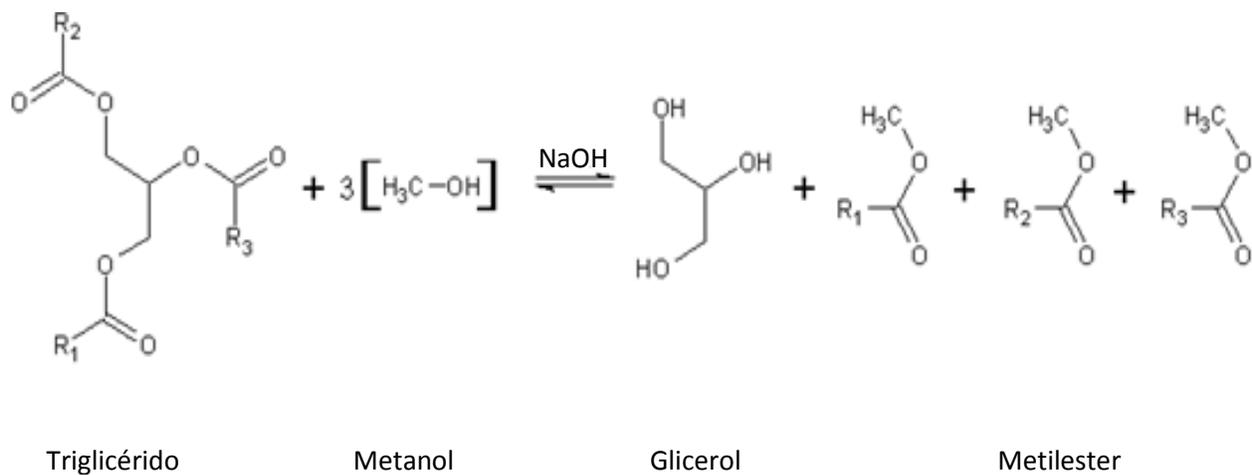


Figura 20. Diferentes materias primas para producir biodiesel.

- Con un vaso de precipitado se mide la cantidad de biodiesel obtenida del proceso.
- El rendimiento se calcula de la siguiente manera:

$$\text{rendimiento \%} = \frac{\text{cantidad real del producto}}{\text{cantidad ideal del producto}} * 100$$

La cantidad ideal del producto es un litro, ya que en la reacción de transesterificación se necesita 1 mol de aceite y 3 moles de metanol para llevar a cabo la reacción, es decir, el metanol se encuentra en exceso y el reactivo limitante viene siendo el aceite, por tanto el rendimiento se calcula en base al reactivo limitante.



$$\text{rendimiento } \% = \frac{\text{cantidad real del biodiesel}}{1 L} * 100$$

3.3. PRUEBAS FISICOQUÍMICAS:

3.3.1. DETERMINACIÓN DE pH.

El pH se determina potenciométricamente mediante la medida del potencial eléctrico que se crea en la membrana de un electrodo de vidrio, que es función de la actividad de los iones hidrógeno a ambos lados de la membrana

Procedimiento

1. Calibración del pH-metro con las soluciones buffer (de acuerdo con las instrucciones del aparato).
2. La temperatura de la muestra debe ser la adecuada para efectuar la medida de pH (temperatura ambiente).
3. En un vaso de precipitados de 50 ml verter la muestra de agua residual. Se tomará como valor de pH de la muestra, cuando la medida de lectura sea estable por al menos 1 minuto. El valor puede ser leído con una precisión de 0,1 unidades o 0,01 unidades.
4. Entre medida y medida de pH de muestras diferentes, el electrodo debe limpiarse con agua destilada y posteriormente secado.

*Nota: la conductividad fue medida con el aparato oakton PC 510

3.3.2. DETERMINACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD.

Conductividad eléctrica de un agua es la aptitud de esta para transmitir la corriente eléctrica, definida como la conductancia de una columna de agua comprendida entre dos electrodos metálicos de 1 cm^2 de superficie y separados el uno del otro por 1cm.

Procedimiento:

1. Calibrar el equipo con la celda de conductividad correspondiente y la solución de 1413 $\mu\text{S}/\text{cm}$ que incluye el aparato.
2. Una vez calibrado se enjuaga con agua destilada y se seca con un paño.

3. Verter en un vaso de precipitados de 50 ml la muestra de agua residual.
4. Se sumerge en la muestra el electrodo
5. Dejar que se estabilice para tomar la lectura.

Interferencias:

- Cuando el agua contenga grandes cantidades de material en suspensión tener cuidado de no ensuciar el electrodo.
- Eliminar las burbujas de aire presentes en la celda de medición.
- Evitar que las grasas y aceites cubran todo el electrodo, porque afectan a la medición.

*Nota: la conductividad fue medida con el aparato oakton PC 510

3.3.3. DETERMINACIÓN DE OLOR.

Por razones de seguridad antes de olfatear la muestra, se debe verificar el origen. Gases liberados podrían ser tóxicos o muestra de alta temperatura.

1. Verter una muestra de agua residual en el vaso de precipitados de 50 ml.
2. Oler la muestra detenidamente a una distancia corta y anotar características.

3.3.4. DETERMINACIÓN DE LA TEMPERATURA.

Procedimiento

1. Verter una muestra de agua residual al vaso de precipitados de 50 ml.
2. La lectura de temperatura se realizará sumergiendo el termómetro en el interior de la muestra hasta una profundidad determinada y esperando hasta lectura constante. Esta medida se realizará nada más tomar la muestra (si la climatología lo permite) y al llegar al laboratorio.

3.3.5. DETERMINACIÓN DE LA TURBIDEZ.

La turbidez se refiere a lo clara o turbia que pueda estar el agua. El agua clara tiene un nivel de turbidez bajo y el agua turbia o lodosa tiene un nivel alto de turbidez.

Procedimiento:

1. Calibrar el turbidímetro con la solución a 0.00NTU.
2. Verter en una celda para turbidímetro aproximadamente 10 ml de la muestra de agua residual.
3. Una vez calibrado el turbidímetro, se introduce la celda con agua residual.
4. Se toma la lectura cuando se estabilice el equipo.

Interferencias:

- La presencia de residuos flotantes y de materia fina, los cuales pueden sedimentarse rápidamente, darán lecturas bajas.
- Pequeñas burbujas de aire pueden afectar el resultado de manera positiva.
- Existen numerosas fuentes de error como son empañamiento de las celdas, suciedad del vidrio, y efectos de vibración que alteran la visibilidad superficial de la muestra los cuales conducirán a errores de lecturas.

* Nota: la turbidez fue medida con el aparato Lamotte 2020 e/i

3.3.6. DETERMINACIÓN DE GRASAS Y ACEITES.

Método partición- gravimetría.

Fundamento: la grasa disuelta o emulsionada se extrae del agua por contacto íntimo con un solvente de extracción (Triclorotrifluoroetano o benceno).

Cabe mencionar que en la determinación de grasas y aceites no se mide una cantidad absoluta de una sustancia específica, más bien se determinan cuantitativamente grupos de sustancias con características físicas similares sobre la base de su solubilidad común en un disolvente orgánico dado.

Procedimiento:

- Poner a peso constante los vasos de precipitado de 100 ml. (W1)
Esta técnica permite conocer cuando una muestra ha perdido por completo o casi por completo la humedad.
- Tomar una muestra de 250 ml de agua residual y acidificar a pH=2 con 1 ml de HCl.
- Aclárese con cuidado el recipiente que contenía la muestra con 20 ml de benceno.
- Añadir al embudo de separación, la muestra acidificada y los 20 ml de disolvente (primer lavado). Agitar vigorosamente durante 2 min., hasta que se presenten dos fases.
- Separar las fases del embudo, sacando en primera instancia la fase inorgánica y posteriormente la orgánica que se ha de ir colectando en el vaso de precipitado sometido previamente a peso constante.
- Introducir nuevamente al embudo de separación la fase inorgánica y adicionar un volumen de 20 ml de disolvente (segundo lavado); agitar y separar las fases.
- Realizar un último lavado adicionando a la fase inorgánica 20 ml de disolvente (tercer lavado).
- La fase orgánica (la que se acumuló a lo largo de los tres lavados), que contiene básicamente aceite más disolvente, ha de someterse a evaporación en una parrilla, dentro de la campana de extracción hasta que se evapore el disolvente y quede un residuo.
- Introducir al desecador durante media hora y pesar (W2)

- El cambio de peso registrado en el vaso en que se colectó la fase orgánica y que después se sometió a evaporación y desecación; menos su peso inicial (peso constante), representa el contenido de grasas y aceites contenidos en un volumen de 250 ml de agua (volumen muestra).

Interferencias

- Los disolventes orgánicos tienen la facilidad de disolver no solamente las grasas y aceites minerales y vegetales, sino también otras sustancias como azufre elemental, tintes y otros compuestos orgánicos.
- Existen pérdidas importantes de hidrocarburos de cadena corta y aromáticos simples con puntos de ebullición menores a 150°C.
- Puede obtenerse interferencia positiva durante el secado del residuo debido a la adsorción de humedad si no se utiliza un desecador.

3.3.7. PROCEDIMIENTO PARA ELEGIR UN COAGULANTE.

Este método consiste en remover contaminantes y partículas suspendidas en aguas residuales. Para esto es necesario probar con diferentes coagulantes, mediante la prueba de jarras, con la finalidad de elegir un coagulante eficaz en función del pH y su concentración.

Procedimiento:

- Medir el pH de la muestra de agua residual.
- Colocar en dos vasos diferentes una muestra de agua residual de 400 ml.
- Adicionar a uno de los vasos con la muestra de agua residual el coagulante de FeCl_3 al 10%. El coagulante se adiciona de mililitro en mililitro.
- Adicionar al otro vaso con muestra de agua residual el coagulante ácido muriático al 24 %. El coagulante se adiciona de mililitro en mililitro.
- Observar a qué pH se forman mejor los flóculos y hay menor turbidez.
- Elegir el coagulante más eficaz para este tipo de agua residual.

3.3.8. FILTRACIÓN CON CARBÓN ACTIVADO Y NEUTRALIZACIÓN.

La filtración se realiza con carbón activado con la finalidad de mejorar la calidad del agua, esto es, que el carbón activado sirve para eliminar el olor y color en las aguas residuales.

La neutralización se lleva a cabo debido a que el agua tiene un pH de uno, ya que durante el tratamiento del agua residual se utiliza ácido muriático para la separación de grasas y aceites.

Procedimiento para la filtración con carbón activado:

1. A la muestra de agua residual de 250 ml agregar 1.5 g de carbón activado.
2. Agitar la muestra con varilla de vidrio hasta que el carbón activado se disperse bien.
3. Filtrar por gravedad la muestra de agua residual.

Procedimiento para la neutralización:

1. Se sumerge el electrodo del pH-metro en una muestra de agua residual de 250 ml.
2. Se mide pH inicial.
3. Se agrega hidróxido de sodio (aproximadamente 4 g) a la muestra de agua residual.
4. Se mide pH nuevamente. Si el pH está dentro de un rango de 6.5-7.5 la muestra estará neutralizada.

Nota: la filtración con carbón activado se vuelve a realizar ya que al neutralizar el agua, esta presenta turbidez nuevamente.

3.4. ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LAS MUESTRAS.

3.4.1. Rendimiento del biodiesel con diferentes materias primas.

De acuerdo a lo explicado en el procedimiento experimental en la sección 3.1. se produce biodiesel con diferentes materias primas y se obtiene lo siguiente del producto:

Aceite vegetal nuevo		
Color	dorado	 Apariencia
Olor	aceite	
pH	7,0	
Rendimiento	100%	

Tabla 5. Resultado con aceite vegetal nuevo.

De acuerdo con la tabla 5, el producto obtenido con el aceite vegetal nuevo, tiene un color dorado, el olor es ligeramente a aceite vegetal, en cuanto al pH registrado (neutro) es una característica buena, ya que al hacerle los tres lavados se fueron todos los residuos que pudiera tener el biodiesel. El rendimiento es del 100%, lo cual es bueno ya que el producto obtenido es de 1L.

Aceite vegetal usado		
Color	dorado oscuro	 Apariencia
Olor	aceite	
pH	6,9	
Rendimiento	97%	

Tabla 6. Resultado con aceite vegetal usado.

De acuerdo con la tabla 6, el color de biodiesel es un dorado oscuro, esto es debido a que el aceite para producir este biodiesel es usado pero permite que el porcentaje de rendimiento sea de un 97%, lo cual es bueno puesto que indica que el aceite a pesar de ser usado no tenía tanta humedad y su acidez no es muy alta. El pH esta considerable es de 6.9 cercano al pH neutro que debe de tener. El olor es ligeramente aceite, ya que es un característica distintiva del biodiesel debido a la materia prima usada.

Grasa animal (pollo rostizado)		
Color	Marrón oscuro	 <p>Apariencia</p>
Olor	grasa	
pH	7,1	
Rendimiento	92%	

Tabla 7. Resultado con la grasa animal.

De acuerdo con la tabla 7, la apariencia del biodiesel es un color marrón esto es debido a que se utilizó grasa animal (grasa del pollo rostizado), el rendimiento aun así es bueno, además el pH se considera bueno está cercano al pH ideal. El olor cambia a grasa por la materia prima usada.

Combinación (AVU+ GA)		
Color	Marrón claro	 <p>Apariencia</p>
Olor	grasa	
pH	7,2	
Rendimiento	95%	

Tabla 8. Resultado con la combinación.

AVU= aceite vegetal usado

GA= grasa animal

De acuerdo con la tabla 8, el color es un marrón claro puesto que aquí se hizo la combinación de materia prima (aceite vegetal usado con grasa del pollo rostizado). Sin embargo predominó el olor de la grasa, el pH es de 7.2 está cercano a pH neutro se considera dentro de lo permitido. El rendimiento es del 95% es alto.

Analizando las tablas anteriores es obvio que con el aceite nuevo se tenga el mejor rendimiento (100%); es por esto que el aceite vegetal nuevo se podría decir que es la base para calcular el rendimiento de las otras materias primas. A pesar de que las otras materias primas son usadas se tuvo un buen rendimiento, debido a que su grado de acidez no es muy alto, además de que no contenían tanta humedad.

Lo que es obvio también es que dependiendo de la materia prima utilizada para producir biodiesel es el color que va a obtener el producto.

En el caso del biodiesel producido con la grasa del pollo rostizado fue el que tuvo menor rendimiento, esto se debe a que esta grasa es más viscosa, además de que venía en condiciones más críticas porque tenía demasiado sólidos suspendidos, tenía mucho tiempo de estar almacenado lo que produjo que tuviera una mayor acidez con respecto a las otras materias primas.

Viéndolo desde un punto de vista industrial y para producir a gran escala, este tipo de materia prima es conveniente, ya que garantizará buena calidad para el producto. Si se tiene la materia prima en otras condiciones, es decir quemado y con humedad, aun así es servible; por eso se le da un pretratamiento a la materia prima usada, además ya estando en una situación así resulta convenientemente aceptable, ya que la materia prima principal es el aceite vegetal o la grasa animal.

3.4.2. Pruebas fisicoquímicas aplicadas al agua residual del proceso.

Las diferentes muestras de agua residual son compuestas, ya que fueron tomadas después de los tres respectivos lavados que se le hacen al biodiesel.

Se tomaron cinco muestras compuestas diferentes para el análisis fisicoquímico.

Las muestras recolectadas son el producto de hacer cinco veces biodiesel con aceite vegetal usado.

Tabla 9. Resultados de análisis fisicoquímicos hechos al agua residual.

Muestras Parámetros	1	2	3	4	5	Promedio
Olor	aceite vegetal					
Turbidez (NTU)	1238	1394	1535	1465	1528	1432
pH	8.23	8.5	8.8	8.63	8.74	8.576
Temperatura (°C)	22	22	22	22	22	22
Conductividad ($\mu S/cm$)	1438	1425	1514	1459	1662	1499.6
Grasas y aceites (mg/L)	9526.4	9801.6	10173.6	9946	10054	9900.32

- El olor del agua residual es de aceite vegetal, esto es debido a que como el biodiesel al ser lavado, el agua arrastra todas las trazas de grasas y aceites que pudiese tener el mismo.
- La turbidez es elevada, ya que el agua proveniente de este proceso es una emulsión grasas y aceites en agua, por eso el agua presenta una coloración entre amarillo y blanco lechoso como se muestra en la figura 21.

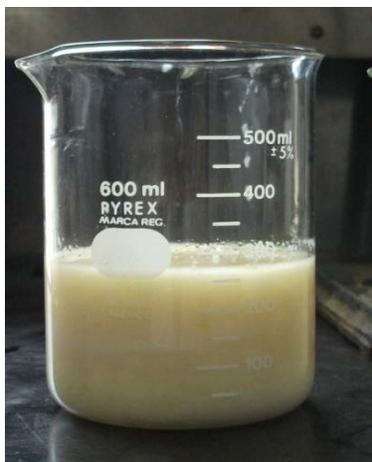


Figura 21. Aspecto del agua residual.

- El pH se encuentra en un rango de 8 y 9, esto pudiese ser porque trae trazas de jabones (glicerina) y sosa cáustica, por eso es que tiene pH alcalino.
- En cuanto a la temperatura es a temperatura ambiente en todas las muestras, esto es que debido a que el proceso es tipo batch, el agua queda en reposo por algunas horas.
- Las conductividades en las muestras son altas, es decir, hay presencia de sales que son capaces de conducir la electricidad; en este caso se trata de las trazas de hidróxido de sodio presentes en las muestras.
- La cantidad de grasas y aceites en las muestras están dentro de un rango de 9526.4 – 10173.6 mg/L, lo cual indica que son muy altas, esto es, debido a la cantidad de grasas y aceites emulsionados en las mismas.

Para lograr un tratamiento efectivo en las diferentes muestras de agua residual, se analizó el proceso de elaboración del biodiesel, mediante el cual se obtuvieron las muestras, la mayor cantidad de contaminación de las aguas se lleva a cabo en el primer lavado y los contaminantes disminuyen para el segundo y tercer lavado, por lo que se podría decir que las muestras tiene dilución ya que se colectó el agua de los tres lavados para caracterizar cada una de las muestras antes mencionadas. Debido a todo esto se llegó a la conclusión de que el contaminante principal en estas aguas son las grasas y aceites, que de ninguna manera se separan por gravedad, es por este motivo que se pensó en un tratamiento que rompa en primera instancia la emulsión.

Una vez obtenidos todos estos parámetros, se propone el tren de tratamiento en base a la cantidad de grasas y aceites emulsionados en las muestras por lo que se hacen pruebas con dos coagulantes para saber a qué pH y dosis se deben de manejar.

Para esto es necesario tomar en cuenta el pH de las muestras que como ya se había mencionado está entre un rango de 8-9, sabiendo esto y la característica principal del agua residual que se encuentra en emulsión, y en base a la literatura, para romper una emulsión de este tipo, se prueba con coagulantes inorgánicos catiónicos, que para este caso se ocupa el ácido muriático y el FeCl_3 .

Tomando en cuenta que para la prueba de determinación de grasas y aceites se maneja un pH ácido, se hicieron pruebas a pHs de 1, 2, 3, 4, 5, y 6 para las muestras de agua residual, utilizando los dos coagulantes; obteniendo que a pH=1 se forman mejor los flóculos de las muestras en la superficie.

Sabiendo el pH adecuado (pH=1), para las muestras, se procede a determinar experimentalmente la cantidad de mililitros que se tienen que agregar de cada coagulante, esto es, en un vaso de precipitado se pone una muestra de agua residual con un volumen de 250 ml y un rango de pH 8-9, se carga en la bureta el coagulante (FeCl_3 al 10% o ácido muriático al 24%), se agrega de mililitro en mililitro el coagulante que se tenga y se va midiendo el pH hasta tener un valor aproximado de 1. Esto se hace para facilitar el tratamiento.

Obteniendo lo siguiente:

- Se agregan 36 ml de FeCl_3 al 10% para llegar a $\text{pH} \approx 1$ en la muestra.
- Se agregan 10 ml de ácido muriático al 24% para llegar a $\text{pH} \approx 1$ en la muestra.

Sabiendo la cantidad que se tiene que agregar tanto de ácido muriático como de cloruro férrico, se procede a agregar a las muestras la cantidad indicada para elegir el mejor coagulante.

Se agrega el FeCl_3 al 10% para que la muestra tenga pH=1. Los flóculos formados con este son muy dispersos, además de que el agua presenta mayor turbidez debido a que la muestra se torna de un color naranja por la presencia de Fe^{3+} (ver figura 22).



Figura 22. Muestra con cloruro férrico a pH=1

Con el ácido muriático al 24 % para que la muestra tenga pH=1. Se nota que la ruptura de la emulsión es más rápido y se muestran los flóculos aglomerados en la superficie mucho más estable (ver figura 23).



Figura 23. Muestra con HCl a pH=1

Comparando los dos coagulantes se obtiene mejor resultado con el ácido muriático, ya que la formación de flóculos en la superficie es más estable, además de que la presencia de Fe^{3+} tendría que ser eliminada posteriormente lo cual significaría un costo más para el tratamiento.

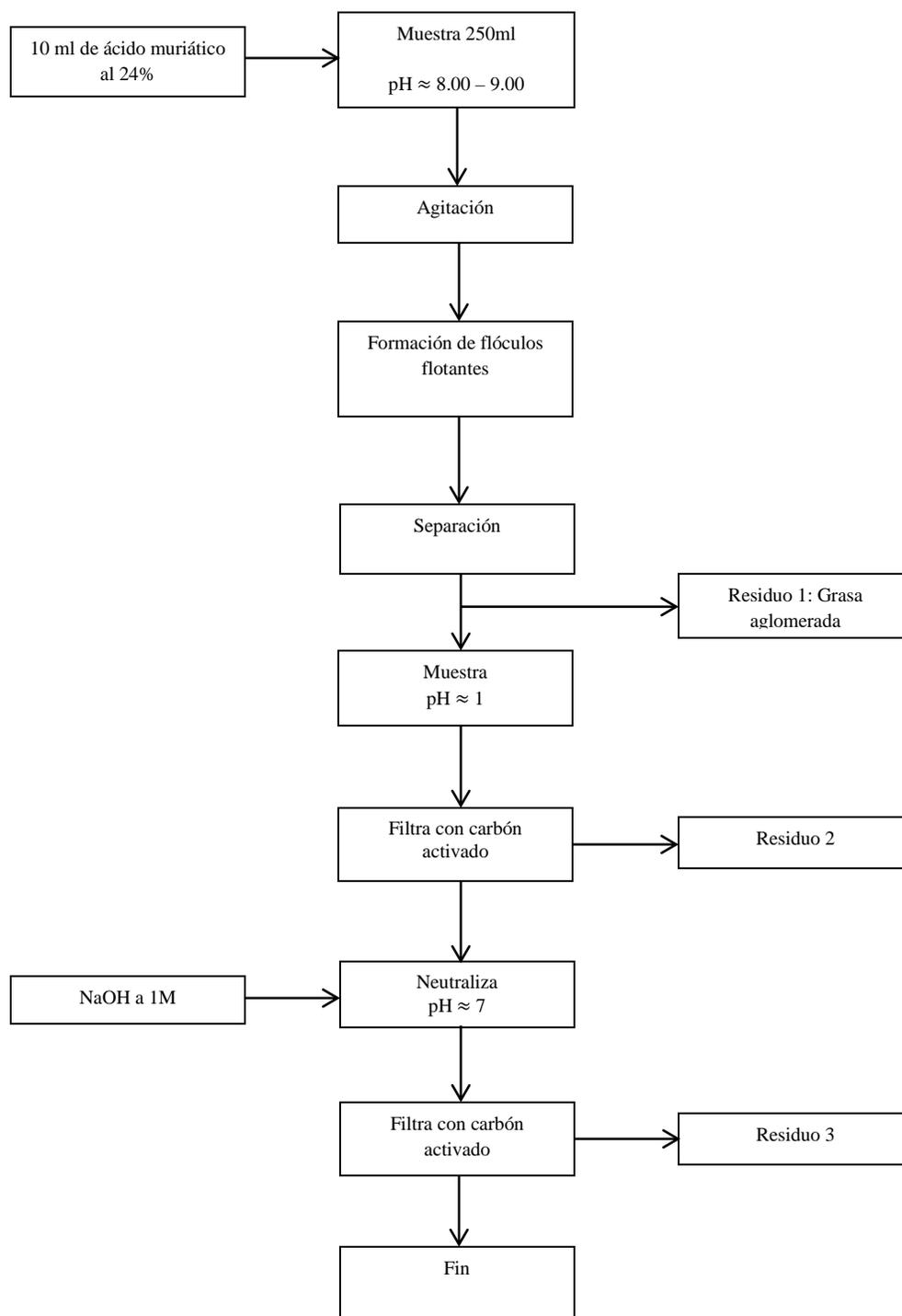
Elegido el coagulante ideal para este tratamiento se procede a probar dicho tratamiento con las 5 muestras diferentes haciendo lo siguiente:

3.5. Propuesta de tren de tratamiento.

Explicación del método de tratamiento:

1. A las muestras de agua residual se vierten 10 ml de ácido muriático (HCl comercial al 24%).
2. Se aplica agitación leve durante 10 minutos para mejorar la aglomeración de flóculos.
3. Una vez formados flóculos y se estabilicen en la superficie se procede a la separación de las grasas y el agua.
4. Las muestras se filtran con carbón activado para disminuir la turbidez que presenten.
5. Se neutralizan con sosa a pH de 7 aproximadamente.
6. Por último se filtran nuevamente con carbón activado.

Diagrama de flujo del tren de tratamiento:



Si se quiere implementar el proceso del biodiesel con una planta para tratar el agua quedaría como se indica en el siguiente diagrama de flujo (ver figura 24).

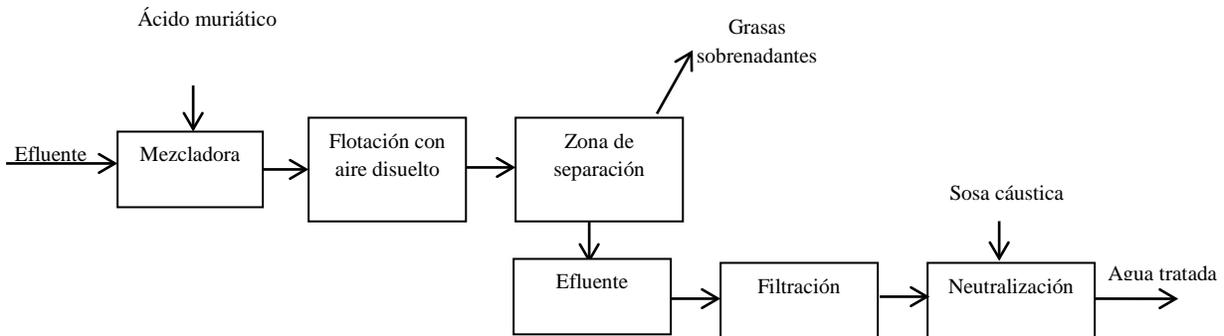


Figura 24. Diagrama de flujo de la planta para tratamiento del agua residual del proceso de fabricación del biodiesel.

No se abarcará más información sobre el tratamiento a nivel industrial, ya que no es parte del trabajo.

3.5.1. Costo del tratamiento:

En base al tratamiento de la muestra se calcula el costo estimado para un litro de agua tratada. Suponiendo que solamente se tomará en cuenta el costo de los reactivos, ya que al invertir en un tratamiento de agua bien vale la pena ya que se puede reutilizar en el proceso y se estaría ahorrando mucho en no tener que comprar o pagar el agua.

Como base se toman los 250ml usados como muestra:

10ml de ácido muriático.

4g de sosa cáustica.

3g de carbón activado en polvo.

Cotización de reactivos:

1L de ácido muriático al 24% cuesta \$3.00

1Kg de sosa cáustica al 98% cuesta \$12.00

250g de carbón activado cuesta \$6.00

Entonces:

$$(0.01L * \$3.00) + (4 \times 10^{-3} Kg * \$12.00) + \left(\frac{3g * \$6.00}{250g} \right) = \$0.15$$

Por lo tanto: \$0.15 centavos cuesta tratar 250ml, para un litro sería lo siguiente:

$$\frac{1000ml * \$0.15}{250ml} = \boxed{\$0.6}$$

Con base al artículo de investigación, remoción de aceite emulsificado en efluentes de refinerías mediante desestabilización de la emulsión y flotación⁴; se menciona que el costo de tratamiento de agua es de \$0.10/m³, lo que lleva a pensar que el tratamiento a nivel laboratorio tiene un costo elevado, ya que se trata solamente 1L de agua. Sin embargo, no hay una comparación directa en cuanto a esto, debido a que lo que se propone es a pequeña escala.

3.6. Análisis de resultados después de tratamiento.

Una vez aplicado el tren de tratamiento propuesto se realizan los mismos análisis fisicoquímicos al agua que resulta después del tratamiento (ver figura 25).



Figura 25. Apariencia del agua después del tratamiento.

⁴ Petia Mijaylova Nacheva, "Remoción de aceite emulsificado en efluentes de refinerías mediante desestabilización de la emulsión y flotación". [en línea]. <<http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/mexico26/ii-076.pdf>>.

Tabla 10. Tabla de resultados después del tratamiento.

Muestras Parámetros	1	2	3	4	5	Promedio
Olor	inodora	inodora	inodora	inodora	inodora	inodora
Turbidez (NTU)	9.18	9.75	10.04	9.9	10.04	9.782
pH	6.84	6.72	6.65	6.79	6.98	6.796
Temperatura (°C)	23	23	23	23	23	23
Conductividad ($\mu S/cm$)	2182	2234	2634	2436	2570	2411.2
Grasas y aceites (mg/L)	122	147.2	200	156.4	188.4	162.8

- Las aguas resultaron ser inodoras, ya que después del tratamiento se eliminó el olor de aceite y grasa, esto es debido a todo lo que se le agregó al agua, lo que es bueno puesto que el agua no tendrá un olor desagradable.
- La turbidez disminuyó demasiado, esto es debido a que en el momento de la ruptura de la emulsión se llevó gran parte de ese color amarillo blanco lechoso, de hecho éste se puede notar físicamente en la muestra (ver figura 25). La muestra tiene ligera turbiedad, pero es posible ver a través de ella.
La turbidez disminuyó alrededor de un 99%.
- El pH está entre un rango de 6.5 a 7, lo que es bueno ya que al estar entre parámetros neutros indica buena calidad en el agua.
- La temperatura aumentó ligeramente, esto es debido a todos los reactivos y procesos a los que se sometió el agua para su tratamiento.
- La conductividad aumentó ligeramente, esto es debido a la presencia de iones, al momento de la neutralización cuando se le agregó hidróxido de sodio; además de que hay presencia de cloruros por el ácido muriático mismo que se le agregó a las muestras.

- En cuanto a la cantidad de grasas y aceites aún hay en las muestras, pero es mínima comparada con la que tenían desde un inicio. Se disminuyó la cantidad de grasas y aceites alrededor de un 98%, lo cual es significativo.

Tabla 11. Tabla comparativa de resultados del antes y después del tratamiento.

Muestras Parámetros	Antes del tratamiento	Después del tratamiento	Porcentaje de disminución
Olor	Aceite vegetal	inodora	elevada
Turbidez (NTU)	1432	9.782	99.31%
pH	8.576	6.796	-
Temperatura (°C)	22	23	-
Conductividad ($\mu S/cm$)	1499.6	2411.2	- 60.78%
Grasas y aceites (mg/L)	9900.32	162.8	98.35%

CAPÍTULO IV
CONCLUSIONES

CONCLUSIONES

Las conclusiones con respecto al trabajo son las siguientes:

- Se cumplió el objetivo de producir biodiesel a nivel laboratorio con materia prima reciclada.
- Se determinó que el rendimiento con diferentes materias primas obteniendo un alto rendimiento, está dentro de un rango del 92% al 100%, lo cual es significativo, puesto que casi no hubo pérdida de producto con las materias primas recicladas.
- En cuanto a la colecta de agua que se tuvo durante este proceso se pudieron realizar con ellas pruebas fisicoquímicas que permitieron proponer un tren de tratamiento con una eficiencia del 98.35%, lo cual es motivo de que la presencia de grasas y aceites en el agua es mínima comparada con la que se tenía en un principio (de 9900.32 mg/L a 162.8 mg/L) así la eficiencia resultó satisfactoria. Con esto se cumplen los objetivos de disminuir la cantidad de grasas y aceites contenidos en estas aguas y al mismo tiempo se está cumpliendo con el objetivo principal proponer un tren de tratamiento para el agua del lavado del proceso de fabricación del biodiesel, para disminuir los contaminantes.
- Se entrará a una etapa de optimización para que el tren de tratamiento se aún más eficiente constando con lo siguiente:
 1. El agua residual sea tratada con una mezcla de coagulantes.
 2. El agua debe de tener más tiempo de residencia en la etapa de coagulación para que la separación de las grasas y aceites sea más considerable.
 3. De ser necesario proponer una modelo a escala de flotación por aire disuelto.
- Al estar utilizando materia prima reciclada para la producción de biodiesel, se tienen dos beneficios, se pudo eliminar material que va directo al drenaje puesto que es lo que se hace con este tipo de desperdicio, lo cual ayuda a disminuir

contaminantes en el medio ambiente, y en cuanto al biocombustible producido disminuyó el impacto ambiental debido a todos los beneficios mencionados con anterioridad en el capítulo II.

- En cuanto a que utilizar un desperdicio en este caso aceite vegetal usado o la grasa animal, para producir el biocombustible por lo menos mostró a la persona que recolectó la materia prima a no contaminar vertiendo al alcantarillado los desechos de aceites vegetales y grasas animales.

ANEXO

GLOSARIO:

Aceite lampante: Denominado así porque en la antigüedad era el que se empleaba para las lámparas de aceite que iluminaban los hogares.

Agente surfactante: Los **tensoactivos** o **tensioactivos** (también llamados **surfactantes**) son sustancias que influyen por medio de la tensión superficial en la superficie de contacto entre dos fases (p.ej., dos líquidos insolubles uno en otro). Cuando se utilizan en la tecnología doméstica se denominan como emulgentes o emulsionantes; esto es, sustancias que permiten conseguir o mantener una emulsión.

Alcohólisis: Rompimiento de una molécula debido a la acción de un alcohol, análogo a la hidrólisis donde el rompimiento se efectúa mediante agua.

Alilo: El grupo alilo es un grupo alqueno con la fórmula $\text{CH}_2=\text{CH}-\text{CH}_2-$. Está compuesto por un grupo vinilo $\text{CH}_2=\text{CH}-$, enlazado a un grupo metileno $-\text{CH}_2-$. Por ejemplo el alcohol alílico que tiene la estructura $\text{CH}_2=\text{CH}-\text{CH}_2-\text{OH}$. Los compuestos que contienen un grupo alilo muchas veces son llamados compuestos alílicos. El lugar del carbono saturado donde este grupo se enlaza (por ejemplo con un $-\text{OH}$) es llamado posición alílica o sitio alílico.

Antropogénicas: Se refiere a los efectos, procesos o materiales que son el resultado de actividades humanas a diferencia de los que tienen causas naturales sin influencia humana.

Bituminosos: Son sustancias de color negro sólidas o viscosas, dúctiles, que se ablandan por el calor y comprenden a aquellos cuyo origen son los crudos petrolíferos como también a los obtenidos por la destilación destructiva de sustancias de origen carbonoso.

Coagulación: La coagulación consiste en desestabilizar los coloides por neutralización de sus cargas, dando lugar a la formación de un floculo o precipitado.

Efluente: La salida o flujos salientes de cualquier sistema que despacha flujos de agua, a un tanque de oxidación, a un tanque para un proceso de depuración biológica del agua, etc. Esta es el agua producto dada por el sistema.

Emulsión: Es una mezcla de líquidos inmiscibles de manera más o menos homogénea.

Escinde: Separar o dividirse en dos o más partes de importancia similar.

Floculación: La floculación trata la unión entre los flóculos ya formados con el fin de aumentar su volumen y peso de forma que puedan decantar. Consiste en la captación mecánica de las partículas neutralizadas dando lugar a un entramado de sólidos de mayor volumen. De esta forma, se consigue un aumento considerable del tamaño y la densidad de las partículas coaguladas, aumentando por tanto la velocidad de sedimentación de los flóculos.

Inertización: La inertización es un término técnico que significa "dejar quieto", "dejar inactivo", se aplica en la ingeniería ambiental para indicar un proceso de tratamiento de residuos catalogados como residuo peligroso, sean líquidos o sólidos, para inactivar o minimizar su potencial naturaleza química y su posterior disposición final.

Influyente: Es el flujo de agua que pasa a través de la planta para ser tratado.

Inmiscible: Se aplica a la sustancia que no puede ser mezclada con otra, como el aceite con el agua.

Lamelas: Son placas paralelas que aumentan la superficie de contacto y por ende la eficiencia de la sedimentación.

Lipasa: Es una enzima ubicua que se usa en el organismo para disgregar las grasas de los alimentos de manera que se puedan absorber. Su función principal es catalizar la hidrólisis de triacilglicerol a glicerol. Las lipasas se encuentran en gran variedad de seres vivos.

Micela: Se denomina micela al conglomerado de moléculas que constituye una de las fases de los coloides. Es el mecanismo por el cual el jabón solubiliza las moléculas insolubles en agua, como las grasas.

Miscibilidad: Es un término usado en química que se refiere a la propiedad de algunos líquidos para mezclarse en cualquier proporción, formando una solución homogénea. En principio, el término es también aplicado a otras fases (sólidos, gases), pero se emplea más a menudo para referirse a la solubilidad de un líquido en otro. El agua y el etanol (*alcohol etílico*), por ejemplo, son miscibles en cualquier proporción.

Tensión superficial: A la fuerza que actúa por centímetro de longitud de una película que se extiende se le llama tensión superficial del líquido, la cual actúa como una fuerza que se opone al aumento de área del líquido. La tensión superficial es numéricamente igual a la proporción de aumento de la energía superficial con el área y se mide dinas· cm⁻¹.

Usufructo: Es la utilidad o provecho que se obtiene de una cosa.

BIBLIOGRAFÍA:

1. INSTITUTO INTERAMERICANO DE COOPERACIÓN PARA LA AGRICULTURA, Atlas de la agroenergía y los biocombustibles en las Américas, San José, 2010.
2. GRUPO PROCESOS FISICOQUÍMICOS APLICADOS. Lavado del biodiesel. Colombia, octubre 2010.
3. JPT, CIB, JPD; Perspectivas generales de desarrollo de la Industria de los biocombustibles en el Uruguay. Tesis Profesional. Contador Público. Facultad de ciencias Económicas y Administración. Octubre 2009.
4. ESPINOZA G. Diseño y construcción de un reactor batch para la obtención por transesterificación de biodiesel a partir de aceite de cocina reciclado. Tesis profesional. Ingeniería Química. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, 2009.
5. CASTRO PAULA. Opciones para la producción y uso del biodiesel en Perú. 1^{era} edición, Lima: Soluciones Prácticas-ITDG. 2007.
6. APHA, AWWA, WPCF. Métodos normalizados para el análisis del agua potable y aguas residuales.- 16^a. Ed. Díaz Santos, S.A. 1995.
7. GREEBERG A. Standard Methods for the Water and Wastewater, 16^a ed. American Public Health Association, USA. 1985.
8. RAMALHO, R.S, Tratamiento de aguas residuales. Ed. Reverté, México, 1993.
9. GUERRERO, R. Tratamiento físico-químico del agua residual proveniente de la industria de papel reciclado. Tesis profesional. Ingeniería Química. FES Cuautitlán, UNAM. México, 2011.
10. SEMARNAT. Norma Mexicana NMX-AA-005 Aguas-Determinación de grasas y aceites -Método de extracción Solhlet, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 8 de agosto de 1980.
11. SEMARNAT. Norma Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996 que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales vertidas en aguas y bienes nacionales. Publicada en el diario oficial de la federación el 6 enero de 1997.

12. SEMARNAT. Norma Mexicana NOM-002-ECOL-1996 establece los máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado. Publicada en el diario oficial de la federación el 3 de junio de 1998.
13. SEMARNAT. Norma Mexicana NOM-003-ECOL-1997 establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público. Publicada en el diario oficial de la federación el 3 de junio de 1998.
14. Anónimo. “Las grasas, aceites y soluciones de tratamiento de efluentes aceitosos”. [en línea]. <<http://www.e-seia.cl/archivos/gyaAP.pdf>>. [Consulta Junio 2011].
15. Anónimo. “Tren de Tratamiento para aguas residuales” [en línea]. <<http://proyectos.iingen.unam.mx/LACClimateChange/Presentacion.html>>. [Consulta Julio 2011].
16. Anónimo. “La producción de biodiesel”. [en línea]. <<http://www.biodisol.com/como-hacer-biodiesel-produccion-y-fabricacion-de-biodiesel-casero/>>. [Consulta Junio 2011].
17. Anónimo. “Biodiesel”. Revista electrónica. [en línea]. Julio del 2004. [en línea]. <<http://www.miliarium.com/Monografias/Biocombustibles/Biodiesel/ProcesoProduccionBiodiesel.asp>>. [Consulta Agosto 2011].
18. Silvia Falasca, Ana Ulberich “Las especies del género *Jatropha* para producir biodiesel en Argentina”. Revista electrónica. Marzo 2008. [en línea]. <<http://revistavirtual.redesma.org/vol3/pdf/investigacion/Jatropha.pdf>>. [Consulta Agosto 2011].
19. Keith Addison “Cómo hacer biodiesel” Journey to Forever. [en línea]. <<http://es.journeytoforever.org/biocombustibles/como-hacer-biodiesel.cgi#secado-aceite>>. [Consulta Junio 2011].
20. Anónimo “tratamiento de aguas residuales”. Enciclopedia con contenido libre. [en línea]. <http://es.wikipedia.org/wiki/Tratamiento_de_aguas_residuales>. [Consulta Julio 2011].