



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS AGROPECUARIAS

PROPUESTA DE OPTIMIZACIÓN DEL TRATAMIENTO DE AGUAS
RESIDUALES DE LA EMPRESA DANEC, S.A

AUTORA

MICHELLE PAOLA ACOSTA YÉPEZ

AÑO

2017



FACULTAD DE INGENIERÍAS Y CIENCIAS AGROPECUARIAS

PROPUESTA DE OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE
AGUAS RESIDUALES DE LA EMPRESA DANEC, S.A

Trabajo de Titulación presentado en conformidad con los requisitos
establecidos para optar por el título de Ingeniera Ambiental en Prevención y
Remediación

Profesor Guía

PhD. Francisco Domínguez

Autora

Michelle Paola Acosta Yépez

Año

2017

DECLARACIÓN DEL PROFESOR GUÍA

“Declaro haber dirigido este trabajo a través de reuniones periódicas con el estudiante, orientando sus conocimientos y competencias para un eficiente desarrollo del tema escogido y dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación”

Francisco Javier Domínguez

PhD. Ingeniería Química Mención Superficies y Catálisis

CI: 1757153737

DECLARACIÓN PROFESOR CORRECTOR

“Declaro haber revisado este trabajo, dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación”

Santiago Daniel Piedra Burgos
Master, Hydrosience and Engineering
CI:1715384150

DECLARACIÓN DE AUTORÍA DEL ESTUDIANTE

“Declaro que este trabajo es original, de mi autoría, que se han citado las fuentes correspondientes y que en su ejecución se respetaron las disposiciones legales que protegen los derechos de autores vigentes”

Michelle Paola Acosta Yépez

CI: 1720643723

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por darme la sabiduría y fortaleza para alcanzar una de mis metas. A mis padres por su apoyo incondicional, ejemplo de perseverancia y su gran amor. Al PhD. Francisco Domínguez por su tiempo y guía constante en el presente trabajo. Al Ing. Camilo Haro por su orientación y apoyo durante la realización de este trabajo.

DEDICATORIA

A Dios, por bendecirme en esta etapa de mi vida. A mis padres por su esfuerzo, trabajo y sacrificio para que sea una profesional. A mi hijo por darme la fortaleza y motivación para seguir adelante. A mi hermano por ser mi apoyo incondicional en este logro. A mis abuelitas, por sus enseñanzas y sus mensajes de aliento. A mis abuelitos, mis ángeles que me cuidan desde el cielo.

RESUMEN

Los efluentes provenientes de las industrias alimenticias, poseen elevados contenidos de aceites y grasas, por lo que se hace necesario realizar un tratamiento para ser evacuados en los cuerpos de agua dulce. Los efluentes estudiados, se caracterizaron por poseer elevadas cantidades de aceites y grasas (10447,80 mg/l), DBO₅ (1600 mg/l), DQO (28900 mg/l), turbidez (1091,5) y pH (8,7). El objetivo de este trabajo fue optimizar el tratamiento de las aguas residuales de la empresa DANEC, mediante la implementación de un tratamiento primario adecuado. Para ello se realizaron dos pretratamientos: la flotación por aire disuelto y la electroflotación a tiempos de 5, 15 y 30 min, respectivamente, con un ajuste de pH a 5 y utilizando como medio electrolítico H₂SO₄. Posterior a esto, se aplicó la tecnología de coagulación-floculación, utilizando 40 ml de policloruro de aluminio al 0,075% y 23 ml del coadyuvante polielectrolito aniónico al 0,1%.

Los diseños experimentales utilizados permitieron determinar que el mejor tratamiento fue la aplicación del método de la flotación por aire disuelto empleando un tiempo de 5 min, ya que se logró una remoción de turbidez del 99,5 %, de la DQO del 99,5 % y de la composición de aceites y grasas del 99,8 %, alcanzando valores de 5,2 NTU, 39,6 mg/l, 95,3 mg/l y 14 mg/l, respectivamente. Este tratamiento permitió que el agua tratada cumpliera con los límites máximos permisibles del Marco Legal regulatorio del Acuerdo Ministerial.

Palabras claves: Flotación por aire disuelto, electroflotación, coagulación-floculación.

ABSTRACT

The effluents from the food industries have high contents of oils and fat, so it is necessary to treat these effluents in order to comply with the National Standards. The effluents in this scope were characterized by high amounts of oils and fat (10447,80 mg / l), BOD₅ (1600 mg / l), COD (28900 mg / l), turbidity (1091,5) and pH (8,7). The objective of this thesis is to optimize the wastewater treatment of the DANEC company. Through the implementation of a primary treatment. Two primary treatments were executed: dissolved air flotation and electroflotation at 5, 15 and 30 minutes, respectively, with an adjusted pH of 5 and the use of the electrolytic medium with H₂SO₄. Subsequently, the coagulation-flocculation technology was applied, using 40 ml of 0,075% aluminum polychloride and 23 ml of the 0,1% anionic polyelectrolyte adjuvant. The experimental designs that were used, allowed us to conclude that the best treatment was the dissolved air flotation method with a residence time of 5 minutes, due to the turbidity removal of 99,5%; COD of 99,5% and composition of oils and fat of 99,8%, reaching values of 5,2 NTU, 39,6 mg/l, 95,3 mg/l and 14 mg/l, respectively. This treatment complies with the maximum permissible limits of the Regulatory Legal Framework of the Ministerial Agreement.

Key words: Dissolved air flotation, electroflotation, coagulation-flocculation.

ÍNDICE

| | |
|--|----|
| INTRODUCCIÓN | 1 |
| Antecedentes..... | 1 |
| Alcance | 3 |
| Justificación | 3 |
| Objetivos..... | 4 |
| Objetivo General | 4 |
| Objetivos Específicos..... | 4 |
| 1. MARCO TEÓRICO..... | 5 |
| 1.1 Contaminación de las fuentes hídricas en el Ecuador por industrias generadoras de aceites vegetales y detergentes | 5 |
| 1.2 Aguas residuales de la industria productora de aceites vegetales y detergentes y su impacto al medio ambiente | 6 |
| 1.3 Marco legal..... | 7 |
| 1.4 Sistemas de tratamiento primario para aguas residuales de la industria productora de aceite vegetal y detergentes | 8 |
| 1.4.1 Flotación por aire disuelto “DAF” | 8 |
| 1.4.2 Electroflotación | 11 |
| 2. METODOLOGÍA..... | 12 |
| 2.1 Lugar del muestreo | 12 |
| 2.2 Toma de muestras..... | 14 |
| 2.3 Caracterización fisicoquímica del agua residual antes y después de su tratamiento | 14 |
| 2.3.1 Parámetros físicos | 14 |
| 2.3.1.1 Medición de pH mediante potenciometría | 14 |
| 2.3.1.2 Medición de la Turbidez mediante nefelometría..... | 14 |
| 2.3.2 Parámetros químicos | 15 |
| 2.3.2.1 Determinación de la demanda química de oxígeno (DQO) mediante fotometría..... | 15 |

| | | |
|---------|---|-----|
| 2.3.2.2 | Determinación de Aceites y grasas mediante partición gravimétrica..... | .16 |
| 2.4 | Proceso de tratamiento de aguas residuales..... | 17 |
| 2.4.1 | Tratamiento utilizando el método Flotación por aire disuelto “DAF”, para la remoción de aceites y grasas..... | 18 |
| 2.4.1.1 | Flotación por aire disuelto | 18 |
| 2.4.1.2 | Decantación | 19 |
| 2.4.1.3 | Coagulación - Floculación por medio del método test de jarras | 20 |
| 2.4.2 | Tratamiento utilizando el método Electroflotación, para la remoción de aceites y grasas. | 25 |
| 2.4.2.1 | Electroflotación | 25 |
| 2.5 | Diseño Experimental | 27 |
| 3. | RESULTADOS Y ANÁLISIS | 28 |
| 3.1 | Caracterización del agua | 28 |
| 3.1.1 | Agua residual..... | 28 |
| 3.2 | Análisis estadístico..... | 31 |
| 3.2.1 | Parámetro turbidez | 33 |
| 3.2.2 | Parámetro DQO..... | 44 |
| 3.2.4 | Parámetro composición de aceites y grasas | 51 |
| 4. | CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 61 |
| 4.1 | Conclusiones | 61 |
| 4.2 | Recomendaciones..... | 62 |
| | REFERENCIAS | 63 |
| | ANEXOS | 69 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Método de adherencia de las burbujas de aire. | 10 |
| Figura 2. Ubicación del área de estudio | 12 |
| Figura 3. Tratamiento de aguas residuales en DANEC..... | 13 |
| Figura 4. Diagrama de proceso de la medición de la demanda química de oxígeno mediante fotometría..... | 15 |
| Figura 5. Medición de la temperatura..... | 17 |
| Figura 6. Flotación por aire disuelto. | 19 |
| Figura 7. Decantador..... | 20 |
| Figura 8. Equipo para el método test de jarras..... | 21 |
| Figura 9. Gráfico de proceso de coagulación-floculación..... | 21 |
| Figura 10. Matriz de estudios exploratorios para la aplicación del método coagulación-floculación con pH 8,7..... | 23 |
| Figura 11. Matriz de estudios exploratorios para la aplicación del método coagulación-floculación. | 24 |
| Figura 12. Tratamiento 1. Utilización del método de flotación por aire disuelto, decantación y coagulación-floculación..... | 25 |
| Figura 13. Electroflotación..... | 26 |
| Figura 14. Tratamiento 2. Utilización del método de electroflotación, decantación y coagulación-floculación..... | 26 |
| Figura 15. Agua residual de la empresa DANEC S.A. | 29 |
| Figura 16. Diagrama de caja. Flotación por aire disuelto. Parámetro turbidez..... | 35 |
| Figura 17. Diagrama de caja. Electroflotación. Parámetro turbidez. | 37 |
| Figura 18. Porcentaje de remoción de la turbidez, utilizando la flotación por aire disuelto..... | 38 |
| Figura 19. Turbidez obtenida en la flotación por aire disuelto | 39 |
| Figura 20. Obtención de lodos en el tratamiento de la flotación por aire disuelto . | 40 |
| Figura 21. Porcentaje de remoción de la turbidez, utilizando la electroflotación. .. | 41 |
| Figura 22. Turbidez obtenida en la electroflotación..... | 42 |
| Figura 23. Obtención de lodos en el tratamiento de la electroflotación..... | 43 |

| | |
|---|----|
| Figura 24. Diagrama de caja. Tratamiento con la flotación por aire disuelto. Parámetro DQO. | 46 |
| Figura 25. Diagrama de caja. Tratamiento con la flotación por aire disuelto. Parámetro DQO. | 48 |
| Figura 26. Porcentaje de remoción de los tratamientos con la flotación por aire disuelto..... | 49 |
| Figura 27. Porcentaje de remoción de los tratamientos con la electroflotación..... | 50 |
| Figura 28. Diagrama de caja. Tratamiento con la flotación por aire disuelto..... | 53 |
| Figura 29. Remoción de grasas obtenidas en el tratamiento de la flotación por aire disuelto..... | 54 |
| Figura 30. Diagrama de caja. Tratamiento con la electroflotación..... | 56 |
| Figura 31. Remoción de grasas obtenidas en el tratamiento con la electroflotación | 57 |
| Figura 32. Porcentaje de remoción de los tratamientos con la flotación por aire disuelto..... | 58 |
| Figura 33. Porcentaje de remoción de los tratamientos con la electroflotación..... | 59 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Matriz experimental | 27 |
| Tabla 2. Caracterización del agua residual | 28 |
| Tabla 3. Resultados finales del tratamiento con flotación por aire disuelto | 30 |
| Tabla 4. Resultados finales del tratamiento con la electroflotación | 30 |
| Tabla 5. Resultados obtenidos de la turbidez empleando la flotación por aire disuelto | 34 |
| Tabla 6. ANOVA para el parámetro turbidez, tratamiento con la flotación por aire disuelto | 34 |
| Tabla 7. Resultados de la prueba de Tukey para el parámetro turbidez, tratamiento con la flotación por aire disuelto | 35 |
| Tabla 8. Resultados de la turbidez empleando la electroflotación..... | 36 |
| Tabla 9. Resultado de la prueba de ANOVA para el parámetro turbidez con la electroflotación | 36 |
| Tabla 10. Resultados de la prueba de Tukey para el parámetro turbidez con la electroflotación | 37 |
| Tabla 11. Resultados de la DQO empleando la electroflotación por aire disuelto | 45 |
| Tabla 12. Resultados de la prueba ANOVA para el parámetro DQO, tratamiento con la flotación por aire disuelto | 45 |
| Tabla 13. Resultados de la prueba de Tukey para el parámetro DQO, tratamiento con la flotación por aire disuelto | 46 |
| Tabla 14. Resultados de la DQO empleando la electroflotación | 47 |
| Tabla 15. Resultados de la prueba ANOVA para el parámetro DQO. Tratamiento con la electroflotación..... | 47 |
| Tabla 16. Resultados de la prueba Tukey para el parámetro DQO, tratamiento con la electroflotación..... | 48 |
| Tabla 17. Resultados de concentración de aceites y grasas, empleando la flotación por aire disuelto | 52 |
| Tabla 18. Resultados de la prueba ANOVA para el parámetro concentración de aceites y grasas, tratamiento con la flotación por aire disuelto | 52 |

| | |
|---|----|
| Tabla 19. Resultados de la prueba Tukey para el parámetro aceites y grasas, tratamiento con la flotación por aire disuelto | 53 |
| Tabla 20. Resultados de la concentración de aceites y grasas, empleando la electroflotación | 54 |
| Tabla 21. Resultados de la prueba ANOVA para el parámetro concentración aceites y grasas, tratamiento con la electroflotación | 55 |
| Tabla 22. Resultados de la prueba Tukey para el parámetro concentración aceites y grasas, tratamiento con la electroflotación | 56 |

INTRODUCCIÓN

Antecedentes

A nivel mundial, el consumo de aceites vegetales ha incrementado en un 2,1% anual (Proecuador, 2015), su producción generó residuos contaminantes especialmente aceites y grasas, muchos de estos residuos que no son tratados pueden presentar amenazas al medio ambiente, particularmente en el agua, lo que podría provocar un deficiente intercambio y absorción de oxígeno, afectando de esta forma su grado de autodepuración. Es por esta razón que surge la necesidad de preservar los cursos hídricos, buscando alternativas eficientes para la eliminación de dichos compuestos (Aly, Hasan y Alfarraj, 2014).

Las aguas residuales de las industrias productoras de aceites vegetales contienen elevados niveles de grasas, aceites y detergentes que presentan baja biodegradabilidad, es por esto que se emplea varios métodos para el tratamiento de las mismas.

Por medio de procesos físicos se pueden separar grasas y aceites mediante “trampas de grasas”, que tienen como principio la separación de las mismas por diferencias de densidades, generando su flotación. La emulsificación generada en las aguas residuales influyen en el funcionamiento de las trampas de grasa, puesto que muchas veces se utilizan detergentes, los mismos que son difícilmente removibles. Para reducir dicha estabilidad se utilizan procesos de flotación por inyección de aire o mediante electroflotación. Una vez que las grasas son separadas, se proceden a realizar procesos como coagulación-floculación y filtración, con la finalidad de reducir la turbidez del agua. (Pintor, Vilar, Botelho y Boaventura, 2016). Otro de los procesos utilizados en algunos países es la implementación de pretratamientos de efluentes con alta concentración de grasas y aceites, mediante procesos de hidrólisis enzimáticas, con el hongo *Penicillium Restrictu*, el cual produce un grupo de hidrolasas capaces de degradar los compuestos orgánicos más complejos como son las grasas presentes en efluentes (Cammara y Freire, 2006).

En otros estudios realizados las aguas residuales de la industria de aceites vegetales y detergentes han sido tratadas por varias metodologías como la electrocoagulación, removiéndose satisfactoriamente contaminantes que se encuentran en el agua residual, pasando posteriormente por un proceso de sedimentación y finalmente por sistemas de filtración, reduciéndose así impurezas remanentes, malos olores y la turbidez del agua (Abdelmoez, Barakat y Moaz, 2013).

En países donde el cultivo de olivo es importante para la producción de aceite vegetal, se utilizan tratamientos biológicos ya sean aerobios o anaerobios, utilizando microorganismos como bacterias, y levaduras, observándose la reducción de la DBO, DQO, aceites y grasas de forma eficiente (Hashwa y Mhanna, 2008).

En el año 2015, la industria alimenticia en el Ecuador, produjo 519.693 TM de aceites vegetales aproximadamente, consumiéndose y exportándose alrededor de 222.556 TM y 308.724 TM respectivamente, según la Fundación de Fomento de Exportaciones de Aceite de Palma y sus derivados de origen nacional (FEDAPAL). Para el presente año se pretende incrementar aproximadamente el 7,4% de la producción de aceite vegetal (Fedapal, 2015)

La empresa DANEC S.A, creada en 1972, produce de aceites, mantecas, margarinas y jabones. Los efluentes generados por dicha industria son tratados mediante procesos tradicionales como trampas de grasas y sistemas de coagulación-floculación, el principal problema es la utilización de químicos en el proceso final de tratamiento (DANEC, 2013). Aproximadamente, en el Ecuador el 1,1% (INEC, 2013) de las aguas residuales industriales poseen algún tipo de tratamiento, ya que muchos de estos efluentes no son tratados apropiadamente por parte de la industria aceitera nacional, por lo que se pretende optimizar los tratamientos existentes en la empresa DANEC, S.A mediante la realización de una propuesta eficiente y aplicable.

Alcance

El presente estudio se centró en el tratamiento de aguas residuales provenientes de la industria alimenticia de aceites vegetales y detergentes, donde se analizaron procesos como la flotación por aire disuelto y la electroflotación, los cuales se adaptaron a la tipología del efluente para garantizar el tratamiento de las mismas. A partir de los resultados obtenidos se identificaron las condiciones óptimas de tratamiento mediante un muestreo por conveniencia, donde se valoró la eficiencia de los sistemas de electroflotación y aireación como tratamiento primario a los procesos ya existentes, determinando para ello variables como la DQO, turbidez y la concentración de aceites y grasas. En función de los resultados que se obtuvieron en la caracterización inicial del agua y luego de efectuar los tratamientos existentes, se lograron establecer las condiciones óptimas, por medio de la caracterización final de las aguas en cada uno de los tratamientos empleados y mediante pruebas estadísticas como el análisis de varianza ANOVA, diagramas de caja y la prueba de Tukey.

Justificación

Las aguas residuales provenientes de la industria de producción de aceites vegetales y detergentes contienen altas concentraciones de grasas y tensoactivos, provocando graves impactos sobre los cursos hídricos. Principalmente en la actividad fotoautótrofa debido a la reducción del paso de la luz y a la transferencia de oxígeno entre la atmósfera y el agua. Las aguas tratadas de forma eficiente pueden ser reutilizadas para el riego de áreas verdes así como en diferentes procesos que no requieran agua de elevada calidad al interior de la empresa.

La presente investigación se sustenta en el Marco Legal regulatorio del Acuerdo Ministerial 028, donde se prohíbe la descarga de residuos líquidos sin ser tratados hacia cuerpos de agua o sistemas de alcantarillado (Ministerio del Ambiente, 2015)

Finalmente, el presente estudio recabó experiencias de tratamiento de aguas con elevados niveles de detergentes, grasas y aceites; pudiéndose adaptar a las condiciones de los efluentes provenientes de la empresa DANEC S.A, verificándose las condiciones óptimas con las que se garantizaron la correcta depuración de dichas descargas.

Objetivos

Objetivo General

- Establecer una propuesta que optimice los sistemas de tratamiento de las aguas residuales provenientes de la industria productora de grasas y aceites.

Objetivos Específicos

- Evaluar sistemas de electroflotación y aireación a escala de laboratorio como tratamiento primario de las aguas provenientes de la empresa DANEC, S.A.
- Determinar la efectividad de los procesos de electroflotación y aireación, a diferentes tiempos, mediante la caracterización del agua tratada y su respectivo análisis estadístico.
- Proponer el sistema de tratamiento apropiado que optimice los procesos de depuración existentes en la empresa DANEC, S.A.

1. MARCO TEÓRICO

1.1 Contaminación de las fuentes hídricas en el Ecuador por industrias generadoras de aceites vegetales y detergentes

El agua dulce es un recurso vital para la vida de los seres vivos, por lo que seguirá siendo renovable siempre y cuando se lo administre de una forma adecuada.

En el Ecuador existen graves problemas ambientales, como la contaminación de recursos hídricos y la degradación de los ecosistemas asociados a estos; entre las causas se encuentran el crecimiento poblacional, la creciente demanda de agua y la ausencia de aplicación de sanciones a los causantes de los impactos ambientales.

Aproximadamente, el 1,1% de las aguas residuales urbanas e industriales conllevan algún tipo de tratamiento en el Ecuador. Por esta razón, la calidad del agua ha ido decreciendo, siendo así el foco de contaminación, debido a que muchos de estos efluentes contienen una gran cantidad de materia orgánica, nutrientes y sustancias tóxicas (Carrera, 2011).

La empresa DANEC S.A elimina sus efluentes tratados en el río San Pedro los fines de semana debido a que la planta deja de funcionar dichos días. El río San Pedro es uno de los afluentes más importantes del río Guayllabamba. Dicho río nace en las faldas del volcán Rumiñahui y lo bordea en su recorrido hacia la parroquia de Amaguaña, recibiendo afluentes de quebradas como Yanahuaycu, Millihuaycu y Canari provenientes del cerro Pasochoa. Consecuentemente, dicho río en su trayectoria recibe muchas descargas domésticas e industriales desembocando en el río Machángara.

Ecuador lamentablemente no cuenta con datos actualizados sobre la contaminación de los recursos hídricos (Aguaecuador, 2012).

1.2 Aguas residuales de la industria productora de aceites vegetales y detergentes y su impacto al medio ambiente

Actualmente, la generación de aceites vegetales ha ido aumentando en un 3,5 % en el mundo (Bombón y Albuja, 2014). A medida que se incrementa su consumo, se extiende la contaminación hacia las fuentes hídricas debido a los residuos líquidos de la producción de aceites puesto que generan efectos nocivos en la vida acuática como el agotamiento de oxígeno, la toxicidad, ahogamiento de aves, muerte de peces y la asfixia de los organismos bentónicos (Darine, Makram, y Albert, 2016). Grandes cantidades de aceite en las fuentes hídricas, pueden persistir en el ambiente por períodos prolongados de tiempo, puesto que se genera un proceso de biodegradación retardado, debido a la falta de oxígeno en los caudales contaminados, formando a su vez un lodo, que puede convertirse en alquitrán pelágico hundiéndose hacia los bentos, funcionando además dichos bioresiduos como cultivos para el crecimiento de muchos microorganismos (Maksimov y Polla, 2016). Como por ejemplo en el año 1962 existió un derrame de 2,5 millones de galones de aceite de soja en el río Minnesota y la parte alta del río Misisipi, produciendo una oxidación y polimerización del aceite formando espumas y persistencia en el medio acuático durante un periodo de 7 meses; causando aproximadamente la muerte de 4.000 aves y organismos bentónicos (Calanog, Street, Chen, y Toia, 1995).

Los detergentes también son un problema ambiental en las fuentes hídricas debido a sus propiedades fisicoquímicas, puesto que están formados por uno o varios tensoactivos en su mayoría por compuestos xenobióticos que son solubles en aguas, fosfatos que se utilizan para contrarrestar la dureza del agua y varios componentes como aditivos, coadyudantes y auxiliares de presentación (Guerrero, 2011) que al accionar con el agua causan la inhibición de: la biodegradación de las sustancias orgánicas, proceso de oxidación y la fotosíntesis originando la muerte de la flora y fauna acuática (H2oworld, 2016); la disolución del oxígeno y la degradación histológica en ciertas especies de peces provocando lesiones en las branquias, dificultando la respiración y la muerte (Abdel y Hammad, 2014).

Según Pattusamy, Nandini y Bheemappa (2003, p. 129), los detergentes deben ser prohibidos en canales que vayan hacia las fuentes hídricas, para evitar la eutrofización de la vida acuática, debido a que se acumulan grandes cantidades de material vegetal en descomposición en el fondo de los ríos, además del enriquecimiento de nutrientes disueltos, que causan la muerte de organismos que habitan en los ríos, debido a que el agua rica en nutrientes estimula el crecimiento de plantas acuáticas, lo que resulta agotamiento del oxígeno. Otro impacto de los detergentes es la turbidez, puesto que obstruye el sistema respiratorio de algunas especies de peces (Pattusamy, Nandini y Bheemappa, 2013).

1.3 Marco legal

A continuación se presenta la normativa considerada para el análisis de los resultados obtenidos en la Investigación.

En una de las leyes se encuentra el Marco Legal regulatorio del Acuerdo Ministerial 028, describiendo varios artículos que se deben tomar como referencia en cuanto al recurso agua (Ministerio del Ambiente, 2015), ubicado en la sección III Calidad de los componentes abióticos, Parágrafo I Del Agua.

“Art. 214 De la calidad del agua.- Son las características físicas, químicas y biológicas que establecen la composición del agua y la hacen apta para satisfacer la salud, el bienestar de la población y el equilibrio, ecológico. La evaluación y control de la calidad de agua, se la realizará con procedimientos analíticos, muestreos y monitoreos de descargas, vertidos y cuerpos receptores; dichos lineamientos se encuentran detallados en el Anexo I del presente Libro.”

“Art. 215 Prohibición.- De conformidad con la normativa legal vigente: b) Se prohíbe la descarga y vertido que sobrepase los límites permisibles o criterios de calidad correspondientes establecidos en este Libro, en las normas técnicas o anexos de aplicación; c) Se prohíbe la descarga y vertidos de aguas servidas o industriales, en quebradas secas o nacimientos de cuerpos hídricos u ojos de agua”

En función de lo descrito, se ha utilizado la Tabla 28. “Límites de Descarga a un Cuerpo de Agua Dulce”, del Acuerdo Ministerial 028 (2015), como la principal referencia legal donde indican los límites máximos permisibles que se deben cumplir antes de realizar la descarga del efluente tratado. Dicha tabla se encuentra en el Anexo 1.

1.4 Sistemas de tratamiento primario para aguas residuales de la industria productora de aceite vegetal y detergentes

1.4.1 Flotación por aire disuelto “DAF”

La flotación por aire disuelto (DAF) es un tratamiento primario muy efectivo para la separación de aceites y grasas, permitiendo generar una capa flotante en suspensión que logra la separación sólido-líquido, la misma que consiste en unir a las partículas que se encuentran en el agua residual, mediante pequeñas burbujas de aire, con la finalidad generar la flotación de ciertas partículas (Behin y Bahrami, 2012).

Dicho tratamiento puede ser utilizado como tratamiento primario para remover aceites y grasas que se encuentren en efluentes, además es utilizado para remover contaminantes como la DQO, Aceites y grasas, sólidos en suspensión y turbidez que pueden impactar negativamente a sistemas de tratamientos biológicos.

El principio de funcionamiento de la DAF consiste en la producción de una corriente de microburbujas que se adhieren a los sólidos de baja densidad o a partículas de una fase líquida que se encuentran en el medio y se elevan hacia la superficie, donde son removidos.

La DAF es especialmente adecuada para remover partículas con una densidad neutra y para aquellas que flotan o que sedimentan lentamente (Salas, 2003). Este método es aplicable para industrias que presenten niveles elevados de sólidos suspendidos bajo forma coloidal. Así mismo, la DAF ocupa un espacio considerablemente menor que los métodos de clarificación convencionales, requiriendo menos del 25% de la superficie equivalente.

1.4.1.1 Funcionamiento del proceso DAF

La flotación es un proceso en el cual se introducen microburbujas de aire en un contenedor con un diámetro aproximado entre 50 y 70 μm , en un estanque con agua residual o lodo, donde existe un contacto entre la burbuja de gas y de aceite en suspensión en el agua. Posterior a esto, se fija el aceite a la burbuja de gas y finalmente la combinación de aceite y aire suben hacia la superficie, formando una capa flotante de material concentrado. Con ello se consigue una efectiva remoción de sólidos suspendidos, aceites y grasas y materia orgánica particulada; removiendo hasta el 99% de los contaminantes dependiendo el efluente a tratar.

La Figura 1 presenta los mecanismos de adherencia de los contaminantes sobre las burbujas de aire.

Método de adherencia de las burbujas de aire

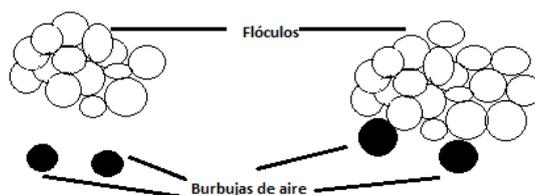
1. Adhesión de las burbujas

Precipitación de burbujas en partículas suspendidas, por colisión o el aumento de burbujas con partículas suspendidas.



2. Fijación de burbujas de aire en las estructuras de los flóculos

Las burbujas de aire aumentan, se adhieren a las estructuras de los flóculos, reducen la gravedad específica de la estructura y levantan el aglomerado a la superficie.



3. Fijación de burbujas de aire en las estructuras de los flóculos

Las burbujas de aire aumentan, se adhieren a las estructuras de los flóculos, reducen la gravedad específica de la estructura y levantan el aglomerado a la superficie.

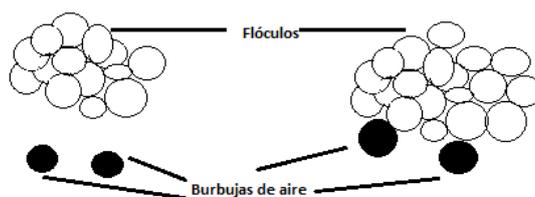


Figura 1. Método de adherencia de las burbujas de aire. Adaptada de Salas, 2003.

De acuerdo a experiencias previstas de Mijaylova y otros (2002, p. 8), la tecnología DAF puede remover un 99.5% de aceites y grasas, obteniéndose además una reducción de la DQO de un 90%.

1.4.2 Electroflotación

La electroflotación es un proceso electroquímico utilizado para la remoción de sólidos en suspensión, coloidales y contaminantes emulsionados como petróleo, aceites vegetales, aceites de lubricadoras, agentes tensoactivos, etc (Ill'in, 2008), presentes en aguas residuales. Dicho proceso tiene como principio la generación de burbujas de oxígeno que se generan a partir de la descomposición de las moléculas de agua mediante electrólisis, donde se forman pequeñas burbujas de oxígeno (en el ánodo) y de hidrógeno (en el cátodo), por lo que dichas burbujas se unen a las partículas sólidas provocando el ascenso de las mismas a la superficie (Arango y López, 2008).

En este proceso se utilizan dos electrodos, un cátodo que es negativo como zinc y hierro; mientras que, un ánodo que es positivo, como cobre, aluminio, magnesio. Además, una solución electrolítica como el ácido sulfúrico, las cuales incrementarán la conductividad eléctrica del medio y fuerza iónica en el medio, utilizando a su vez electricidad mediante una fuente de poder o un regulador de voltaje para poder producir una reacción química, formando así una reacción oxido-reducción, produciendo en el ánodo una reacción de oxidación y en el cátodo una reacción de reducción (Baeza y Garcia, 2011).

En dicho proceso se generan electrolíticamente burbujas de oxígeno en el ánodo, provocando la destrucción de sustancias orgánicas solubles, alterando la composición del agua y las propiedades fisicoquímicas de los compuestos extraídos (Sedashova, 2000), y de hidrógeno en el cátodo, donde las burbujas de gas tienen altas capacidades de adsorción y de adhesión provocando una distribución uniforme dentro del volumen y a su vez el ascenso de las mismas a la superficie (Robayo y Gaona, 2012). La eficiencia del proceso de flotación está fundamentalmente determinada por el tamaño de las burbujas generadas que generalmente oscilan entre 15 y 45 μm . Dichas burbujas generan una mayor superficie de contacto para la eliminación de las partículas contaminantes que se encuentran en el contenedor. En varios estudios realizados, Oliveira, Adilson y Gomez (2015, p.1) se ha eliminado hasta el 97%

de contaminantes provenientes de una perforación de petróleo, entre ellos aceites y grasas.

2. METODOLOGÍA

2.1 Lugar del muestreo

Las muestras utilizadas en este trabajo provienen de los efluentes de la empresa de DANEC S.A, ubicada en la Provincia de Pichincha, Cantón Rumiñahui, parroquia de Sangolquí. En la Figura 2, se presenta la ubicación geográfica del área de estudio.



Figura 2. Ubicación del área de estudio.

Adaptada de Google Maps, s.f.

(A) Ubicación del Cantón Rumiñahui, parroquia de Sangolquí.

(B) Ubicación de la empresa DANEC.

DANEC es una empresa creada en 1972, encargada de producir aceites, mantecas, margarinas y jabones a partir de la palma africana (DANEC, 2013).

En cuanto al tratamiento de aguas residuales, la empresa genera residuos líquidos al momento de lavar los tanques de los procesos de producción, utilizando aproximadamente 300 gal de agua por carga, en este proceso. Los efluentes son trasladados a la planta de tratamiento de la empresa, que cuenta con 2 pocetas principales. En la primera poceta existe un pretratamiento del agua residual con trampas de grasa, donde la grasa es retirada manualmente para incorporarla a la fabricación de detergentes y jabones; Posteriormente,

mediante el uso de una bomba, el agua es enviada hacia la poceta 2 para una revisión de parámetros previo ingreso a las torres de enfriamiento. Seguidamente, pasa por los tanques de homogenización, coagulación y floculación. Para finalizar, y después de cumplir con los parámetros permisibles según la Autoridad Ambiental Nacional es devuelta al río San Pedro.

En la Figura 3 se presenta el proceso de tratamiento de la industria DANEC.



Figura 3. Tratamiento de aguas residuales en DANEC.

- (A) Descarga de agua residual.
- (B) Trampas de grasas.
- (C) Agua residual.
- (D) Tanque de homogenización.
- (E) Tanque de coagulación.
- (F) Tanque de floculación.

2.2 Toma de muestras

La recolección y conservación de las muestras está basada en la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 2 169:98, aplicando el método manual simple con botellas de vidrio ámbar con un volumen de 1 litro, respectivamente etiquetadas; con la finalidad de reducir actividades fotosensitivas y evitar que las muestras se contaminen y cambien los valores iniciales de la muestra. Se utilizaron 4 canecas de agua residual. Las muestras recolectadas fueron transportadas a los Laboratorios de la carrera de Ingeniería Ambiental en la Universidad de Las Américas, para su respectivo análisis y tratamiento.

2.3 Caracterización fisicoquímica del agua residual antes y después de su tratamiento

2.3.1 Parámetros físicos

2.3.1.1 Medición de pH mediante potenciometría

La determinación del pH se realizó en función del método potenciométrico (Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 21th edition, 4500-H+ pH) que consiste en la utilización de sondas potenciométricas con un rango de medición de 2 – 16.

Para la medición del pH se utilizó el equipo pHmetro Hanna Instruments HI 2255. Se sumergieron los electrodos de pH y temperatura dentro de la muestra hasta una profundidad de 3 cm y se esperó hasta que los electrodos se estabilizarán e indicarán el valor del pH.

2.3.1.2 Medición de la Turbidez mediante nefelometría

La medición de la turbidez se realizó mediante el método nefelométrico, basado en (Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 21th edition, 2130-B); que consiste en la determinación de la turbidez mediante el cálculo de la luz dispersada y transmitida, utilizando un LED infrarrojo como fuente luminosa de 850 nm; empleándose para ello el Espectrofotómetro NANOCOLOR UV/VIS Macherey Nagel, con un rango de 0,1 a 1000 NTU (Nephelometric turbidity Unit).

Para la medición se procedió a llenar un tubo de ensayo con el agua hasta 15 ml, posterior a esto se le colocó en el espectrofotómetro para que indicara la lectura de dicho parámetro.

2.3.2 Parámetros químicos

2.3.2.1 Determinación de la demanda química de oxígeno (DQO) mediante fotometría

Para la determinación de la DQO, se utilizó el método de la determinación fotométrica utilizando un kit de Nanocolor, Macherey-Nagel, basado en la concentración de Cromo (III) tras la oxidación de dicromato de potasio, en presencia de ácido sulfúrico y sulfato de plata (Nanocolor, Macherey-Nagel).

En un tubo de reacción, se agregaron 2 ml de muestra de agua sin filtrar, luego se agitó verticalmente hasta obtener una completa homogenización. El tubo preparado fue trasladado a un digestor, durante 2 horas y a 148°C. Durante este lapso se generó la reducción de la materia orgánica presente en el medio. Después de esta reacción, el tubo de ensayo se enfrió a temperatura ambiente para su posterior lectura en el espectrofotómetro NANOCOLOR UV/VIS Macherey-Nagel Nanocolor D500, donde a una longitud de onda desde 190 a 1100 nm se determinó la demanda química de oxígeno en mg/l O₂. En la Figura 4 se presenta el diagrama de proceso de la medición de la DQO.

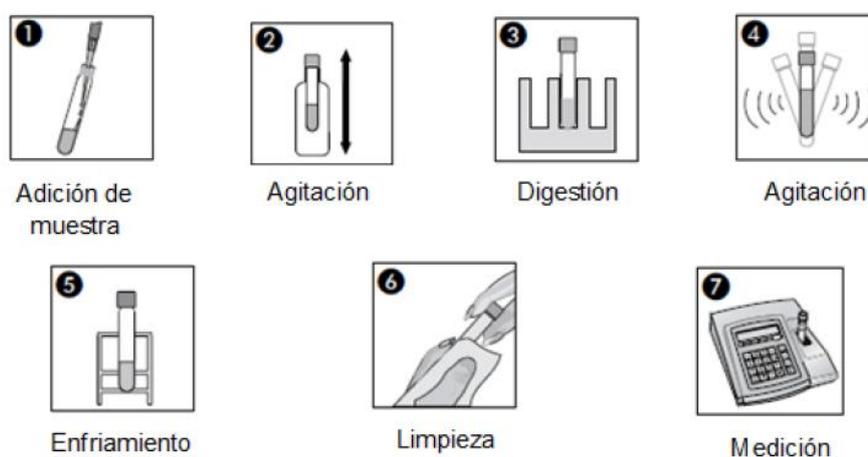


Figura 4. Diagrama de proceso de la medición de la demanda química de oxígeno mediante fotometría.
Adaptada de MACHEREY-NAGEL, 2011.

2.3.2.2 Determinación de Aceites y grasas mediante partición gravimétrica

Las concentraciones de aceites y grasas se determinaron en el laboratorio LASA, (acreditado bajo la Norma ISO 17025:2005 en el año 2006), utilizando el Método de Partición Gravimétrica, basado en "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 21th edition, 5520-B".

Se acidificó la muestra de agua residual con ácido sulfúrico (H_2SO_4) 1:1 o ácido clorhídrico (HCl) 1:1 hasta obtener un pH de 2 o más bajo y luego se transfirió la muestra a un embudo de separación. Se enjuagó cuidadosamente el frasco de muestra con 30 ml de disolvente de extracción (ya sea 100% de n-hexano o éter sulfúrico) y se agregaron los lavados con disolventes al embudo de separación agitando vigorosamente durante 2 min. A continuación, se drenó la fase acuosa en el recipiente para realizar posteriormente otras extracciones, cuyo número dependió de la naturaleza de la muestra. La fase no acuosa se drenó en un recipiente limpio, previamente tarado. Cuando no se pudo obtener una fase no acuosa límpida, libre de emulsiones, se drenaron la emulsión y el solvente hacia un tubo de centrífuga y se centrifugó por 5 min a 2400 rpm. El material centrifugado se transfirió a una ampolla de decantación y se drenó la capa de solvente al recipiente tarado. Finalmente, se mezclaron las fases acuosas y cualquier emulsión remanente en un embudo de separación; se extrajo dos veces más (se repitió la centrifugación cuando la emulsión persistió). La emulsión también puede romperse con el agregado de Na_2SO_4 anhidro. Se evaporó el solvente orgánico y se lo pesó. Cabe recalcar que se debe realizar un blanco de solvente.

Para obtener los resultados de la cantidad de grasas y aceites en la muestra, se realizó la diferencia entre el peso total del recipiente tarado, A, y el residuo calculado de un blanco de solvente, B (Ecuación 1):

$$\frac{\text{mgsusancia solubles solvente}}{L} = \frac{(A - B) \times 100}{\text{mL de muestra}} \quad (\text{Ecuación 1})$$

2.4 Proceso de tratamiento de aguas residuales

A continuación se describen los procesos que se realizaron en los tratamientos 1 y 2, donde se aplicaron varias metodologías de tratamiento primario como flotación por aire disuelto y electroflotación, precedido de una trampa de grasas y coagulación-floculación.

Una vez obtenida el agua residual se mantuvo la temperatura inicial de las muestras en 40°C. Después de la terminación del proceso de la DAF y de la electroflotación se realizaron mediciones de temperatura (Figura 5).

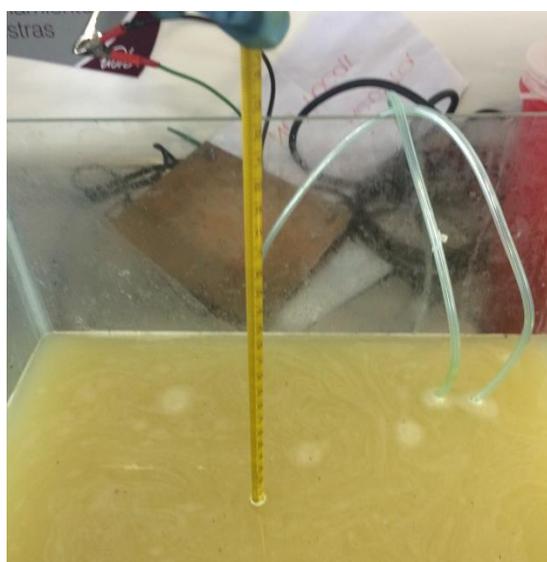


Figura 5. Medición de la temperatura.

Para la aplicación de los tratamientos del efluente se tuvo que realizar un ajuste de pH a 5, mediante la utilización de ácido sulfúrico (H_2SO_4) al 20%.

Se prepararon 100 ml de H_2SO_4 con una concentración de 20%, para lo cual se midieron 20,4 ml de H_2SO_4 concentrado (Ecuación 2), luego se aforó en un balón volumétrico con agua ultra pura hasta 100 ml.

Para el H_2SO_4 al 20% se utilizó la siguiente ecuación:

$$V_1 C_1 = V_2 C_2$$

(Ecuación 2)

$$V_1 \times 0,98 \% = 100 \text{ ml} \times C_2$$

$$V_1 = \frac{100 \text{ ml} \times 20 \%}{98 \%}$$

$$V_1 = 20,4 \text{ ml H}_2\text{SO}_4$$

Donde:

V_1 = Volumen de H_2SO_4 requerido

C_1 = Concentración de H_2SO_4 inicial

V_2 = Volumen del matraz aforado

C_2 = Concentración de H_2SO_4 requerido

Una vez culminado el tratamiento de coagulación-floculación se procedió a ajustar el pH a 6. Para el ajuste del pH se utilizó hidróxido de sodio (NaOH).

Se pesó 1g de NaOH en una balanza analítica, para la dilución se utilizó 50ml de agua destilada en un balón volumétrico (Ecuación 3). Una vez que se obtuvo una completa dilución, se aforó hasta 100ml con agua destilada.

$$X = \frac{1000 \text{ ml} \times 0,1 \text{ g}}{100 \text{ ml}} \quad (\text{Ecuación 3})$$

$$X = 1 \text{ g}$$

2.4.1 Tratamiento utilizando el método flotación por aire disuelto “DAF”, para la remoción de aceites y grasas.

Para el tratamiento 1 se utilizó el proceso de flotación por aire disuelto como separación de aceites y grasas; precedido del proceso de decantación y coagulación-floculación como se detallará posteriormente.

2.4.1.1 Flotación por aire disuelto

Para la DAF se procedió a generar microburbujas de aire, desde el fondo del tanque, utilizando para ello un compresor, logrando que las burbujas de aire se adhieran a las partículas emulsificadas, y de forma ascensional se transporten

hacia la superficie (Figura 6). Posteriormente, se trasladó al sistema de decantación (Ecopreneur, 2016).



Figura 6. Flotación por aire disuelto.

2.4.1.2 Decantación

Es un sistema que permite la separación de grasas y aceites del agua residual (Figura 7), evitando que estos materiales ingresen a procesos posteriores de tratamiento (reactores biológicos, sedimentadores, etc). Con este dispositivo las grasas y aceites quedan retenidas en el interior del tanque, dejando pasar el efluente tratado hacia los otros procesos (Unatsabar, 2003)

Para este método, el agua proveniente de la flotación por aire disuelto fue colocada en un tanque, consiguiendo una separación de grasas y aceites por diferencia de densidades, en un tiempo de retención hidráulica de 15 min, logrando obtener agua que se pueda usar en posteriores tratamientos.



Figura 7. Decantador.

2.4.1.3 Coagulación - Floculación por medio del método test de jarras

Los procesos de coagulación y floculación son tratamientos esenciales para muchos sistemas de purificación y tratamientos de aguas residuales, que consisten en la aglutinación de sustancias coloidales y suspendidas bajo forma de flóculos, permitiendo removerlos luego por sedimentación y filtración (Andía, 2000).

En la experimentación, se agregaron 800 ml de agua residual previamente separada de grasas y aceites a partir de la DAF en vasos de precipitación, donde se procedió a la utilización del test de jarras (Figura 8) en dos fases. La primera se realizó a una velocidad de 200 rpm por 5 minutos (tiempo de mezcla); donde se añadieron 40 ml de policloruro de aluminio (PCA) al 0,075 %. Posteriormente, las muestras fueron agitadas por 5 minutos, tiempo en el cual se añadieron 23,5 ml de coadyuvante polielectrolito aniónico al 0,1 % (Romero Rojas, 2002). Una vez homogenizadas las muestras se procedió a disminuir la velocidad de agitación a 40 rpm (fase lenta), dejándolo nuevamente por un lapso de 10 minutos hasta la formación de los flocs. Finalmente la agitación fue interrumpida para dar inicio al proceso de sedimentación por un período de 10 a 30 min. En la Figura 9 se muestra el proceso de coagulación-floculación.



Figura 8. Equipo para el método test de jarras.

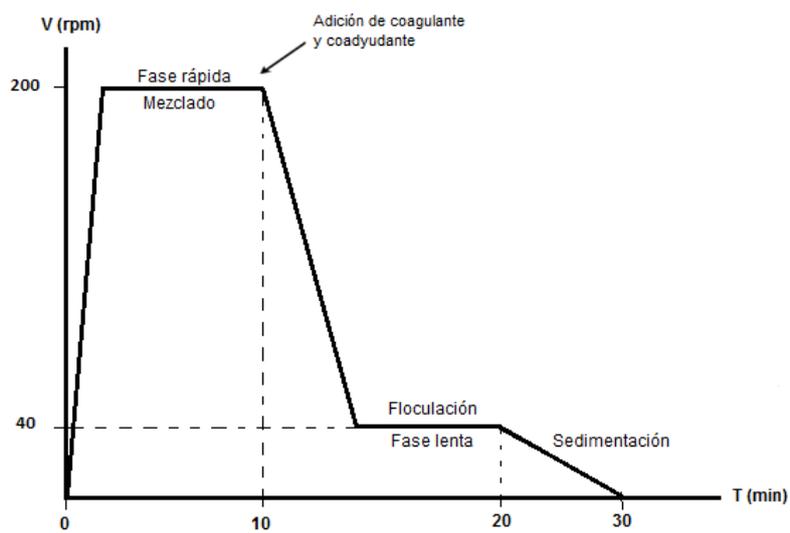


Figura 9. Gráfico de proceso de coagulación-floculación.

Para el (PCA) a una concentración de 0,075%, se utilizó polímero comercial VX-50 a una concentración del 15%, donde se diluyeron 0,5 ml (Ecuación 4), luego se diluyó en un balón volumétrico con 30ml de agua destilada y finalmente se aforo hasta 100ml.

$$V_1 C_1 = V_2 C_2 \quad (\text{Ecuación 4})$$

$$V_1 = \frac{100 \text{ ml} \times 0,075\%}{15\%}$$

$$V_1 = 0,5 \text{ ml}$$

Donde:

V_1 = Volumen de PCA requerido

C_1 = Concentración de PCA inicial

V_2 = Volumen del matraz aforado

C_2 = Concentración de PCA requerido

Para la poliacrilamida aniónica al 0,1%, se utilizó el coadyuvante Super Flocc A 130 provista por la empresa Kelner Internacional. Se pesó 1 g de poliacrilamida en una balanza analítica (Ecuación 5), para la dilución se utilizó una estufa eléctrica a 50°C para su total dilución de las partículas de poliacrilamida, donde se colocó 500 ml de agua destilada en un matraz de Erlenmeyer de 1000 ml y se colocó un agitador magnético al fondo del matraz a 200 ppm para una mejor homogenización de la muestra. Una vez que se obtuvo una completa dilución, se aforó hasta 1000 ml con agua destilada.

$$X = \frac{1000 \text{ ml} \times 0,1 \text{ g}}{100 \text{ ml}} \quad (\text{Ecuación 5})$$

$$X = 1 \text{ g}$$

En esta etapa se realizaron estudios exploratorios para realizar el proceso de coagulación – floculación, con la finalidad de encontrar las condiciones óptimas para tratar dicho efluente.

- i. Se realizaron pruebas con pH 8,7 (típicas de aguas residuales), utilizando dos clases de coagulantes como policloruro de aluminio (PCA) y cloruro férrico (FeCl_3), a concentraciones de 0,075%, 5% y 10% para cada uno de ellos. Además, se utilizaron 2 clases de coadyuvantes, como poliacrilamida aniónica y catiónica, ambas al 0,1% (Figura 10).

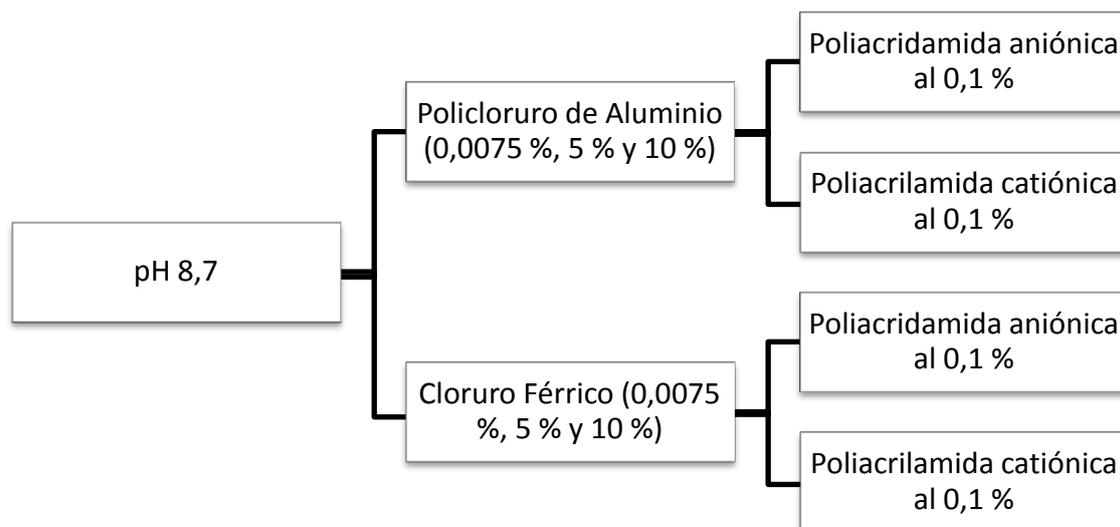


Figura 10. Matriz de estudios exploratorios para la aplicación del método coagulación-floculación con pH 8,7.

- ii. Se experimentó el proceso de coagulación- floculación bajando el pH a 5 con ácido sulfúrico al 20% y utilizando los mismos coagulantes y coadyuvantes descritos anteriormente (Figura 11).

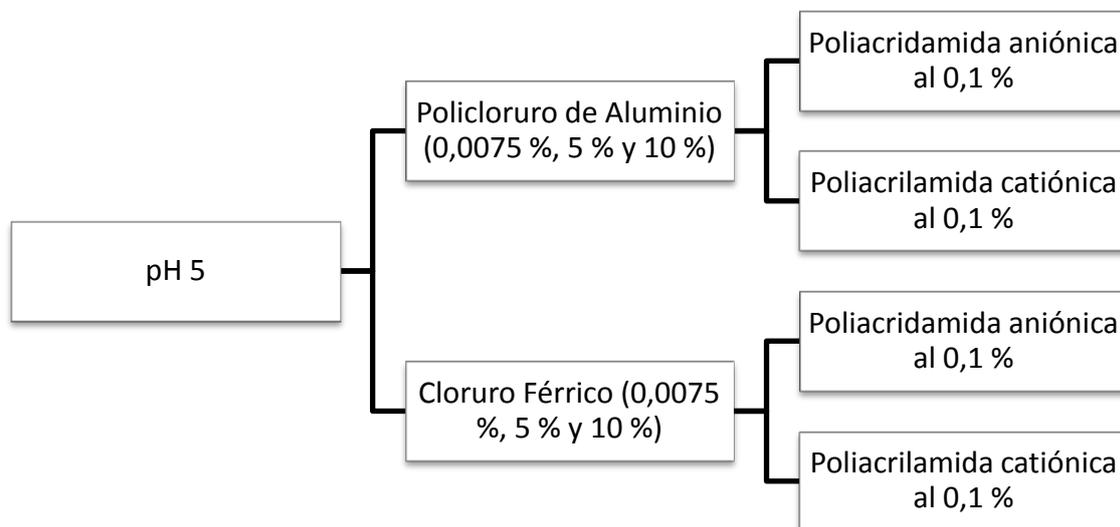


Figura 11. Matriz de estudios exploratorios para la aplicación del método coagulación-floculación.

Con los estudios exploratorios se observó que con el PCA al 0,075 % y el coadyuvante aniónico al 0,1 %, se obtuvo mejor eficiencia para tratar el agua residual.

La adaptación del método DAF como tratamiento primario a los procesos ya existentes, permitió la flotación de las grasas y aceites presentes en el efluente como se detalla en el siguiente diagrama (Figura 12), pasando primero por el proceso de flotación por aire disuelto, luego a un decantador y finalmente al proceso de coagulación–floculación.

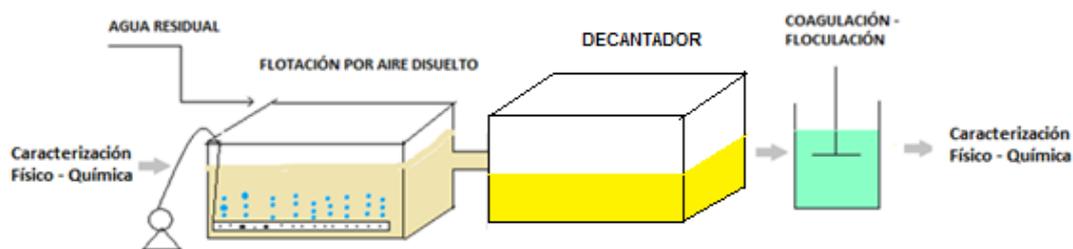


Figura 12. Tratamiento 1. Utilización del método de flotación por aire disuelto, decantación y coagulación-floculación.

2.4.2 Tratamiento utilizando el método Electroflotación, para la remoción de aceites y grasas.

Para el tratamiento 2 se utilizó el proceso de electro-flotación como separación de aceites y grasas; precedido del proceso de decantación y finalmente a coagulación-floculación como se detalla en la Figura 14.

Para dicho proceso se bajó el pH de agua residual a 5, con la adición de H_2SO_4 al 20% (Ecuación 1).

2.4.2.1 Electroflotación

Se utilizaron placas metálicas paralelas de cobre electrolítico de 4 mm de diámetro como ánodo y zinc de 2 mm de diámetro como cátodo, conectados a una fuente de poder con 30 amperios (Figura 13), utilizando como electrolito base ácido sulfúrico (H_2SO_4) a una concentración de 20 %, puesto que incrementa la conductividad eléctrica y aumenta la fuerza iónica en el medio (He et al., 2016). Por cada litro de agua residual se colocó 1 ml de H_2SO_4 . Además se emplearon tiempos de 5 min, 15 min y 30 min para cada tratamiento.

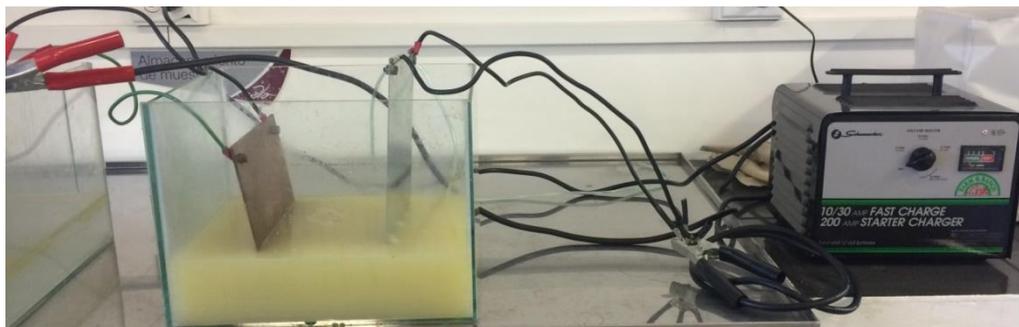


Figura 13. Electroflotación.

Posterior a la aplicación del método de electroflotación, el efluente pasó decantación, y finalmente a coagulación–floculación. A continuación se presenta el diagrama de procesos con la utilización de electro-flotación como tratamiento previo (Figura 14).

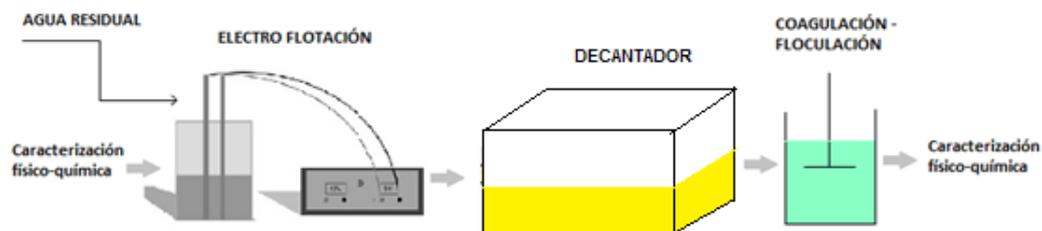


Figura 14. Tratamiento 2. Utilización del método de electroflotación, decantación y coagulación-floculación.

2.5 Diseño Experimental

El diseño experimental es una técnica estadística que permite identificar y cuantificar las causas de un efecto dentro de un estudio experimental, que a su vez requiere de varias repeticiones con la finalidad de obtener un grado de confianza de los resultados obtenidos.

El método estadístico que se utilizó en dichos procesos fue basado en un diseño muestral por conveniencia con variable tiempo (t1, t2 y t3) y análisis de la varianza (ANOVA) con 3 réplicas para cada tratamiento (R1, R2 y R3). Este diseño se emplea para comparar 2 o más tratamientos, debido a que solo se consideran dos fuentes de variabilidad: el error aleatorio y los tratamientos (Gutiérrez y De la Vara, 2013).

A continuación se presenta la matriz experimental que se llevó a cabo en dichos procesos.

Tabla 1.
Matriz experimental.

| Tratamientos | Parámetros | | |
|--------------------------------|------------|----|----|
| | R1 | R2 | R3 |
| Flotación por aire disuelto t1 | | | |
| Flotación por aire disuelto t2 | | | |
| Flotación por aire disuelto t3 | | | |
| Electroflotación t1 | | | |
| Electroflotación t2 | | | |
| Electroflotación t3 | | | |

Nota. t1= 5min, t2=15min y t3=30min.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Caracterización del agua

3.1.1 Agua residual

En el presente capítulo se presentan y se analizan los resultados obtenidos de la caracterización del agua residual y del efluente tratado. La caracterización fisicoquímica se realizó en función de los siguientes parámetros: Turbidez (NTU), pH, DBO₅ (mg/l), DQO (mg/l), y concentración de aceites y grasas (mg/l).

En la Tabla 2 se presentan los parámetros evaluados en la caracterización del agua residual.

Tabla 2.
Caracterización del agua residual.

| Parámetros | Concentración |
|------------------|---------------|
| Aceites y grasas | 10447,80 mg/L |
| DBO ₅ | 1600 mg/L |
| DQO | 28900 mg/L |
| Turbidez | 1091,5 NTU |
| pH | 8,7 |

La relación DBO/DQO permitió conocer la posibilidad de efectuar un tratamiento biológico o fisicoquímico de los efluentes. Si la relación de la DBO/DQO es menor a 0,2 los efluentes se consideran de naturaleza inorgánica, lo que quiere decir que son poco biodegradables; en cambio, si la relación de la DBO/DQO es mayor a 0,4 se considera un efluente biodegradable. Adicionalmente, si se obtiene en la relación de la DBO/DQO un valor mayor a 0,65 el efluente se considera orgánico y muy biodegradable y se puede aplicar un tratamiento biológico (Bureau, 2008).

Con los datos obtenidos en la caracterización inicial del agua residual, se realizó la relación DBO/DQO, dando como resultado 0,05; lo cual implica que el

agua es poco biodegradable. Por esta razón, se efectuaron tratamientos como la flotación por aire disuelto y la electroflotación.

En la Figura 15 se muestra el agua residual de la empresa DANEC, utilizada en el presente trabajo.



Figura 15. Agua residual de la empresa DANEC S.A.

En la Tabla 3 y 4 se muestran los resultados obtenidos de los tratamientos primarios, empleando la flotación por aire disuelto y la electroflotación, donde se obtuvo una reducción de los parámetros turbidez, DQO y la concentración de aceites y grasas. La caracterización del agua tratada se la realizó después del proceso de coagulación-floculación.

En cuanto al parámetro DBO_5 , no se pudo realizar una caracterización después del efluente puesto que el equipo a utilizar no se encontraba en buenas

condiciones para dar una lectura final real, por lo que se realizó el análisis de los parámetros que se muestran a continuación.

Tabla 3.

Resultados finales del tratamiento con flotación por aire disuelto.

| TURBIDEZ (NTU) | | |
|--------------------------------|----------------------|----------------------|
| Tratamiento 1 | Tratamiento 2 | Tratamiento 3 |
| 3,2 | 148,9 | 994,8 |
| 7 | 138,5 | 842,8 |
| 5,6 | 185 | 817,7 |
| DQO (mg/l) | | |
| Tratamiento 1 | Tratamiento 2 | Tratamiento 3 |
| 37 | 1800 | 900 |
| 45 | 1600 | 800 |
| 35 | 1200 | 900 |
| Aceites y grasas (mg/l) | | |
| Tratamiento 1 | Tratamiento 2 | Tratamiento 3 |
| 18 | 594 | 88,5 |
| 8,8 | 595 | 74,5 |
| 15,2 | 539,3 | 59 |

Nota. Tratamiento 1 empleando 5 min, tratamiento 2 empleando 15 min y tratamiento 3 empleando 30 min.

Tabla 4.

Resultados finales del tratamiento con la electroflotación.

| TURBIDEZ (NTU) | | |
|--------------------------------|----------------------|----------------------|
| Tratamiento 1 | Tratamiento 2 | Tratamiento 3 |
| 446,7 | 13,2 | 28 |
| 459,9 | 14,2 | 16,5 |
| 457,5 | 15,4 | 24 |
| DQO (mg/l) | | |
| Tratamiento 1 | Tratamiento 2 | Tratamiento 3 |
| 1600 | 170 | 460 |
| 1700 | 146 | 430 |
| 1400 | 164 | 490 |
| Aceites y grasas (mg/l) | | |
| Tratamiento 1 | Tratamiento 2 | Tratamiento 3 |
| 301 | 14,45 | 13,96 |
| 252,6 | 15 | 20,31 |
| 257,03 | 24,26 | 12 |

Nota. Tratamiento 1 empleando 5 min, tratamiento 2 empleando 15 min y tratamiento 3 empleando 30 min.

3.2 Análisis estadístico

Para afianzar los resultados obtenidos se utilizó varios métodos: ANOVA, Tukey y diagramas de cajas, con la utilización del software IBM SPSS Statistics. Mediante dicho análisis se pudo realizar la comparación de la varianza de los resultados obtenidos en los tratamientos aplicados, logrando contrastar la hipótesis nula con la hipótesis alternativa. La primera señala que las medias de las K poblaciones son iguales, mientras que la última indica que al menos una de esas K poblaciones es diferente en cuanto al valor que se espera.

Las hipótesis para comparar varios tratamientos se muestran a continuación:

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \mu_k$$

$$H_A : \mu_i \neq \mu_j \text{ para algún } i \neq j$$

Dónde:

μ_i = es el efecto del tratamiento i sobre la variable respuesta

H_0 = hipótesis nula

H_A = hipótesis alternativa

Para el análisis de varianza ANOVA, el valor F es el cociente entre dos estimadores diferentes de la varianza poblacional. Uno de estos estimados se obtiene a partir de la variación existente entre las medias de los grupos (variación entre grupos). El otro estimador se obtienen a partir de la variación existente entre las puntuaciones dentro de cada grupo (variación dentro de grupos). Los resultados de esta prueba recogen una cuantificación de ambas fuentes de variación (sumas de cuadrados), los grados de libertad asociados a cada suma de cuadrados y el valor concreto adoptado por cada estimador de la varianza poblacional (medias cuadráticas: se obtienen dividiendo las sumas de cuadrados entre sus correspondientes grados de libertad). El cociente entre estas dos medias cuadráticas nos proporciona el valor del estadístico F, el cual aparece acompañado con el nivel de significación (Sig), es decir, la

probabilidad de obtener valores como el obtenido o mayores bajo la hipótesis de igualdad de medias (SPS, 2010).

El método Tukey es un método más conservador que sirve para comparar las diferencias muestrales con el valor crítico dado por:

$$T_{\alpha} q_{\alpha}(k, N - K) = \sqrt{\frac{CM_E}{n}} \quad (\text{Ecuación 6})$$

Dónde:

T_{α} = Cuadrado medio del error.

q_{α} = punto porcentual de la distribución del rango de la t student con grados de libertad del error del análisis de varianza.

n = número de observaciones por tratamiento.

$N-k$ = grados de libertad para el error.

α = nivel de significancia prefijado.

CM_E = cuadrado medio del error.

Los diagramas de caja son una representación visual que describe varias características importantes, entre ellas la dispersión, simetría y la comparación de los tratamientos. Los mismos, representan los tres cuartiles y los valores mínimo y máximo de los datos obtenidos en los tratamientos aplicados. En dicha gráfica, se obtiene una caja rectangular, donde los lados más largos muestran el recorrido intercuartil. A su vez, dicho rectángulo se encuentra dividido por un segmento vertical que indica donde se posiciona la media y por lo tanto su relación con los cuartiles primero y tercero. La caja se ubica a escala sobre un segmento que tiene como extremos los valores mínimo y máximo de la variable. Además, las líneas que sobresalen de la caja son llamadas bigotes, ya que tienen un límite de prolongación, de modo que

cualquier dato o caso que no se encuentre dentro de este rango es marcado e identificado individualmente (Bakieva, 2010).

3.2.1 Parámetro turbidez

La turbidez es un parámetro en la calidad del agua, puesto que dicho parámetro puede indicar el nivel de contaminación, debido a que hace referencia a la presencia de partículas en suspensión.

Para el parámetro turbidez se realizó un análisis de varianza ANOVA y diagramas de caja para cada tratamiento aplicado en la experimentación, por lo cual se determinó si la hipótesis debe ser rechazada o aceptada. Además, se aplicó la prueba de Tukey con la finalidad de identificar diferencias significativas entre los tratamientos.

$$H_0 = \mu_1 = \mu_2 = \mu_3$$

$$H_A : \mu_i \neq 0 \text{ para algún } i=1,2,3$$

Para determinar la significancia de los tratamientos, se consideró un nivel de significación de (0,05), para apreciar la diferencia entre los tratamientos. Si el valor obtenido es mayor a 0,05 se acepta la hipótesis nula y se rechaza la hipótesis alternativa, en cambio, si el valor obtenido es menor o igual a 0,05 se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa. Cuando se acepta la hipótesis nula no existen diferencias significativas en los tratamientos, mientras que si se acepta la hipótesis alternativa existen diferencias significativas en los tratamientos (Gutiérrez y De la Vara, 2013).

En la Tabla 5 se presentan los resultados obtenidos de la turbidez empleando la flotación por aire disuelto.

Tabla 5.
Resultados obtenidos de la turbidez empleando la flotación por aire disuelto.

| Turbidez inicial (NTU) | Tratamiento 1 (NTU) | Tratamiento 2 (NTU) | Tratamiento 3 (NTU) |
|---------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| 1091,5 | 3,2 | 148,9 | 994,8 |
| | 7 | 138,5 | 842,8 |
| | 5,6 | 185 | 817,7 |

Nota. Tratamiento 1 empleando 5 min, tratamiento 2 empleando 15 min y tratamiento 3 empleando 30 min

El análisis de varianza ANOVA para el parámetro turbidez en la Tabla 6 se obtuvo un valor de significancia de 0 (menor a 0,05). Por esta razón se aceptó la hipótesis nula, puesto que existen diferencias entre algunos de los tratamientos.

Tabla 6.
ANOVA para el parámetro turbidez. Tratamiento con la flotación por aire disuelto.

| Fuente de variación | Suma de cuadrados | Grados de libertad | Media cuadrática | F | Sig |
|---------------------|-------------------|--------------------|------------------|--------|-----|
| Entre grupos | 1221779,580 | 2 | 610889,790 | 854,11 | 0 |
| Dentro de grupos | 4291,400 | 6 | 715,233 | 3 | |
| Total | 1226070,980 | 8 | | | |

En los resultados de la prueba Tukey mostrados en la Tabla 7 y en el diagrama de caja de la Figura 16 se observa que existen diferencias entre los tratamientos 1, 2 y 3, ya que el nivel de significancia dio como resultado 0 (menor a 0,05).

Tabla 7.

Resultados de la prueba de Tukey para el parámetro turbidez. Tratamiento con la flotación por aire disuelto.

| (I) TRATAMIENTO | (J) TRATAMIENTO | Diferencias de medias (I-J) | Error estándar | Sig. |
|--------------------|--------------------|-----------------------------------|-------------------|------|
| 1 | 2 | -846,500* | 21,836 | 0 |
| | 3 | -152,200* | 21,836 | ,001 |
| 2 | 1 | 846,500* | 21,836 | 0 |
| | 3 | 694,300* | 21,836 | 0 |
| 3 | 1 | 152,200* | 21,836 | ,001 |
| | 2 | -694,300* | 21,836 | 0 |

Nota. Los * en los valores de las diferencias de medias, significan que existe una diferencia significativa entre la comparación de los tratamientos. El error estándar estima la variabilidad entre los tratamientos.

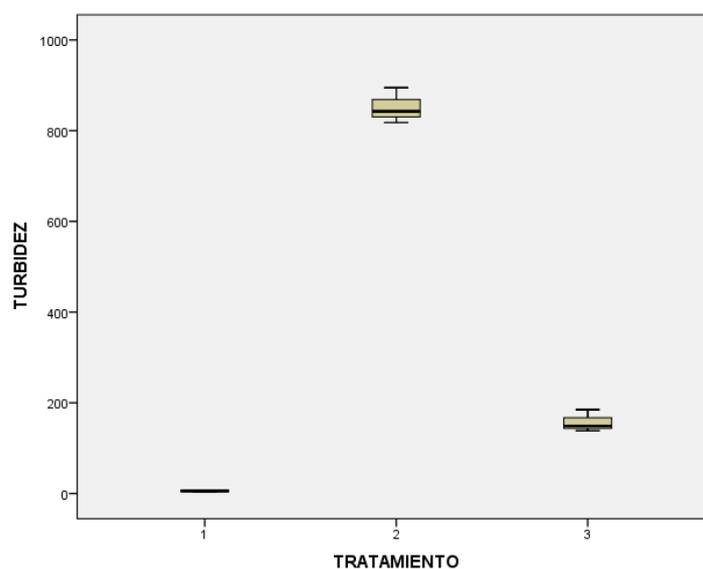


Figura 16. Diagrama de caja. Flotación por aire disuelto. Parámetro turbidez.

En la Tabla 8 se presentan los resultados obtenidos del tratamiento primario de la electroflotación.

Tabla 8.
Resultados de la turbidez empleando la electroflotación.

| Turbidez inicial (NTU) | Tratamiento 1 (NTU) | Tratamiento 2 (NTU) | Tratamiento 3 (NTU) |
|-----------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 1091,5 | 446,7 | 13,2 | 28 |
| | 459,9 | 14,2 | 16,5 |
| | 457,5 | 15,4 | 24 |

Nota. Tratamiento 1 empleando 5 min, tratamiento 2 empleando 15 min y tratamiento 3 empleando 30 min.

Los resultados del análisis de la varianza ANOVA de la Tabla 9, muestran que existen diferencias entre los tres tratamientos debido a que su valor de significancia resultó menor a 0,05. Por esta razón se debe rechazar la hipótesis nula, aceptando que existe diferencia entre alguno de los tratamientos en cuanto al parámetro turbidez.

Tabla 9.
Resultado de la prueba ANOVA para el parámetro turbidez con la electroflotación.

| Fuente de variación | Suma de cuadrados | Grados de libertad | Media cuadrática | F | Sig |
|--------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|----------|------------|
| Entre grupos | 380563,727 | 2 | 190281,863 | 6736,701 | 0 |
| Dentro de grupos | 169,473 | 6 | 28,246 | | |
| Total | 380733,200 | 8 | | | |

En la prueba Tukey de la Tabla 10 y en el diagrama de la Figura 17, se puede observar que entre los tratamientos 1 y 2, el valor de significancia dió como resultado 0 (menor a 0,05), además los tratamientos 1 y 3 dieron como resultado el mismo valor, lo que significa que existen diferencias significativas entre los tratamientos ya mencionados. Sin embargo, se puede observar que entre los tratamientos 2 y 3 no existen diferencias significativas, debido a que el

valor de significancia dio como resultado 0,199 (mayor a 0,05) en cuanto al parámetro turbidez aplicando la electroflotación.

Tabla 10.

Resultados de la prueba Tukey para el parámetro turbidez, tratamiento con la electroflotación.

| (I) TRATAMIENTO | (J) TRATAMIENTO | Diferencias de medias (I-J) | Error estándar | Sig. |
|--------------------|--------------------|--------------------------------|----------------|------|
| 1 | 2 | 440,433* | 4,339 | 0 |
| | 3 | 431,867* | 4,339 | 0 |
| 2 | 1 | -440,433* | 4,339 | 0 |
| | 3 | -8,567 | 4,339 | ,199 |
| 3 | 1 | -431,867* | 4,339 | 0 |
| | 2 | 8,567 | 4,339 | ,199 |

Nota. Los * en los valores de las diferencias de medias, significan que existe una diferencia significativa entre la comparación de los tratamientos. El error estándar estima la variabilidad entre los tratamientos.

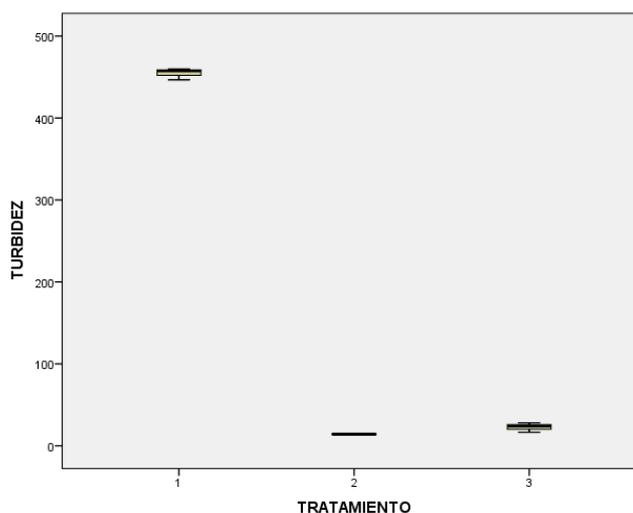


Figura 17. Diagrama de caja. Electroflotación. Parámetro turbidez.

Con los resultados obtenidos, para el parámetro turbidez se calculó el porcentaje de remoción (Ecuación 7). Los resultados obtenidos de los tratamientos se presentan en las Figuras 18 y 21.

$$\% \text{Remoción} = \frac{C_{\text{afuente}} - C_{\text{efluente}}}{C_{\text{afuente}}} \times 100 \quad (\text{Ecuación 7})$$

Dónde:

C_{afluente} = concentración del afluente

C_{efluente} = concentración del efluente

En la Figura 18, se puede observar que los tratamientos efectuados presentan comportamientos diferentes en cuanto a la remoción de la turbidez. En el tratamiento 1 empleando un tiempo de 5 min con el tratamiento primario de flotación por aire disuelto se puede observar que existió una remoción de 99,7 %, 99,4 % y 99,5 % en sus tres réplicas, alcanzando resultados de 3,2 NTU, 7 NTU y 5,6 NTU, respectivamente y la temperatura se mantuvo en los 40°C. En el tratamiento con 15 min se puede apreciar que no se obtuvo un porcentaje alto de remoción de turbidez puesto que fue aproximadamente del 25%, y los resultados alcanzados fueron de 994,9 NTU, 842,8 NTU y 817,7 NTU, su temperatura se redujo a 35°C. Sin embargo, se puede observar que el tratamiento 3 se obtuvo una remoción de la turbidez aproximada del 85% y la temperatura disminuyó a 30°C, obteniendo valores de 148,9 NTU, 138,5 NTU y 185 NTU.

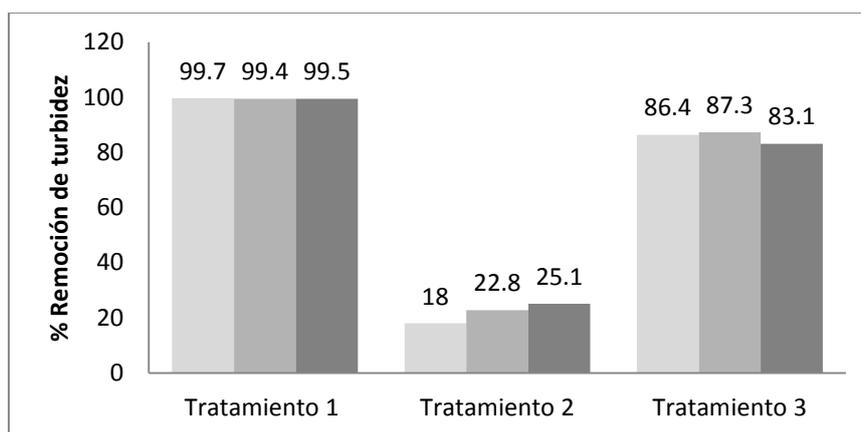


Figura 18. Porcentaje de remoción de la turbidez, utilizando la flotación por aire disuelto. Tratamiento 1 con tiempo 5 min, tratamiento 2 con tiempo 15 min y tratamiento 3 con tiempo 30 min.

En la Figura 19 se muestra la turbidez del tratamiento de flotación por aire disuelto, aplicando las 3 réplicas a diferentes tiempos. El tratamiento 1, fue uno de los mejores resultados debido a que su remoción fue del 99%.

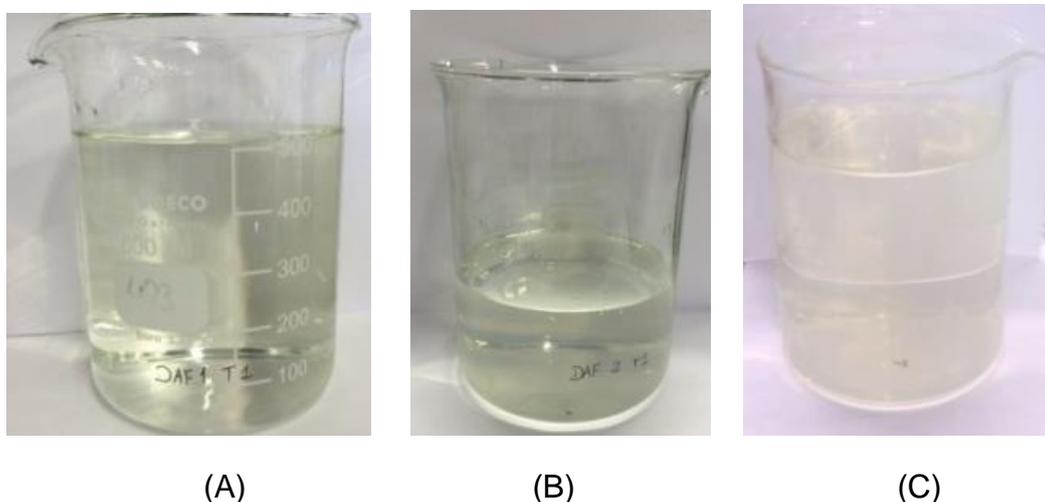


Figura 19. Turbidez obtenida en la flotación por aire disuelto.

(A) DAF tiempo 1 réplica.

(B) DAF tiempo 1 réplica 2.

(C) DAF tiempo 1 réplica 3.

En la Figura 20 se pueden observar los lodos obtenidos empleando el tratamiento primario con la DAF y después de la aplicación del proceso de coagulación-floculación. Los lodos en el tratamiento 1 resultaron lodos compactos que fueron hacia la superficie, por lo que dichos lodos se los podía retirar manualmente, en cambio los lodos obtenidos en el tratamiento 2 empleando un tiempo de 15 min, fueron sueltos, compactos y de mala calidad. Finalmente, la calidad de los lodos obtenidos en el tratamiento 3 empleando un tiempo de 30 min, resultaron lodos compactos, sueltos y de mala calidad.

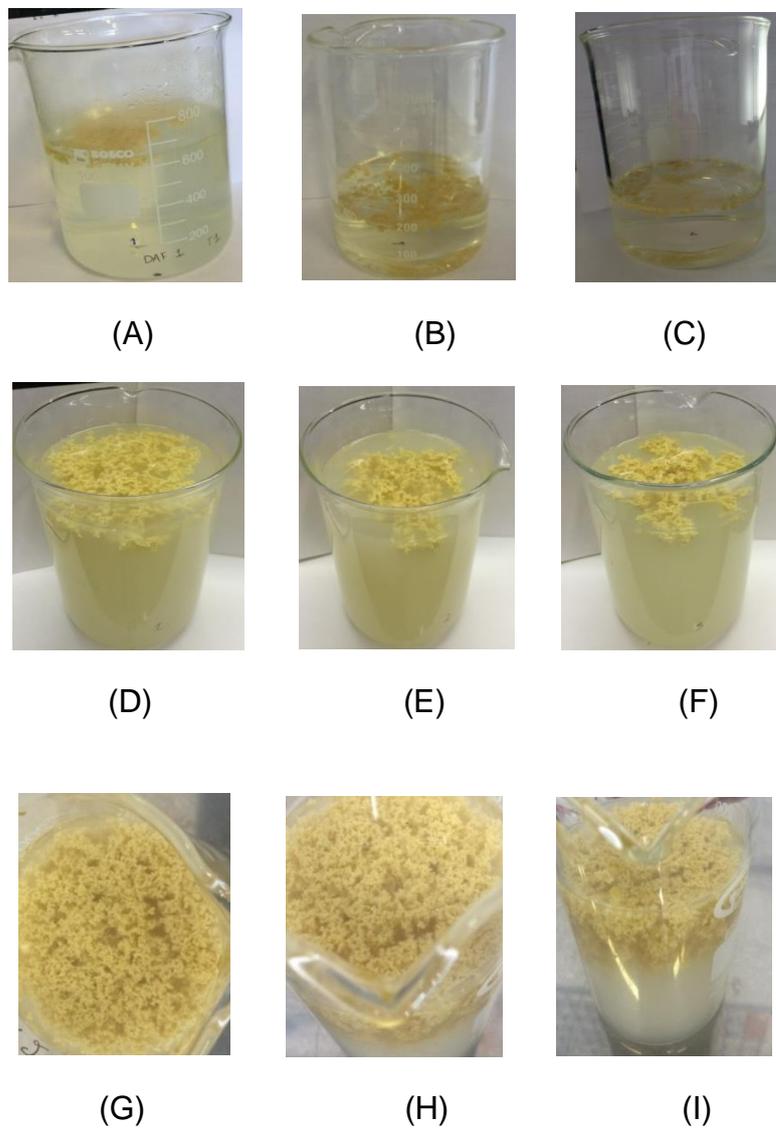


Figura 20. Obtención de lodos en el tratamiento de la flotación por aire disuelto.

- (A) DAF tiempo 1 réplica 1.
- (B) DAF tiempo 1 réplica 2.
- (C) DAF tiempo 1 réplica 3.
- (D) DAF tiempo 2 réplica 1.
- (E) DAF tiempo 1 réplica 2.
- (F) DAF tiempo 2 réplica 3.
- (G) DAF tiempo 3 réplica 1.
- (H) DAF tiempo 3 réplica 2.
- (I) DAF tiempo 3 réplica 3.

En la Figura 21, se puede visualizar el porcentaje de remoción de la turbidez del tratamiento de electroflotación a diferentes tiempos. En el tratamiento 1 con tiempo de 5 min se obtuvo una remoción del 50%, alcanzando resultados de 446,7 NTU, 580,9 NTU y 357,5 NTU. El tratamiento 2, logró una remoción del 98.8 %, 97,6 %, 98,6 %, en sus tres réplicas; obteniendo valores de 13,2 NTU, 14,2 NTU y 15,4NTU. En el tratamiento 3 se logró obtener resultados de 97,4%, 98,5% y 97,8%, alcanzando resultados de 28 NTU, 16,5 NTU y 24 NTU. Por lo que los tratamientos 2 y 3, tienen una tendencia estable en cuanto al parámetro turbidez.

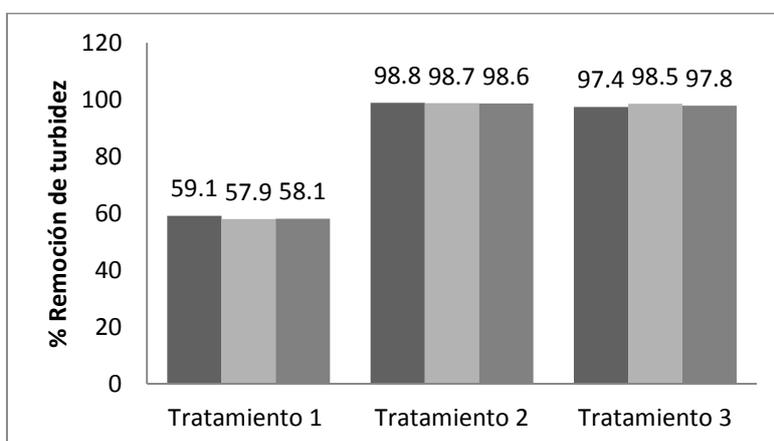


Figura 21. Porcentaje de remoción de la turbidez, utilizando la electroflotación. Tratamiento 1 con tiempo 5 min, tratamiento 2 con tiempo 15 min y tratamiento 3 con tiempo 30 min.

En la Figura 22 se puede apreciar la turbidez alcanzada en los tratamientos, aplicando el tratamiento primario de la electroflotación, observando que en el tratamiento 2 empleando 15 min y el tratamiento 3 empleando 30 min, se redujo la turbidez del efluente.

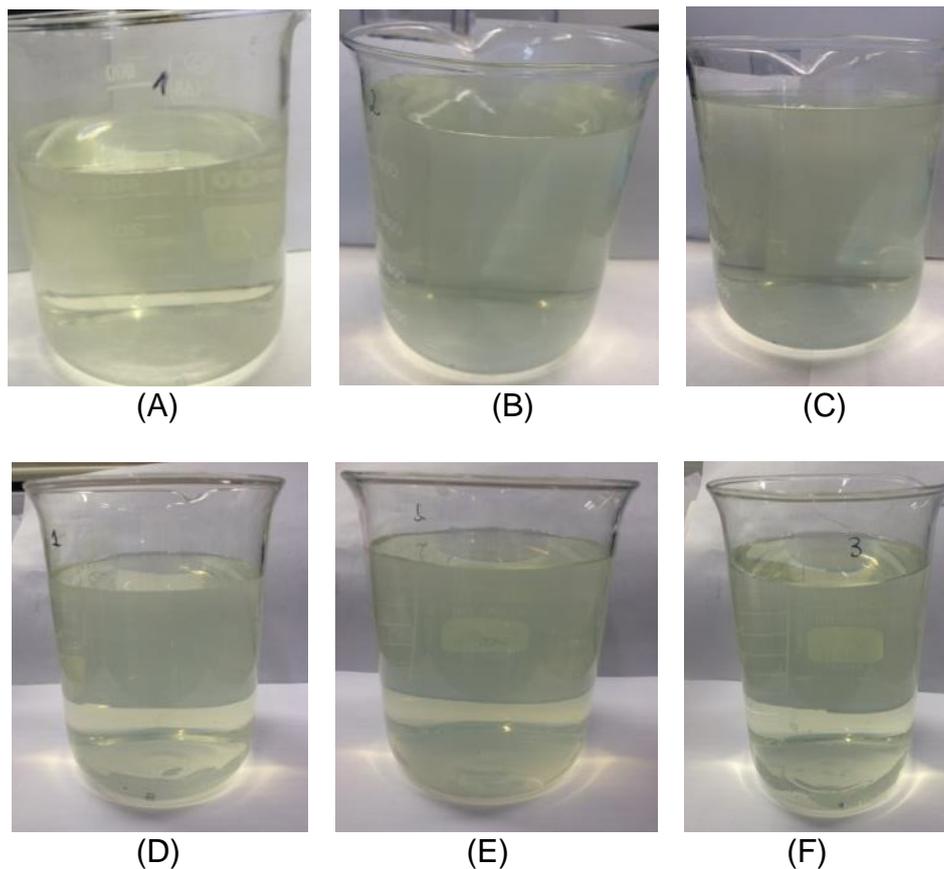


Figura 22. Turbidez obtenida en la electroflotación.

- (A) tiempo 15 min réplica 1.
- (B) tiempo 15 min réplica 2.
- (C) tiempo 15 min réplica 3.
- (D) tiempo 30 min réplica 1.
- (E) tiempo 30 min réplica 2.
- (F) tiempo 30 min réplica 3.

En la Figura 23 se observa la calidad del lodo que se obtuvo en el proceso de coagulación floculación, y como tratamiento primario electroflotación. En el tratamiento 1 se obtuvieron lodos compactos y sueltos, de mala calidad. En el tratamiento 2 empleando 5 min se obtuvieron lodos compactos que lograron sedimentarse totalmente, obteniendo lodos de buena calidad puesto que se los pudo retirar manualmente. Posteriormente, en el tratamiento 3 se obtuvieron lodos compactos que no lograron sedimentarse totalmente, por lo que se consideran lodos de mala calidad.

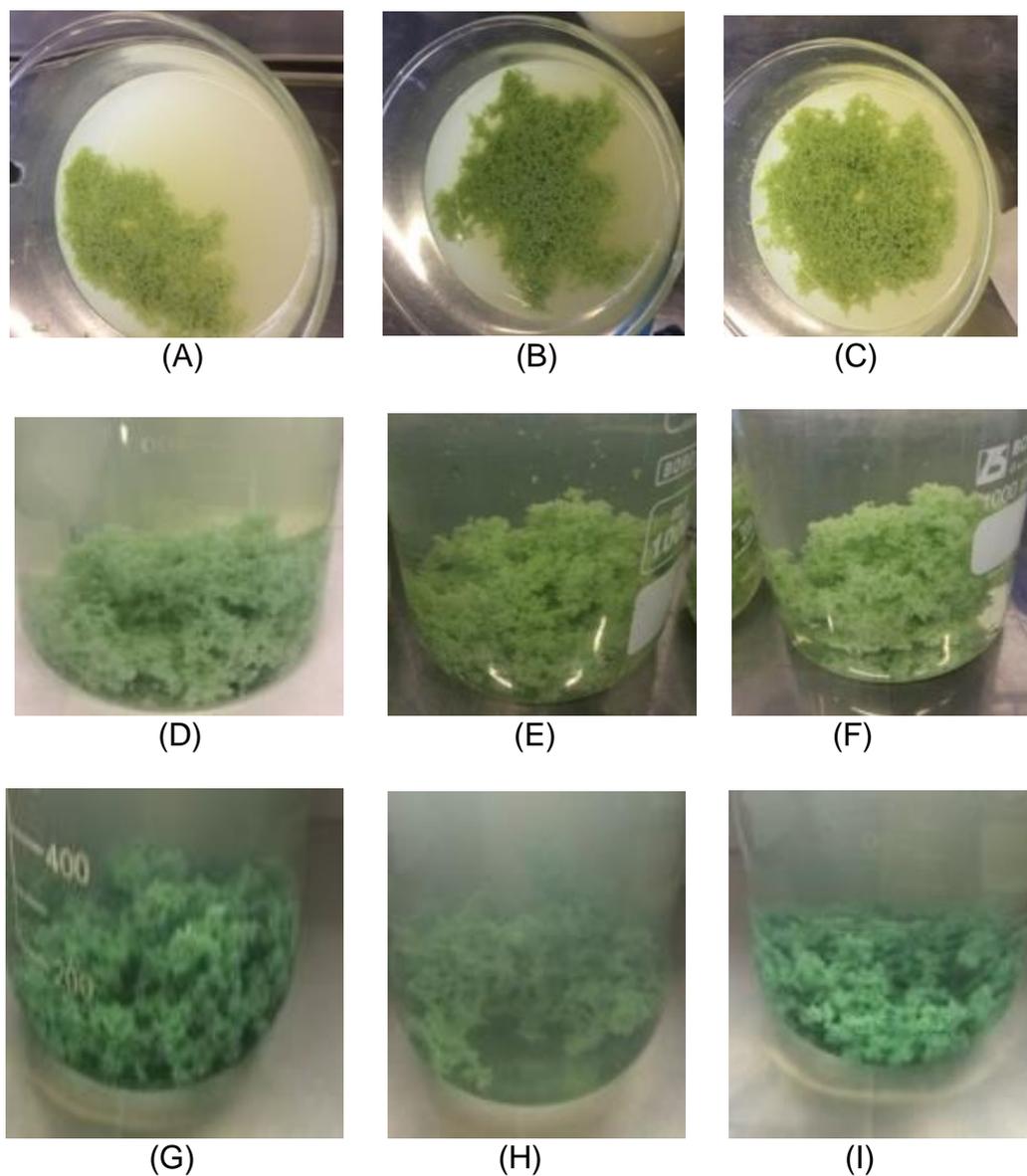


Figura 23. Obtención de lodos en el tratamiento de la electroflotación.

- (A) tiempo 5 min réplica 1.
- (B) tiempo 5 min réplica 2.
- (C) tiempo 5 min réplica 3.
- (D) tiempo 15 réplica 1.
- (E) tiempo 15 réplica 2.
- (F) tiempo 15 réplica 3.
- (G) tiempo 30 min réplica 1.
- (H) tiempo 30 min réplica 2.
- (I) tiempo 30 min réplica 3.

En los tratamientos empleando con flotación por aire disuelto con tiempo de 5 minutos, se alcanzaron resultados aproximadamente del 99.5% de remoción de

la turbidez. La aplicación de electroflotación con 15 y 30 min también se obtuvieron resultados favorables debido a que la remoción de la turbidez fue aproximadamente del 98,7% y 98% respectivamente.

Gross, Cristar y Richer (2003, p.4) afirman que la turbidez depende del tiempo de la flotación por aire disuelto, obteniendo mejores resultados entre 5 y 8 min con una reducción de turbidez del 99%. Además, del tipo, la cantidad de coagulante y floculante que se utilice, también señalan, que la temperatura no debe ser mayor a 40°C debido a que afecta la solubilidad del aire en el agua. Por esta razón, en el tratamiento 1 empleando un tiempo de 5 min, con una temperatura de 40°C, y utilizando el tratamiento de coagulación–floculación con PCA al 0,075 % y coadyuvante poliacrilamida aniónica al 0,1%, se obtuvieron resultados de remoción de turbidez del 99 %.

Por otro lado, en estudios realizados por Prasad, Kumar y Srivastava (2008, p.1), la eficacia de los tratamientos de electroflotación se debe a la utilización del tipo de electrodos. En este estudio se utilizaron electrodos de hierro y aluminio, con 30 amperios y un tiempo de electrólisis de 4 horas, logrando remover hasta el 95% de la turbidez de un efluente proveniente de un lavado de aceites. En este caso, los tratamientos 2 y 3 pudieron alcanzar una remoción eficaz de la turbidez, debido a que se obtuvo un porcentaje de remoción del 98%, utilizando un tiempo de electrólisis de 15 y 30 min. A su vez se utilizaron electrodos de cobre y zinc y con 30 amperios. Dichos autores señalan que mientras mayor sea el tiempo de electrólisis, se pueden obtener mejores resultados en cuanto al parámetro turbidez. Por lo tanto, en el tratamiento 1 empleando un tiempo de 5 min no se pudo lograr una remoción eficaz de la turbidez.

3.2.2 Parámetro DQO

Para el parámetro DQO se realizó un análisis de varianza ANOVA y diagramas de caja para cada tratamiento aplicado en la experimentación, por lo cual se determinó si la hipótesis debe ser rechazada o aceptada. Además, se aplicó la

prueba de Tukey con la finalidad de identificar diferencias significativas entre los tratamientos.

$$H_0 = \mu_1 = \mu_2 = \mu_3$$

$$H_A : \mu_i \neq 0 \text{ para algún } i=1,2,3$$

En la Tabla 11 se presentan los resultados obtenidos de la DQO empleando la flotación por aire disuelto.

Tabla 11.

Resultados de la DQO empleando la flotación por aire disuelto.

| DQO inicial (mg/l) | Tratamiento 1 (mg/l) | Tratamiento 2 (mg/l) | Tratamiento 3 (mg/l) |
|-----------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 28900 | 37 | 1800 | 900 |
| | 45 | 1600 | 800 |
| | 35 | 1200 | 900 |

Nota. Tratamiento 1 empleando 5 min, tratamiento 2 empleando 15 min y tratamiento 3 empleando 30 min.

En el análisis de varianza ANOVA de la Tabla 12, se obtuvo un valor de significancia de 0 (menor a 0,05), por lo que se estima que existe alguna diferencia significativa entre los tratamientos empleados a diferentes tiempos. Por esta razón se acepta la hipótesis nula para el parámetro DQO.

Tabla 12.

Resultados de la prueba ANOVA para el parámetro DQO, tratamiento con la flotación por aire disuelto.

| Fuente de variación | Suma de cuadrados | Grados de libertad | Media cuadrática | F | Sig |
|---------------------|-------------------|--------------------|------------------|--------|-----|
| Entre grupos | 3414708,667 | 2 | 1707354,333 | 37,471 | 0 |
| Dentro de grupos | 273389,333 | 6 | 45564,889 | | |
| Total | 3688098,000 | 8 | | | |

En los resultados de la prueba Tukey de la Tabla 13 y en el diagrama de caja de la Figura 24, se puede observar que existen diferencias significativas en cuanto a los 3 tratamientos empleados con la flotación por aire disuelto a diferentes tiempos, debido a que todos los valores de significancia son menores a 0,05. Además, se puede observar que el mejor tratamiento es el 1 puesto que se redujo la concentración de la DQO.

Tabla 13.

Resultados de la prueba de Tukey para el parámetro DQO, tratamiento con la flotación por aire disuelto.

| (I) | (J) | Diferencias de medias (I-J) | Error estándar | Sig. |
|-----|-----|-----------------------------|----------------|------|
| 1 | 2 | -1494,333* | 174,289 | 0 |
| | 3 | -927,667* | 174,289 | ,004 |
| 2 | 1 | 1494,333* | 174,289 | 0 |
| | 3 | 566,667* | 174,289 | ,040 |
| 3 | 1 | 927,667* | 174,289 | ,004 |
| | 2 | -566,667* | 174,289 | ,040 |

Nota. Los * en los valores de las diferencias de medias, significan que existe una diferencia significativa entre la comparación de los tratamientos. El error estándar estima la variabilidad entre los tratamientos.

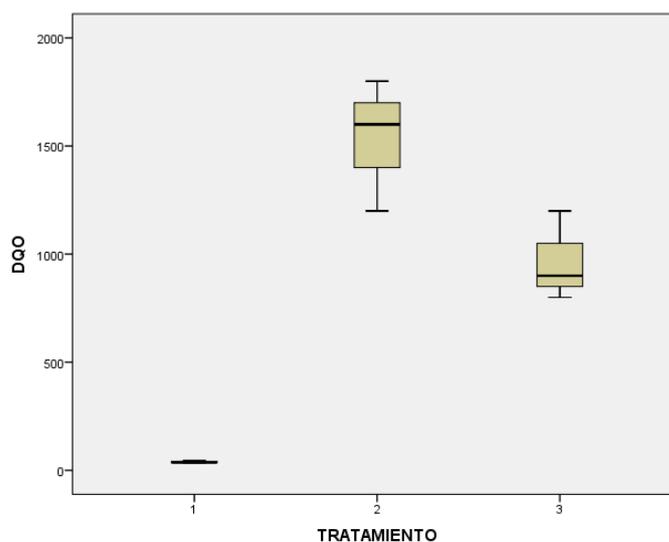


Figura 24. Diagrama de caja. Tratamiento con la flotación por aire disuelto. Parámetro DQO.

A continuación se presentan los valores obtenidos de la DQO en la Tabla 14.

*Tabla 14.
Resultados de la DQO, empleando la electroflotación.*

| DQO inicial (mg/l) | Tratamiento 1 (mg/l) | Tratamiento 2 (mg/l) | Tratamiento 3 (mg/l) |
|-------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 28900 | 1600 | 170 | 460 |
| | 1700 | 146 | 430 |
| | 1400 | 164 | 490 |

Nota. Tratamiento 1 empleando 5 min, tratamiento 2 empleando 15 min y tratamiento 3 empleando 30 min.

En los resultados del análisis de la varianza ANOVA de la Tabla 15, se puede observar que el valor de significancia es de 0 (menor a 0,05), lo cual permite afirmar que existe alguna diferencia significativa entre algunos de los tratamientos en cuanto al parámetro DQO utilizando la electroflotación. Por esta razón se rechaza la hipótesis alternativa y se acepta la hipótesis nula.

*Tabla 15.
Resultados de la prueba ANOVA para el parámetro DQO, tratamiento con la electroflotación.*

| Fuente de variación | Suma de cuadrados | Grados de libertad | Media cuadrática | F | Sig |
|--------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|----------|------------|
| Entre grupos | 3293422,222 | 2 | 1646711,11 1 | 202,553 | 0 |
| Dentro de grupos | 48778,667 | 6 | 8129,778 | | |
| Total | 3342200,889 | 8 | | | |

En los resultados de la prueba Tukey en la Tabla 16 y en el diagrama de caja en la Figura 25, se puede observar que hay diferencias significativas entre los 3 tratamientos en cuanto al parámetro DQO, debido a que los valores de significancia son menores a 0,05. Además, se observa en el diagrama de caja

que el mejor tratamiento es el 2 mediante la aplicación del tratamiento primario con electroflotación puesto que la concentración de la DQO obtenida es de 170 mg/l, 146 mg/l y 164 mg/l, en sus tres réplicas.

Tabla 16.

Resultados de la prueba Tukey para el parámetro DQO, tratamiento con la electroflotación.

| (I) | (J) | Diferencias de medias (I-J) | Error estándar | Sig. |
|-------------|-------------|-----------------------------|----------------|------|
| TRATAMIENTO | TRATAMIENTO | | | |
| 1 | 2 | 1406,667* | 73,620 | 0 |
| 1 | 3 | 1106,667* | 73,620 | 0 |
| 2 | 1 | -1406,667* | 73,620 | 0 |
| 2 | 3 | -300,000* | 73,620 | ,015 |
| 3 | 1 | -1106,667* | 73,620 | 0 |
| 3 | 2 | 300,000* | 73,620 | ,015 |

Nota. Los * en los valores de las diferencias de medias, significan que existe una diferencia significativa entre la comparación de los tratamientos. El error estándar estima la variabilidad entre los tratamientos.

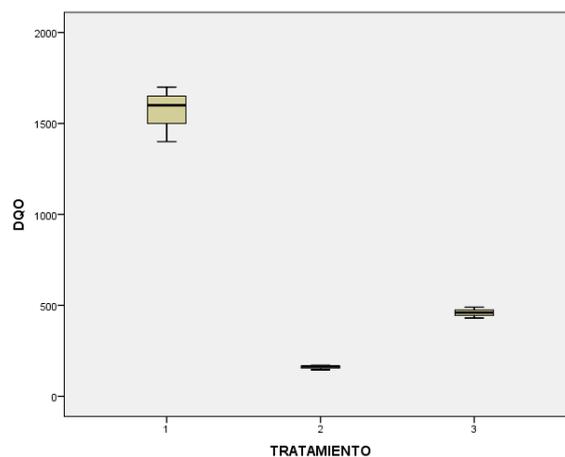


Figura 25. Diagrama de caja. Tratamiento con la flotación por aire disuelto. Parámetro DQO.

La remoción alcanzada en cuanto al parámetro DQO se calculó según la ecuación 7. Los resultados obtenidos de los tratamientos se presentan en las Figuras 26 y 27.

En la Figura 26 se observa que los resultados de remoción de la DQO, son favorables, ya que se alcanzó más del 90 % en sus tres tratamientos.

En el tratamiento 1 empleando la DAF con un tiempo de 5 min, se logró alcanzar una remoción del 99%, 98,8% y 99,9% respectivamente, en sus tres réplicas, puesto que se obtuvieron valores de 37 mg/l, 45 mg/l y 37 mg/l. Dichos valores se encuentran dentro del límite máximo permisible de la normativa ambiental. Sin embargo, en el tratamiento 3 se puede observar que hubo una remoción del 95,8%, 97,2% y 96,9%, obteniendo resultados de 1200 mg/l, 800 mg/l y 900 mg/l, y finalmente en el tratamiento 2 se obtuvieron remociones del 93,8 %, 94,5 % y 95,8%, con valores de 1800 mg/l, 1600 mg/l y 1200 mg/l, de manera que el tratamiento 1 fue el más eficaz en cuanto a la remoción del parámetro DQO.

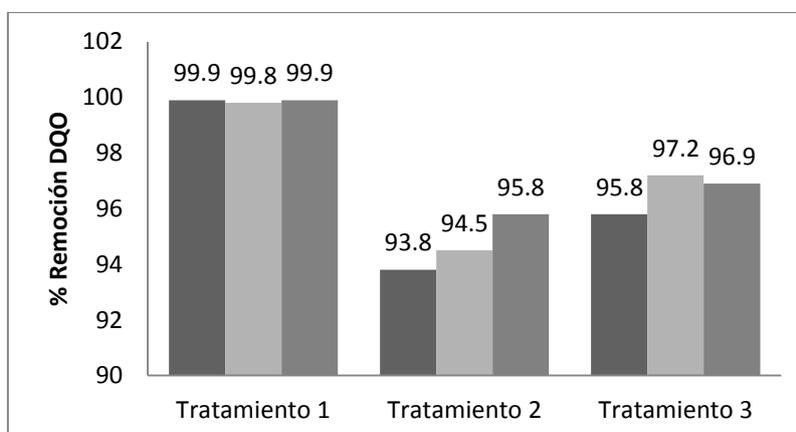


Figura 26. Porcentaje de remoción de los tratamientos con la flotación por aire disuelto. Parámetro DQO. Tratamiento 1 con tiempo 5 min, tratamiento 2 con tiempo 15 min y tratamiento 3 con tiempo 30 min.

En la Figura 27 se puede observar los resultados de la remoción de la DQO aplicando el tratamiento de la electroflotación. El tratamiento 2 fue el más favorable, puesto que se obtuvieron remociones de 99,4 %, 99,5 % y 99,4 %, de manera que el tratamiento 2 fue el más eficaz en cuanto a la remoción del parámetro DQO.

alcanzando valores de 170 mg/l, 146 mg/l y 164 mg/l. Dichos resultados se encuentran dentro de los parámetros permisibles de la normativa ambiental, debido a que su valor límite máximo permisible es de 200 mg/l. En el tratamiento 3 se obtuvo una remoción del 98,4 mg/l, 98,5 mg/l y 98,3 mg/l, con valores de 460 mg/l, 430 mg/l y 490 mg/l. El tratamiento 1 se obtuvo una remoción del 94,5%, 94,1 % y 95,2 % con valores de 600 mg/l, 800 mg/l y 900 mg/l, pero ninguno de los dos tratamientos cumplen con la normativa ambiental.

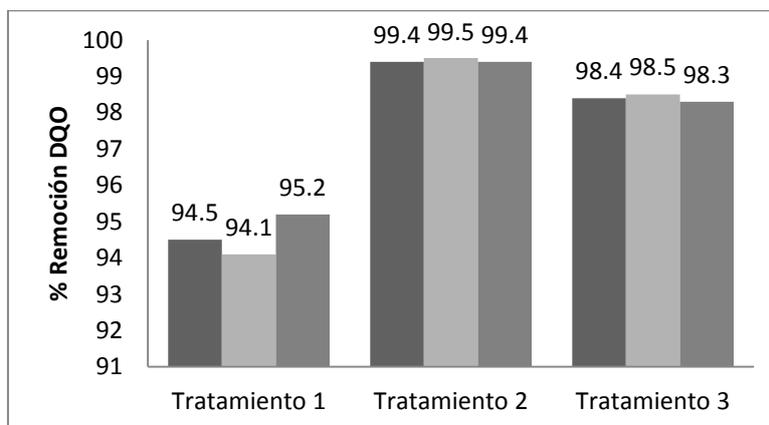


Figura 27. Porcentaje de remoción de los tratamientos con la electroflotación. Parámetro DQO. Tratamiento 1 con tiempo 5 min, tratamiento 2 con tiempo 15 min y tratamiento 3 con tiempo 30 min.

Para el parámetro de la DQO, se pudo observar que la mejor remoción se obtuvo en el tratamiento de la DAF a un tiempo de 5 min, puesto que cumple con los límites permisibles para la descarga a un cuerpo de agua dulce. Sin embargo, en los tratamientos 2 y 3 de electroflotación a tiempos de 15 y 30 min, se logró alcanzar una remoción del 99,4 % y 98,4 % respectivamente; por lo que se logró remover la DQO alcanzando valores moderados.

En un estudio realizado por Salas y Condorhuamán, (2008, p.35), aplicaron el método de la DAF, en un efluente proveniente de un matadero, el mismo que tenía una concentración inicial de la DQO de 705 mg/l. Obtuvieron valores finales de la DQO de 200 mg/l con un porcentaje de remoción del 75 % de dicho parámetro. En cuanto al tratamiento 1 empleando 5 minutos con la DAF,

se obtuvo un porcentaje de remoción del 99,9%, lo que indica que este tratamiento es muy eficaz para la reducción de la DQO.

Guevara, De la Torre y Manangon (2011, p.1)(Guevara, De la Torre, & Manangon, 2011), realizaron un estudio aplicando electrocoagulación en aguas residuales provenientes de una empresa de mantenimiento de motores, donde utilizaron dos electrodos uno de hierro como ánodo y otro de aluminio como cátodo, obteniendo una DQO inicial de 14700 mg/l. Sus resultados no fueron favorables en cuanto a la remoción de la DQO puesto que obtuvieron una remoción de la turbidez de un 32%, con un tiempo de 60 min. Concluyeron que la eficiencia y la capacidad de los procesos de electroflotación dependen de la naturaleza del agua residual, de las concentraciones de los contaminantes y el tiempo de electrólisis. Sin embargo, en la experimentación realizada aplicando la electroflotación con electrodos de cobre y zinc, a un tiempo de 15 min se pudieron obtener resultados favorables en cuanto a la remoción de la DQO, puesto que se logró remover el 99,5 % de dicho parámetro, debido a que luego de la aplicación de la DAF, se aplicó el tratamiento de coagulación-floculación con la finalidad de remover más los contaminantes que se encontraban en el efluente.

Según Hotl et al, para realizar este tipo de tratamiento, las aguas residuales deben tener un pH entre 5 y 6. Evidentemente el agua utilizada en este trabajo cumple con las condiciones de pH. Según los resultados de la electroflotación, se pudo determinar que es un método eficaz para remover la clase de contaminantes usados como parámetros de medición, además que es un óptimo tratamiento primario para efluentes que contengan altas concentraciones de DQO.

3.2.4 Parámetro composición de aceites y grasas

Para el parámetro composición aceites y grasas se realizó un análisis de varianza ANOVA y diagramas de caja para cada tratamiento aplicado en la experimentación, por lo cual se determinó si la hipótesis debe ser rechazada o

aceptada. Además, se aplicó la prueba de Tukey con la finalidad de identificar diferencias significativas entre los tratamientos.

$$H_0 = \mu_1 = \mu_2 = \mu_3$$

$$H_A : \mu_i \neq 0 \text{ para algún } i=1,2,3$$

En la Tabla 17 se presentan los resultados obtenidos empleando el tratamiento primario de la flotación por aire disuelto en cuanto al parámetro aceites y grasas.

Tabla 17.

Resultados de concentración de aceites y grasas, empleando la flotación por aire disuelto.

| Aceites y grasas - inicial (mg/l) | Tratamiento 1 (mg/l) | Tratamiento 2 (mg/l) | Tratamiento 3 (mg/l) |
|--|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 10447,8 | 18 | 594 | 88,5 |
| | 8,8 | 595 | 74,5 |
| | 15,2 | 539,3 | 59 |

Nota: Tratamiento 1 empleando 5 min, tratamiento 2 empleando 15 min y tratamiento 3 empleando 30 min.

Los resultados del análisis de la varianza ANOVA en la Tabla 18, muestra que existen diferencias significativas entre los tratamientos debido a que su valor de significancia resultó menor a 0,05. Por esta razón, se acepta la hipótesis nula, lo cual permite afirmar que existe diferencia entre alguno de los tratamientos en cuanto al parámetro concentración de aceites y grasas.

Tabla 18.

Resultados de la prueba ANOVA para el parámetro concentración aceites y grasas, tratamiento con la flotación por aire disuelto.

| Fuente de variación | Suma de cuadrados | Grados de libertad | Media cuadrática | F | Sig |
|----------------------------|--------------------------|---------------------------|-------------------------|----------|------------|
| Entre grupos | 571660,820 | 2 | 285830,410 | 682,759 | 0 |
| Dentro de grupos | 2511,840 | 6 | 418,640 | | |
| Total | 574172,660 | 8 | | | |

Los resultados de la prueba Tukey de la Tabla 19 y en el diagrama de caja de la Figura 28 se pueden observar que existen diferencias significativas entre los tratamientos 1 y 2, puesto que su valor de significancia dio como resultado 0,03 (menor a 0,05). Además, entre los tratamientos 2 y 3 existen diferencias significativas debido a que su valor de significancia fue de 0,008 (menor a 0,05). No obstante, entre los tratamientos 1 y 3 no existen diferencias significativas puesto que el valor de significancia se obtuvo un valor de 0,559 (mayor a 0,005).

Tabla 19

Resultados de la prueba Tukey para el parámetro concentración aceites y grasas, tratamiento con la flotación por aire disuelto.

| (I) TRATAMIENTO | (J) TRATAMIENTO | Diferencias de medias (I-J) | Error estándar | Sig. |
|--------------------|--------------------|-----------------------------------|-------------------|------|
| 1 | 2 | -528,767* | 92,643 | ,003 |
| | 3 | -93,333 | 92,643 | ,599 |
| 2 | 1 | 528,767* | 92,643 | ,003 |
| | 3 | 435,433* | 92,643 | ,008 |
| 3 | 1 | 93,333 | 92,643 | ,599 |
| | 2 | -435,433* | 92,643 | ,008 |

Nota. Los * en los valores de las diferencias de medias, significan que existe una diferencia significativa entre la comparación de los tratamientos. El error estándar estima la variabilidad entre los tratamientos.

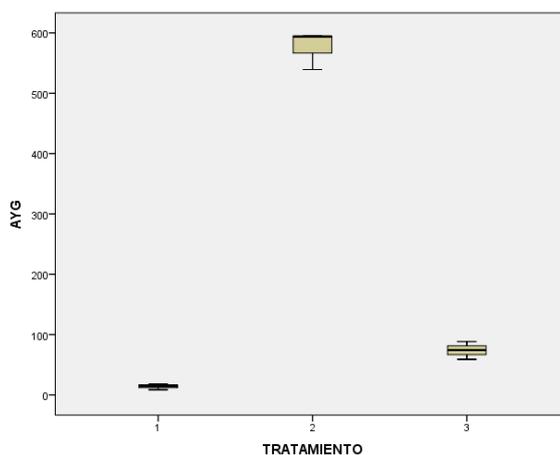


Figura 28. Diagrama de caja, tratamiento con la flotación por aire disuelto.

En la figura 29, se observa la capa de grasa que se pudo formar después de la aplicación del método DAF. La aplicación de este tratamiento es eficaz para la remoción de la concentración de aceites y grasas.

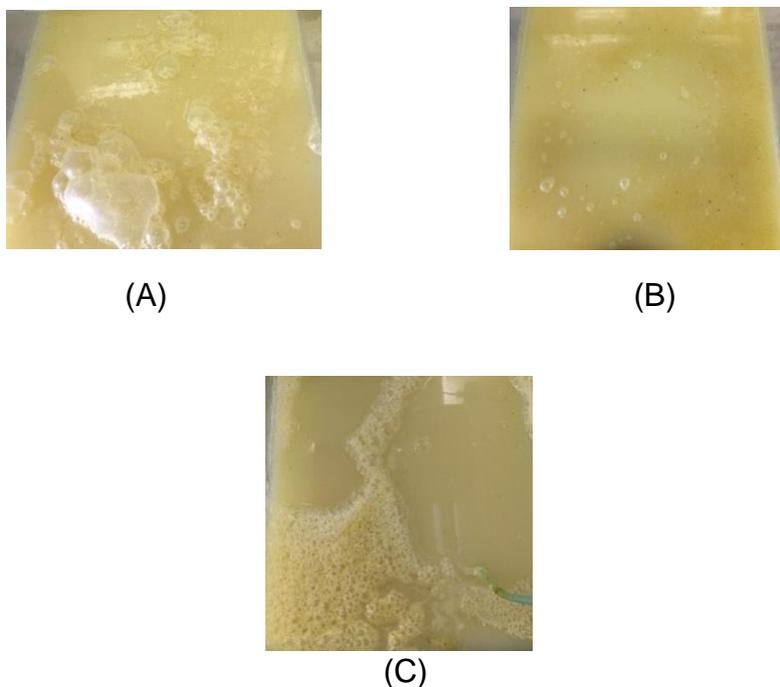


Figura 29. Remoción de grasas obtenidas en el tratamiento de la flotación por aire disuelto.

- (A) DAF tiempo 5 min.
- (B) DAF tiempo 15 min.
- (C) DAF 30min.

En la Tabla 20 se muestran los resultados obtenidos empleando el tratamiento primario de la electroflotación.

Tabla 20.

Resultados de concentración de aceites y grasas, empleando la electroflotación.

| Aceites y grasas inicial (mg/l) | Tratamiento 1 (mg/l) | Tratamiento 2 (mg/l) | Tratamiento 3 (mg/l) |
|---------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 10447,8 | 301 | 14,45 | 13,96 |
| | 252,6 | 15 | 20,31 |
| | 257,03 | 24,26 | 12 |

Nota: Tratamiento 1 empleando 5 min, tratamiento 2 empleando 15 min y tratamiento 3 empleando 30 min.

Los resultados del análisis de varianza ANOVA en la Tabla 21, para el parámetro de aceites y grasas, empleando el tratamiento de electroflotación, indican un valor de significancia de 0 (menor a 0,05), lo que permite afirmar que existe alguna diferencia significativa entre algunos de los tratamientos.

Tabla 21.

Resultados de la prueba ANOVA para el parámetro concentración aceites y grasas, tratamiento con la electroflotación.

| Fuente de variación | Suma de cuadrados | Grados de libertad | Media cuadrática | F | Sig |
|----------------------------|--------------------------|---------------------------|-------------------------|----------|------------|
| Entre grupos | 128581,050 | 2 | 64290,525 | 252,062 | 0 |
| Dentro de grupos | 1530,351 | 6 | 255,058 | | |
| Total | 130111,401 | 8 | | | |

En los resultados de la prueba Tukey en la Tabla 22 y en el diagrama de caja de la Figura 30, se observa que en el tratamiento 1 y 2 existen diferencias significativas en cuanto al parámetro de aceites y grasas, puesto que el valor de significancia dio como resultado 0 (menor a 0,05), además se puede observar que entre el tratamiento 2 y 3 no existen diferencias significativas ya que el valor de significancia es de 0.980 (mayor a 0,5).

Tabla 22.

Resultados de la prueba Tukey para el parámetro concentración aceites y grasas, tratamiento con la electroflotación.

| (I) TRATAMIENTO | (J) TRATAMIENTO | Diferencias de medias (I-J) | Error stándar | Sig. |
|--------------------|--------------------|-----------------------------------|------------------|------|
| 1 | 2 | 252,307* | 13,040 | 0 |
| | 3 | 254,787* | 13,040 | 0 |
| 2 | 1 | -252,307* | 13,040 | 0 |
| | 3 | 2,480 | 13,040 | ,980 |
| 3 | 1 | -254,787* | 13,040 | 0 |
| | 2 | -2,480 | 13,040 | ,980 |

Nota. Los * en los valores de las diferencias de medias, significan que existe una diferencia significativa entre la comparación de los tratamientos. El error estándar estima la variabilidad entre los tratamientos.

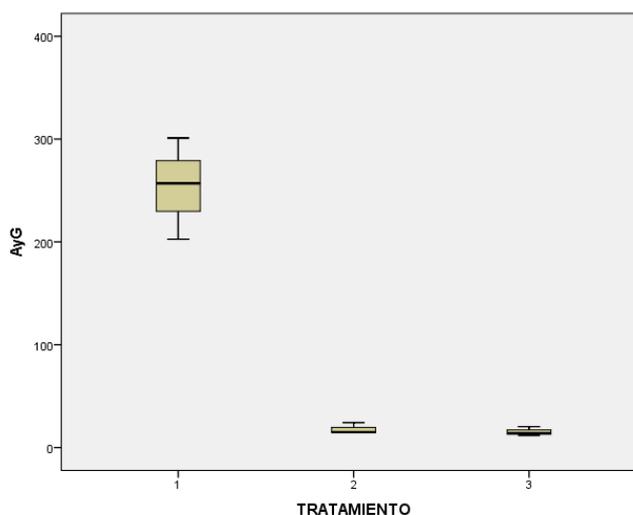


Figura 30. Diagrama de caja. Tratamiento con la electroflotación.

La Figura 31, presenta la remoción de grasas y aceites después de empleando el tratamiento primario de electroflotación. Como se puede observar el agua residual cambió de coloración puesto que ocurrió un proceso de óxido-reducción, reduciéndose en el zinc (cátodo) y oxidándose en el cobre (ánodo), obteniendo una coloración verdosa debido al cobre. En este tratamiento primario los iones positivos del efluente se movilaron hacia el cátodo y los

iones negativos se movilizaron hacia el ánodo, donde los contaminantes fueron desestabilizados y las partículas aglomeradas precipitaron (Maldonado & Molina, 2011).

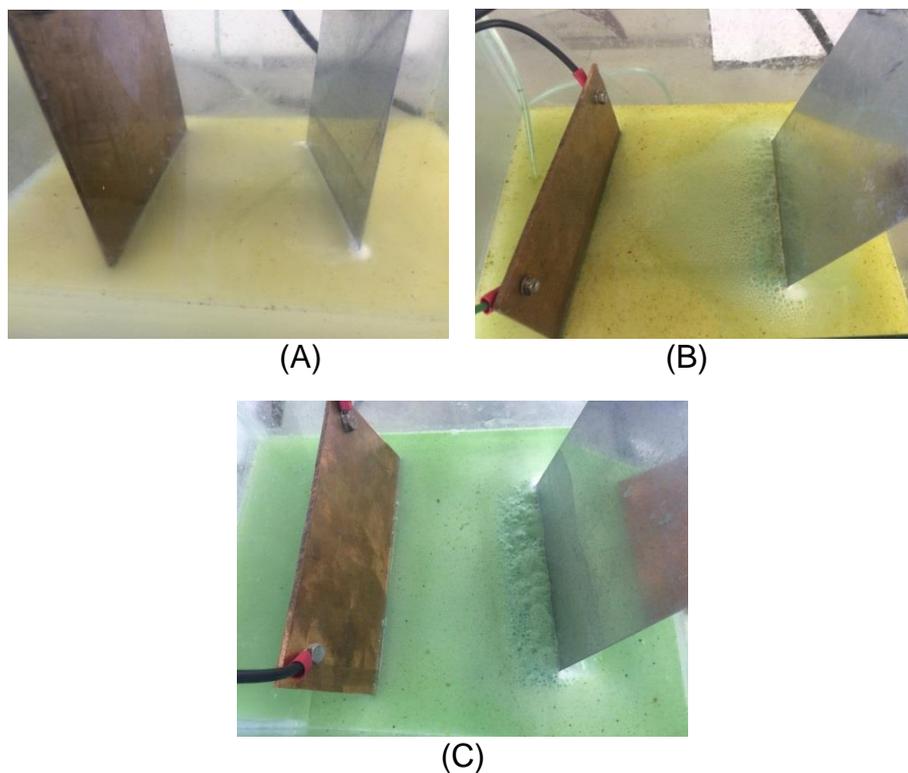


Figura 31. Remoción de grasas obtenidas en el tratamiento con la electroflotación.

(A) Electroflotación 5 min.

(B) Electroflotación tiempo 15 min.

(C) Electroflotación 30 min.

La remoción alcanzada en cuanto al parámetro composición aceites y grasas se calculó según la ecuación 7. Los resultados obtenidos de los tratamientos se presentan en las Figuras 32 y 33.

En la Figura 32, se puede observar que en la aplicación del método de la DAF, en el tratamiento 1 empleando 5 min, existió una mayor remoción del parámetro aceites y grasas, puesto que se obtiene una remoción de la DBO_5 del 99,8 %, 99,9 % y 99,9 %, obteniendo valores de 18 mg/l, 8,8 mg/l y 15,2 mg/l en sus tres réplicas. Posterior a esto en el tratamiento 3 se obtuvo una

remoción del 98,2 %, 99,3 % y 99,4 % en sus tres réplicas, obteniendo valores de 88,5 mg/l, 74,5 mg/l y 59 mg/l. En el tratamiento 2 la remoción de aceites y grasas fue del 94,3 % 94,3 % y 94, 8 %, ya que se obtuvo valores de 594 mg/l, 595 mg/l y 539,3 mg/l.

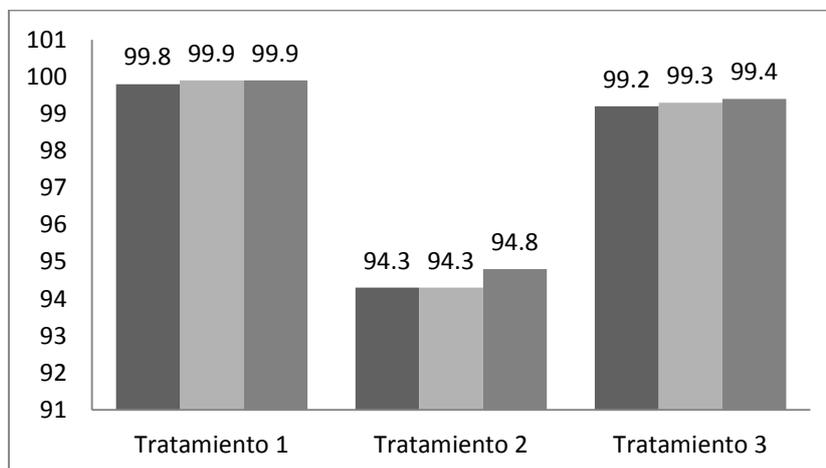


Figura 32. Porcentaje de remoción de los tratamientos con la flotación por aire disuelto. Tratamiento 1 con tiempo 5 min, tratamiento 2 con tiempo 15 min y tratamiento 3 con tiempo 30 min.

En la Figura 33, se puede observar la remoción de grasas y aceites aplicando la electroflotación a diferentes tiempos por lo que en el tratamiento 2 se obtuvieron remociones de 99,9 %, 99,9 % y 99,8 % en sus tres réplicas, respectivamente; con valores de 14,45 mg/l, 15 mg/l y 24,6 mg/l. En el tratamiento 3 se obtuvo una remoción de 99,9 %, 99,8 % y 99,9 % con valores de 13,96 mg/l, 20,31mg/l y 12mg/l. Sin embargo, en el tratamiento 1 también se logró obtener una gran remoción del 97,1 %, 98,1% y 87,5 %, obteniendo valores de 301 mg/l, 202,6 mg/l, 257,03 mg/l.

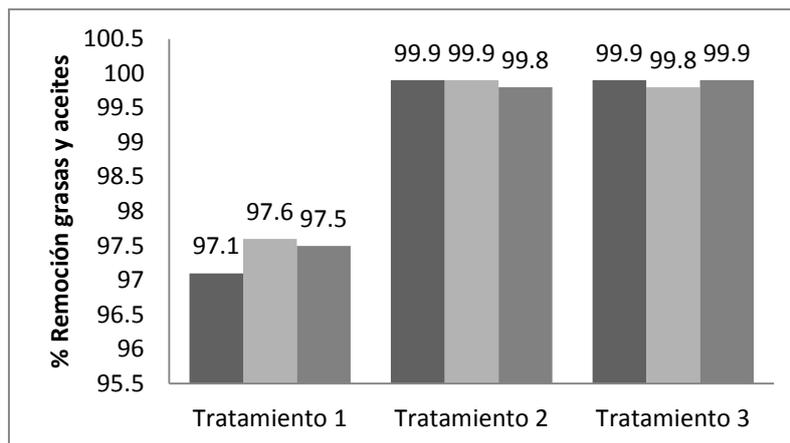


Figura 33. Porcentaje de remoción de los tratamientos con la electroflotación. Tratamiento 1 con tiempo 5 min, tratamiento 2 con tiempo 15 min y tratamiento 3 con tiempo 30 min.

Según indican Turkman, Sengul y Ozel (1992, p.516) que los mejores resultados en cuanto a la variable de aceites y grasas, con la aplicación de flotación por aire disuelto se dan en tiempos de 5 a 7 minutos, debido que existe una remoción mayor del 95% de las mismas.

Por otro lado, Yoval y otros (2002, p.7) indica que el factor principal para la remoción de aceites y grasas es la selección del polímero y la optimización del tratamiento. Puesto que utilizaron efluentes con una concentración inicial de aceites y grasas de 500 mg/l y obtuvieron resultados finales de 17 mg/l y 30 mg/l de dicha variable, con una remoción hasta del 70 %. Con la utilización del PCA y poliacrilamida aniónica en el tratamiento de coagulación-floculación utilizando la DAF se obtuvieron resultados favorables, puesto que en la caracterización inicial del efluente se obtuvo una concentración de aceites y grasas de 10447,80 mg/l y la remoción que se logró alcanzar en el tratamiento 1 aplicando un tiempo de 5 min, fue de 99.8%, 99,9 % y 99,9 % en las tres réplicas, obteniendo valores de 18 mg/l, 8,8 mg/l y 15,2 mg/l. Dichos valores cumplen con la normativa ambiental debido a que el límite máximo permisible de dicho parámetro es de 30 mg/l. Sin embargo el tiempo de la DAF es de 5 minutos, suficiente para tratar dicho efluente.

Vasudevan y Oturan (2012, p.43), la eficacia de la aplicación del método de electroflotación se da cuando la temperatura del agua a tratar se encuentra entre los 40°C y 60°C, para obtener una mejor eficiencia de eliminación de los contaminantes, ya que los flóculos que se forman no son compactos y no se depositan sobre la superficie del electrodo. En la aplicación de la electroflotación la temperatura tuvo una variación debido a que en el tratamiento 1 fue de 40 °C, en el tratamiento 2 fue de 45 °C y en el tratamiento 3 de 50°C. Es por esta razón que se obtuvo una mejor remoción de los aceites y grasas en el tratamiento 2 y 3 puesto que también influye mucho el tiempo de la hidrólisis.

Las condiciones de operación de la electroflotación dependen del medio acuoso que se obtenga como pH, pero también influyen en el tamaño de partículas, el tipo de electrodos que se utilice, el tiempo de retención, y la concentración de contaminantes. Además se debe tomar en cuenta las características fisicoquímicas del agua residual puesto que estas pueden modificar las propiedades de los contaminantes, afectando así su remoción como el pH y temperatura. Es por esta razón que se reguló el pH a 5 para todos los tratamientos debido a que influye mucho en la remoción de los contaminantes.

Por otro lado, a pesar de que no se ha investigado a profundidad el efecto de la temperatura en la electroflotación, se ha encontrado que la eficiencia de la corriente aplicada para el cobre se incrementa hasta los 60 °C, efecto que se atribuye a la destrucción de la película de óxidos de zinc que se forma en la superficie de los electrodos (Soberanis et al., 2011).

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

La caracterización inicial realizada del agua obtenida de DANEC, permitió evidenciar la contaminación de dichos efluentes, con elevados contenidos de aceites y grasas 10447.80 mg/l, DBO₅ 1600 mg/l, DQO 28900 mg/l, pH 8.7 y una turbidez de 1091.5 mg/l.

Considerando los resultados de la caracterización del agua tratada se pudo observar que el pretratamiento de la flotación por aire disuelto a un tiempo de 5 minutos y el tratamiento primario con electroflotación a un tiempo de 15 min, cumplieron con todos los límites máximos permisibles del Acuerdo Ministerial 098, por lo que el agua tratada ya puede ser vertida a los cuerpos de agua dulce.

La DAF y la electroflotación en efluentes que tienen concentraciones de aceites y grasas, son muy eficaces para disolver dicha concentración, puesto que se obtuvo una remoción hasta del 99% de los parámetros analizados en la experimentación realizada.

El tratamiento primario de flotación por aire disuelto es muy eficaz para industrias donde se obtengan elevadas concentraciones de aceites y grasas, puesto que se utiliza menor cantidad de químicos en los tratamientos posteriores para separar las emulsiones y además permite recuperar el agua para ser reutilizada en posteriores actividades como en riego, torres de enfriamiento y agua que no sea de consumo.

Para la aplicación de los tratamientos primarios empleados fue necesario bajar el pH a 5 con H₂SO₄, puesto que dicho parámetro influye en la remoción de los contaminantes, además que mejora el proceso de remoción de aceites y grasas.

Los tratamientos primarios utilizados son una alternativa viable para las industrias productoras de aceite vegetal puesto que se requiere poco tiempo de

tratamiento. Además, que remueve el 90 % de las grasas, las mismas que pueden ser incorporadas a la cadena de producción.

La DAF fue el tratamiento más favorable, debido a que presentó mejores condiciones en cuanto al agua tratada y los parámetros analizados resultaron ser bajos. Sin embargo, el tratamiento primario con electroflotación también fue eficaz, puesto que de igual manera hubo un porcentaje de remoción considerable.

4.2 Recomendaciones

Es necesario al momento de aplicar el tratamiento de coagulación floculación, que las muestras sean homogenizadas para que no se obtenga mucho rango de error en la medición de los parámetros.

Se recomienda para futuros estudios, emplear el tratamiento de electroflotación con otras industrias que contengan aceites y grasas.

Debido a que en el presente trabajo los límites permisibles resultaron óptimos en cuanto al tratamiento primario de electroflotación, se recomienda aumentar el tiempo de hidrólisis para obtener mejores resultados de los parámetros que se desea analizar.

REFERENCIAS

- Abdelmoez, W., Barakat, N., y Moaz, A. (2013). *Treatment of wastewater contaminated with detergents and mineral oils using effective and scalable technology*. Recuperado el 12 de Septiembre de 2016 de <http://doi.org/10.2166/wst.2013.275>
- Abdel, G., y Hammad, D. (2014). *Aquatic environmental monitoring and removal efficiency of detergents*. Recuperado el 12 de Octubre de 2016 de <http://doi.org/10.1016/j.wsj.2014.09.001>
- Aguaecuador. (2012). El Agua en el Ecuador. Recuperado el 18 de Noviembre de 2016 de <http://agua-ecuador.blogspot.com/2012/04/la-contaminacion-del-agua-en-ecuador.html>
- Aly, A., Hasan, Y., y Alfarraj, A. (2014). Olive mill wastewater treatment using a simple zeolite-based low-cost method. Recuperado el 15 de Octubre de 2016 de. <http://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.07.012>
- Arango, S., y López, A. (2008). Tratamiento de aguas residuales de proceso de desengrase de autopartes con fines de reuso. Recuperado el 12 de Octubre de 2016 de https://repository.eafit.edu.co/handle/10784/500#.WLxIYm81_IU
- Baeza, A., y Garcia, A. (2011). Principios de electroquímica analítica. Recuperado el 12 de Noviembre de 2016 de http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/DOC_APOY_FUNDAMENTOS_ELECTROANALITICA_2011_16333.pdf
- Bakieva, M. (2010). SPSS: Gráficos. Recuperado el 22 de Noviembre de 2016 de http://www.uv.es/innomide/spss/SPSS/SPSS_0303a.pdf
- Behin, J., y Bahrami, S. (2012). Modeling an industrial dissolved air flotation tank used for separating oil from wastewater. Recuperado el 18 de Noviembre de 2016 de <http://doi.org/10.1016/j.cep.2012.05.004>

- Bombón, N., y Albuja, M. (2014). Diseño De Una Planta De Saponificación Para El Aprovechamiento Del Aceite Vegetal De Desecho. Recuperado el 18 de Octubre de 2016 de http://www.revistapolitecnica.epn.edu.ec/ojs2/index.php/revista_politecnica2/article/view/304
- Bureau, V. (2008). Manual para la formación en Medio Ambiente. Recuperado el 20 de Noviembre de 2016 de https://books.google.com.ec/books?id=J7rMDpW49ZQC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false
- Calanog, S., Street, H., Chen, J., y Toia, R (1995). *Preliminary Evaluation of Potential Impacts of Non-Petroleum Oils on the Aquatic Environment*. Recuperado el 20 de Noviembre de 2016 de <http://www.ioscproceedings.org/doi/abs/10.7901/2169-3358-1999-1-597?code=ampi-site>
- Cammarota, M., y Freire, D. (2006). *A review on hydrolytic enzymes in the treatment of wastewater with high oil and grease content*. Recuperado el 13 de Octubre de 2016 de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852406000848>
- DANEC. (2013). Informe Social. Recuperado el 28 de Septiembre de 2016 de <http://www.danec.com/images/contenidos/resp-social/resp-social.pdf>
- Darine, S., Makram, S., y Albert, V. (2016). *Biodegradation and toxicity of vegetable oils in contaminated aquatic*. Recuperado el 18 de Octubre de 2016 de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969715312936>
- Ecopreneur. (2016). Flotación por aire disuelto “D.A.F.” Recuperado el 16 de

Noviembre de 2016 de <http://ecopreneur.com.ar/services-view/flotacion-por-aire-disuelto-d-a-f/>

Fedapal. (2015). Exportaciones de aceite de Palma. Recuperado el 20 de Noviembre de 2016 de <http://fedapal.com/web/>

Googlemaps. (s.f). Ubicación del área de estudio. Recuperado el 13 de Octubre de 2016 de https://www.google.com.ec/maps?q=danec&ion=1&espv=2&bav=on.2,or.r_cp.&bvm=bv.148747831,d.eWE&biw=1366&bih=662&dpr=1&um=1&ie=UTF-8&sa=X&ved=0ahUKEwjnipTLI8DSAhXLRyYKHR60Dx8Q_AUICCgD

Guerrero, C. (2011). Remoción De Detergentes De Aguas Residuales Textiles Empleando Hongos Seleccionados Obtenidos a Partir De Efluentes De Industria Textil Y Evaluación De Su Tolerancia a Metales Pesados a Nivel De Laboratorio. Quito, Ecuador: Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. Recuperado el 15 de Octubre de 2016 de <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/4949>

Guevara, A., De la Torre, E., y Manangon, E. (2011). Electrocoagulación aplicada al tratamiento de efluentes generados por empresas de mantenimiento de motores. Recuperado el 20 de Septiembre de 2016 de <http://revistas.ustatunja.edu.co/index.php/ingeniomagno/article/view/40>

Gutiérrez, H., y De la Vara, R. (2013). Análisis y Diseño de Experimentos (3.^a ed.). México, DF., México: Mc Graw Hill.

He Z., Lan H., Gong W., Liu R., Gao Y., Liu H., y Qu J. (2016). *Coagulation behaviors of aluminum salts towards fluoride: Significance of aluminum speciation and transformation*. Recuperado el 22 de

Noviembre de 2016 de
<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S138358661630017X>

H2oworld. (2016). Contaminación del agua por detergentes. Recuperado el 16 de Octubre de 2016 de <http://www.h2oworld.co/contaminacion-del-agua-por-detergentes/>

Hashwa, F., y Mhanna, E. (2008). *Aerobic and Anaerobic Biotreatment of Olive Oil Mill Wastewater in Lebanon*. Recuperado el 13 de Noviembre de 2016 de https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-540-74492-4_16

Il'in, V. (2008). *Improving electroflotation in coke-industry wastewater treatment*. Recuperado el 13 de Noviembre de 2016 de <http://doi.org/10.3103/S1068364X08010080>

INEC. (2013). Censo de Información Ambiental Económica en Gobiernos Autónomos Descentralizados Municipales 2013. Recuperado el 12 de Octubre de 2016 de http://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Encuestas_Ambientales/EMPRESAS/Empresas_2013/Informacion_Ambiental_Economica_en_Empresas_2013.pdf

Innovamide. (2010). Análisis de varianza de un factor: El procedimiento ANOVA de un factor. Recuperado el 20 de Noviembre de 2016 de http://www.uv.es/innomide/spss/SPSS/SPSS_0702b.pdf

Maksimov, E., y Polla, M. (2016). *Prospective systems and technologies for the treatment of wastewater containing oil substances*. Recuperado el 15 de Noviembre de 2016 de <http://doi.org/10.1007/s10098-015-1003-0>

Maldonado, A., y Molina, R. (2011). Estudio para la reducción de colorantes de las aguas residuales de la industria textil a través de procesos

electroquímicos. Recuperado el 12 de Octubre del 2016 de <http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/1508/13/UPS-CT002191.pdf>

Ministerio del Ambiente. (2015). Acuerdo Ministerial 028. Recueprado el 15 de Octubre de 2016 de <http://extwprlegs1.fao.org/docs/pdf/ecu155123.pdf>

Mijaylova N., Moehler, G., Ramirez E., Cardaso L., (2002). *Characterization and dewaterability of raw and stabilized sludge using different treatment methods*. Recuperado el 6 de Octubre de 2016 de <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12479461>

Pattusamy, V., Nandini, N., y Bheemappa, K. (2013). *Detergent and sewage phosphates entering into lake ecosystem and its impact on aquatic environment*. Recuperado el 20 de Octubre de 2016 de http://www.journalijar.com/uploads/2013-05-25_115556_927.pdf

Pintor, A., Vilar, V., Botelho, C., y Boaventura, R. (2016). *Oil and grease removal from wastewaters: Sorption treatment as an alternative to state-of-the-art technologies*. Recuperado el 20 de Noviembre de 2016 de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1385894716303850>

Proecuador. (2015). Alimentos frescos y procesados. Recuperado el 10 de Noviembre de 2016 de <http://www.proecuador.gob.ec/sector1-4/>

Robayo, L., y Gaona, C. (2012). Propuesta de Optimzacion de la Remocion de Grasas y Aceites en el Sistema de Tratamiento de Agua Residual Industrial de un Campo Petrolero en San Martin, Meta. Recuperado el 15 de Octubre de 2016 de <http://repositorio.uis.edu.co/jspui/bitstream/123456789/7526/2/144141.pdf>

Salas, G. (2003). Proceso de flotación por aire disuelto en el tratamiento del

agua residual de bombeo en la industria de harina de pescado. Recuperado el 20 de Noviembre de 2016 de <http://revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe/index.php/quim/article/view/4494>

Sedashova, O. (2000). *An electroflotation method and plant for removing oil products from effluents. In Chemical and Petroleum Engineering.* Recuperado el 16 de Octubre de 2016 de https://www.researchgate.net/publication/245007520_An_electroflotation_method_and_plant_for_removing_oil_products_from_effluents

Soberanis, M., Domínguez, M., Gonzáles, C., Prieto, F., Guevara, A., y García, J. (2011). Revisión de variables de diseño y condiciones de operación en la electrocoagulación. Recuperado el 12 de Noiembre de 2016 de <http://www.scielo.org.mx/pdf/rmiq/v10n2/v10n2a10.pdf>

Unatsabar. (2003). Especificaciones Técnicas para el diseño de Tanques Sépticos. Recuperado el 20 de Noviembre del 2016 de <http://www.ingenieroambiental.com/4014/viii.pdf>

ANEXOS

ABREVIATURAS

NTU = Nephelometric Turbidity Unit

gal = galones

nm = nanómetros

µm = micrómetros

mg/l = miligramo / litro

mg = miligramo

mm = milímetros

l = litro

g = gramo

ml = mililitro

rpm = revoluciones por minuto

min = minutos

H₂SO₄ = Ácido sulfúrico

HCl = Ácido Clorhídrico

Na₂SO₄ = Sulfato de sodio

Na (OH) = Hidróxido de sodio

PCA = Policloruro de Aluminio

FeCl₃ = Cloruro férrico

Anexo 1

*Tabla 28.
Límites de descarga a un cuerpo de agua dulce.*

| Parámetros | Expresado como | Unidad | Límite máximo permisible |
|-------------------------------------|-------------------------------|-------------------|--------------------------------|
| Aceites y grasas | Sust. Solubles en hexano | mg/l | 30,0 |
| Alkil mercurio | | mg/l | No detectable |
| Aluminio | Al | mg/l | 5.0 |
| Arsénico total | As | mg/l | 0.1 |
| Bario | Ba | mg/l | 2.0 |
| Boro | B | mg/l | 2.0 |
| Cadmio | Cd | mg/l | 0.02 |
| Cianuro total | CN | mg/l | 0.1 |
| Cinc | Zn | mg/l | 5.0 |
| Cloro Activo | Cl | mg/l | 0.5 |
| Cloroformo | Ext. Carbón Cloroformo ECC | mg/l | 0.1 |
| Cloruros | Cl | mg/l | 1000 |
| Cobre | Cu | mg/l | 1.0 |
| Cobalto | Co | mg/l | 0.5 |
| Coliformes fecales | NMP | NMP/100ml | 10000 |
| Color real | Color real | Unidades de color | Inapreciable en dilución: 1/20 |
| Compuestos fenólicos | Fenol | mg/l | 0.2 |
| Cromo hexavalente | Cr ⁺⁶ | mg/l | 0.5 |
| Demanda Química de Oxígeno (5 días) | DBO ₅ | mg/l | 100 |
| Demanda Química de Oxígeno | DQO | mg/l | 200 |
| Estaño | Sn | mg/l | 5.0 |
| Fluoruros | F | mg/l | 5.0 |
| Fósforo Total | P | mg/l | 10.0 |
| Hierro total | Fe | mg/l | 10.0 |

| | | | |
|--------------------------|-------------------------------|------|-------------------------|
| Hidrocarburos Totales de | | | |
| Petróleo | TPH | mg/l | 20.0 |
| Manganeso total | Mn | mg/l | 2.0 |
| Materia flotante | Visible | | Ausencia |
| Mercurio total | Hg | mg/l | 0.005 |
| Níquel | Ni | mg/l | 2.0 |
| Nitrógeno amoniacal | N | mg/l | 30.0 |
| Nitrógeno Total Kjeldahl | N | mg/l | 50.0 |
| Compuestos | Organoclorados | | |
| Organoclorados | totales | mg/l | 0.05 |
| Compuestos | Organofosforados | | |
| Organofosforados | totales | mg/l | 0.1 |
| Plata | Ag | mg/l | 0.1 |
| Plomo | Pb | mg/l | 0.2 |
| Potencial de hidrógeno | pH | | 6 - 9 |
| Selenio | Se | mg/l | 0.1 |
| Sólidos Suspendidos | | | |
| Totales | SST | mg/l | 130 |
| Sólidos totales | ST | mg/l | 1600 |
| Sulfatos | SO ₄ ⁻² | mg/l | 1000 |
| Sulfuros | S ⁻² | mg/l | 0.5 |
| Temperatura | °C | | Condición natural (+-3) |
| Tensoactivos | Activas al azul de metileno | mg/l | 0.5 |
| Tetracloruro de carbono | Tetracloruro de carbono | mg/l | 1.0 |

Anexo 2

Toma de muestras



Anexo 3

Medición de la temperatura en el agua residual



Anexo 4

Equipos utilizados en el laboratorio



Turbidimeter de Hanna Instruments



Bloque Digestor



Espectrofotómetro

Anexo 5

Informe de análisis de aceites y grasas del agua residual



LABORATORIO ANALÍTICO AMBIENTAL
AGUA - EFLUENTES INDUSTRIALES

INFORME DE RESULTADOS

INF.LASA 27-09-16-1854
ORDEN DE TRABAJO No. 0028698-16

SOLICITADO POR: EDISON HUGO ACOSTA IZA
DIRECCIÓN: LA ARMENIA
TELÉFONO/FAX: 0998328525
TIPO DE MUESTRA: AGUA
PROCEDENCIA: DANEC
IDENTIFICACIÓN: AGUA RESIDUAL

FECHA DE RECEPCIÓN: 19/09/2016
FECHA DE ANÁLISIS: 19/09-27/09/2016
FECHA DE ENTREGA: 27/09/2016
NÚMERO DE MUESTRAS: UNA (1)
MUESTREO POR: SOLICITANTE
CÓD. DE MUESTRA: 12888-16

REPORTE DE ANÁLISIS FÍSICO - QUÍMICO

| ITEM | PARÁMETROS | UNIDADES | MUESTRA | MÉTODO DE ENSAYO |
|------|------------------|----------|----------|-------------------------------|
| 1 | ACEITES Y GRASAS | mg/l | 10447,80 | PEE-LASA-FQ-15 APHA 5520 B |


Dr. Marco Gujano Ruales.
GERENTE DE LABORATORIO

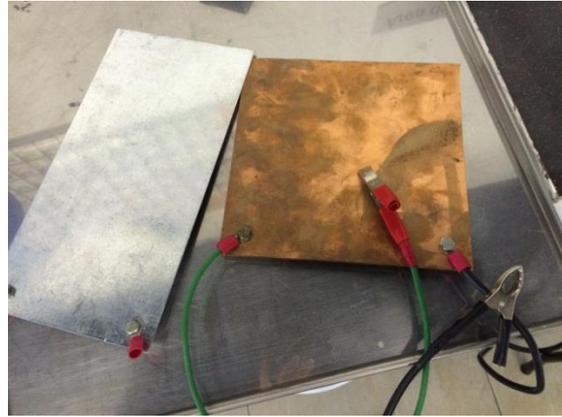
LASA se responsabiliza exclusivamente de los análisis, el resultado se refiere únicamente a la muestra recibida en el laboratorio.
Las incógnitas de los resultados para los ensayos se encuentran disponibles en los registros de Laboratorio LASA.
Prohibida su reproducción parcial o total por cualquier medio sin permiso por escrito del Laboratorio.

Anexo 6

Materiales usados en la experimentación de electroflotación



Regulador de voltaje



Placa de zinc y cobre

Anexo 7

Coagulante y floculante químico



Policloruro de Aluminio



Poliacrilamida aniónica

