



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

**EVALUACIÓN DEL PRE TRATAMIENTO DE AGUA ÁCIDA Y ALCALINA PROVENIENTE
DEL LAVADO DE BIODIESEL Y PROPUESTA DE SOLUCIONES PARA VIABILIZAR SU
POST TRATAMIENTO ADECUADO**

Dalia Milena Berreondo del Valle

Asesorado por el Ing. Jorge Mario Estrada Asturias

Guatemala, noviembre de 2011

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN DEL PRE TRATAMIENTO DE AGUA ÁCIDA Y ALCALINA PROVENIENTE
DEL LAVADO DE BIODIESEL Y PROPUESTA DE SOLUCIONES PARA VIABILIZAR SU
POST TRATAMIENTO ADECUADO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

DALIA MILENA BERREONDO DEL VALLE
ASESORADO POR EL ING. JORGE MARIO ESTRADA ASTURIAS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERA QUÍMICA

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2011

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE LA JUNTA DIRECTIVA

| | |
|-------------------|-------------------------------------|
| DECANO | Ing. Murphy Olympo Paíz Recinos |
| VOCAL I | Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno |
| VOCAL II | Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco |
| VOCAL III | Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón |
| VOCAL IV | Br. Juan Carlos Molina Jiménez |
| VOCAL V | Br. Mario Maldonado Muralles |
| SECRETARIO | Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez |

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

| | |
|--------------------|-------------------------------------|
| DECANO | Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos |
| EXAMINADORA | Ing. Dinna Lissete Estrada Moreira |
| EXAMINADOR | Ing. Adolfo Narciso Gramajo Antonio |
| EXAMINADOR | Ing. Manuel Gilberto Galván Estrada |
| SECRETARIO | Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez |

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**EVALUACIÓN DEL PRE TRATAMIENTO DE AGUA ÁCIDA Y ALCALINA PROVENIENTE
DEL LAVADO DE BIODIESEL Y PROPUESTA DE SOLUCIONES PARA VIABILIZAR SU
POST TRATAMIENTO ADECUADO**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha enero de 2011.



Dalia Milena Berreondo del Valle



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA.

PROGRAMA ACREDITADO POR
Agencia Centroamericana de Acreditación de
Programas de Arquitectura y de Ingeniería
Período 2009 - 2012



Guatemala, 27 de junio de 2010

Ingeniero

Williams Guillermo Álvarez Mejía

Director de la escuela de Ingeniería Química

Universidad de San Carlos

Su despacho

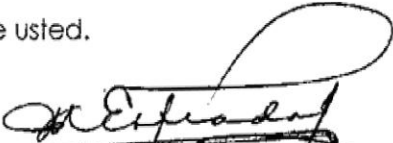
Respetable señor Director:

Me dirijo a usted en relación al INFORME FINAL del trabajo de graduación de la estudiante DALIA MILENA BERREONDO DEL VALLE, carne No. 2005-12161, Titulado **EVALUACIÓN DEL PRE TRATAMIENTO DEL EFLUENTE DE AGUA ÁCIDA Y ALCALINA PROVENIENTE DEL LAVADO DE BIODIESEL Y PROPUESTA DE SOLUCIONES PARA VIABILIZAR SU POST TRATAMIENTO ADECUADO**, del cual he sido nombrado como ASESOR.

Los aspectos metodológicos de la elaboración del INFORME FINAL han sido cubiertos de manera satisfactoria para el cumplimiento del perfil requerido para nuestros egresados, no tengo inconveniente en hacer de su conocimiento que estoy de acuerdo en que dicho INFORME FINAL sea aprobado y que el Srta. Berreondo pueda continuar con los trámites respectivos.

Sin otro particular, suscribo de usted.

Deferentemente,


JORGE MARIO ESTRADA ASTURIAS
INGENIERO QUIMICO
COLEGIADO 685



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

Guatemala, 26 de Octubre de 2011
Ref.EIQ.TG.237.2011

Ingeniero
Williams Guillermo Álvarez Mejía
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
Presente.

Estimado Ingeniero Álvarez:

Como consta en el Acta TG- 89-2010-B-IF le informo que reunidos los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del informe final del trabajo de graduación, para optar al título de **INGENIERA QUÍMICA** a la estudiante universitaria **Dalia Milena Berreondo del Valle**, identificada con carné No 200512161 titulado: "**EVALUACIÓN DEL PRE TRATAMIENTO DE AGUA ÁCIDA Y ALCALINA PROVENIENTE DEL LAVADO DEL BIODIESEL Y PROPUESTA DE SOLUCIONES PARA VIABILIZAR SU POST TRATAMIENTO ADECUADO**", el cual ha sido asesorado por el Ingeniero Químico **Jorge Mario Estrada Asturias**.

Habiendo encontrado el referido informe final **satisfactorio**, se procede a recomendarle autorice a la estudiante **BERREONDO DEL VALLE**, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑAR A TODOS"

Inga. **Teresa Lisely de León Arana M.Sc.**
COORDINADORA
Tribunal que revisó el informe final
Del trabajo de graduación



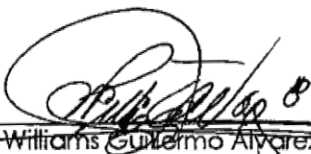
C.c.: archivo



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

Ref.EIQ.TG.299.2011

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Trabajo de Graduación de la estudiante, **DALIA MILENA BERREONDO DEL VALLE** titulado: **"EVALUACIÓN DEL PRE TRATAMIENTO DE AGUA ÁCIDA Y ALCALINA PROVENIENTE DEL LAVADO DE BIODIESEL Y PROPUESTA DE SOLUCIONES PARA VIABILIZAR SU POST TRATAMIENTO ADECUADO"**. Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.


Ing. Guillermo Alvarez Mejia; C.Dr.
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química

Guatemala, noviembre de 2011



Cc: Archivo
WGAM/ale

Universidad de San Carlos
de Guatemala



Facultad de Ingeniería
Decanato

Ref. DTG.526.2011

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al trabajo de graduación titulado: **EVALUACION DEL PRE TRATAMIENTO DE AGUA ACIDA Y ALCALINA PROVENIENTE DEL LAVADO DE BIODIESEL Y PROPUESTA DE SOLUCIONES PARA VIABILIZAR SU POST TRATAMIENTO ADECUADO**, presentado por la estudiante universitaria **Dalia Milena Berreondo del Valle** procede a la autorización para la impresión del mismo.

IMPRIMASE

Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
DECANO



Guatemala, noviembre de 2011

/cc

ACTO QUE DEDICO A:

Dios

Por haber sido una guía durante los momentos más difíciles, dándome fuerza para superar los obstáculos y seguir adelante, dándome valor para continuar y no dejarme vencer, te agradezco infinitamente por todo, ya que más éxitos me esperan.

Mi madre

Edna Elizabett del Valle Rosales, gracias a sus consejos, valores y apoyo que me brindó durante la carrera y toda mi vida, es posible hacer realidad el sueño de convertirme en Ingeniera Química, junto a sus esfuerzos y el mío, hemos logrado con éxito dicho sueño el cual la llena de orgullo. Gracias por su esfuerzo.

Mi padre

Francisco Fabián Berreondo Méndez (g.e.p.d.), gracias por inculcarme valores, por enseñarme a luchar por mis sueños, por apoyarme y guiarme durante el tiempo que estuvo conmigo.

Mis hermanos

Lissie Mariela, Nelson Dario y Ligia Elizabeth Berreondo del Valle, les agradezco el apoyo durante los buenos y malos momentos y la confianza que han tenido en mí. Gracias por estar junto a mí.

| | |
|--|---|
| Mis tíos | Ninfa Ligia Girón Rosales y Juan José Castellanos Guzmán, quienes me brindaron su apoyo durante toda la carrera acogéndome en su casa sin haberme pedido nada a cambio, muchas gracias por todo. |
| Mi tía | Vilma del Valle Rosales por haberme apoyado y animado durante la carrera. |
| Mi primo | Sergio Juan Méndez del Valle (q.e.p.d), gracias por haber sido mi compañero de juegos durante la niñez, mi mejor amigo y por apoyarme siempre. |
| Mis primos | Juan José y Heidy Marissa Castellanos Girón, Vilma Helen y Kevin Josué Méndez del Valle, por haber creído en mí siempre y nunca haber dudado de mis capacidades. |
| Mis amigos | Jeimy Sabrina Barrios Pérez, Rosa María Lemus Fuentes y Diego Ricardo Colindres, por haber compartido buenos y malos momentos, por ser compañeros inseparables de estudio y porque siempre nos apoyamos mutuamente. |
| La Universidad de San Carlos de Guatemala | Por haberme permitido ingresar en esta prestigiosa casa de estudios de élite en Guatemala. |
| La Facultad de Ingeniería | Por haberme instruido y guiado para ser un profesional orgullosamente San Carlista. |

AGRADECIMIENTOS A:

Mis amigos y compañeros

Jeimy Barrios, Rosa Lemus, Diego Colindres, por haber compartido los mejores y peores momentos durante mi formación profesional además de habernos apoyado y trabajado en equipo.

Ingeniero Jorge Estrada

Por haberme asesorado y apoyado durante el tiempo en el cual realicé el trabajo de graduación. Gracias por su paciencia y dedicación.

Ingeniero Otto León

Por haberme enseñado las bases de la carrera, por haber sido comprensivo y paciente y por proporcionarme sus conocimientos que fueron vitales para la realización del trabajo de graduación.

Ingeniero Manuel Tay

Por revisar mi trabajo de graduación y ayudarme a mejorarlo proporcionándome sus conocimientos y consejos.

ÍNDICE GENERAL

| | |
|--|------|
| ÍNDICE DE ILUSTRACIONES | V |
| LISTADO DE SÍMBOLOS | VII |
| GLOSARIO | IX |
| RESUMEN | XIII |
| OBJETIVOS | XV |
| INTRODUCCIÓN | XVII |
| | |
| 1. ANTECEDENTES | 1 |
| | |
| 2. MARCO TEÓRICO: PRODUCCIÓN DE BIODIESEL | |
| 2.1. Biodiesel | 5 |
| 2.2. Materia prima | 6 |
| 2.2.1. Cultivos oleaginosos | 6 |
| 2.2.2. Piñón (<i>jatropha curcas</i>) | 6 |
| 2.2.3. Aceites y grasas usadas | 7 |
| 2.3. Composición de los aceites y grasas | 8 |
| 2.4. Propiedades fisicoquímicas relevantes de las grasas y aceites ... | 10 |
| 2.4.1. Índice de acidez | 10 |
| 2.4.2. Insolubles y agua | 11 |
| 2.5. Producción de biodiesel | 12 |
| 2.5.1. Transesterificación | 12 |
| 2.5.1.1. Transesterificación alcalina | 12 |
| 2.5.1.2. Transesterificación ácida | 14 |
| 2.5.2. Decantación | 15 |
| 2.5.3. Lavado | 15 |

| | | |
|--------|---|----|
| 2.5.4. | Secado..... | 16 |
| 2.5.5. | Filtrado..... | 16 |
| 2.6. | Aguas residuales..... | 16 |
| 2.6.1. | Aguas residuales urbanas..... | 17 |
| 2.6.2. | Aguas residuales industriales..... | 17 |
| 2.7. | Parámetros de calidad de las aguas residuales..... | 18 |
| 2.7.1. | pH..... | 18 |
| 2.7.2. | Demanda bioquímica de oxígeno..... | 18 |
| 2.7.3. | Demanda química de oxígeno..... | 18 |
| 2.7.4. | Nitrógeno..... | 19 |
| 2.7.5. | Fósforo..... | 19 |
| 2.7.6. | Sólidos..... | 19 |
| 2.7.7. | Aceites y grasas..... | 30 |
| 2.7.8. | Metales pesados..... | 20 |
| 2.7.9. | Método de vertido en placa..... | 20 |
| 2.8. | Fundamento legal para las aguas residuales en Guatemala..... | 22 |
| 2.8.1. | Límites máximos permisibles..... | 22 |
| 2.8.2. | Parámetros relevantes de las aguas residuales en la producción de biodiesel..... | 24 |
| | | |
| 3. | MARCO TEÓRICO | |
| 3.1. | Variables..... | 25 |
| 3.2. | Delimitación del campo de estudio..... | 26 |
| 3.3. | Recursos humanos disponibles..... | 27 |
| 3.4. | Recursos materiales disponibles..... | 28 |
| 3.5. | Técnica aplicada..... | 29 |
| 3.6. | Recolección y ordenamiento de la información..... | 40 |
| 3.6.1. | ph en el lecho de grava..... | 32 |
| 3.6.2. | pH de las aguas residuales alcalinas..... | 32 |

| | | |
|--------|--|----|
| 3.6.3. | ph de las aguas residuales ácidaS | 33 |
| 3.6.4. | ph de las aguas residuales en función de la temperatura..... | 34 |
| 3.6.5. | Caudal de las aguas residuales ácidas y alcalinas | 35 |
| 3.6.6. | Recuento aeróbico total..... | 35 |
| 3.7. | Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información..... | 37 |
| 3.8. | Análisis estadístico | 41 |
| | | |
| 4. | RESULTADOS | |
| 4.1. | Comportamiento del ph | 43 |
| 4.2. | Caudal de las aguas residuales..... | 46 |
| 4.3. | Condiciones fisicoquímicas para el desarrollo bacteriano | 48 |
| 4.4. | Eficiencia del lecho de grava para la regulación del ph..... | 49 |
| 4.5. | Propuestas para el pre tratamiento de las aguas residuales | 49 |
| 4.5.1. | Primera propuesta | 40 |
| 4.5.2. | Segunda propuesta..... | 51 |
| 4.5.3. | Tercera propuesta..... | 52 |
| 4.5.4. | Cuarta propuesta | 53 |
| 4.6. | Compración de propuestas..... | 54 |
| | | |
| 5. | INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS | 57 |
| | | |
| | CONCLUSIONES | 65 |
| | RECOMENDACIONES | 67 |
| | BIBLIOGRAFÍA..... | 69 |
| | APÉNDICE..... | 71 |
| | ANEXOS | 81 |

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

| | | |
|-----|--|----|
| 1. | Diagrama de la fosa 1y 2 de la planta de tratamiento de aguas | 4 |
| 2. | Éster monoalquílico..... | 5 |
| 3. | Planta de jatropha curcas..... | 7 |
| 4. | Triglicérido..... | 8 |
| 5. | Ácido graso (ácido oleico) | 9 |
| 6. | Trioxialcohol (glicerol). | 9 |
| 7. | Reacción de transesterificación alcalina | 13 |
| 8. | Mecanismo de reacción de la esterificación fischer | 14 |
| 9. | Procedimiento adecuado para el pre tratamiento de las aguas residuales provenientes del lavado de biodiesel | 27 |
| 10. | Flujo grama de trabajo | 31 |
| 11. | pH en función del agua de lavado de biodiesel producido mediante transesterificación alcalina | 41 |
| 12. | pH en función del agua de lavado de biodiesel producido mediante transesterificación ácida..... | 42 |
| 13. | Comportamiento del pH de las aguas de lavado de biodiesel producido por transesterificación alcalina | 43 |
| 14. | Comportamiento del pH de las aguas de lavado de biodiesel producido por transesterificación ácida | 44 |
| 15. | Aumento del pH de las aguas residuales en función de la temperatura..... | 45 |
| 16. | Pre tratamiento realizado manualmente..... | 50 |
| 17. | Pre tratamiento realizado manualmente de forma continua | 51 |

| | | |
|-----|--|----|
| 18. | Pre tratamiento sin agitación..... | 52 |
| 19. | Pre tratamiento automatizado | 53 |
| 20. | Diagrama de flujo de las propuestas para el pre tratamiento..... | 54 |
| 21. | Agua residual | 59 |
| 22. | Agua residual agitada | 59 |

TABLAS

| | | |
|-------|--|----|
| I. | Límites máximos permisibles para los parámetros de calidad de aguas residuales..... | 23 |
| II. | Definición operacional de las variables | 25 |
| III. | Parámetros de variación y variable de respuesta | 26 |
| IV. | Material y equipo para las variables dependientes | 28 |
| V. | Material y equipo para las variables independientes | 29 |
| VI. | pH de las aguas residuales alcalinas..... | 37 |
| VII. | pH de las aguas residuales ácidas | 37 |
| VIII. | Caudal de las aguas residuales alcalinas | 38 |
| IX. | Caudal de las aguas residuales ácidas..... | 38 |
| X. | pH en función de la temperatura de las aguas residuales a 24h de incubación..... | 39 |
| XI. | Mediciones de pH en la entrada y salida del lecho de grava | 39 |
| XII. | Unidades de formación de colonias en función del pH del agua..... | 40 |
| XIII. | Agua utilizada para lavar un lote de biodiesel producido por transesterificación alcalina..... | 46 |
| XIV. | Agua utilizada para lavar un lote de biodiesel producido por transesterificación ácida..... | 47 |
| XV. | Unidades de formación de colonias en función del pH del agua..... | 48 |
| XVI. | Eficiencia del lecho de grava para regular el pH del agua residual..... | 49 |
| XVII. | Ventajas y desventajas de las propuestas..... | 55 |

LISTADO DE SÍMBOLOS

| Símbolo | Significado |
|-----------------------|---|
| A_L | Agua de lavado |
| Gal | Galones |
| Q_L | Galones de agua por lote de biodiesel |
| Q_t | Galones de agua por unidad de tiempo |
| Q_{AC} | Litros de agua de lavado ácida por lote de biodiesel |
| Q_{AL} | Litros de agua de lavado alcalina por lote de biodiesel |
| mL | Mililitros |
| pH | Potencial de hidrógeno |
| T | Temperatura |
| UFC | Unidades formadoras de colonias |

GLOSARIO

| | |
|-------------------------|---|
| Aceite crudo | Aceite que proviene de un cultivo oleaginoso, después de separarle cualquier sustancia no deseada y ser procesado para luego ser utilizado comúnmente en la industria alimenticia. |
| Aguas residuales | Materiales derivados de residuos domésticos o de procesos industriales, los cuales por razones de salud pública y por consideraciones económicas y estéticas, no pueden desecharse vertiéndolas sin tratamiento en lagos o corrientes convencionales. |
| Biodiesel | 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. |
| Catalizador | Sustancia que está presente en una reacción química en contacto físico con los reactivos, y acelera, induce o propicia dicha reacción sin actuar en la misma. |

| | |
|-----------------------|---|
| Caudal | En dinámica de fluidos, caudal es la cantidad de fluido que pasa en una unidad de tiempo. Normalmente se identifica con el flujo volumétrico o volumen que pasa por un área dada en la unidad de tiempo. |
| Efluente | La salida o flujos salientes de cualquier sistema que despacha flujos de agua, sólidos o desperdicios, a un tanque para un proceso de tratamiento del agua el cual depende de su contenido. |
| Emulsión | Sistema de dos fases que consta de dos líquidos parcialmente miscibles, uno de los cuales es dispersado en el otro. Muchas emulsiones son emulsiones de aceite y agua. |
| Éster | Compuestos orgánicos, en los cuales un grupo orgánico reemplaza a uno o más átomos de hidrógeno en un ácido oxigenado. Es un compuesto derivado formalmente de la reacción química entre un ácido carboxílico y un alcohol. |
| Esterificación | Proceso por el cual se sintetiza un éster. |
| Glicerina | Es un alcohol con tres grupos hidroxilos, es uno de los principales productos de la degradación digestiva de los lípidos y aparece como un producto intermedio en la fermentación alcohólica. |

| | |
|-------------------------|---|
| Hidrólisis | Reacción ácido-base entre una sustancia, típicamente una sal, y el agua. Al ser disueltos en agua, los iones constituyentes de una sal se combinan con los iones hidronio o bien con los iones hidroxilo o ambos, los cuales se disocian en el agua. Esto produce un desplazamiento del equilibrio de disociación del agua y como consecuencia se modifica el valor del pH. |
| Lecho de grava | Consiste en un rectángulo o una cama que se encuentra lleno de grava u otros materiales con el fin de realizar un tratamiento al efluente que pase por él. |
| Metanol residual | Es el que queda después de una reacción, puede deberse a diferentes factores, como un exceso de metanol en la reacción. |
| Metóxido | Sales orgánicas, son los alcóxidos más simples. Es ampliamente empleado como reactivo, tanto a nivel industrial como en laboratorio. |
| pH | Es una medida de la acidez o alcalinidad de una solución, indica la concentración de iones hidronio presentes en determinadas sustancias. Está determinado por el número de iones libres de hidrógeno en una sustancia. |

| | |
|----------------------------|---|
| Reactor | Es un equipo en el que tiene lugar una reacción química con condiciones controladas, estando diseñado para maximizar la conversión y selectividad de la misma con el menor coste posible. |
| Transesterificación | Reacción en la cual los ésteres reaccionan con alcoholes en medios ácidos o básicos formando nuevos ésteres sin necesidad de pasar por el ácido carboxílico. Esta reacción es reversible y requiere exceso de alcohol para desplazar los equilibrios. |
| Triglicérido | Tipo de lípidos, formados por una molécula de glicerol, que tiene esterificados sus tres grupos hidroxilo por tres ácidos grasos, saturados o insaturados y forman parte de las grasas. |
| Vertidos | Material de desecho que las instalaciones industriales o energéticas arrojan a vertederos o al agua. Se pueden clasificar según su origen en vertidos urbanos o vertidos industriales. |

RESUMEN

La presente investigación consistió en la evaluación del pre tratamiento del efluente de agua residual que proviene del lavado de biodiesel producido por medio de transesterificación ácida y alcalina, y propuesta de soluciones para viabilizar el post tratamiento de dicho efluente. El pre tratamiento consiste en la separación adecuada de agua y aceite para la regulación de pH y el post tratamiento en la degradación de material orgánico por medio de bacterias.

Se realizó un muestreo para medir el pH de las aguas residuales ácidas y alcalinas para luego establecer el rango del mismo. Se evaluó el lecho de grava que es utilizado actualmente para regular el pH de las aguas residuales para determinar su eficiencia como regulador de pH. Se investigaron las condiciones fisicoquímicas adecuadas para permitir desarrollo bacteriano en las aguas residuales y se realizó la prueba de recuento aeróbico total para observar dicho desarrollo. Se investigaron y propusieron los procedimientos para regular el pH del efluente del agua residual. Finalmente se compararon las propuestas para proponer un pre tratamiento adecuado de las aguas residuales.

Se determinó que el lecho de grava es ineficiente para regular el pH del agua residual, el caudal de las aguas residuales ácidas es mayor al de las alcalinas, a temperatura ambiente y rango de pH 6-8 se desarrollan bacterias, el pre tratamiento propuesto pretende preparar las aguas residuales para luego seguir tratándolas y alcanzar los valores de los parámetros de calidad del agua establecidos por las regulaciones guatemaltecas.

OBJETIVOS

General

Evaluar el pre tratamiento del efluente de aguas ácidas y alcalinas provenientes del lavado de biodiesel y proponer soluciones para viabilizar su post tratamiento adecuado.

Específicos

1. Determinar el comportamiento del pH del efluente de aguas residuales provenientes del lavado de biodiesel, lavando el biodiesel en el laboratorio en función de agua de lavado y temperatura del agua.
2. Determinar el caudal de las aguas residuales ácidas y alcalinas provenientes del lavado de biodiesel en la salida del tanque de lavado, durante la producción de biodiesel en la planta.
3. Determinar las condiciones fisicoquímicas adecuadas donde las bacterias puedan desarrollarse para degradar el material orgánico de las aguas residuales, comprobando su desarrollo por medio de una prueba de recuento aeróbico total.
4. Evaluar la eficiencia del pre tratamiento del efluente de aguas residuales provenientes del lavado de biodiesel utilizado actualmente. tomando muestras en la entrada y en la salida del lecho de grava para medir el pH.

5. Proponer procedimientos para pre tratar el efluente de aguas provenientes del lavado de biodiesel adecuados para las condiciones de la planta, tomando en cuenta el equipo y las sustancias a utilizar.
6. Proponer el mejor pre tratamiento de las aguas residuales basado en la comparación de las propuestas de regulación de pH investigados.

HIPÓTESIS

Debido a que el presente trabajo consistió en una evaluación de las condiciones existentes y deriva en propuesta de soluciones, se puede concluir que es un trabajo de investigación de tipo exploratorio que busca solucionar los problemas mediante la mejora del procedimiento actual y por lo tanto no procede el planteamiento de hipótesis.

INTRODUCCIÓN

El biodiesel es lavado con grandes cantidades de agua durante seis u ocho horas para remover impurezas y refinarlo. Esta etapa genera dos tipos de aguas residuales, las que provienen del proceso de lavado de biodiesel producido mediante la transesterificación alcalina y las que provienen del lavado de biodiesel producido a partir de la transesterificación ácida. Su tratamiento actual es descargarlas en un lecho de grava que debe ayudar a regular el pH y luego se van depositando en las fosas. Se forma una emulsión causada por la desproporción de los dos tipos de aguas que dificulta la separación del aceite y el agua. Se forma una capa de aceite en las paredes de la última fosa evitando que el agua sea absorbida por la tierra.

El tratamiento de las aguas residuales debe tener un orden lógico de pasos, que permita continuar con los siguientes. El aceite debe separarse del agua, el pH es la variable relevante necesaria de controlar para que pueda realizarse el procedimiento correcto. En condiciones adecuadas de temperatura y pH se puede favorecer el desarrollo bacteriano y degradar el material orgánico de las aguas residuales.

La investigación propone un procedimiento adecuado para regular el pH de las aguas residuales, evaluando el tratamiento actual, tomando en cuenta las condiciones de las instalaciones de la planta para luego continuar el post tratamiento que pretende degradar el material orgánico y regular el resto de los parámetros de calidad del agua.

1. ANTECEDENTES

El proceso de producción de biodiesel comenzó en Guatemala por la empresa Biocombustibles de Guatemala desde el 2002 con estudios para viabilizar la producción de aceite vegetal proveniente de la planta *Jatropha Curcas* y su transformación en biodiesel, producto que se produce mediante el procesamiento de distintas materias primas desde mediados del 2005.

Cuenta con 2 hectáreas en el departamento de Retalhuleu y con la finca San Francisco las Canoas de 500 hectáreas en Chiquimulilla municipio del departamento de Santa Rosa, ambas totalmente sembradas con la planta de *jatropha curcas*. Se ha realizado una intensa labor de Investigación para el mejor conocimiento y manejo de la planta, actividad por la que la empresa ha sido reconocida internacionalmente.

Para la producción de biodiesel, se utiliza la refinería ubicada a 33 km de la ciudad de Guatemala en la carretera hacia el sur. Esta refinería tiene una capacidad de producir 50 000 galones diarios de Biodiesel, cumpliendo con las normas de producción y calidad internacional. Tiene la capacidad de ajustar sus procesos para producir, con diferentes tipos de materias primas como: aceites vegetales crudos, aceites vegetales provenientes de frituras, oleínas y grasas animales.

En la refinería se mantiene constantemente un programa de investigación para el aprovechamiento de los sub productos que el proceso genera.

La empresa se administra bajo regulaciones internacionales, respetando los requerimientos de auditoría y total respeto a las regulaciones contables, fiscales, laborales y administrativas que se requieren.

La producción de biodiesel, a partir de aceites usados, es diferente a la producida a partir de aceites crudos como el *jatropha curcas*. El biodiesel de aceite usado requiere de un proceso de producción más largo y los subproductos que se generan de éste presentan más inconvenientes para tratarlos. Los subproductos que se generan, específicamente de la producción de biodiesel, son: la glicerina, metanol y aguas residuales. La glicerina debe tratarse para utilizarse en otro tipo de industrias, la glicerina de biodiesel de aceites usados es más oscura que la generada por biodiesel de aceites crudos. El metanol se recupera de la glicerina y se utiliza nuevamente en proceso de producción de biodiesel.

Las aguas residuales que se generan de la producción de biodiesel son ácidas y alcalinas; dependiendo del tipo de transesterificación utilizada para su producción. Durante todo el tiempo que se ha producido biodiesel, se ha utilizado agua para refinarlo, en el último año se han buscado alternativas para refinar el biodiesel y disminuir o eliminar el uso de agua. La empresa cuenta con una planta de tratamiento de aguas residuales; la cual está conformada por tres fosas, en cada una de ellas se realiza un tratamiento para cumplir con los parámetros de la calidad del agua establecidos por las regulaciones guatemaltecas, con respecto a las aguas residuales.

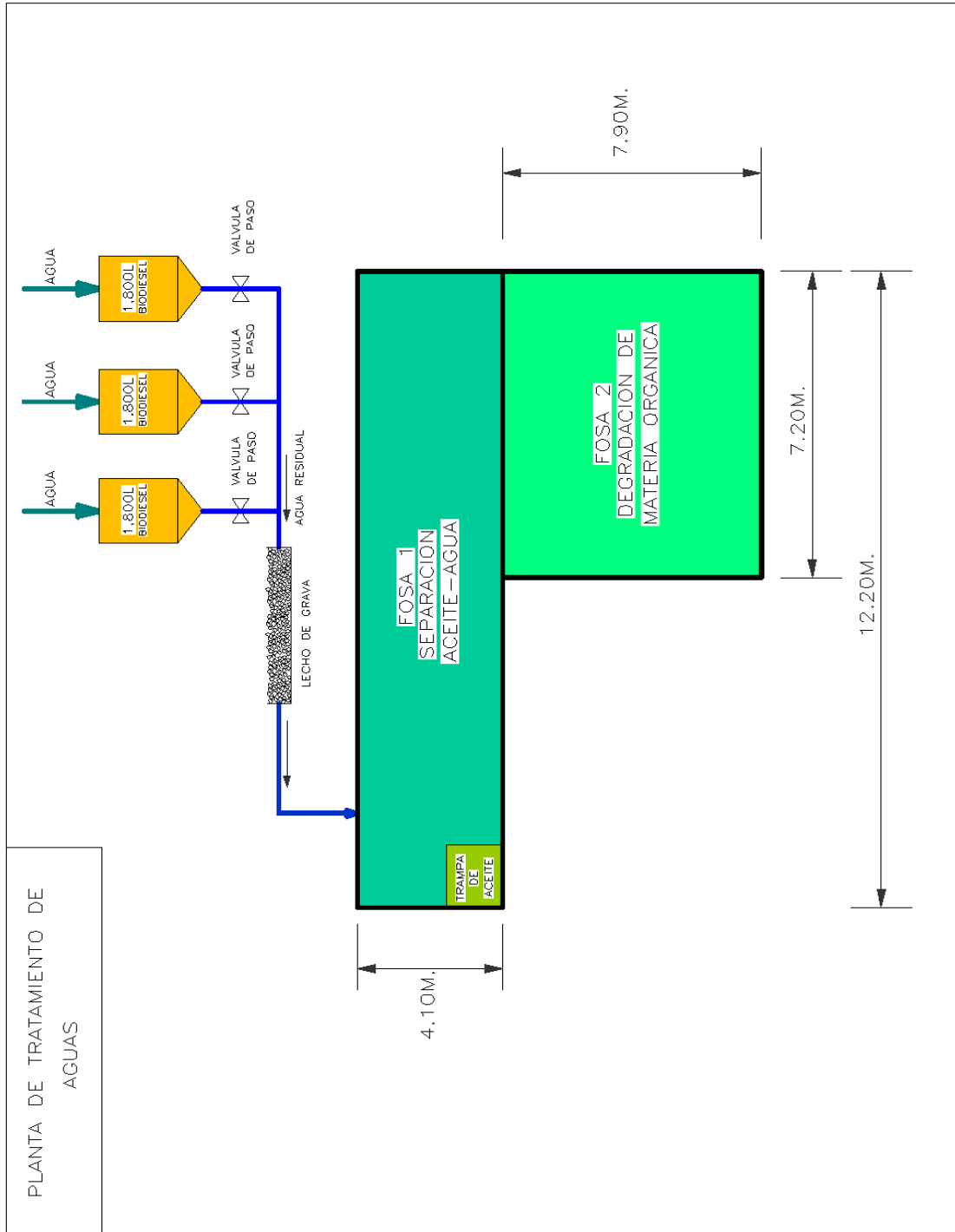
Las referencias sobre la producción de biodiesel son muchas y fáciles de encontrar, se describen metodologías para producción a gran escala y para realizar biodiesel casero.

Con el tiempo, el interés por la producción de este tipo de combustibles ha tenido bastante auge, pero los productores han encontrado dificultades que no han permitido que la producción de este combustible sea cien por ciento rentable. Estas dificultades son la generación de glicerina y la gran cantidad de aguas residuales.

Las aguas residuales contienen material orgánico, no pueden descargarse libremente en cuerpos receptores como ríos o alcantarillas. Afectan la flora y fauna, y durante los últimos años se ha buscado la manera de tratarlas adecuadamente. Se desea que el agua tratada sea absorbida por la tierra sin que ésta provoque efectos nocivos para el medio ambiente. No se han encontrado antecedentes acerca de cómo realizar el tratamiento de este tipo de aguas residuales.

Las aguas residuales se acumulan en las fosas de la planta de la empresa, debido a que el tratamiento que se ha estado efectuando no ha dado los resultados esperados. Durante la aplicación del tratamiento propuesto por el personal de la empresa se observaron aspectos negativos que no permiten que el tratamiento funcione correctamente. Se desea realizar un proceso eficaz de tratamiento de aguas residuales, de acuerdo a las posibilidades con las que cuenta la empresa.

Figura 1. Diagrama de la fosa 1 y 2 de la planta de tratamiento de aguas



Fuente: elaboración propia.

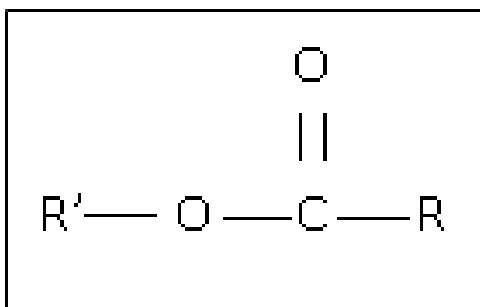
2. MARCO TEÓRICO: PRODUCCIÓN DE BIODIESEL

2.1. 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.

La asociación de productores norteamericanos de biodiesel (*National Biodiesel Board*) lo define como un combustible compuesto de ésteres monoalquílicos de ácidos grasos de cadena larga derivados de aceites o grasas vegetales o animales. La estructura del biodiesel es como se muestra en la figura 2.

Figura 2. Éster monoalquílico



Fuente: MORRISON, Robert. *Química orgánica*. p. 1245.

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, éste recibe finalmente el nombre de biodiesel. Estas moléculas resultantes están compuestas por un ácido graso de cadena larga y un alcohol.

2.2. Materia Prima

Las materias primas utilizadas para la elaboración de biodiesel son los aceites vegetales y aceites usados de frituras. Los aceites vegetales se obtienen de cultivos oleaginosos que contienen una gran cantidad de aceite.

2.2.1. Cultivos Oleaginosos

Los vegetales que contienen grandes cantidades de aceite en sus semillas o frutos se conocen como oleaginosos. Estas plantas provienen de diferentes familias botánicas y se han adaptado a las diferentes regiones climáticas del planeta, aunque las regiones tropicales son las que albergan la mayor cantidad de variedades de ellas. Solamente una decena de especies se usa con propósitos comerciales, existiendo centenares de cultivos oleaginosos de los que se tiene poco conocimiento, pero que son excelentes fuentes de aceite.

2.2.2. Piñón (*Jatropha Curcas*)

Se adapta a suelos pobres, arenosos y alcalinos. Es muy resistente a la sequía, requiriendo un mínimo de 250 mm/año de precipitación para sobrevivir.

Esta planta oleaginosa es nativa de América y actualmente se encuentra difundida a lo largo de las regiones tropicales áridas y semiáridas de América, África y Asia.

Figura 3. **Planta de *Jatropha Curcas***



Fuente: ASTURIAS, Ricardo. *Biodiesel en Guatemala*. Disponible en: http://www.eepCa.org/guatemala/documents/presentaciones/ricardo_asturias.pdf [Consulta: 22 de marzo de 2010]

La gran rusticidad y adaptabilidad de este cultivo se basa en su variabilidad genética, lo cual le permite resistir condiciones tan diversas y exigentes, como las de la costa desértica o la selva tropical. Sus cualidades, muy probablemente se presenten como dificultad cuando se desee obtener cierta uniformidad y homogeneidad en grandes extensiones de cultivo.

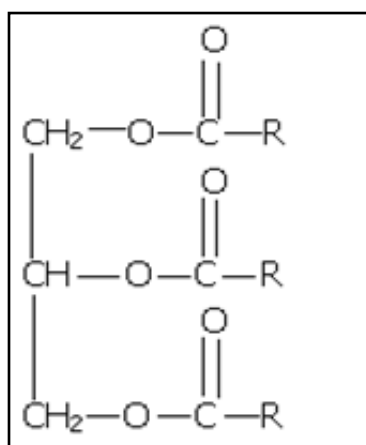
2.2.3. Aceites y grasas usadas

La cantidad disponible de aceites y grasas usadas conocidos también como grasa amarilla, depende de la población humana y de sus hábitos de consumo alimenticio. La transformación de esta grasa amarilla en biodiesel podría tener como principal beneficio, evitar su vertimiento en los desagües y, por ende, a cuerpos de agua como mares, ríos o lagos.

2.3. Composición de los aceites y grasas

Los aceites y grasas vegetales o animales están compuestos principalmente por moléculas denominadas triglicéridos, éstos son ésteres de tres ácidos grasos unidos a un glicerol. Se caracterizan por ser insolubles en agua y solubles en solventes orgánicos no polares. La estructura de un triglicérido se muestra en la figura 4.

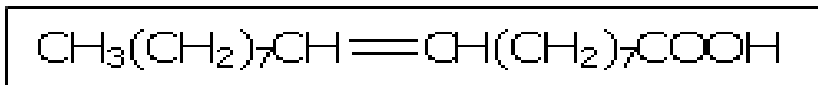
Figura 4. **Triglicérido**



Fuente: MORRISON, Robert. *Química orgánica*. p. 1269.

Los ácidos grasos son compuestos carboxílicos terminales (terminan con un radical carboxilo – COOH) de cadena abierta alifática de C8 a C24 de longitud. Pueden ser saturados (cuando no contienen dobles ni triples enlaces entre los átomos de carbono) o insaturados (cuando contienen uno o más dobles o triples enlaces entre los átomos de carbono).

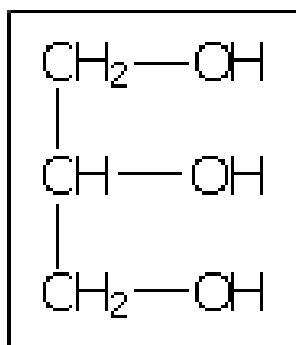
Figura 5. **Ácido graso (Ácido oleico)**



Fuente: MORRISON, Robert. *Química Orgánica*. p. 1375.

El glicerol es un trioxialcohol, formado por una cadena de tres carbonos, cada uno unido a un grupo alcohólico.

Figura 6. **Trioxialcohol (glicerol)**



Fuente: KNOTHE, Gerhard; KRAHL, Jurgen. *The Biodiesel handbook*. p.102.

Los aceites y grasas animales y vegetales son mezclas de triglicéridos diferentes, los cuales a su vez están compuestos frecuentemente por ácidos grasos diferentes.

Los aceites o grasas recién extraídos de los animales o semillas oleaginosas se denominan brutos o crudos.

Además de los triglicéridos, contienen cantidades variables de otras sustancias presentes naturalmente, como: ácidos grasos libres, proteína, fosfolípidos, fosfátidos, ceras, resinas y pigmentos. Aunque estén presentes en cantidades relativamente pequeñas, estas sustancias aportan colores, olores, sabores extraños, inestabilidad, formación de espuma y humo durante la fritura de alimentos.

El caso es diferente cuando se produce biodiesel, algunas de estas sustancias son desfavorables para la producción de este combustible, pero otras pueden permanecer sin alterar su calidad o estabilidad.

2.4. Propiedades fisicoquímicas relevantes de las grasas y aceites

Los aceites y grasas pueden ser caracterizados según sus propiedades físicas (densidad, viscosidad, punto de fusión, índice de refracción) o químicas (índice de acidez, índice de yodo, índice de peróxido, índice de saponificación). A continuación se describen las más importantes para la producción de biodiesel.

2.4.1. Índice de acidez

El índice de acidez (IA) es el número de mg de KOH necesario para neutralizar los ácidos grasos libres (es decir, que no se encuentran unidos a un glicérido) de 1g de aceite.

Se determina mediante la titulación o valoración del aceite disuelto en alcohol con una solución estándar de KOH. Un valor elevado para este índice muestra que el aceite contiene una alta cantidad de ácidos grasos libres, ya que ha sufrido un alto grado de hidrólisis.

Puede expresarse también como porcentaje de ácido oleico, palmítico o láurico, según el ácido graso que predomine en la grasa en cuestión.

Los aceites y grasas refinados deben tener un nivel de ácidos grasos libres inferior al 0.2% como ácido oleico para ser aptos para su uso en alimentación.

Sin embargo, los aceites crudos y los usados previamente en frituras, comúnmente tienen un contenido de ácidos grasos libres significativamente superior a éste (2% o más). Este índice es particularmente importante para el proceso de producción de biodiesel, ya que los ácidos grasos libres reaccionan con el catalizador de la transesterificación (NaOH ó KOH) formando jabones (saponificación), lo cual lleva a un menor rendimiento en la producción de biodiesel.

La saponificación no sólo consume el catalizador necesario para la transesterificación, sino que además los jabones producidos promueven la formación de emulsiones que dificultan la purificación de biodiesel.

2.4.2. Insolubles y agua

El contenido de insolubles del aceite debe mantenerse lo más bajo posible (menor a un 0,8% para que el biodiesel cumpla con las especificaciones europeas). Estas sustancias no participan en el proceso de transesterificación, pero permanecen en el éster (el biodiesel), y representan impurezas en el combustible.

El contenido de agua en un aceite es importante porque ésta produce la hidrólisis de los triglicéridos: reacciona con las uniones entre el glicerol y los ácidos grasos y los rompe, produciendo ácidos grasos libres, mono y diglicéridos y/o glicerol. La hidrólisis resulta acelerada por las altas temperaturas y presiones y una excesiva cantidad de agua.

Durante la transesterificación, la presencia de agua puede causar la saponificación de los ésteres y consumir el catalizador, reduciendo su eficiencia. La presencia de agua tiene un efecto aún más negativo que la de ácidos grasos libres, y debe mantenerse por debajo de un 0.05%.

2.5. Producción de biodiesel

El biodiesel se produce por medio de una serie de etapas, en las que el aceite crudo o usado se procesa para formarlo.

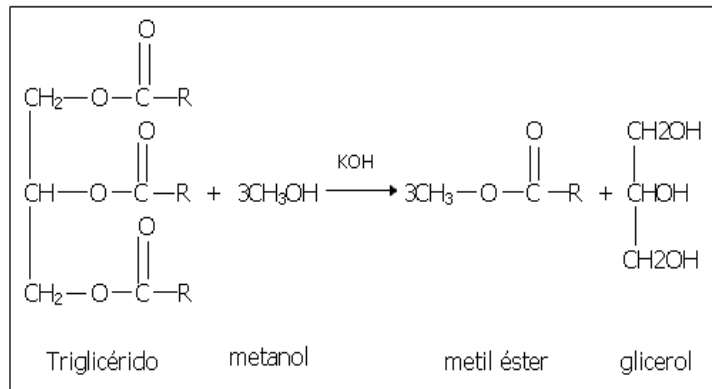
2.5.1. Transesterificación

La transesterificación es el proceso de intercambiar el grupo alcoxi de un éster por otro alcohol. Estas reacciones son frecuentemente catalizadas mediante la adición de un ácido o una base.

2.5.1.1 Transesterificación alcalina

La transesterificación alcalina es el proceso más simple y mayor utilizado para fabricar biodiesel. La reacción consiste en sustituir un éster por otro.

Figura 7. **Reacción de Transesterificación Alcalina**



Fuente: KNOTHE, Gerhard; KRAHL, Jurgen. *The Biodiesel handbook*. p.113.

Requiere de un aceite con bajo contenido de ácidos grasos libres, agua y otras impurezas, o de procesos adicionales de pre tratamiento de la materia prima para asegurar esta calidad. Además, requiere de pasos posteriores de post tratamiento del biodiesel para reducir su contenido de impurezas procedentes del proceso.

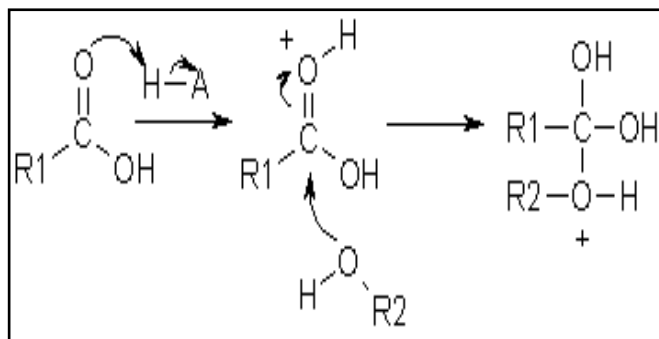
El proceso de la transesterificación alcalina consiste en disolver el catalizador sólido (hidróxido de sodio (NaOH) o potasio (KOH)) en el alcohol (metanol (CH₃OH) o etanol (CH₃CH₂OH)). La cantidad de catalizador a utilizar depende de la acidez del aceite. La transesterificación resulta en la separación de dos fases: una fase más viscosa y densa, que consiste en una mezcla de glicerol, jabones, catalizador, metanol y agua (glicerol crudo), y una fase más liviana, que consiste en el biodiesel con metanol, una menor proporción de catalizador y jabones, (en caso que la reacción no haya sido completa). Se requiere de un tanque decantador donde ambas fases se puedan separar por gravedad.

2.5.1.2. Transesterificación ácida

Es un proceso de dos etapas, la primera ácida y la segunda alcalina. Se basa en la gran concentración de ácidos grasos libres (AGL) de los aceites de cocina usados, pero se puede usar con cualquier aceite o grasa, ya sea de origen animal o vegetal, aunque no contenga muchos AGL.

El proceso inicia con una esterificación Fischer seguida de la transesterificación alcalina. Si el aceite contiene agua la reacción no se desarrolla correctamente. Hay dos formas de separar el agua: la primera es dejar que el agua se deposite en el fondo, este método ahorra energía. Se calienta el aceite hasta 60° C, se mantiene la temperatura durante 15 minutos y se deja reposar por lo menos 24 horas. La segunda es evaporar el agua, este método no es recomendable, porque hace falta más energía y se forman más ácidos grasos libres. Se calienta el aceite hasta 100° C. El calor hace que el agua se deposite en el fondo.

Figura 8. **Mecanismo de reacción de la Esterificación Fischer**



Fuente: KNOTHE, Gerhard; KRAHL, Jurgen. *The Biodiesel handbook*. p.108.

Se calienta el aceite hasta 35° C; para que las grasas sólidas se fundan y se mezclen con el aceite, se mezcla metanol con el aceite caliente, la cantidad debe ser de 0.08 litros de metanol por cada litro de aceite/grasas. Por cada litro de aceite se añade 1 ml de ácido sulfúrico (H₂SO₄) con una concentración del 95%. Después de la esterificación del aceite, se realiza el proceso de transesterificación alcalina descrito anteriormente.

2.5.2. Decantación

En esta etapa, el biodiesel es separado del glicerol por medio de decantación, después que se da la reacción de transesterificación, se forman el biodiesel y glicerol, la mezcla se deja en reposo por más de un día para que se separe completamente, debajo está el glicerol con la mayor parte de metanol residual, arriba queda el biodiesel sin refinar.

Después de la decantación del glicerol, el biodiesel está listo para lavarse, el glicerol pasa a otra línea de proceso en la cual se recupera el metanol que lleva y se separa de la glicerina.

2.5.3. Lavado

Después de la decantación, la glicerina recibe un tratamiento para recuperar el metanol residual. El biodiesel se traslada a los tanques de lavado para remover el material no deseado como aceite si reaccionar, metanol residual, sólidos etc. El biodiesel debe ser lavado para remover restos de catalizador, de jabón y de glicerol libre y ligado. El lavado se realiza por aspersion de agua templada. La aspersion no debe promover la agitacion para prevenir la formacion de emulsion.

La separación de fases entre el biodiesel y el agua ocurre rápidamente y de forma bien definida. Para una transesterificación alcalina, por volumen de biodiesel se agregan aproximadamente diez volúmenes de agua, el proceso dura aproximadamente de cinco a seis horas. Para una transesterificación ácida, por volumen de biodiesel se agregan trece volúmenes de agua, el proceso dura de seis a ocho horas.

El pH de las aguas durante el lavado se mide con papel pH, el lavado finaliza cuando al medir el pH de las aguas que salen del tanque de lavado es menor a 8.

2.5.4. Secado

Al final de la etapa de lavado, se saca el agua del tanque y la fase de biodiesel se bombea a un tanque secador donde se somete a un secado a 120°C de temperatura para eliminar los restos de agua evaporándola.

2.5.5. Filtrado

El biodiesel seco se pasa por un filtro de 10 micras y se entrega al tanque de producto terminado midiendo el volumen por medio de un contador de galones.

2.6. Aguas residuales

Éstas se clasifican respecto a su origen, ya que es el que va a determinar su composición.

2.6.1. Aguas residuales urbanas

Son los vertidos que se generan en los núcleos de población urbana como consecuencia de las actividades propias de éstos. Las aguas residuales urbanas presentan una cierta homogeneidad en cuanto a composición y carga contaminante, ya que sus aportes van a ser siempre los mismos. Pero esta homogeneidad tiene márgenes muy amplios, debido a que las características de cada vertido urbano van a depender del núcleo de población en el que se genere, influyendo parámetros, tales como: el número de habitantes, la existencia de industrias dentro del núcleo, tipo de industria, ente otros.

2.6.2. Aguas residuales industriales

Son aquéllas que proceden de cualquier actividad o negocio en cuyo proceso de producción, transformación o manipulación se utilice el agua. Son enormemente variables, en cuanto a caudal y composición, difiriendo las características de los vertidos, no sólo de una industria a otra, sino también dentro de un mismo tipo de industria. En ocasiones, las industrias no emite vertidos de forma continua, sino únicamente en determinadas horas del día o incluso únicamente en determinadas épocas del año, dependiendo del tipo de producción y del proceso industrial.

También son habituales las variaciones de caudal y carga a lo largo del día. Este tipo de aguas son más contaminadas que las aguas residuales urbanas, además, con una contaminación mucho más difícil de eliminar. Su alta carga unida a la enorme variabilidad que presentan, hace que el tratamiento de las aguas residuales industriales sea complicado, siendo preciso un estudio específico para cada caso.

2.7. Parámetros de calidad de las aguas residuales

Estos parámetros permiten conocer la composición de las aguas residuales y el grado de contaminación en ellas.

2.7.1. pH

El pH es una medida de la acidez o alcalinidad de una solución. El pH indica la concentración de iones hidronio [H_3O^+] presentes en determinadas sustancias. Las siglas significan potencial de hidrógeno, se define como el logaritmo negativo de base 10 de la actividad de los iones hidrógeno.

2.7.2. Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)

Es la medida indirecta del contenido de materia orgánica en aguas residuales. Se determina por la cantidad de oxígeno utilizado en la oxidación bioquímica de la materia orgánica biodegradable durante un período de cinco días y una temperatura de veinte grados Celsius.

2.7.3. Demanda química de oxígeno (DQO)

Es la medida indirecta del contenido de materia orgánica e inorgánica oxidable en aguas residuales, que se determina por la cantidad equivalente de oxígeno utilizado en la oxidación química. Generalmente la demanda química de oxígeno es mayor a la demanda bioquímica de oxígeno.

2.7.4. Nitrógeno

Las moléculas de nitrógeno se encuentran, principalmente en el aire, en agua y suelos. El nitrógeno puede ser encontrado en forma de nitratos y nitritos. Todas estas sustancias son parte del ciclo del nitrógeno, aunque hay una conexión entre todos. El nitrógeno es emitido extensamente por las industrias, incrementando los suministros de nitratos y nitritos en el suelo y agua como consecuencia de reacciones que tienen lugar en el ciclo del nitrógeno.

La adición de nitrógeno enlazado en el ambiente tiene varios efectos. Puede cambiar la composición de especies, debido a la susceptibilidad de ciertos organismos a las consecuencias de los compuestos de nitrógeno. La mayoría del nitrito puede tener varios efectos sobre la salud de los humanos así como en animales.

2.7.5. Fósforo

El fósforo puede ser encontrado en el ambiente principalmente en plantas, más comúnmente como fosfato. Los fosfatos son sustancias importantes en el cuerpo de los humanos porque son parte del material de ADN y tienen parte en la distribución de la energía.

2.7.6. Sólidos

Los sólidos en las aguas residuales son partículas de tamaño apreciable y que en su mayoría son de naturaleza mineral, aunque pueden llevar adherida materia orgánica. Los sólidos enturbian las masas de agua cuando están en movimiento, o bien forman depósitos de lodos si encuentran condiciones adecuadas para sedimentar.

2.7.7. Aceites y grasas

Son altamente estables, inmiscibles con el agua, proceden de desperdicios alimentarios en su mayoría, a excepción de los aceites minerales que proceden de otras actividades. Contienen gran cantidad de material orgánico que se descompone, provoca un efecto negativo para la vida acuática.

2.7.8. Metales pesados

Las sales de metales como: plomo, zinc, mercurio, plata, níquel, cadmio y arsénico son, muy tóxicas para la flora y fauna terrestres y acuáticas. La exposición continua a metales pesados, es la causa de la degradación y muerte de vegetación, ríos, animales y seres humanos.

2.7.9. Método de vertido en placa

La técnica se basa en contar las unidades formadoras de colonias o UFC presentes en un gramo o mililitro de muestra. Se considera que cada colonia que se desarrolla en el medio de cultivo de elección después de un cierto tiempo de incubación a la temperatura adecuada, proviene de un microorganismo o de un agregado de ellos, ese microorganismo o microorganismos son capaces de formar la colonia, es decir una UFC.

- El medio de cultivo no debe fundirse más de una vez, y debe mantenerse en baño de agua regulado a 45 °C, durante el tiempo suficiente para que alcance esta temperatura, hasta su utilización.

- El tiempo transcurrido desde el momento en que la muestra se incorpora al diluyente, hasta que finalmente se adiciona el medio de cultivo a las cajas, no debe exceder de 20 minutos.

La técnica de vertido en placa se describe a continuación:

- Distribuir las cajas estériles en la mesa de trabajo. Marcar las bases de las cajas con los datos pertinentes antes de inocular.
- Inocular por duplicado, 1mL de la dilución correspondiente en cada caja, mediante pipeta estéril. Agregar de 18 a 20 mL del medio fundido y mantenido a 45 °C. Para homogenizar, mezclar mediante 6 movimientos de derecha a izquierda, 6 en el sentido de las manecillas del reloj, 6 en sentido contrario y 6 de atrás hacia adelante, sobre una superficie lisa y horizontal hasta lograr la completa incorporación del inóculo en el medio; cuidar que el medio no moje la cubierta de las cajas. Dejar solidificar. El tiempo transcurrido desde el momento en que la muestra se incorpora al diluyente, hasta que finalmente se adiciona el medio de cultivo a las cajas, no debe exceder de 20 minutos.
- Incluir una caja sin inóculo por cada lote de medio y diluyente preparado como testigo de esterilidad.
- Incubar las cajas en posición invertida durante el tiempo y a la temperatura que se requiera, según el tipo de microorganismo de que se trate 1.
- Después de la incubación, contar todas las colonias desarrolladas en las placas seleccionadas.

2.8. Fundamento legal para las aguas residuales en Guatemala

Los criterios y requisitos que deben cumplirse para la descarga y re uso de aguas residuales en Guatemala, se encuentran normados en el Acuerdo Gubernativo No. 236-2006, denominado Reglamento de las descargas y re uso de aguas residuales y de la disposición de lodos. Este reglamento aplica para todos los entes generadores de aguas residuales, para las personas que descarguen estas aguas al alcantarillado público y que produzcan aguas residuales para re uso, y para las personas responsables del manejo, tratamiento y disposición final de los lodos.

2.8.1. Límites máximos permisibles

Se permite la descarga de aguas residuales, que cumplan con los límites de los parámetros de calidad establecidos por las regulaciones guatemaltecas. Ver tabla I.

Tabla I. **Límites máximos permisibles para los parámetros de calidad de aguas residuales**

| Parámetros | Dimensionales | Valores |
|------------------------|--------------------------|-------------------|
| Temperatura | Grados Celcius | TCR +/-7 |
| Grasas y Aceites | Miligramos por litro | 10 |
| Materia Flotante | Ausencia/Presencia | Ausente |
| Sólidos Suspendidos | Miligramos por litro | 100 |
| Nitrógeno total | Miligramos por litro | 20 |
| Fósforo total | Miligramos por litro | 10 |
| Potencial de hidrógeno | Potencial de hidrógeno | 6 a 9 |
| Coliformes Fecales | Número más probable | $< 1 \times 10^4$ |
| Arsénico | Miligramos por litro | 0.1 |
| Cadmio | Miligramos por litro | 0.1 |
| Cianuro total | Miligramos por litro | 1 |
| Cobre | Miligramos por litro | 3 |
| Cromo hexavalente | Miligramos por litro | 0.1 |
| Mercurio | Miligramos por litro | 0.01 |
| Níquel | Miligramos por litro | 2 |
| Plomo | Miligramos por litro | 0.4 |
| Cinc | Miligramos por litro | 10 |
| Color | Unidades platino cobalto | 500 |

Fuente: Acuerdo Gubernativo 236-2006. *Reglamento de las descargas y re uso de aguas residuales y de la disposición de lodos*. Guatemala, 2006. p. 16.

2.8.2. Parámetros de calidad relevantes de las aguas residuales en la producción de biodiesel

Los parámetros de calidad de las aguas residuales de la producción de biodiesel más importantes a considerar de acuerdo a las sustancias utilizadas durante el proceso son los siguientes:

- pH
- Aceites y grasas
- Fósforo
- Nitrógeno
- Sólidos suspendidos
- DQO
- DBO

3. MARCO METODOLÓGICO

3.1. Variables

Se tomó en cuenta la definición operacional de las variables que están relacionadas con el efluente de aguas residuales que provienen del lavado de biodiesel, siendo estas variables dependientes e independientes según el caso.

Tabla II. **Definición operacional de las variables**

| No. | Variables | Dimensional | Variable Independiente | Variable Dependiente |
|-----|---------------------------|----------------|------------------------|----------------------|
| 1 | pH | Unidades de pH | | X |
| 2 | Agua de lavado | ml | X | |
| 3 | Temperatura del agua | °C | X | |
| 4 | Flujo volumétrico de agua | L/min | X | |
| 5 | Recuento aeróbico total | UFC/ml | | X |

Fuente: elaboración propia.

Tabla III. **Parámetros de variación y variables de respuesta**

| No. | Parámetro de variación | Rango de variación | Variable de respuesta |
|------------|-------------------------------|---------------------------|------------------------------|
| 1 | Volumen de agua de lavado | 100-1400ml | pH |
| 2 | pH | 1.5-10 | Recuento aeróbico total |

Fuente: elaboración propia.

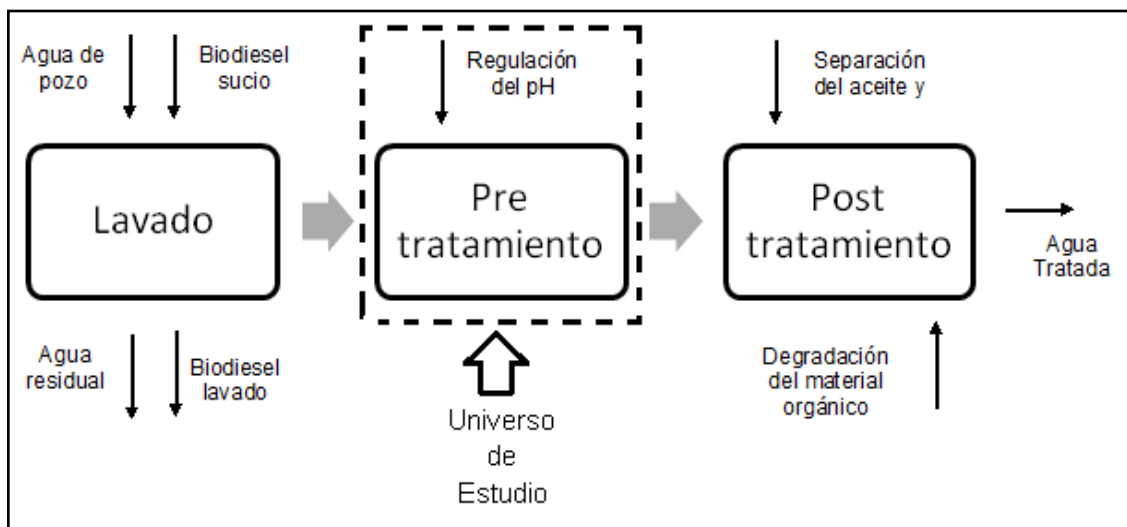
3.2. Delimitación del campo de estudio

El presente trabajo se limitó al pre tratamiento de las aguas residuales provenientes del lavado de biodiesel, el cual consiste en separar el agua del aceite para luego regular el pH encontrando la manera apropiada para hacerlo y así evitar la formación de la emulsión y favorecer el desarrollo bacteriano. Se tomó en cuenta el recorrido del efluente de aguas residuales desde la salida del tanque de lavado, hasta la primera fosa donde se depositan las mismas.

- Las mediciones de caudal se realizaron en la planta de producción de biodiesel de la empresa.
- Se tomaron muestras de diferentes lotes de biodiesel producido mediante la transesterificación ácida y alcalina, para realizar el lavado del biodiesel a nivel laboratorio y medir el pH de las aguas de lavado.

- El estudio de la relación entre el pH y la temperatura del agua se realizó en un laboratorio.
- La investigación de las condiciones fisicoquímicas de pH y temperatura para el desarrollo bacteriano, se realizó en un laboratorio por medio de de un recuento aeróbico total.

Figura 9. **Procedimiento adecuado para el tratamiento de las aguas residuales provenientes del lavado de biodiesel**



Fuente: elaboración propia.

3.3. Recursos humanos disponibles

La investigadora, Dalia Milena Berreondo del Valle, el asesor del trabajo de graduación Ing. Jorge Mario Estrada Asturias y empleados de la empresa ayudaron a la recolección de información.

3.4. Recursos materiales disponibles

Se tuvo a disposición muestras de distintos lotes de biodiesel sin lavar, producido mediante transesterificación alcalina y ácida, también se tuvo a disposición las instalaciones y el laboratorio de la empresa, así como el laboratorio del Instituto de Fomento Municipal (INFOM).

Tabla IV. **Materiales y equipo para las variables dependientes**

| VARIABLE | EQUIPO Y REACTIVOS | CRISTALERÍA |
|-------------------------|--|--|
| pH | <ul style="list-style-type: none">• pH metro• Termómetro• Aspersor• Plancha• Soporte y anillo de soporte• Guantes y mascarilla• Bata• Metanol y ácido sulfúrico | <ul style="list-style-type: none">• Equipo de decantación• Probeta de 100ml• Beaker de 1000ml• 2 Beaker de 250 ml• Frascos para muestras• Pipeta de 5ml |
| Recuento aeróbico total | <ul style="list-style-type: none">• Agar plate count• Producto bacteriano• Mechero bunsen• Microscopio• Incubadora• Asa de siembra | <ul style="list-style-type: none">• Tubos de ensayo• Cajas petri• Pipeta |

Fuente: elaboración propia.

Tabla V. **Materiales y equipo para las variables independientes**

| VARIABLE | EQUIPO Y REACTIVOS | CRISTALERÍA |
|-----------------|--|---|
| Caudal | <ul style="list-style-type: none"> • Equipo de aforo volumétrico en función del tiempo. • Cronómetro | |
| Temperatura | <ul style="list-style-type: none"> • Termómetro • pH metro • Plancha • Magneto | <ul style="list-style-type: none"> • Beaker de 50ml • Beaker de 250ml • Varilla de agitación • Pizeta |

Fuente: elaboración propia.

3.5. Técnica aplicada

Para cumplir con los objetivos del trabajo de graduación, corresponde a un estudio exploratorio que busca examinar un tema poco estudiado, como el tratamiento de las aguas residuales que se generan del lavado de biodiesel. Este tipo de estudio permitirá conocer más a fondo el problema real de tratamiento de este tipo de aguas residuales y todos los factores que influyen para lograr un tratamiento eficaz. Se llevaron a cabo técnicas cuantitativas y cualitativas para cumplir con los objetivos propuestos.

- Medición de pH: las mediciones se utilizaron para establecer un rango de pH de las aguas ácidas y alcalinas para luego determinar la mejor forma de regularlo.

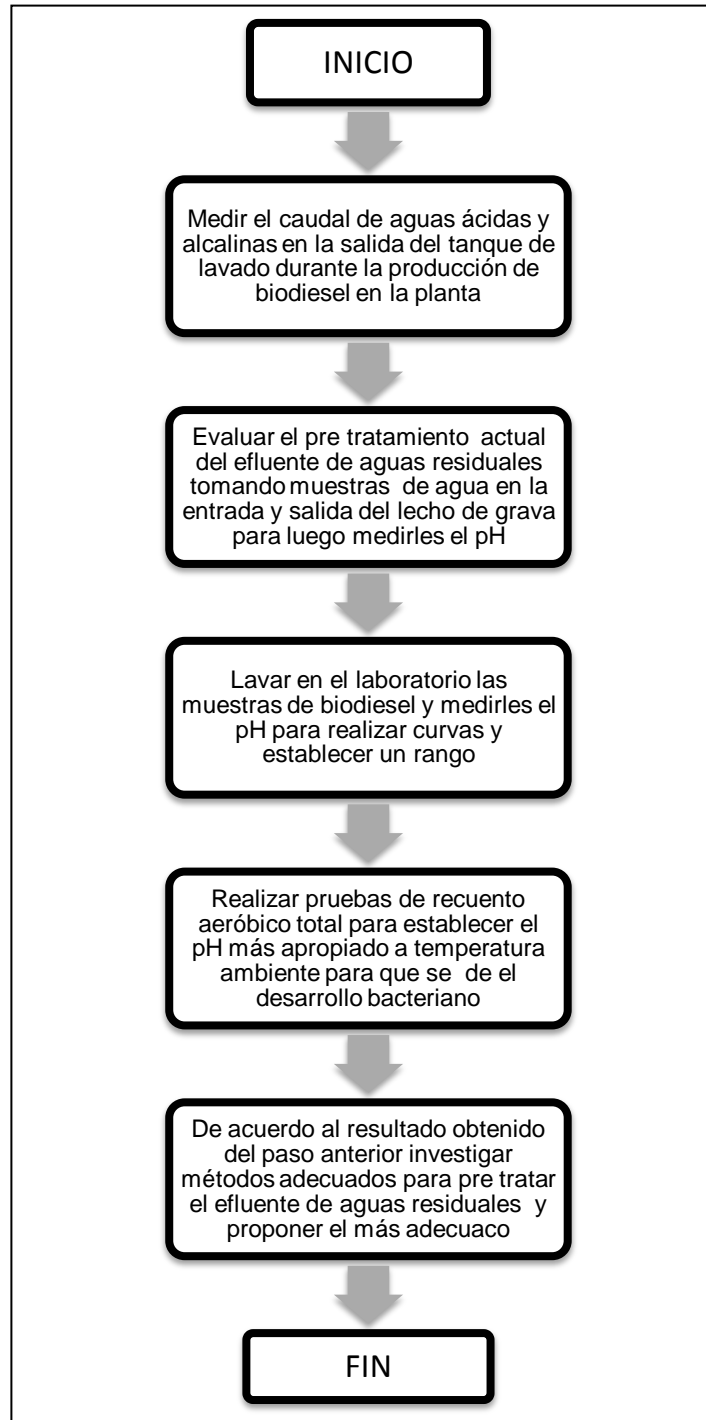
- Medición de caudal: estas mediciones ayudaron a calcular un promedio de la cantidad de agua residual que cae en la fosa de tratamiento por unidad de tiempo.
- Medición de temperatura del agua: es una variable de referencia para las mediciones de pH y para establecer el comportamiento del mismo al variar la temperatura.
- Realización de la prueba de recuento aeróbico total: esta prueba se realizó para verificar que en las aguas residuales con el pH regulado, puedan desarrollarse bacterias para degradar el material orgánico.

3.6. Recolección y ordenamiento de la información

La información que se obtuvo durante la realización de la investigación fue: las mediciones de pH, caudal y temperatura de las aguas provenientes del lavado de biodiesel y pH de las aguas en la entrada y salida del lecho de grava.

El procedimiento que se siguió para la recolección de la información se describe en los siguientes incisos. El flujo grama de trabajo se muestra en la figura 11.

Figura 10. Flujo grama de trabajo



Fuente: elaboración propia.

3.6.1. pH en el lecho de grava

El procedimiento utilizado para la recolección de los datos de pH en la entrada y salida del lecho de grava es el siguiente:

- Esperar media hora después de que empieza el lavado de biodiesel para que el flujo de agua fuera constante.
- Colocar un frasco de muestra justo antes de que el agua entre en el lecho de grava, esperar a que el frasco se llene y luego se tapa.
- Utilizar otro frasco de muestra, tomar la muestra de agua en la salida de agua del lecho de grava y luego tapanlo.
- Las dos muestras se llevan al laboratorio y deben dejarse enfriar a temperatura ambiente.
- Medir el pH de cada una con un potenciómetro.

3.6.2. pH de aguas alcalinas

El procedimiento utilizado para la recolección de los datos de pH de las aguas residuales alcalinas se describe a continuación:

- Realizar mediciones de pH de diferentes lotes de biodiesel producido mediante la transesterificación alcalina, las muestras de los lotes fueron proporcionadas por la empresa y recolectadas por personal de la misma.
- En un beaker de 1000ml calentar agua de grifo hasta que su temperatura llegue arriba de los 70°C.

- Medir 100ml de muestra de un lote específico de biodiesel y verter en el equipo de decantación.
- El agua caliente hay que verterla en un aspersor y luego rociar el biodiesel que se encuentra en el equipo de decantación con el agua caliente, hasta llegar a la marca de 300ml del equipo de decantación.
- Después de llegar a la marca de 300ml en el equipo de decantación, decantar la fase de agua formada en el fondo de la ampolla y colocarla en un beaker de 250ml.
- Después de decantar toda el agua, colocarla en un frasco de muestra previamente marcado con el número de lote y número de muestra, luego medir su temperatura con un termómetro.
- Con un potenciómetro medir el pH de la muestra a 32°C. Medir el pH de todas las muestras de agua a la misma temperatura para que todas las muestras tengan las mismas condiciones de medición.
- Anotar el pH de la muestra en el frasco.
- Repetir los pasos del 4 al 8 hasta que el pH del agua de lavado se encuentre entre 6.5 y 8.
- Almacenar los frascos con las muestras y se lavar el resto de lotes de biodiesel utilizando el mismo procedimiento.

3.6.3. pH de las aguas ácidas

El procedimiento utilizado para la recolección de los datos de pH de las aguas residuales ácidas se describe a continuación:

- Tomar medidas de pH de diferentes lotes de biodiesel, las muestras de los lotes fueron proporcionadas por la empresa.
- En un beaker de 1000ml, calentar agua de grifo hasta que su temperatura esté arriba de los 70°C.
- Medir 100ml de muestra de un lote específico de biodiesel y se verter en el equipo de decantación.
- En una pipeta volumétrica de 2ml, medir ácido sulfúrico concentrado y verterlo en la muestra de biodiesel, con una varilla de agitación, agitar la muestra para mezclar el ácido con el biodiesel.
- A partir de este punto, realizar el mismo procedimiento que en el lavado de las aguas alcalinas.

3.6.4. pH en función de la temperatura

El procedimiento utilizado para la recolección de los datos de pH en función de la temperatura es el siguiente:

- Tomar una muestra de agua de lavado de biodiesel y verter aproximadamente 30ml en un beaker de 50ml.
- Medir el pH de la muestra a temperatura ambiente.
- Colocar el beaker encima de una plancha para calentar la muestra.
- Medir el pH a cada 5°C, hasta llegar a 50°C.

- Anotar el resultado de cada medición.

3.6.5. Caudal de aguas ácidas y alcalinas

El caudal de las aguas ácidas y alcalinas se midió durante el lavado de biodiesel en la planta de producción de la empresa con la ayuda de los técnicos de la planta.

- Colocar una cubeta de volumen específico justo debajo de la llave de paso del agua de salida del tanque de lavado. El aspersor roció agua caliente sobre el biodiesel dentro del tanque de lavado, el agua se separó rápidamente del biodiesel y se fue al fondo del tanque.
- Abrir por completo la llave de paso y se tomar el tiempo en segundos que tarda en llenarse la cubeta. Anotar el resultado en galones por minuto.
- Tomar el tiempo que tarda en lavarse todo el lote de biodiesel.
- Obtener la cantidad de agua utilizada para lavar un lote de biodiesel en un tiempo determinado.

3.6.6. Recuento aeróbico total

Para establecer la cantidad de organismos presentes en las muestras de agua residual, se utilizó el método de vertido en placa.

- Preparar el medio de cultivo de agar.

- Verter el medio sobre dos placas petri, dejar enfriar el medio hasta aproximadamente 50°C.
- Colocar sobre una de las placas 1ml de agua problema y luego tapar.
- Sobre otra de las placas verter 1ml de dilución 1/10 del agua problema y se tapar la caja petri.
- Agitar un minuto con precaución para que el medio no suba sobre las paredes de la placa.
- Dejar solidificar, invertir e introducir en la incubadora, incubar a 37°C, durante 24 horas.
- Después de ese tiempo se realizar el recuento de las colonias.

3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

La información obtenida durante la investigación, se ordenó en tablas identificadas para facilitar su interpretación.

Tabla VI. **pH de las aguas residuales alcalinas**

| No. | Agua de lavado (ml) | pH lote 1 | pH lote 2 | pH lote 3 | pH lote 4 | pH lote 5 | pH lote 6 | pH lote 7 |
|-----|---------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 1 | 200 | 9,01 | 9,06 | 8,99 | 9,00 | 9,02 | 9,01 | 9,05 |
| 2 | 400 | 8,75 | 8,71 | 8,73 | 8,80 | 8,79 | 8,71 | 8,77 |
| 3 | 600 | 8,10 | 8,12 | 8,05 | 8,19 | 8,08 | 8,15 | 8,20 |
| 4 | 800 | 7,82 | 7,79 | 7,81 | 7,78 | 7,81 | 7,76 | 7,81 |
| 5 | 1000 | 7,76 | 7,72 | 7,69 | 7,74 | 7,72 | 7,74 | 7,76 |
| 6 | 1200 | 7,65 | 7,64 | 7,66 | 7,61 | 7,64 | 7,60 | 7,66 |

Fuente: elaboración propia.

Tabla VIII. **Caudal de las aguas residuales alcalinas**

| No. | Fecha | Q_t (Galagua/min) | Tiempo de lavado (h) | Q_L (Galagua/Lote) |
|-----|------------|---------------------|----------------------|----------------------|
| 1 | 28/10/2009 | 11,11 | 6,02 | 4 013,29 |
| 2 | 30/10/2009 | 11,65 | 6,05 | 4 229,68 |
| 3 | 06/11/2009 | 11,23 | 6,03 | 4 064,46 |
| 4 | 10/11/2009 | 11,12 | 5,99 | 3 997,97 |
| 5 | 12/11/2009 | 10,98 | 6,00 | 3 953,88 |
| 6 | 17/11/2009 | 11,89 | 6,10 | 4 350,64 |

Fuente: elaboración propia.

Tabla VII. **pH de las aguas residuales ácidas**

| No. | Agua lavado (ml) | pH lote 1 | pH lote 2 | pH lote 3 | pH lote 4 | pH lote 5 | pH lote 6 | pH lote 7 |
|-----|------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 1 | 200 | 1,88 | 1,91 | 1,90 | 1,71 | 1,80 | 1,85 | 1,74 |
| 2 | 400 | 2,31 | 2,35 | 2,41 | 2,26 | 2,28 | 2,31 | 2,30 |
| 3 | 600 | 2,87 | 2,86 | 2,90 | 2,77 | 2,79 | 2,78 | 2,77 |
| 4 | 800 | 3,25 | 3,22 | 3,31 | 3,20 | 3,22 | 3,28 | 3,25 |
| 5 | 1000 | 3,89 | 3,91 | 3,98 | 3,81 | 3,80 | 3,84 | 3,76 |
| 6 | 1200 | 4,20 | 4,13 | 4,23 | 4,18 | 4,18 | 4,22 | 4,20 |
| 7 | 1400 | 6,10 | 6,00 | 6,09 | 5,75 | 5,98 | 6,06 | 5,96 |
| 8 | 1600 | 6,61 | 6,50 | 6,66 | 6,54 | 6,46 | 6,59 | 6,52 |

Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. **Caudal de las aguas residuales ácidas**

| No. | Fecha | Q_t (Galagua/min) | Tiempo de lavado (h) | Q_L (Galagua/Lote) |
|-----|------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 1 | 24/11/2009 | 11,56 | 8,00 | 5 548,80 |
| 2 | 27/11/2009 | 11,01 | 8,10 | 5 350,86 |
| 3 | 11/01/2010 | 11,21 | 8,07 | 5 427,88 |
| 4 | 13/01/2010 | 11,24 | 7,80 | 5 260,32 |
| 5 | 15/01/2010 | 11,67 | 7,77 | 5 440,55 |
| 6 | 18/01/2010 | 11,87 | 7,89 | 5 619,26 |
| 7 | 21/01/2010 | 11,98 | 7,95 | 5 714,46 |

Fuente: elaboración propia.

Tabla X. **pH en función de la temperatura de las aguas residuales**

| T (°C) | pH Muestra 1 | pH Muestra 2 | pH Muestra 3 | pH Muestra 4 | pH Muestra 5 | pH Muestra 6 | pH Muestra 7 |
|---------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 24 | 6,32 | 5,55 | 5,43 | 4,85 | 4,67 | 3,24 | 3,18 |
| 30 | 6,32 | 5,60 | 5,46 | 4,86 | 4,67 | 3,24 | 3,19 |
| 35 | 6,43 | 5,65 | 5,51 | 4,87 | 4,70 | 3,25 | 3,21 |
| 40 | 6,49 | 5,68 | 5,57 | 4,89 | 4,75 | 3,27 | 3,23 |
| 45 | 6,69 | 5,71 | 5,60 | 4,91 | 4,80 | 3,29 | 3,25 |
| 50 | 6,75 | 5,77 | 5,62 | 4,94 | 4,82 | 3,31 | 3,28 |

Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. **Mediciones de pH en la entrada y salida del lecho de grava**

| Lote | pH Entrada | pH Salida |
|-------------|-------------------|------------------|
| 1 | 2,14 | 2,15 |
| 2 | 1,98 | 1,98 |
| 3 | 2,23 | 2,24 |
| 4 | 2,11 | 2,12 |
| 5 | 1,87 | 1,87 |
| 6 | 2,43 | 2,43 |
| 7 | 2,19 | 2,19 |

Fuente: elaboración propia.

Tabla XII. **Unidades de formación de colonias en función del pH del agua a 24h de incubación**

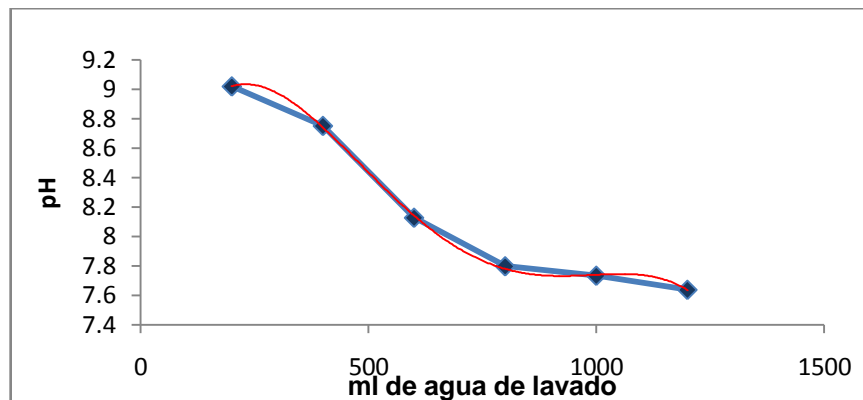
| Muestra | pH | UFC/mL a 24h |
|----------------|-----------|---------------------|
| 1 | 1,84 | < 1 |
| 2 | 4,06 | < 1 |
| 3 | 5,15 | < 1 |
| 4 | 5,58 | < 1 |
| 5 | 6,08 | > 65 000 |
| 6 | 6,24 | > 65 000 |
| 7 | 7,31 | > 65 000 |
| 8 | 8,00 | > 65 000 |
| 9 | 8,34 | > 65 000 |
| 10 | 8,66 | > 65 000 |
| 11 | 9,63 | > 65 000 |
| 12 | 10,20 | > 65 000 |

Fuente: elaboración propia.

3.8. Análisis estadístico

Se realizó una regresión no lineal para determinar la ecuación que proporciona el valor de pH del agua ácida y alcalina en función de la cantidad del agua utilizada para lavar biodiesel.

Figura 11. **pH en función del agua de lavado de biodiesel producido mediante transesterificación alcalina**



Fuente: elaboración propia.

- La ecuación que mejor se ajusta y el valor de R^2 son los siguientes:

$$pH = -1^{-11}A_L^4 + 4^{-8}A_L^3 - 4^{-5}A_L^2 + 0.011A_L + 7.946$$

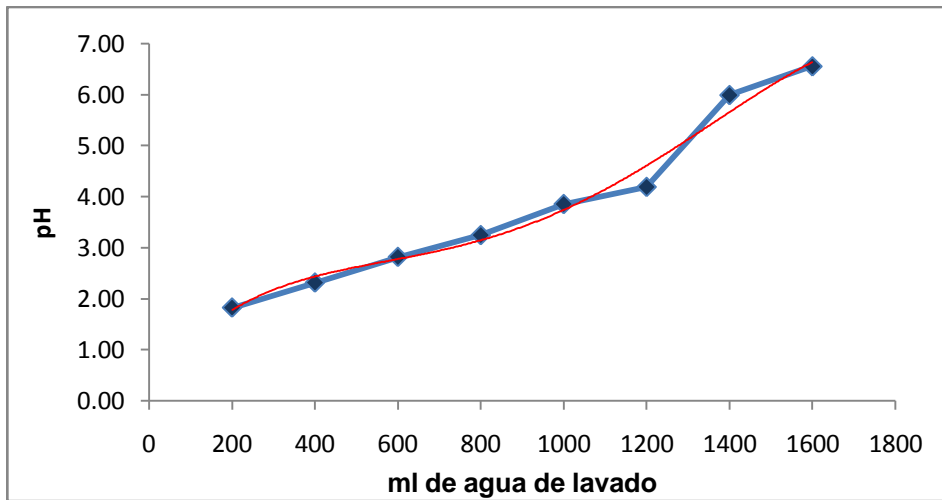
$$R^2=0,999$$

- Condiciones de validez de la ecuación

Dominio: [200,1200] ml de agua de lavado

Rango: [7,10] pH del agua de lavado

Figura 12. **pH en función del agua de lavado de biodiesel producido mediante transesterificación ácida**



Fuente: elaboración propia.

- La ecuación que mejor se ajusta y el valor de R^2 son los siguientes:

$$pH = -4^{-12}A_L^4 + 1^{-8}A_L^3 - 2^{-5}A_L^2 + 0.010A_L + 0.323$$

$$R^2=0,983$$

- Condiciones de validez de la ecuación

Dominio: [200,1800] ml de agua de lavado

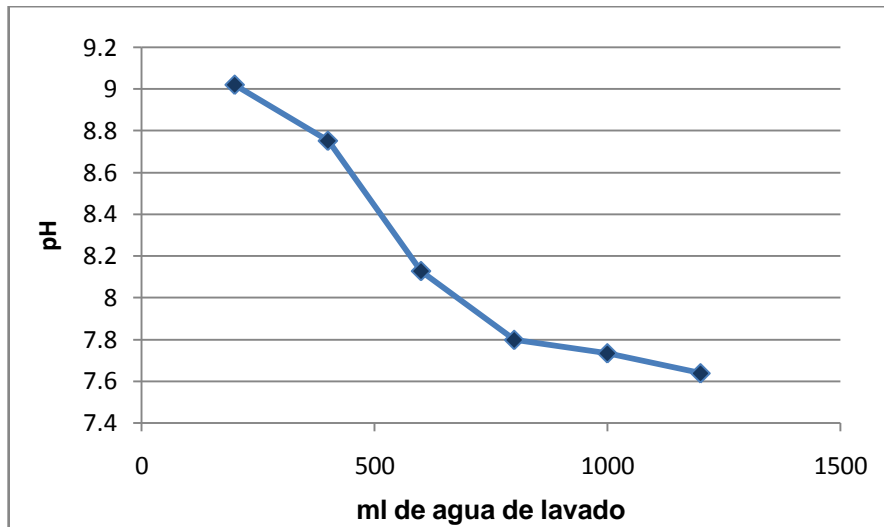
Rango: [1,7] pH del agua de lavado

4. RESULTADOS

4.1. Determinación del comportamiento del pH

El comportamiento del pH de las aguas residuales durante el lavado de biodiesel depende de la cantidad de agua utilizada para lavarlo.

Figura 13. **Comportamiento del pH de las aguas de lavado de biodiesel producido por transesterificación alcalina**



Fuente: elaboración propia.

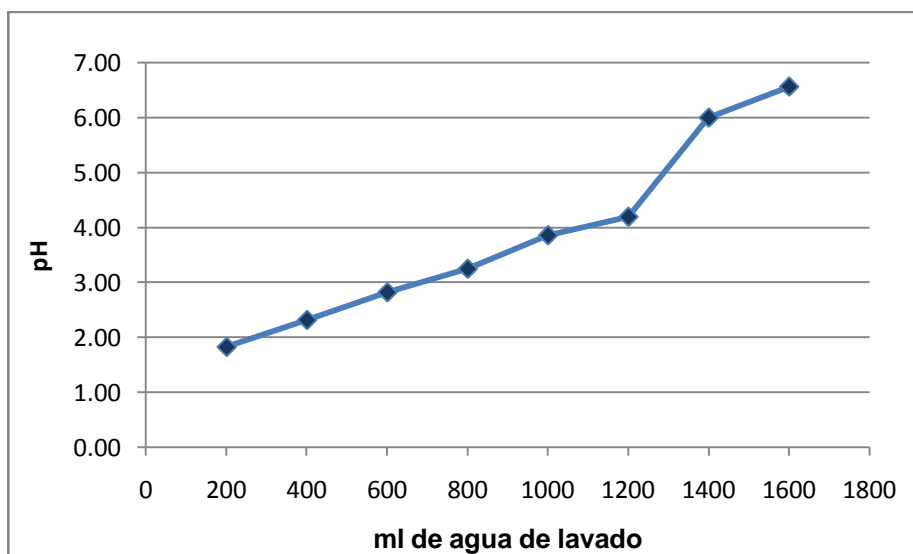
- La ecuación que mejor se aplica al pH en función del volumen de agua de lavado para las aguas residuales alcalinas es la siguiente:

$$pH = -1^{-11}A_L^4 + 4^{-8}A_L^3 - 4^{-5}A_L^2 + 0.011A_L + 7,946$$

Donde:

A_L = agua de lavado

Figura 14. **Comportamiento del pH de las aguas de lavado de biodiesel producido por transesterificación ácida**



Fuente: elaboración propia.

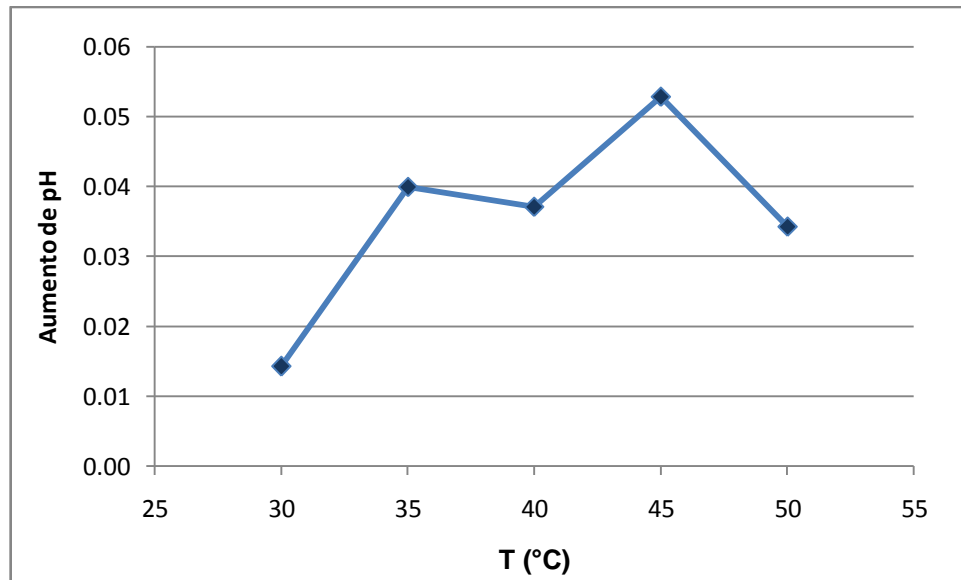
- La ecuación de regresión que mejor se aplica al pH en función del volumen de agua de lavado para las aguas residuales ácidas es la siguiente:

$$pH = -4^{-12}A_L^4 + 1^{-8}A_L^3 - 2^{-5}A_L^2 + 0.010A_L + 0,323$$

Donde:

A_L = agua de lavado

Figura 15. **Aumento del pH de las aguas residuales en función de la temperatura**



Fuente: elaboración propia.

4.2. Determinación del caudal de las aguas residuales ácidas y alcalinas

El caudal de las aguas residuales, depende del tipo de transesterificación utilizada para la producción de biodiesel.

Tabla XIII. **Agua utilizada para lavar un lote de biodiesel producido por transesterificación alcalina en función del tiempo**

| No. | Q_{AL} (L_{agua}/L_{ote}) |
|--------------|--|
| 1 | 14 788,99 |
| 2 | 15 586,36 |
| 3 | 14 977,54 |
| 4 | 14 732,50 |
| 5 | 14 570,05 |
| 6 | 16 032,12 |
| 7 | 15 437,37 |
| Media | 15 160,70 |

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIV. **Agua utilizada para lavar un lote de biodiesel producido por transesterificación ácida en función del tiempo**

| No. | Q_{AC} (L_{agua}/Lote) |
|--------------|---|
| 1 | 20 447,33 |
| 2 | 19 717,92 |
| 3 | 20 001,75 |
| 4 | 19 384,28 |
| 5 | 20 048,44 |
| 6 | 20 706,97 |
| 7 | 21 057,79 |
| Media | 20 194,92 |

Fuente: elaboración propia.

4.3. Determinación de las condiciones fisicoquímicas para el desarrollo bacteriano

El desarrollo bacteriano en el agua residual, permitirá que bacterias degraden el material orgánico presente en ésta.

Tabla XV. **Unidades formadoras de colonias en función del pH del agua residual**

| Muestra | pH | UFC/mL a 24h |
|---------|-------|--------------|
| 1 | 1,84 | < 1 |
| 2 | 4,06 | < 1 |
| 3 | 5,15 | < 1 |
| 4 | 5,58 | < 1 |
| 5 | 6,08 | > 65 000 |
| 6 | 6,24 | > 65 000 |
| 7 | 7,31 | > 65 000 |
| 8 | 8,00 | > 65 000 |
| 9 | 8,34 | > 65 000 |
| 10 | 8,66 | > 65 000 |
| 11 | 9,63 | > 65 000 |
| 12 | 10,20 | > 65 000 |

Fuente: elaboración propia.

4.4. Evaluación de la eficiencia del pre tratamiento actual

El lecho de grava se utiliza actualmente, para regular el pH de las aguas residuales, se determinó la eficiencia de éste, por las diferencias de pH en su entrada y salida.

Tabla XVI. **Eficiencia del lecho de grava para regular el pH de las aguas residuales**

| Lote | Eficiencia (%) |
|--------------|-----------------------|
| 1 | 0,47 |
| 2 | 0,00 |
| 3 | 0,45 |
| 4 | 0,47 |
| 5 | 0,00 |
| 6 | 0,00 |
| 7 | 0,00 |
| Media | 0,20 |

Fuente: elaboración propia.

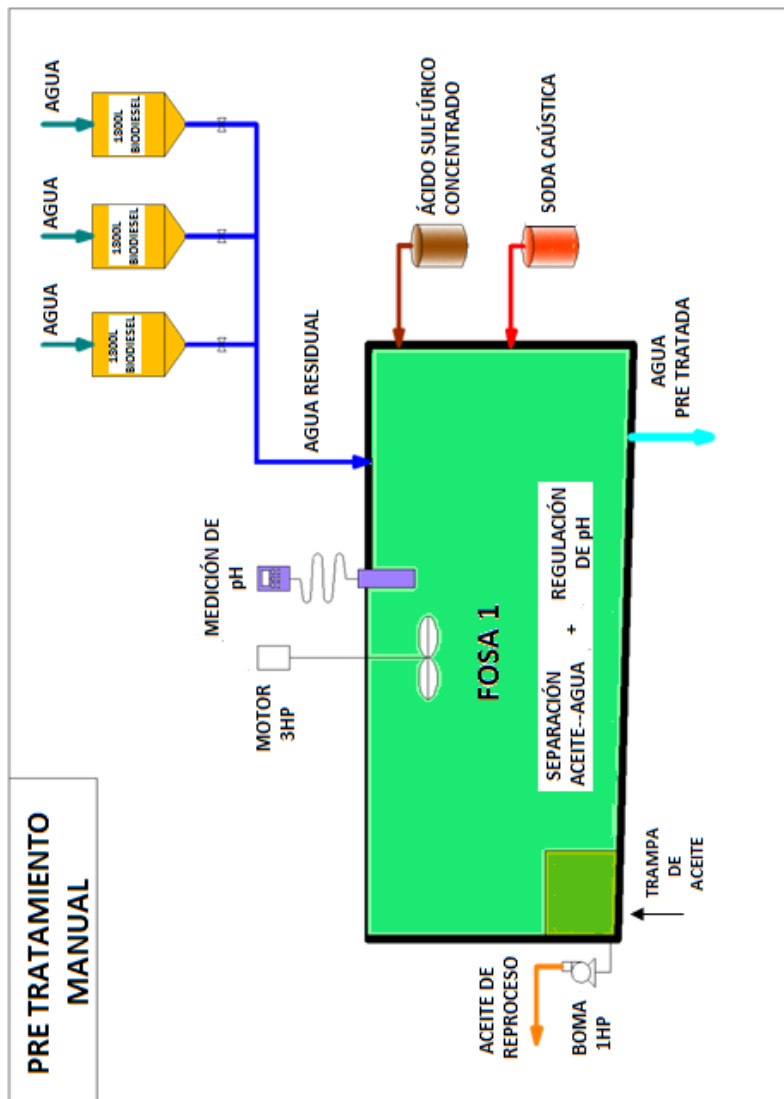
4.5. Propuestas de procedimientos para el pre tratamiento de las aguas residuales

Las propuestas utilizan como base la fosa 1, en la que se depositan actualmente las aguas residuales provenientes del lavado de biodiesel, con el fin de facilitar su aplicación. Los reactivos utilizados son los más comunes para la regulación de pH en industrias relacionadas con este tipo de aguas que contienen sustancias orgánicas. Los tratamientos consisten en la separación del agua y aceite para luego regular el pH, y así continuar con el post tratamiento.

4.5.1. Primer propuesta

En esta propuesta se pretende realizar el pre tratamiento en la fosa 1. Separar el aceite del agua por medio de la trampa de aceite y después regular el pH.

Figura 16. Pre tratamiento realizado manualmente

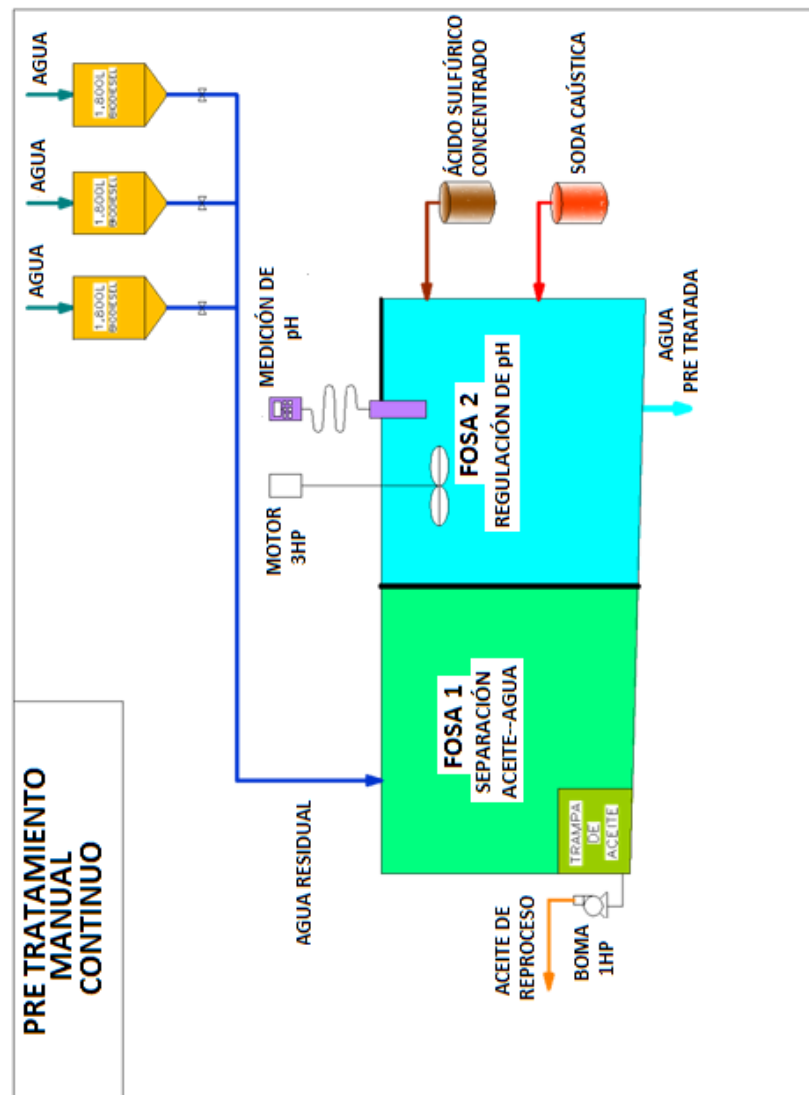


Fuente: elaboración propia.

4.5.2. Segunda propuesta

Esta propuesta consiste en dividir la fosa 1 en dos para facilitar el proceso de pre tratar el agua residual, en una fosa se separará el agua del aceite y en la segunda se regulará el pH.

Figura 17. Pre tratamiento realizado manualmente de forma continua

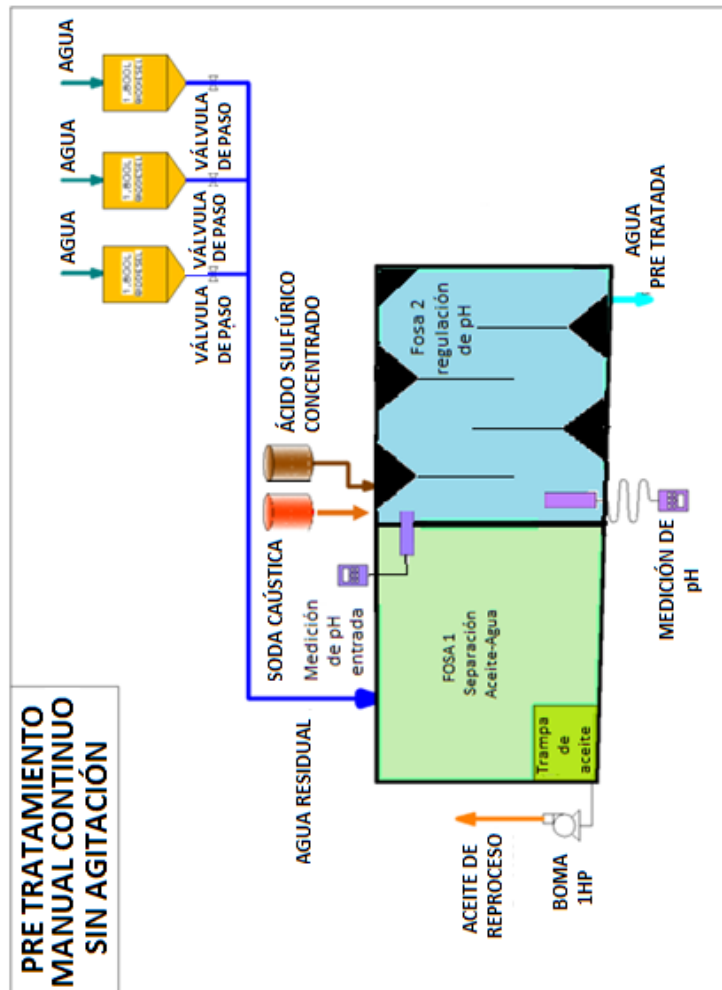


Fuente: elaboración propia.

4.5.3. Tercer propuesta

Para facilitar el pre tratamiento y disminuir costos de operación, se elimina el agitador para regular el pH. Se divide la fosa 2 en canales y se colocan deflectores o baffles en las esquinas de cada pared para promover el movimiento del agua y favorecer la mezcla de la sustancia reguladora de pH.

Figura 18. Pre tratamiento realizado manualmente de forma continua sin agitación

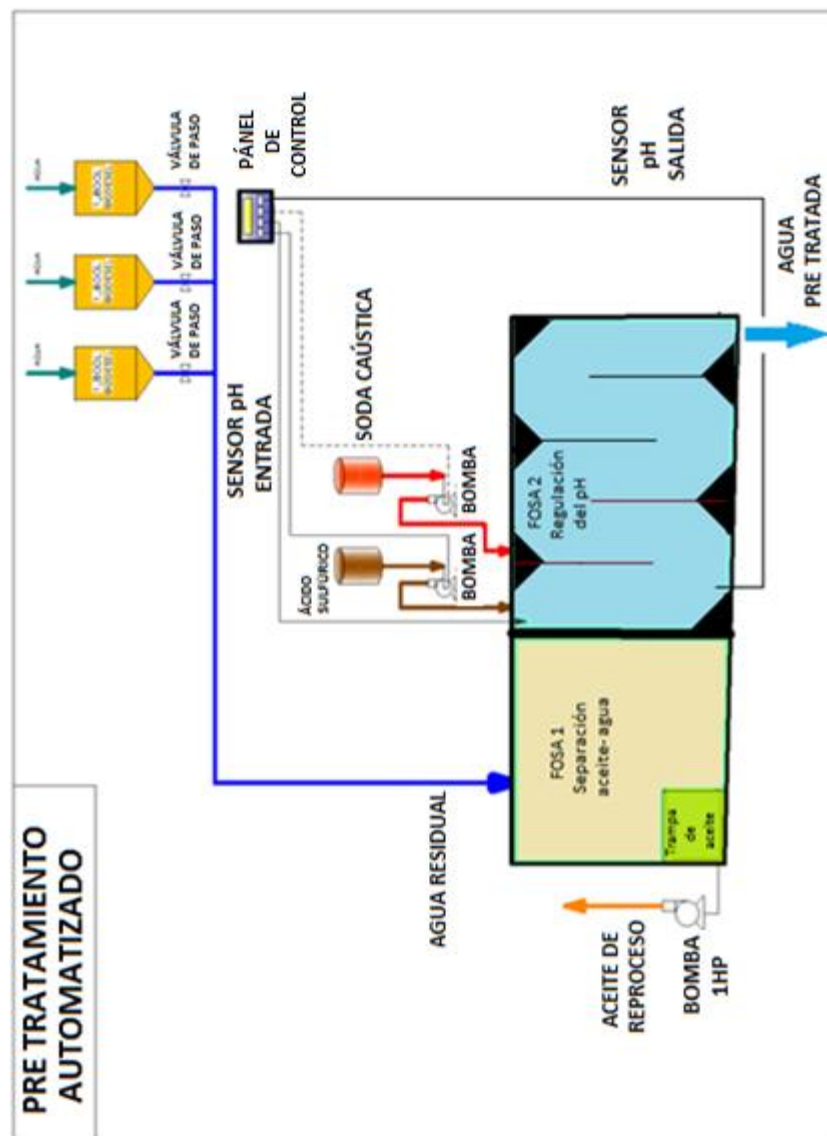


Fuente: elaboración propia.

4.5.4. Propuesta 4

Esta propuesta consiste en automatizar el proceso del pre tratamiento del agua residual para que un solo operador controle todo el proceso.

Figura 19. Pre tratamiento automatizado

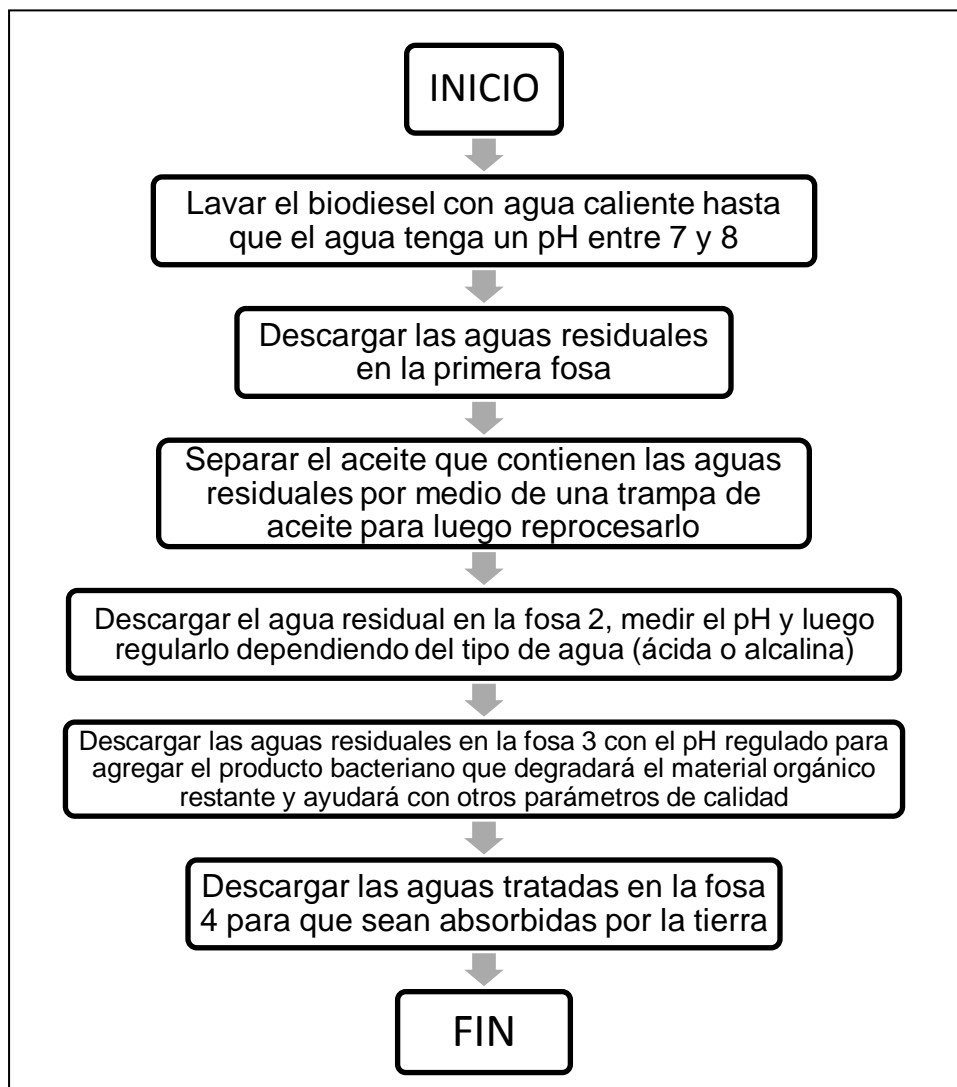


Fuente: elaboración propia.

4.6. Comparación de propuestas

Las propuestas se comparan analizando sus ventajas y desventajas, para luego proponer una de ellas como la más recomendada.

Figura 20. Diagrama de flujo de las propuestas para el pre tratamiento



Fuente: elaboración propia.

Tabla XVII. **Ventajas y desventajas de las propuestas**

| VENTAJAS | | | |
|---|--|--|--|
| PROPUESTA 1 | PROPUESTA 2 | PROPUESTA 3 | PROPUESTA 4 |
| No es necesario modificar las fosas | El pre tratamiento se vuelve continuo | El pre tratamiento es continuo | El pre tratamiento es continuo |
| La inversión es solamente el costo del agitador | No se pierde tiempo realizando el pre tratamiento por lotes | No se pierde tiempo realizando el pre tratamiento por lotes | No se pierde tiempo realizando el pre tratamiento por lotes |
| | El pH en la fosa 2 se homogeniza fácilmente debido a que el área de mezcla es más pequeña. | No se necesita de un agitador | No se necesita de un agitador |
| | | Se aprovecha la gravedad para que el agua residual recorra la fosa 2 mientras se mezcla con la sustancia reguladora. | Se aprovecha la gravedad para que el agua residual recorra la fosa 2 mientras se mezcla con la sustancia reguladora. |
| | | No es necesario contar con personal altamente calificado. | Se necesita de un solo operador. |
| | | La inversión es solamente el costo de la modificación de las fosas. | |

Continuación tabla XVII.

| DESVENTAJAS | | | |
|--|--|---|---|
| PROPUESTA 1 | PROPUESTA 2 | PROPUESTA 3 | PROPUESTA 4 |
| El pre tratamiento no es continuo se realizar por lotes. | Se debe dividir la fosa 1 en al menos dos partes | Se debe dividir la fosa 1 en al menos dos partes | Se debe dividir la fosa 1 en al menos dos partes |
| Se debe instalar un equipo de agitación | Se debe instalar un equipo de agitación | Divisiones en la fosa dos para formar canales | Realizar divisiones en la fosa dos para formar canales |
| La mezcla no es uniforme debido al gran tamaño de la fosa | La instalación y operación del agitador, y división de las fosas tiene un costo. | La modificación de las fosas tiene un costo. | Se debe instalar equipos de automatización. |
| La operación es manual, necesita un operario para el agitador y medir el pH y otro para regularlo. | La operación es manual, necesita un operario para el agitador y medir el pH y otro para regularlo. | La operación es manual, se necesita un operario para medir el pH y otro para regularlo. | La automatización no abarca todo el tratamiento de las aguas residuales |
| Costo de operación e instalación del agitador. | | | El operario a cargo debe de ser capacitado |
| | | | Costo de operación e instalación elevado. |

Fuente: elaboración propia.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Según los resultados obtenidos, el pH de las aguas residuales del lavado de biodiesel se va acercando a la neutralidad al aumentar el volumen de agua utilizada para lavar el biodiesel. Según los caudales medidos de los dos tipos de aguas residuales, se utiliza más agua para lavar un lote de biodiesel producido mediante transesterificación ácida, que para lavar un lote de biodiesel producido mediante transesterificación alcalina.

En la gráfica 4 se puede observar que al agregar más agua de lavado, el pH va disminuyendo y se deja de lavar hasta que el pH se encuentra entre 7 y 8. En la gráfica 5 se puede ver que al agregar más agua de lavado, el pH va aumentando y se deja de lavar cuando el pH se encuentra entre 6 y 7.

Las mediciones del pH de las aguas residuales ácidas y alcalinas se realizaron a 32°C, debido a que en la planta, esa es la temperatura a la cual las aguas son descargadas en la fosa 1. En la gráfica 3 se puede observar que al aumentar la temperatura, también hay un incremento en el pH y el incremento más grande se da a los 45°C.

El aumento de pH se debe a que la temperatura ayuda a disolver el material orgánico que se encuentra en las aguas residuales, por lo que los ácidos grasos se encuentran más dispersos en comparación de aguas residuales a temperatura menor.

Para realizar el pre tratamiento de las aguas residuales se debe dejar que la temperatura de dichas aguas llegue a temperatura ambiente, así al regular el pH, éste no variará a causa de un cambio de temperatura.

El lecho de grava es utilizado para regular el pH de las aguas residuales provenientes del lavado de biodiesel. Según los datos recopilados, no hay diferencia significativa en los valores del pH en la entrada del lecho y en la salida del mismo, por lo tanto el pH de las aguas residuales que llegan a la fosa 1 no se encuentra regulado.

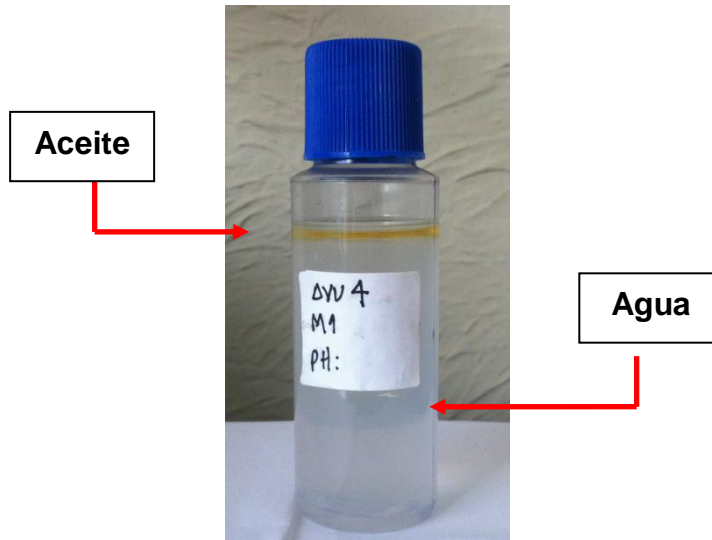
La prueba del recuento aeróbico total tiene como fin determinar las condiciones bajo las cuales se puedan desarrollar bacterias para que degraden el material orgánico. Los resultados muestran que debajo de pH 6 no hay crecimiento de colonias, mientras que arriba de pH 6 se reportaron resultados de crecimiento mayor a 65 000 colonias.

Si bien hubo crecimiento arriba de pH 8, se observó que a estos pH's, solamente crecen mohos, levaduras y hongos, no bacterias que podría degradar materia orgánica. El rango en el cual se observó crecimiento de bacterias es entre pH 6 y pH 8.

Actualmente las aguas residuales ácidas y alcalinas se mezclan en la fosa 1. Debido a que el lecho de grava no regula el pH, esta mezcla provoca una emulsión indicando que, el agua y el aceite no puedan separarse adecuadamente.

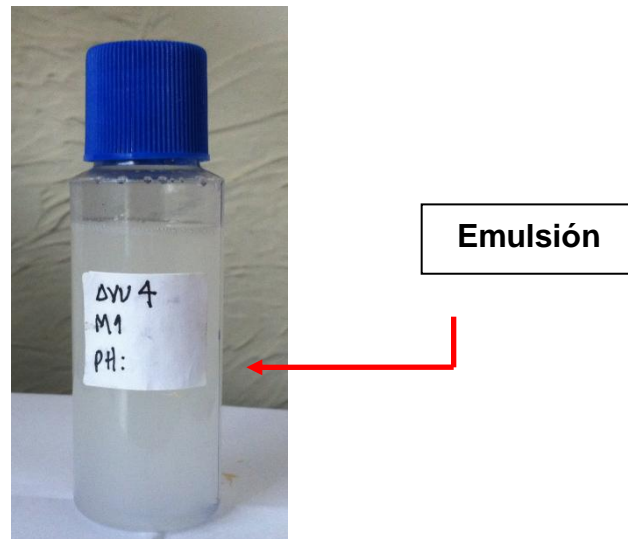
En las figuras 20 y 21 se puede observar una muestra de agua residual con aceite y la misma muestra después de agitarla.

Figura 21. **Agua residual**



Fuente: Fotografía tomada en el laboratorio del INFOM.

Figura 22. **Agua residual agitada**



Fuente: Fotografía tomada en el laboratorio del INFOM.

Se puede observar que al agitar la muestra se forma una solución parcialmente homogénea, mientras que sin agitar se forman dos fases, la superior de aceite y la inferior de agua. Para realizar el pre tratamiento que consiste en regular el pH de las aguas residuales se necesita agitarlas para que el pH sea homogéneo, pero es necesario que antes se recupere todo el aceite que se encuentra en las aguas residuales ácidas y alcalinas y, para evitar la formación de emulsión las aguas residuales ácidas y alcalinas, no se deben mezclar antes de remover el aceite.

El tratamiento actual de las aguas residuales consiste en:

- El agua residual tanto, ácida como alcalina atraviesa el lecho de grava con el fin de regular el pH de la misma.
- Después el agua residual ácida y alcalina se descarga en la fosa 1 y luego se recupera el aceite que contiene el agua residual con una trampa de aceite.
- Seguidamente, el agua pasa a la fosa 2 con el propósito de degradar el material orgánico que aún se encuentra en las aguas residuales por medio de bacterias.
- El último paso es descargar el agua residual en la fosa 3 para que sea absorbida por la tierra.

El procedimiento adecuado de este tratamiento se interrumpe desde el lecho de grava, debido a que éste no ayuda a regular el pH, los dos tipos de aguas se mezclan en la fosa 1 y se forma la emulsión, por lo que no se puede separar el aceite del agua, en la fosa 2 no se degrada el material orgánico, porque el medio para el desarrollo bacteriano no es adecuado.

Sin la separación del aceite del agua y la regulación apropiada de pH no se puede seguir con el tratamiento de las aguas residuales provenientes del lavado de biodiesel.

Las cuatro propuestas consisten en realizar un pre tratamiento para que luego el post tratamiento sea viable y eficaz. El pre tratamiento consiste en la separación del aceite y el agua y en la regulación del pH. Las propuestas para el pre tratamiento de las aguas residuales ácidas y alcalinas se basan en el procedimiento siguiente:

- Descargar el agua residual ácida o alcalina en la fosa 1 sin mezclarlas.
- Recuperar el aceite que contiene el agua residual con una trampa de aceite.
- Regular el pH del agua residual para que existan condiciones apropiadas para el desarrollo bacteriano.

A partir del último punto se puede realizar el post tratamiento del agua residual sin tener los problemas de separación y un medio no adecuado para el desarrollo bacteriano. Las propuestas se basan en la planta con la que cuenta actualmente la empresa para facilitar su aplicación.

La primera propuesta consiste en colocar en la fosa 1 un agitador con la capacidad adecuada para mezclar el agua residual que se encuentra en ella, con el propósito de que al agregar la sustancia reguladora el pH sea uniforme. Primero se recupera el aceite para reproceso y luego se regula el pH con ácido sulfúrico para bajar el pH o soda cáustica para subirlo, el pH se monitorea durante todo el proceso y se deja de agregar la sustancia reguladora hasta llegar al pH requerido.

Después de la regulación, el agua residual está lista para el post tratamiento. Este procedimiento se realiza manualmente, un operario debe encender el motor del agitador y monitorear el pH y otro agregar la sustancia reguladora, en esta propuesta el pre tratamiento debe realizarse por lotes, el agua que se encuentra en la fosa 1 debe ser tratada antes de descargar más agua en dicha fosa.

La segunda propuesta es similar a la primera, el procedimiento para el pre tratamiento es el mismo, la variante es que la fosa 1 se divide en dos: la fosa 1 y fosa 2; la separación del aceite y el agua se realizará en la fosa 1 y la regulación del pH en la fosa 2, con el propósito de realizar un pre tratamiento continuo, así no habrá que esperar a que se trate un lote de agua residual para continuar con el pre tratamiento. Esta propuesta, también se realiza manualmente con el requerimiento mínimo de dos operarios para manejarla.

La tercera propuesta consiste en realizar un pre tratamiento continuo sin utilizar un agitador y regular el pH, por medio del flujo de fluidos por acción de la gravedad y así aprovechar el desnivel que tiene la fosa, este desnivel provocará que el agua residual circule por los canales de la fosa 2.

La sustancia reguladora del pH se debe agregar en la entrada del agua hacia la fosa 2, durante el trayecto hacia la salida de la fosa, el agua se mezclará con la sustancia reguladora. Así, en la salida de la fosa, el pH del agua se encontrará regulado y el agua estará lista para su post tratamiento.

La cuarta propuesta consiste en automatizar el pre tratamiento para facilitar la operación.

Se deben realizar modificaciones en la planta actual e instalar los equipos necesarios para controlar todo el proceso desde el panel de control, se necesita sólo de un operador para que lleve el control del procedimiento.

La comparación de las propuestas se realizó analizando las ventajas y desventajas que posee cada una. La que tiene más ventajas y menos desventajas es la tercera, debido a que no es necesario modificar drásticamente la fosa 1, ni instalar equipos sofisticados para su funcionamiento.

CONCLUSIONES

1. Las aguas residuales ácidas y alcalinas provenientes del lavado de biodiesel, tienen un pH variable durante todo el proceso de lavado.
2. El pH de las aguas residuales crece al aumentar la temperatura, el mayor aumento se da a los 45°C.
3. El caudal de las aguas residuales ácidas es mayor que el caudal de las aguas residuales alcalinas. Se necesita más agua para lavar un lote de biodiesel producido mediante transesterificación ácida, que uno producido mediante transesterificación alcalina.
4. El lecho de grava es ineficiente para regular el pH de las aguas residuales provenientes del lavado de biodiesel, el pH es igual en la entrada del lecho de grava y en la salida del mismo.
5. Las condiciones de desarrollo bacteriano adecuado son pH entre 6 y 8 a temperatura ambiente.
6. El regulador actual de las aguas residuales no funciona, se deben realizar modificaciones en el orden del proceso, y por lo tanto en la planta de tratamiento.
7. El pH debe regularse después de recuperar el aceite para evitar que el aceite se disperse en el agua.

8. Las aguas residuales ácidas no deben de mezclarse con las alcalinas, hasta que el aceite se recupere y el pH se regule para evitar la emulsión.
9. La tercera propuesta es la que se recomienda aplicar para el pretratamiento de las aguas residuales, debido a que se le asigna menos desventajas en comparación con las otras.

RECOMENDACIONES

1. Medir el pH hasta que haya terminado el proceso de lavado, cuando se tenga un volumen establecido para después regularlo.
2. Realizar el pre tratamiento de las aguas residuales provenientes del lavado de biodiesel después de que las aguas lleguen a temperatura ambiente.
3. Separar primero el aceite que contiene el agua residual y después regular el pH, para evitar que éste influya en el mismo.
4. No mezclar las aguas residuales alcalinas con las ácidas hasta después de separar el aceite que contienen las mismas, para evitar la formación de emulsión.
5. Realizar el pre tratamiento lo más pronto posible, para evitar la variación de pH causada por la liberación de ácidos grasos libres provenientes del material orgánico que contienen las aguas residuales.
6. Investigar la manera de disminuir la pérdida de biodiesel durante el lavado.
7. Realizar un estudio completo para la automatización completa de la planta de tratamiento de aguas residuales de la producción de biodiesel.

8. Después de la regulación del pH, evaluar la eficiencia de las bacterias para degradar el material orgánico y su influencia en los demás parámetros de calidad del agua que contienen las aguas residuales por medio de un análisis de calidad de agua.

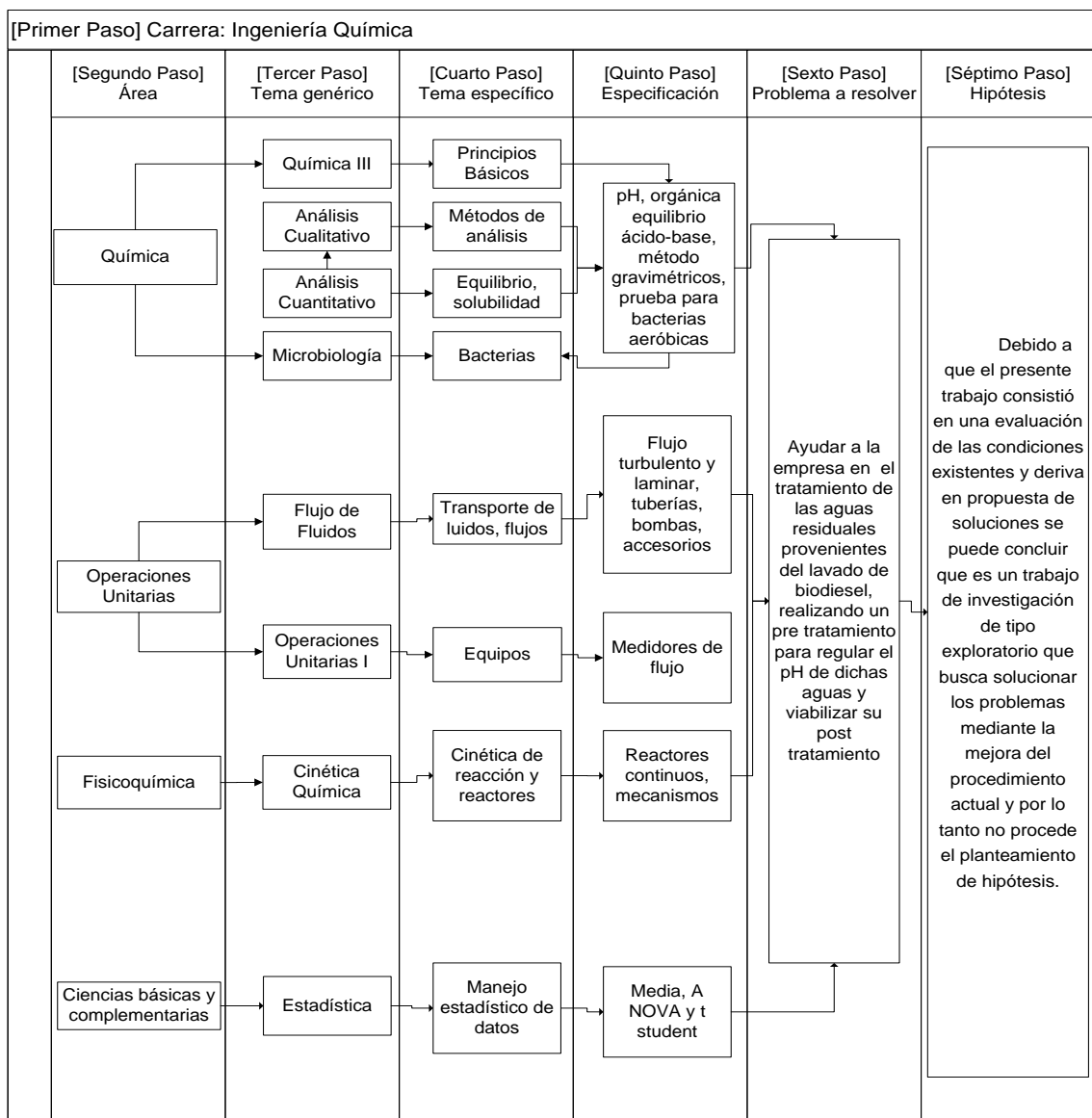
BIBLIOGRAFÍA

1. Acuerdo Gubernativo 236-2006. *Reglamento de las descargas y re uso de aguas residuales y de la disposición de lodos*. Guatemala, 2006. 22 p.
2. ASTURIAS, Ricardo. *Biodiesel en Guatemala*. Disponible en web: <http://www.eepCa.org/guatemala/documents/presentaciones/ricardo_asturias.pdf> [Consulta: 22 de marzo de 2010].
3. CASTRO, Paula. *Opciones para la producción y uso del biodiesel en el Perú*. Perú: Soluciones Prácticas, 2007. 176 p.
4. CHANG, Raymond. *Química*. 7ª ed. Colombia: McGraw-Hill, 2002. 1000 p.
5. EATON, D. Andrew; FRANSON, Mary Ann, American Water Works Association, Water Environment Federation. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 20ª ed. Estados Unidos: McGraw-Hill, 1998. 620 p.
6. KNOTHE, Gerhard; GERPEN, Jon Van; KRAHL, Jurgen. *The Biodiesel handbook*. Illinois: Pearson 2004. 250 p.
7. MORRISON, Robert ; BOYD, Neilson. *Química orgánica*. 5ª ed. México: Pearson, 1998. 1480 p.

8. RAMALHO, Robert. Tratamiento de aguas residuales. 2ª ed. España: Reverté, 2003. 340 p.
9. RIGOLA, Miguel. *Tratamiento de aguas industriales: aguas de proceso y residuales*. España: Alfaomega Marcombo, 1990. 250 p.

APÉNDICE 1

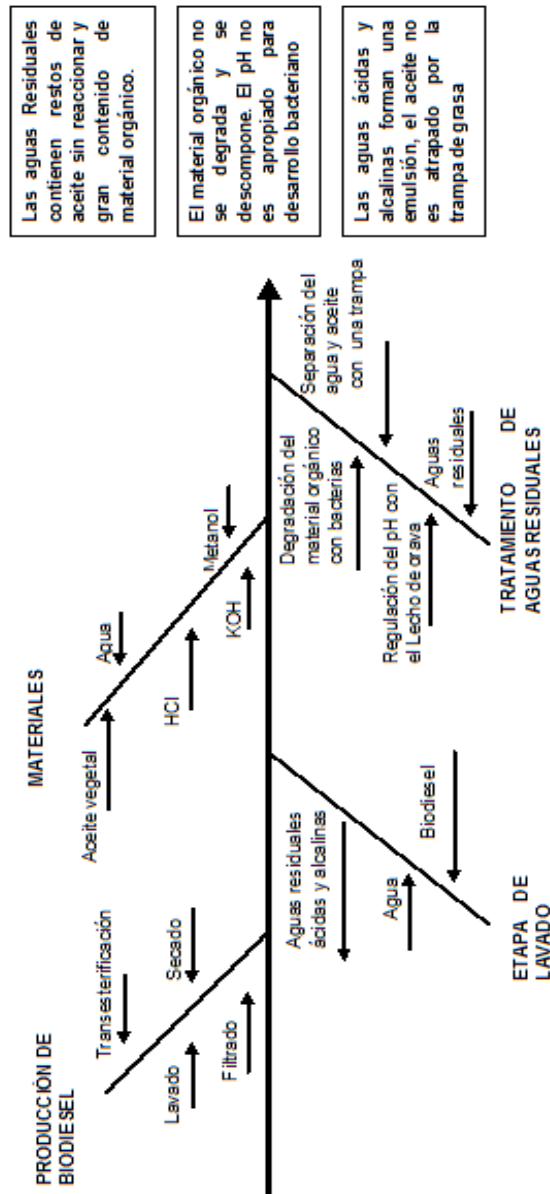
Requisitos académicos



Fuente: elaboración propia.

APÉNDICE 2

Árbol de problemas



Las aguas Residuales contienen restos de aceite sin reaccionar y gran contenido de material orgánico.

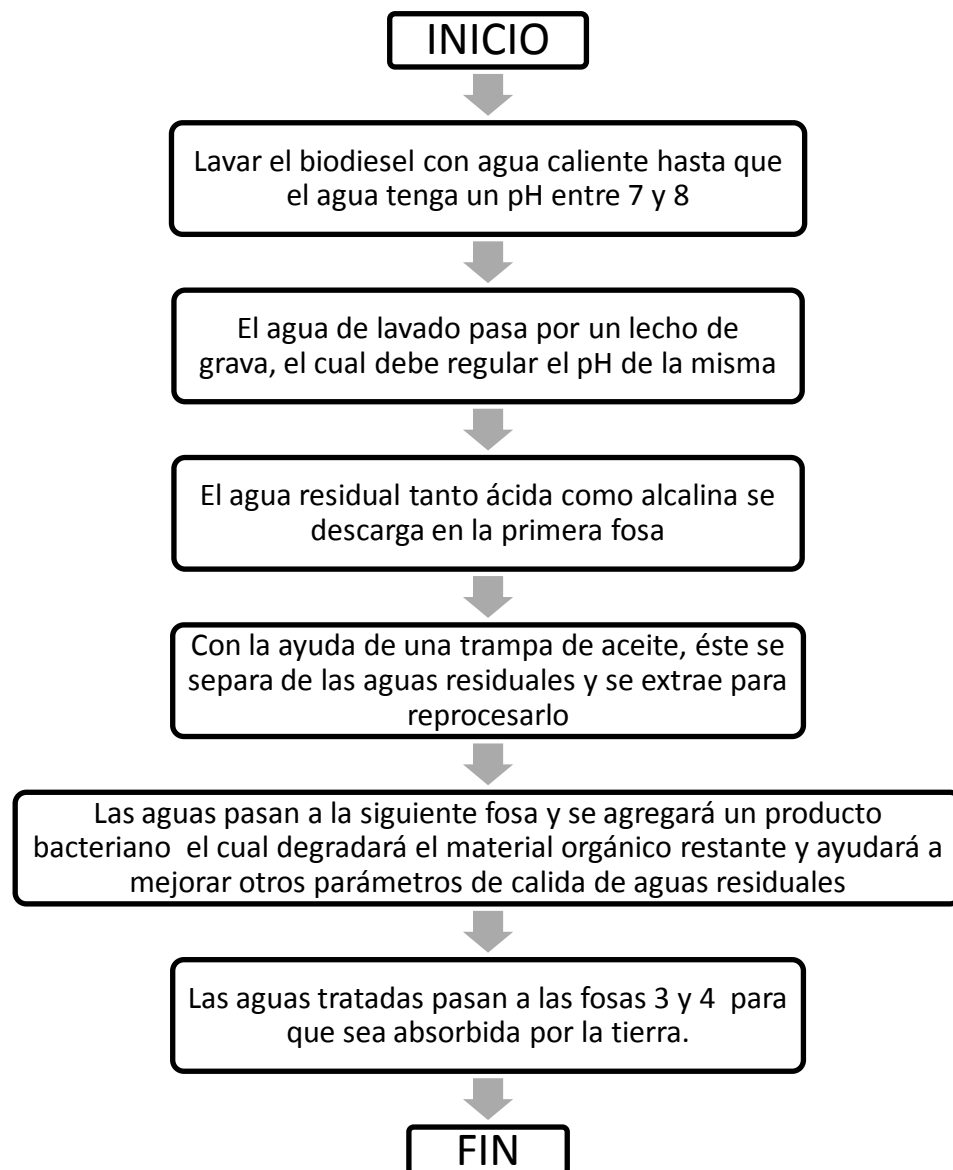
El material orgánico no se degrada y se descompone. El pH no es apropiado para desarrollo bacteriano

Las aguas ácidas y alcalinas forman una emulsión, el aceite no es atrapado por la trampa de grasa

Fuente: elaboración propia.

APÉNDICE 3

Diagrama de flujo del tratamiento actual de las aguas residuales



Fuente: elaboración propia.

APÉNDICE 4

Datos calculados

Eficiencia del lecho de grava

| Lote | pH Entrada | pH Salida | ε (%) |
|------|---------------|--------------|-------|
| 1 | 2,14 | 2,15 | 0,47 |
| 2 | 1,98 | 1,98 | 0,00 |
| 3 | 2,23 | 2,24 | 0,45 |
| 4 | 2,11 | 2,12 | 0,47 |
| 5 | 1,87 | 1,87 | 0,00 |
| 6 | 2,43 | 2,43 | 0,00 |
| 7 | 2,19 | 2,19 | 0,00 |

Fuente: elaboración propia.

Aumento de pH de las aguas residuales a cada de 5°C de temperatura

| Intervalo (°C) | Diferencia | | | | | | | Media |
|-------------------|------------|------|------|------|------|------|------|-------|
| 24-30 | 0,00 | 0,05 | 0,03 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,01 |
| 30-35 | 0,11 | 0,05 | 0,05 | 0,01 | 0,03 | 0,01 | 0,02 | 0,04 |
| 35-40 | 0,06 | 0,03 | 0,06 | 0,02 | 0,05 | 0,02 | 0,02 | 0,04 |
| 40-45 | 0,20 | 0,03 | 0,03 | 0,02 | 0,05 | 0,02 | 0,02 | 0,05 |
| 45-50 | 0,06 | 0,06 | 0,02 | 0,03 | 0,02 | 0,02 | 0,03 | 0,03 |

Fuente: elaboración propia.

Caudal de las aguas residuales alcalinas

| No. | Q_t (Galagua/min) | Tiempo de lavado (h) | Q_L (Galagua/Lote) | Q_{AL} (Lagua/Lote) |
|-----|------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|
| 1 | 11,11 | 6,02 | 4 013,29 | 14 788,99 |
| 2 | 11,65 | 6,05 | 4 229,68 | 15 586,36 |
| 3 | 11,23 | 6,03 | 4 064,46 | 14 977,54 |
| 4 | 11,12 | 5,99 | 3 997,97 | 14 732,50 |
| 5 | 10,98 | 6,00 | 3 953,88 | 14 570,05 |
| 6 | 11,89 | 6,10 | 4 350,64 | 16 032,12 |
| 7 | 11,81 | 5,91 | 4 189,24 | 15 437,37 |
| | | | Media | 15 160,70 |

Fuente: elaboración propia.

Caudal de las aguas residuales ácidas

| No. | Q_t (Galagua/min) | Tiempo de lavado (h) | Q_L (Galagua/Lote) | Q_{AC} (Lagua/Lote) |
|-----|------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|
| 1 | 11,56 | 8,00 | 5 548,80 | 20 447,33 |
| 2 | 11,01 | 8,10 | 5 350,86 | 19 717,92 |
| 3 | 11,21 | 8,07 | 5 427,88 | 20 001,75 |
| 4 | 11,24 | 7,80 | 5 260,32 | 19 384,28 |
| 5 | 11,67 | 7,77 | 5 440,55 | 20 048,44 |
| 6 | 11,87 | 7,89 | 5 619,26 | 20 706,97 |
| 7 | 11,98 | 7,95 | 5 714,46 | 21 057,79 |
| | | | Media | 20 194,92 |

Fuente: elaboración propia.

APÉNDICE 5

Imágenes de la planta de tratamiento de aguas

Lecho de grava



Fuente: elaboración propia.

Fosa 1 aguas ácidas y alcalinas



Fuente: elaboración propia.

APÉNDICE 6

Imágenes del lavado de biodiesel tomadas en laboratorio del INFOM

Lavado de biodiesel por aspersión



Fuente: elaboración propia.

Separación del biodiesel y el agua



Fuente: elaboración propia.

Biodiesel producido mediante transesterificación ácida



Fuente: elaboración propia.

Biodiesel producido mediante transesterificación alcalina



Fuente: elaboración propia.

Muestras de aguas residuales provenientes del lavado de biodiesel



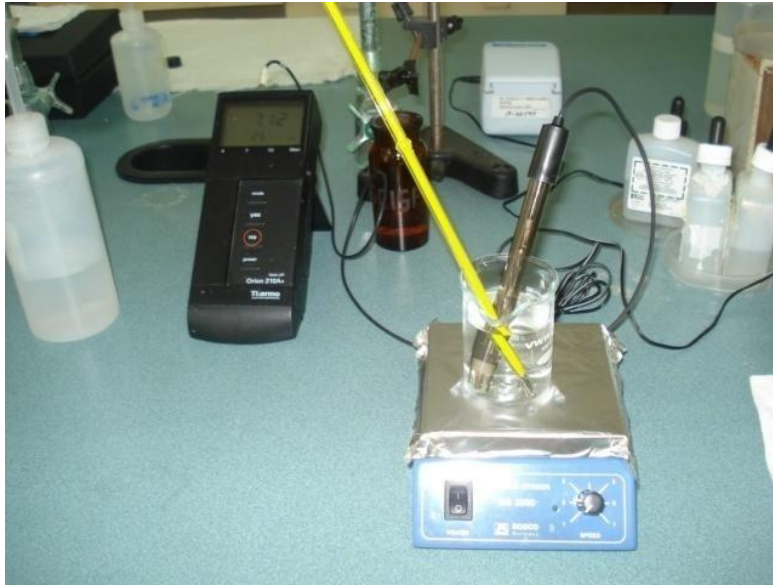
Fuente: elaboración propia.

Medición de pH de las aguas residuales provenientes del lavado de biodiesel



Fuente: elaboración propia.

Medición de pH en función de la temperatura



Fuente: elaboración propia.

ANEXO 1

Capítulo 5 del reglamento de las descargas y re uso de aguas residuales y de la disposición de lodos

CAPÍTULO V

PARÁMETROS PARA AGUAS RESIDUALES Y VALORES DE DESCARGA A CUERPOS RECEPTORES

Artículo 16. PARÁMETROS DE AGUAS RESIDUALES. Los parámetros de medición para determinar las características de las aguas residuales son los siguientes:

- a) Temperatura,
- b) Potencial de hidrógeno,
- c) Grasas y aceites,
- d) Materia flotante,
- e) Sólidos suspendidos totales,
- f) Demanda bioquímica de oxígeno a los cinco días a veinte grados Celsius
- g) Demanda química de oxígeno
- h) Nitrógeno total,
- i) Fósforo total,
- j) Arsénico,
- k) Cadmio,
- l) Cianuro total,
- m) Cobre,
- n) Cromo hexavalente,
- o) Mercurio,
- p) Níquel,
- q) Plomo,
- r) Zinc,
- s) Color y
- t) Coliformes fecales.

Artículo 17. MODELO DE REDUCCIÓN PROGRESIVA DE CARGAS DE DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO. Los entes generadores existentes

deberán reducir en forma progresiva la demanda bioquímica de oxígeno de las aguas residuales que descarguen a un cuerpo receptor, conforme a los valores y etapas de cumplimiento del cuadro siguiente:

| | | | | | |
|-------------------------------------|-------------------------------------|---------------|----------------|----------------|-----------------|
| Etapas | Uno | | | | |
| Fecha máxima de cumplimiento | Dos de mayo de dos mil once | | | | |
| Duración, años | 5 | | | | |
| Carga, kilogramos por día | 3000≤EG<6000 | 6000≤EG<12000 | 12000≤EG<25000 | 25000≤EG<50000 | 50000≤EG<250000 |
| Reducción porcentual | 10 | 20 | 30 | 35 | 50 |
| Etapas | Dos | | | | |
| Duración, años | 4 | | | | |
| Fecha máxima de cumplimiento | Dos de mayo de dos mil quince | | | | |
| Carga, kilogramos por día | 3000≤EG<5500 | 5500≤EG<10000 | 10000≤EG<30000 | 30000≤EG<50000 | 50000≤EG<125000 |
| Reducción porcentual | 10 | 20 | 40 | 45 | 50 |
| Etapas | Tres | | | | |
| Fecha máxima de cumplimiento | Dos de mayo de dos mil veinte | | | | |
| Duración, años | 5 | | | | |
| Carga, kilogramos por día | 3000≤EG<5000 | 5000≤EG<10000 | 10000≤EG<30000 | 30000≤EG<65000 | |
| Reducción porcentual | 50 | 70 | 85 | 90 | |
| Etapas | Cuatro | | | | |
| Fecha máxima de cumplimiento | Dos de mayo de dos mil veinticuatro | | | | |
| Duración, años | 4 | | | | |
| Carga, kilogramos por día | 3000≤EG<4000 | | | 4000≤EG<7000 | |
| Reducción porcentual | 40 | | | 60 | |

EG = carga del ente generador correspondiente, en kilogramos por día.

Para efectos de la aplicación del presente modelo, el valor inicial de descarga estará determinado en el Estudio Técnico. Dicho valor inicial, se refiere a la carga expresada en kilogramos por día de demanda bioquímica de oxígeno. Para los porcentajes de reducción de la etapa uno, se utilizará el valor inicial de descarga del Estudio Técnico y para cada una de las etapas siguientes, la carga inicial será el resultado obtenido de la reducción porcentual de la etapa anterior.

Artículo 18. DETERMINACIÓN DE DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO. Los entes generadores, en el Estudio Técnico, deberán incluir la determinación de la demanda química de oxígeno, a efecto de establecer su relación con la demanda bioquímica de oxígeno, mediante la siguiente fórmula: demanda química de oxígeno dividido entre la demanda bioquímica de oxígeno.

Artículo 19. META DE CUMPLIMIENTO. La meta de cumplimiento, al finalizar las etapas del modelo de reducción progresiva de cargas, se establece en tres mil kilogramos por día de demanda bioquímica de oxígeno, con un parámetro de calidad asociado igual o menor que doscientos miligramos por litro de demanda bioquímica de oxígeno. Los entes generadores existentes que alcancen y mantengan éstos valores habrán cumplido con la meta establecida en este artículo y con el modelo de reducción progresiva de cargas del artículo 17 del presente Reglamento.

Los entes generadores existentes que registren cargas menores o iguales a tres mil kilogramos por día, pero que registren valores mayores a doscientos miligramos por litro en el parámetro de calidad asociado, procederán a efectuar la reducción del valor de dicho parámetro de conformidad con los porcentajes correspondientes a la primera columna del lado izquierdo correspondiente a los rangos, en el modelo de reducción progresiva de cargas del artículo 17, del presente Reglamento.

Los entes generadores existentes de aguas residuales de tipo especial y ordinario que después de tratar dichas aguas, y que en cualesquiera de las etapas del modelo de reducción progresiva de cargas alcancen y mantengan valores en el parámetro de calidad asociado, iguales o menores que cien miligramos por litro en la demanda bioquímica de oxígeno, podrán realizar descargas mayores a tres mil kilogramos por día de demanda bioquímica de oxígeno.

Artículo 20. LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE DESCARGAS DE AGUAS RESIDUALES A CUERPOS RECEPTORES. Los límites máximos permisibles de los parámetros para las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores son:

| Parámetros | Dimensionales | Valores iniciales | Fecha máxima de cumplimiento | | | |
|------------------------|--|---------------------|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|
| | | | Dos de mayo de dos mil once | Dos de mayo de dos mil quince | Dos de mayo de dos mil veinte | Dos de mayo de dos mil veinticuatro |
| | | | Etapa | | | |
| | | | Uno | Dos | Tres | Cuatro |
| Temperatura | Grados Celsius | TCR +/- 7 | TCR +/- 7 | TCR +/- 7 | TCR +/- 7 | TCR +/- 7 |
| Grasas y aceites | Miligramos por litro | 1500 | 100 | 50 | 25 | 10 |
| Materia flotante | Ausencia/presencia | Presente | Ausente | Ausente | Ausente | Ausente |
| Sólidos suspendidos | Miligramos por litro | 3500 | 600 | 400 | 150 | 100 |
| Nitrógeno total | Miligramos por litro | 1400 | 100 | 50 | 25 | 20 |
| Fósforo total | Miligramos por litro | 700 | 75 | 30 | 15 | 10 |
| Potencial de hidrógeno | Unidades de potencial de hidrógeno | 6 a 9 | 6 a 9 | 6 a 9 | 6 a 9 | 6 a 9 |
| Coliformes fecales | Número más probable en cien mililitros | < 1x10 ⁵ | < 1x10 ⁵ | < 1x10 ⁵ | < 1x10 ⁴ | < 1x10 ⁴ |
| Arsénico | Miligramos por litro | 1 | 0.5 | 0.1 | 0.1 | 0.1 |
| Cadmio | Miligramos por litro | 1 | 0.4 | 0.1 | 0.1 | 0.1 |
| Cianuro total | Miligramos por litro | 6 | 3 | 1 | 1 | 1 |
| Cobre | Miligramos por litro | 4 | 4 | 3 | 3 | 3 |
| Cromo hexavalente | Miligramos por litro | 1 | 0.5 | 0.1 | 0.1 | 0.1 |
| Mercurio | Miligramos por litro | 0.1 | 0.1 | 0.02 | 0.02 | 0.01 |
| Níquel | Miligramos por litro | 6 | 4 | 2 | 2 | 2 |
| Plomo | Miligramos por litro | 4 | 1 | 0.4 | 0.4 | 0.4 |
| Zinc | Miligramos por litro | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| Color | Unidades platino cobalto | 1500 | 1300 | 1000 | 750 | 500 |

TCR = temperatura del cuerpo receptor, en grados Celsius.

Artículo 21. LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PARA ENTES GENERADORES NUEVOS.

Los entes generadores nuevos deberán cumplir, desde el inicio de sus operaciones, con una meta de tres mil kilogramos por día de demanda bioquímica de oxígeno, con un parámetro de calidad asociado igual o menor que doscientos miligramos por litro de demanda bioquímica de oxígeno. En el caso de que el parámetro de calidad asociado sea igual o menor a cien miligramos por litro en la demanda bioquímica de oxígeno, podrán realizar descargas mayores a tres mil kilogramos por día de demanda bioquímica de oxígeno.

Adicionalmente, deberán cumplir los límites máximos permisibles de los parámetros siguientes:

| Parámetros | Dimensionales | Límites máximos permisibles |
|------------------------|--|-----------------------------|
| Temperatura | Grados Celsius | TCR +/- 7 |
| Grasas y aceites | Miligramos por litro | 10 |
| Materia flotante | Ausencia/presencia | Ausente |
| Sólidos suspendidos | Miligramos por litro | 100 |
| Nitrógeno total | Miligramos por litro | 20 |
| Fósforo total | Miligramos por litro | 10 |
| Potencial de hidrógeno | Unidades de potencial de hidrógeno | 6 a 9 |
| Coliformes fecales | Número más probable en cien mililitros | < 1x10 ⁴ |
| Arsénico | Miligramos por litro | 0.1 |
| Cadmio | Miligramos por litro | 0.1 |
| Cianuro total | Miligramos por litro | 1 |
| Cobre | Miligramos por litro | 3 |
| Cromo hexavalente | Miligramos por litro | 0.1 |
| Mercurio | Miligramos por litro | 0.01 |
| Níquel | Miligramos por litro | 2 |
| Plomo | Miligramos por litro | 0.4 |
| Zinc | Miligramos por litro | 10 |
| Color | Unidades platino cobalto | 500 |

TCR = temperatura del cuerpo receptor, en grados Celsius.

Cuando de conformidad con lo establecido en el artículo 8 de la Ley de Protección y Mejoramiento del Medio Ambiente se requiera un Estudio de Evaluación de Impacto Ambiental, el ente generador deberá cumplir con los valores de los límites máximos permisibles contenidos en el presente artículo.

El ente generador nuevo que, por razones técnicas debidamente justificadas, requiera de un período de estabilización productiva, definirá en el Estudio de Evaluación de Impacto Ambiental la necesidad y etapas de ajuste consecutivas dentro del período de estabilización, el cual no excederá de seis meses, contados a partir del inicio de operaciones del ente generador. El Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, establecerá en la resolución aprobatoria del Estudio de Evaluación de Impacto Ambiental correspondiente, el plazo o plazos consecutivos de las etapas que fueren necesarias para dicho período de estabilización.

Artículo 22. LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PARA DESCARGA DE AGUAS RESIDUALES EN ESTEROS. Cuando el cuerpo receptor sea un estero se aplicarán las siguientes disposiciones:

- a) Los entes generadores existentes deberán observar los límites máximos permisibles establecidos en el artículo 20 del presente Reglamento. El parámetro de demanda bioquímica de oxígeno aplicable es el siguiente:

| Parámetro | Dimensional | Valor inicial | Fecha máxima de cumplimiento | | | |
|-------------------------------|----------------------|---------------|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|
| | | | Dos de mayo de dos mil once | Dos de mayo de dos mil quince | Dos de mayo de dos mil veinte | Dos de mayo de dos mil veinticuatro |
| | | | Etapa | | | |
| | | | Uno | Dos | Tres | Cuatro |
| Demanda bioquímica de oxígeno | Miligramos por litro | 500 | 300 | 250 | 150 | 100 |

- b) Los entes generadores nuevos deberán aplicar los límites máximos permisibles y la reducción de la última etapa del artículo 20 y del artículo 22 literal a).
- c) Para los entes generadores que descargan aguas residuales de tipo especial a esteros, los valores de las concentraciones de los parámetros establecidos en el presente Reglamento, se determinan de acuerdo a la diferencia entre la concentración del efluente y la del afluente. El resultado que se obtenga se utilizará como base para establecer si el ente generador cumple con los límites máximos permisibles de los artículos 20 y 22 literal a) del presente Reglamento.
- d) A los entes generadores regulados en el presente artículo no les serán aplicables los artículos 17 y 19, del presente Reglamento.

Artículo 23. DEDUCCIÓN ESPECIAL DE VALORES EN PARÁMETROS. A los entes generadores de aguas residuales de tipo especial que registren en sus afluentes valores mayores a los límites máximos permisibles de los parámetros de demanda bioquímica de oxígeno y sólidos suspendidos, se aplicará el concepto de deducción especial. Dicha deducción especial consiste en restar el valor de cada parámetro del efluente del valor registrado en el afluente. El resultado que se obtenga se utilizará como base para establecer si el ente generador cumple con los límites máximos permisibles del presente Reglamento.

Artículo 24. LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE DESCARGAS A CUERPOS RECEPTORES PARA AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES Y DE URBANIZACIONES NO CONECTADAS AL ALCANTARILLADO PÚBLICO. Las municipalidades o empresas encargadas del tratamiento de aguas residuales del alcantarillado público y las urbanizaciones existentes no conectadas al alcantarillado público, cumplirán con los límites máximos permisibles para descargar a cuerpos receptores, de cualesquiera de las formas siguientes:

- a) Con lo preceptuado en los artículos 17, 18, 19 y 20, de conformidad con los plazos establecidos en estos artículos del presente Reglamento.
- b) Con los límites máximos permisibles y plazos establecidos en el siguiente cuadro:

| Parámetros | Dimensionales | Valores iniciales | Fecha máxima de cumplimiento | | | |
|-------------------------------|--|-------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|
| | | | Dos de mayo de dos mil quince | Dos de mayo de dos mil veinte | Dos de mayo de dos mil veinticuatro | Dos de mayo de dos mil veintinueve |
| | | | Etapa | | | |
| | | | Uno | Dos | Tres | Cuatro |
| Temperatura | Grados Celsius | TCR +/- 7 | TCR +/- 7 | TCR +/- 7 | TCR +/- 7 | TCR +/- 7 |
| Grasas y aceites | Miligramos por litro | 100 | 50 | 10 | 10 | 10 |
| Materia flotante | Ausencia/presencia | Presente | Ausente | Ausente | Ausente | Ausente |
| Demanda bioquímica de oxígeno | Miligramos por litro | 700 | 250 | 100 | 100 | 100 |
| Sólidos suspendidos | Miligramos por litro | 300 | 275 | 200 | 100 | 100 |
| Nitrógeno total | Miligramos por litro | 150 | 150 | 70 | 20 | 20 |
| Fósforo total | Miligramos por litro | 50 | 40 | 20 | 10 | 10 |
| Potencial de hidrógeno | Unidades de potencial de hidrógeno | 6 a 9 | 6 a 9 | 6 a 9 | 6 a 9 | 6 a 9 |
| Coliformes fecales | Número más probable en cien mililitros | $< 1 \times 10^8$ | $< 1 \times 10^7$ | $< 1 \times 10^4$ | $< 1 \times 10^4$ | $< 1 \times 10^4$ |
| Arsénico | Miligramos por litro | 1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 |
| Cadmio | Miligramos por litro | 1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 |
| Cianuro total | Miligramos por litro | 6 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Cobre | Miligramos por litro | 4 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| Cromo hexavalente | Miligramos por litro | 1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 |
| Mercurio | Miligramos por litro | 0.1 | 0.02 | 0.02 | 0.01 | 0.01 |
| Níquel | Miligramos por litro | 6 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| Plomo | Miligramos por litro | 4 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.4 |
| Zinc | Miligramos por litro | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| Color | Unidades platino cobalto | 1500 | 1000 | 750 | 500 | 500 |

Todas las municipalidades deberán cumplir con tener en operación, por lo menos con sistemas de tratamiento primario al cumplirse a más tardar el dos de mayo del dos mil quince.

Las municipalidades que reciban descargas de aguas residuales de tipo especial en el alcantarillado público, que contengan compuestos que no puedan ser tratados en un sistema de tratamiento primario, no estarán sujetas a los límites máximos permisibles de demanda bioquímica de oxígeno, sólidos suspendidos, nitrógeno total y fósforo total en la etapa uno del cuadro anterior, del presente artículo, lo cual deberá ser acreditado en el Estudio Técnico.

