

**EVALUACIÓN TÉCNICA DE LA UTILIZACIÓN DE FLOTACIÓN CON
MICROBURBUJAS PARA SEPARACIÓN DE EMULSIONES ACEITE-AGUA**

**CINDY TATIANA LOBO SIERRA
JEFFERSON JOSE SILVA RODRIGUEZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUIMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
BUCARAMANGA**

2013

**EVALUACIÓN TÉCNICA DE LA UTILIZACIÓN DE FLOTACIÓN CON
MICROBURBUJAS PARA SEPARACIÓN DE EMULSIONES ACEITE-AGUA**

**CINDY TATIANA LOBO SIERRA
JEFFERSON JOSE SILVA RODRIGUEZ**

**Trabajo de grado realizado para obtener el título
de Ingeniero(a) Metalúrgico(a)**

**Director:
M.Sc. CUSTODIO VÁSQUEZ QUINTERO**

**Codirectores:
ING. CARLOS AUGUSTO MEJÍA MIRANDA
ING. ENRIQUE ANAYA LEGUIZAMÓN**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUIMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
BUCARAMANGA**

2013

AGRADECIMIENTOS

Como autores del presente trabajo queremos expresar nuestros más sinceros agradecimientos:

A la Universidad Industrial de Santander y a la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales por brindarnos su apoyo durante el transcurso de nuestra carrera.

A nuestro director MsC. Custodio Vásquez, a ese gran profesor y ser humano, por sus orientaciones y recomendaciones, agradecemos su disposición y colaboración a lo largo de todo el proceso de formación que hizo parte de este proyecto.

A nuestro codirector de proyecto Ing. Carlos Augusto Mejía Miranda por su apoyo y orientación durante el desarrollo de ésta investigación, por creer en nuestras capacidades y depositar su entera confianza en nosotros, porque más que nuestro guía fue nuestro amigo y nos brindó lo máximo posible de sus conocimientos y experiencia para la culminación de esta meta; a él, le agradecemos todo su tiempo, dedicación e incondicionalidad, deseándole un próspero futuro en su carrera profesional y miles de bendiciones.

A los miembros y al Grupo de Investigación en Corrosión GIC por permitirnos la utilización de los equipos necesarios y las instalaciones del edificio y al Grupo de Investigación en Minerales y Biohidrometalurgia y Ambiente GIMBA, por su colaboración en el desarrollo de este proyecto.

A la empresa Palmas del Cesar S.A quienes nos suministraron las muestras de aceite de palma para la realización de este proyecto.

A Dios porque ha estado conmigo en cada paso
que doy, dándome fortaleza para continuar:
A mi madre quien ha sido la mujer más maravillosa,
que ha dedicado su vida entera a hacer de mí
una mujer íntegra y con valores morales,
quien me ha llenado de amor y me ha comprendido,
¡Gracias a tu esfuerzo Mamá! hoy logré este gran sueño
A mi padre que desde el cielo, baja todos los días
y me lleva de la mano sin dejarme caer:
A mi hermano quien ha sido mi compañía y mi amigo:
A Yesid por su cariño, apoyo y compañía:
A mi familia por su gran amor y ayuda:
A mis amigos por ser mis cómplices:
*Es por todos ellos que soy lo que soy ahora, les doy gracias por estar
en mi vida y acompañarme a lograr todos mis propósitos.*

Cindy Lobo

A Dios, por darme la oportunidad de vivir, crecer, por llenarme de fortaleza y sabiduría para lograr este triunfo y ser mi guía incondicional durante toda mi existencia.

A mi mamá Nubia, por enseñarme que debo salir adelante a pesar de todos los obstáculos y darme el ejemplo de su carisma trabajador, entregándome su amor y comprensión.

A mi padre Rafael, por el apoyo económico, por inculcarme el valor de la exigencia y la responsabilidad, por el valor mostrado para salir adelante.

Gracias por todo papá y mamá por darme una carrera para mi futuro

A mis hermanos Rafa y Nanda por estar conmigo, por apoyarme y siempre creer en mí.

A mi tía Bertha, por el cariño que me brindó cada día, por la confianza, por aguantarme, pero ante todo por el apoyo que recibí cada día.

A mis padrinos Martín y Pola, y Moncho por el apoyo, por los buenos consejos, por creer en mí y brindarme su confianza.

A mi nona y a mi abuela, por creer en mí todo este tiempo, por su cariño y apoyo

A mis tíos, primos y demás familiares por estar conmigo y apoyarme siempre.

A mis amigos por todos los buenos momentos, las experiencias vividas y todos los recuerdos que llevo gravados, porque de cada uno aprendí

Son muchas las personas especiales en mi vida a las que me gustaría agradecer su amistad, apoyo, motivación y compañía en esta etapa que hoy culmino. Sin importar dónde estén o si alguna vez llegan a leer estas dedicatorias, quiero darle las gracias por formar parte de mí, por todo lo que me han brindado y por cada enseñanza que dejaron en mi memoria.

Jefferson Silva

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	17
1. DESCRIPCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	18
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	18
1.2 OBJETIVOS	19
1.2.1 Objetivo general	19
1.2.2 Objetivos específicos	19
2. MARCO TEORICO	20
2.1 PROCESO DE EXTRACCIÓN DE ACEITE DE PALMA	20
2.1.1 Recepción de fruto	21
2.1.2 Esterilización	21
2.1.3 Desfrutamiento	22
2.1.4 Digestión	22
2.1.5 Prensado	22
2.1.6 Clarificación	23
2.1.7 Secado	23
2.1.8 Almacenamiento	23
2.1.9 Deslodado	23
2.2 GENERACIÓN DE AGUAS RESIDUALES	24
2.3 EMULSIONES	25
2.3.1 Tipos de emulsión y distribución de tamaños	26
2.3.2 Emulsionación	28
2.3.3 Ultra-turrax	28
2.4 FLOTACIÓN COLUMNAR	29

2.4.1 Etapas del proceso de flotación	30
2.4.2 Forma de la celda columna	30
2.4.3 Aireación de la celda	30
2.5 DENSIDAD	31
2.6. PARÁMETROS DE LA NORMA AMBIENTAL VIGENTE PARA EL VERTIMIENTO DE EFLUENTES EN FUENTES HÍDRICAS	31
3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	33
3.1 ETAPA 1: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	34
3.2 ETAPA 2: CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE FLOTACIÓN COLUMNAR	34
3.3 ETAPA 3: PREPARACIÓN DE EMULSIONES	37
3.4 ETAPA 4: ENSAYOS EXPERIMENTALES	38
3.5 ETAPA 5: ANÁLISIS DE RESULTADOS	38
3.6 ETAPA 6: ELABORACIÓN DEL INFORME FINAL	39
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS	40
4.1 CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA	40
4.2 VOLÚMEN DE AIRE	42
4.3 PRESIÓN DE AIRE	42
4.4 TAMAÑO DE BURBUJA	43
4.4.1 Movimiento de una burbuja de aire en un fluido	43
4.5 PREPARACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LAS EMULSIONES	47
4.5.1 Medición de la densidad	48
4.6 ESTANDARIZACIÓN DEL SISTEMA DE FLOTACIÓN	50
4.7 MODELO CINÉTICO	53
4.8 MODELO ESTADÍSTICO	57
4.9 COMPARACIÓN DE LOS MODELOS	62
5. CONCLUSIONES	64

6. RECOMENDACIONES	65
BIBLIOGRAFÍA	70
ANEXOS	75

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Proceso de extracción de aceite de palma	21
Figura 2. tipos de emulsión con fase acuosa y aceitosa.	26
Figura 3. Distribución de tamaño de gotas en función de la velocidad de agitación y de la tensión interfacial.	27
Figura 4. Máquina de dispersión ultra turrax	29
Figura 5. Diagrama de flujo de la metodología para el desarrollo del proyecto	33
Figura 6. Diseño de la celda de flotación columnar.	35
Figura 7. Bomba de agua sumergible modificada	36
Figura 8. Zona de limpieza y zona de colección en la columna.	37
Figura 9. Bomba centrífuga convencional	41
Figura 10. Bomba centrífuga modificada	41
Figura 11. Fotografía de las microburbujas a menor presión de aire en el sistema.	46
Figura 12. Fotografía de las microburbujas a mayor presión de aire en el sistema.	46
Figura 13. Picnómetro	49
Figura 14. Porcentaje de remoción para emulsión 1,5% de concentración para cada tamaño de burbuja.	51
Figura 15. Porcentaje de remoción a menor presión de aire en el sistema.	52
Figura 16. Seguimiento de la eficiencia durante el proceso de remoción	53
Figura 17. Ecuación cinética de primer orden	55
Figura 18. Ecuación cinética de segundo orden	56
Figura 19. Porcentaje de remoción calculados experimentalmente y según modelo cinético.	57
Figura 20. Linealización del modelo estadístico	62
Figura 21. Comparación del modelo cinético y estadístico	62

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Efluentes obtenidos en las diferentes etapas del proceso de extracción de aceite de palma	24
Tabla 2. Normas de vertimiento de aguas residuales	32
Tabla 3. Cálculo del radio de las burbujas para volumen de aire introducido de 38.2 cm ³ con presión de 8,81lb-f	45
Tabla 4. Cálculo del radio de las burbujas para volumen de aire introducido de 49 cm ³ con una presión de 11.01 lb-f	46
Tabla 5. Muestras de emulsiones para el proceso de flotación columnar.	48
Tabla 6. Densidad de las emulsiones y aceite de palma virgen	49
Tabla 7. Comparación del modelo cinético de primer y segundo orden	56
Tabla 8. Regresión múltiple- % remoción	58
Tabla 9. Análisis de la variación	58
Tabla 10. Resultados del modelo	60
Tabla 11. Comparación del modelo cinético y estadístico	63
Tabla 12. Porcentaje de error para el modelo cinético y estadístico	63

RESUMEN

TITULO: EVALUACIÓN TÉCNICA DE LA UTILIZACIÓN DE FLOTACIÓN CON MICROBURBUJAS PARA SEPARACIÓN DE EMULSIONES ACEITE-AGUA.*

AUTORES: LOBO SIERRA CINDY TATIANA
SILVA RODRÍGUEZ JEFFERSON JOSÉ**

PALABRAS CLAVE: Flotación Columnar, Microburbujas, Aceite de Palma, Efluentes Industriales, Emulsiones aceite-agua.

Para países tropicales como Colombia, el cultivo de palma se ha convertido en una actividad estratégica tanto económica como social, por esta razón el mejoramiento de los procesos es de gran importancia y tienen un impacto significativo para las regiones productoras.

Es de gran interés en el estudio de los procesos relacionados con limpieza de aguas residuales, que busquen un balance entre protección del medio ambiente y recuperación del material. En el proceso de extracción de aceite de palma se generan efluentes acuosos con alto contenido de aceite y sólidos dispersos.

Entre las alternativas de recuperación del aceite emulsionado, la flotación por microburbujas sin adición de compuestos químicos, siendo esta una alternativa para el tratamiento de efluentes en comparación con los procesos de flotación convencionales.

En este proyecto se plantea la evaluación de un sistema de flotación utilizando la inducción de micro burbujas de aire con el fin de mejorar el arrastre de las gotas de aceite y la posterior floculación, utilizando aceite de palma virgen para realizar las diferentes emulsiones que simulen las aguas residuales provenientes de la etapa de clarificación.

Con los resultados de este proyecto se evaluó la influencia de variables del proceso y las propiedades de la solución sobre la eficiencia en la remoción de aceite, con el fin de dar cumplimiento a la normatividad legal del vertimiento de efluentes en diferentes cuerpos de agua.

* Proyecto de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico- Químicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales.

Director. MsC. Custodio Vásquez Quintero Coodirector: Ing. Carlos Augusto Mejía Miranda

ABSTRACT

TITLE: TECHNICAL EVALUATION OF THE USE OF MICROBUBBLES FLOTATION FOR SEPARATION OF OIL-WATER EMULSION.*

AUTORS: LOBO SIERRA CINDY TATIANA
SILVA RODRÍGUEZ JEFFERSON JOSÉ**

KEYWORDS: Flotation Cells, Microbubbles, Palm Oil, Industrial Effluents, Oil-Water Emulsion.

In tropical countries like Colombia, palm cultivation has become in a strategic activity both economic like social, for this reason the improvement of the process is of great value and have an significant impact in all the producer regions.

Is very important the study of the processes related with wastewater cleaning, pursue a balance between enviroment protection and the mineral recovery. In the process of palm oil extraction are generated aqueous effluents with a high oil content and solids dispersed.

Among recovery alternatives of the emulsified oil, the microbubble flotation without any addition of chemical compounds, being this an alternative of the effluents treatment in comparison with the conventional flotation process.

In this research work presents the evaluation of a flotation system using the induction of air microbubbles in order to improve the entrainment of the oil droplets and subsequent flocculation, using this virgin palm oil to do the differents emulsions to simulate the wastewater from the clarification stage.

With the results obtained in the present work were evaluated the influence of the process variables and the properties of the solution on the efficiency in the oil removal, in order to meet the legal standards about effluents dumping.

* Project of degree.

** Faculty Physicochemical Engineering, School of Metallurgical Engineering and Materials Science.
Poject Director: MsC. Custodio Vásquez Quinter Co- director: Ing. Carlos Augusto Mejía Miranda

INTRODUCCIÓN

Para los países tropicales como Colombia, el cultivo de palma y la posterior extracción de aceite refinado se han convertido en actividades estratégicas económicas y sociales. Colombia ha aumentado el porcentaje de cultivos de palma en los últimos años, por lo cual es considerado el quinto productor a nivel mundial y el primero en América Latina. [20] Por ser una actividad estratégica para el país las investigaciones realizadas en todos los campos del sector, para el mejoramiento de procesos, tienen un impacto significativo sobre el desarrollo económico y social de las regiones productoras.

Es de gran interés el estudio de los procesos relacionados con limpieza de aguas residuales industriales que busquen un balance entre protección del medio ambiente y recuperación de material. La flotación por aire es un proceso de separación físico para el tratamiento de aguas industriales que remueve grasas, aceites y sólidos suspendidos. Aunque hay diferentes métodos de flotación, su aplicación está sujeta a numerosas limitaciones operacionales y económicas. En este proyecto se ha diseñado un sistema para el tratamiento de aguas residuales producto de la clarificación de aceite de palma. Un diseño de flotación por aire inducido, que produce finas burbujas (generalmente aire) las cuales se adhieren a las partículas contaminantes (aceites) presentes en la fase líquida y forman aglomerados con una densidad aparente menor a la de la fluido dispersable. La fuerza de empuje generada hace que las partículas suban a la superficie donde pueden ser removidas con facilidad.

Este proyecto estudia la eficiencia de remoción del aceite de aguas residuales utilizando un proceso de flotación con microburbujas con el fin de dar cumplimiento a la normatividad legal del vertimiento.

1. DESCRIPCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En el proceso de extracción de aceite de palma se generan efluentes acuosos con alto contenido de aceites y sólidos dispersos. Los procesos tradicionalmente utilizados para la reducción de la carga contaminante, tales como: sedimentación, floculación química, electro-coagulación y adsorción, no presentan resultados enteramente satisfactorios, al ser costosos económicamente y con bajos porcentajes de recuperación. Para la industria de la palma el adecuado procesamiento de estos efluentes, representa un beneficio económico, teniendo en cuenta el costo adicional de la venta del aceite recuperado, que en algunos casos, es superior al 20% en peso en el efluente contaminado [34].

En síntesis, los retos relacionados con el procesamiento de efluentes contaminados de la industria del aceite vegetal impactan significativamente dos aspectos importantes de las sostenibilidad industrial. Un valor económico derivado de la recuperación del aceite y un impacto ambiental al reducir la carga contaminante de los efluentes. Entre las alternativas de recuperación de aceite emulsionado, la flotación sin adición de compuestos químicos, es una alternativa promisoriosa para el tratamiento de estos efluentes. En este proyecto se plantea la evaluación de un sistema de flotación utilizando microburbujas de aire, con el fin de mejorar el arrastre de las gotas de aceite y la posterior floculación. Entre las actividades propuestas se contempla la construcción de un sistema de generación y evaluación del proceso de flotación. Con los resultados de este proyecto se pretende evaluar la influencia de variables del proceso y las propiedades de la solución sobre la eficiencia en la remoción de aceite.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo general

Evaluar el efecto de los parámetros operacionales y las propiedades fisicoquímicas de las emulsiones, en la eficiencia de la remoción de aceite de efluentes acuosos de la industria del aceite de palma.

1.2.2 Objetivos específicos

- Construir un sistema de generación de microburbujas para la flotación columnar de aceite de palma en agua.
- Evaluar el impacto de las condiciones operacionales del sistema de flotación y las propiedades fisicoquímicas de la emulsión en la eficiencia de separación de aceite de palma de corrientes de procesamiento.
- Determinar correlaciones experimentales para establecer condiciones de operación adecuadas para diferentes tipos de efluentes contaminados.

2. MARCO TEORICO

Los procesos para el tratamiento de aguas, se basan en la eliminación de los contaminantes, ya sean grasas, aceites o sólidos en suspensión, hasta alcanzar los valores máximos permisibles de acuerdo a las normas y a los estándares nacionales e internacionales. La diversidad de contaminantes que se pueden presentar en las aguas residuales y el número de procesos propuestos para su tratamiento, son muy diversos en cuanto a sus requerimientos técnicos y aplicabilidad específica. Una clasificación amplia en la que se puede agrupar los procesos de tratamientos, es aquella que está de acuerdo al tipo de fenómeno asociado:

- Físico
- Químico
- Bioquímico
- Físico-químico
- Enzimático

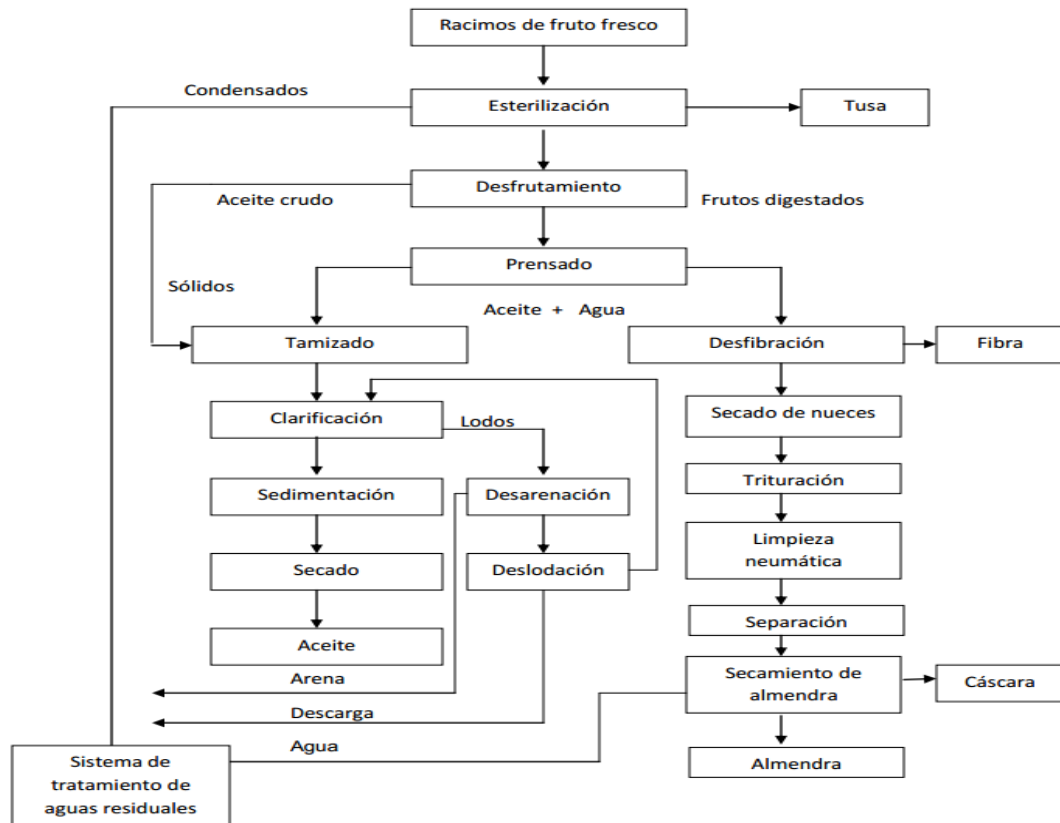
De los cuales serán de nuestro interés los fenómenos físicos, químicos y físico-químicos. Para el caso particular de este estudio se investigará sobre el proceso de flotación de aire inducido (micro burbujas inducidas) para la remoción de aceite en aguas residuales del proceso de extracción de aceite de palma.

2.1 PROCESO DE EXTRACCIÓN DE ACEITE DE PALMA

Dependiendo de los productos que se deseen originar a partir del procesamiento industrial del fruto de la palma, existen diferentes métodos para la extracción del aceite.

El proceso de extracción de aceite de palma, se lleva a cabo mediante una serie de etapas, Figura 1.

Figura 1. Proceso de extracción de aceite de palma



Fuente: Fedepalma 2007, anuario estadístico 2007. La agroindustria de la palma de aceite en Colombia y el mundo, p 133 [4]

2.1.1 Recepción de fruto

Al llegar a la planta de beneficio, el fruto es pesado y se lleva a cabo un control para evaluar la calidad del fruto. Los racimos son descargados en plataformas de recibo y mediante un sistema de tolvas se alimentan las vagonetas. Para luego ser trasladados por medio de rieles a la zona de esterilización.

2.1.2 Esterilización

El fruto es ingresado a autoclaves, es esterilizado por medio de vapor de agua saturada a presiones relativamente bajas durante 90 minutos aumentando y

disminuyendo la presión. Este proceso acelera el ablandamiento de los frutos y facilita la separación de los frutos, la extracción del aceite, el desprendimiento de la almendra y la inactivación de enzimas degradadoras del aceite. Los condensados, es decir los primeros efluentes contienen aceite, impurezas y materia orgánica, que generalmente son conducidos a tanques florentinos, donde se hace una recuperación del aceite.

2.1.3 Desfrutamiento

El desprendimiento de los frutos de la tusa es realizado mediante un proceso mecánico en el tambor desfrutador. El fruto se transporta por tornillos sinfines o elevadores a los digestores. Las tusas son llevadas por medio de bandas transportadoras y se recolectan para disponerlas en los cultivos, donde se inicia su descomposición y la incorporación de sus elementos al suelo.

2.1.4 Digestión

La digestión es el proceso de liberación del fruto de la palma a través de la ruptura o desintegración de las células oleaginosas. Los frutos son macerados hasta formar una masa homogénea blanda, luego, se extrae el aceite mediante prensas que separan la torta (fibra, cuesco y nueces) del aceite crudo.

2.1.5 Prensado

La extracción del aceite se obtiene mediante el proceso de prensado, el cual sirve para separar los componentes de la pulpa (aceite y fibra), el compuesto aceitoso pasa por bombeo al proceso de decantación y clarificación. La torta pasa a la desfibración para separar las nueces que son secadas en un silo y son llevadas a la palmistería. La fibra es usada como combustible de las

calderas que generan el vapor de agua que necesita la planta.

2.1.6 Clarificación

Separación estática o dinámica de fases por diferencias de densidades. La separación puede hacerse por sistemas estáticos en tanques circulares verticales, en tanques cuadrangulares horizontales o también puede hacerse con sistemas dinámicos como centrifugas “decanter”. Luego el aceite que es clarificado pasa a tanques de sedimentación, donde las partículas pesadas se van decantando por reposo. Así se separa de la mezcla lodosa que pasa a las centrifugas desludadoras.

2.1.7 Secado

El aceite es secado para disminuir su humedad, esto se hace mediante calentamiento en un tanque o por sistema de secamiento atmosférico o al vacío.

2.1.8 Almacenamiento

Luego de realizar los respectivos controles de calidad en el laboratorio, el aceite es llevado a tanques de almacenamiento para luego ser llevado a industrias procesadoras.

2.1.9 Desludado

Las aguas aceitosas son tamizadas y pasan por centrifugas desludadoras para recuperar el aceite y separar las aguas efluentes. Estas aguas pasan a las piscinas de desaceitado para continuar con el sistema de tratamiento de aguas

residuales. El aceite es recuperado y entra nuevamente al proceso en la etapa de clarificación. [1]

El destino de los efluentes generados en cada una de las etapas de extracción del aceite de palma se presenta en la Tabla 1. Se evidencia la generación de efluentes que deben ser tratados para dar cumplimiento a la normativa ambiental establecida.

Tabla 1. Efluentes obtenidos en las diferentes etapas del proceso de extracción de aceite de palma

Etapas del proceso	Efluente	Destino del efluente
Recepción	Impureza de la fruta	Plantaciones, como abono
Esterilizado	Líquidos	Tratamientos de aguas (lagunas)
Desfrutado	Raquis vacía	Plantaciones, como control de malezas
	Líquidos	Tratamiento de aguas (lagunas)
Extracción	Líquidos	Tratamiento de aguas (lagunas)
clarificación	Aguas y lodos residuales	Tratamiento de aguas (lagunas)

Fuente: Estrategia ambiental en el manejo de efluentes en la extracción de aceite de palma, Donomie María y Reyes María [2].

2.2 GENERACIÓN DE AGUAS RESIDUALES

Las aguas residuales se producen durante el proceso de extracción del aceite de palma en las etapas de esterilización, clarificación y palmisteria. Otras aguas provienen también del mantenimiento y limpieza de los equipos.

En los casos de los condensados de vapor, estos contienen aceite y sólidos de diferentes formas y materia orgánica. Las aguas aceitosas que provienen de la clarificación pasan por centrifugas deslodadoras para poder recuperar el aceite, y el efluente, junto con el de la esterilización pasan por unas trampas de grasas o tanques denominados florentinos. El efluente que sale de aquí es el principal vertimiento de la planta de beneficio.

En el caso de las plantas de beneficio que tienen hidrociclones se produce otro vertimiento con menor carga orgánica. De aquí en adelante, el efluente pasa por un sistema de tratamiento, conformado por lagunas anaerobias (acidogénica y metanogénica), lagunas facultativas para remover cargas orgánicas y sólidos suspendidos. Una vez cumplido el ciclo de tratamiento, los efluentes son usados para riego de las plantaciones o se descargan en los sistemas de drenaje natural. De las lagunas se extraen los lodos que son utilizados como abonos orgánicos en las plantaciones por sus contenidos nutricionales. [3]

2.3 EMULSIONES

Definición: Una emulsión es un sistema que contiene dos fases líquidas inmiscibles, una de las cuales está dispersa en la otra y cuya estructura es estabilizada por un agente surfactante llamado emulsionante. [13]

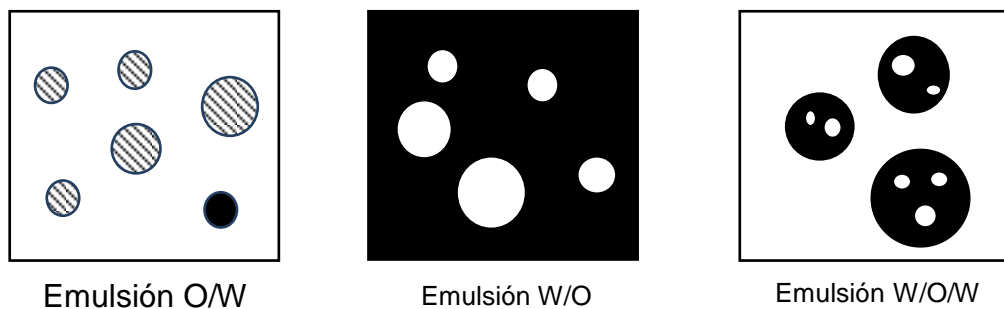
La noción de estabilidad es por supuesto relativa, pero se refiere a una casi ausencia de cambio durante un periodo de tiempo suficientemente largo para el propósito de la aplicación práctica, lo cual puede variar de algunos minutos a largos periodos de tiempo.

Los efluentes que se generan de las empresas productoras de aceite de palma, tiene la particularidad de encontrarse algunas veces en emulsión, en dos formas, una de ellas, la emulsión agua/aceite donde la fase dispersa es el agua y la continua es el aceite. La segunda es la emulsión aceite/agua donde la fase dispersa es el aceite y el agua la fase continua. Las cantidades relativas de fase dispersa y de fase continua influyen notablemente sobre las propiedades. Debajo de un 20% de fase dispersa se habla de una emulsión de bajo contenido de fase interna. Esta última es el tipo de emulsión en la que se encuentra clasificados los efluentes de estudio de este proyecto. En estas emulsiones se puede considerar que hay poca interacción de las gotas entre sí, lo que le permite modelar ciertos comportamientos.

2.3.1 Tipos de emulsión y distribución de tamaños

En muchos casos cuando se hace una emulsión con dos líquidos inmiscibles, uno de los líquidos es una fase acuosa y el otro una fase aceite u orgánica, se usarán las abreviaturas W (water) y O (oil) para dichas fases. Como se observa en la Figura 2, si la emulsión contiene gotas de aceite (O) dispersables en agua (W), se le llamará emulsión O/W, la emulsión normal para todas las aplicaciones con excepción de la industria del petróleo, en la cual se denomina emulsión inversa. Si la fase dispersable es el agua, se llama una emulsión W/O.

Figura 2. Tipos de emulsión con fase acuosa y aceitosa.



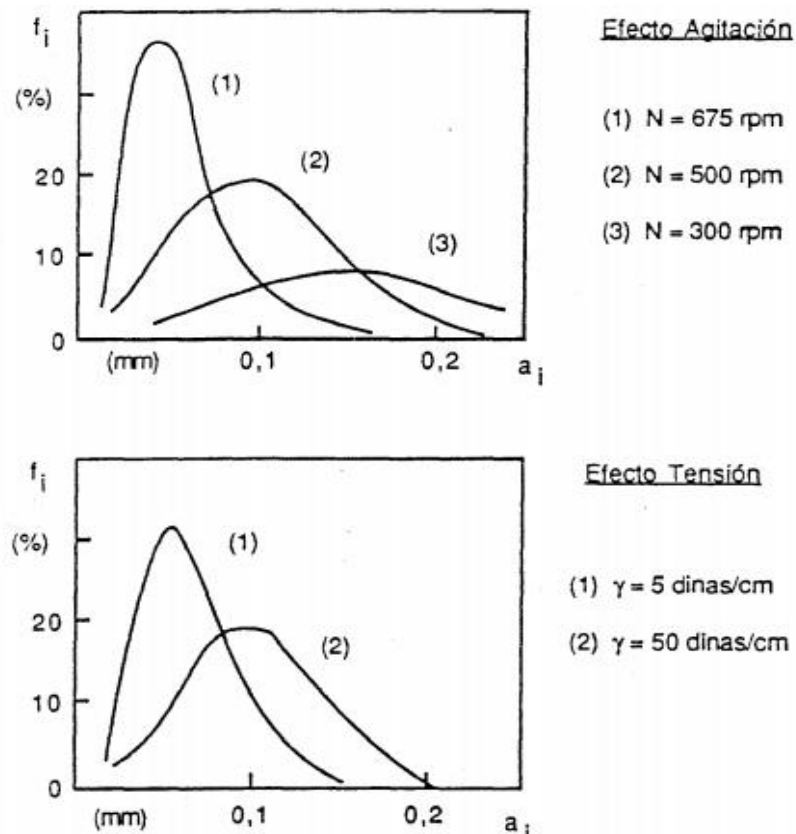
Fuente: Emulsiones, propiedades y formulación [5].

Pueden existir casos más complejos. Por ejemplo, si las gotas de aceite de una emulsión O/W contienen en su interior pequeñas gotas de agua, se dice que se tiene una emulsión múltiple tipo W/O/W. Las emulsiones múltiples se encuentran en forma espontánea. Las emulsiones múltiples no pueden definirse con la concentración de ambas fases o por diseño en varias aplicaciones. Hay que especificar el contenido de fases internas en los tipos de gotas.

En las emulsiones ordinarias se hablar de diámetro promedio de las gotas. Sin embargo las propiedades de la emulsión, en particular su viscosidad, no dependen solo del diámetro promedio y la única forma de describir la geometría de una emulsión es por su distribución de tamaño de gotas.

La experiencia muestra que si la emulsión ha sido producida por un proceso de agitación único, su distribución de tamaño de gotas se aproxima a una ley normal o log-normal, lo cual se representa en la siguiente figura.

Figura 3. Distribución de tamaño de gotas en función de la velocidad de agitación y de la tensión interfacial.



Fuente: Emulsiones, propiedades y formulación [5]

Los diferentes casos indicados en la figura ilustran las tendencias generales. Cuando la agitación aumenta o cuando la tensión interfacial disminuye, o

cuando la viscosidad de la fase dispersa disminuye:

1. La distribución se desplaza hacia más pequeños diámetros: los diámetros medios disminuyen. Se habla de los diámetros medios ya que existen varias formas de calcular una media.
2. La distribución se torna más angosta. Se dice que su polidispersidad disminuye y que tiende a ser más monodispersa.
3. La distribución se torna más asimétrica, pasando típicamente del caso de una ley normal a una ley log-normal. En general las emulsiones finas poseen una distribución log-normal y por tal razón es una gráfica especial para representarlas. [5]

2.3.2 Emulsión

Una emulsión se obtiene mediante un proceso llamado emulsión, el cual consiste generalmente en agitar una mezcla agua/aceite/surfactante con un artefacto mecánico que genere turbulencia. El resultado de la operación depende de la naturaleza de los componentes, y las proporciones de las fases, así como también la forma según se lleva a cabo la emulsión. [5]

2.3.3 Ultra-Turrax

Para preparar emulsiones estables de aceite/agua es importante generar turbulencias que dispersen las partículas de aceite, el artefacto mecánico utilizado es una máquina de dispersión de alto rendimiento llamado ultra-turrax. Es un agitador de rotor-estator, el estator de la máquina está montado en el tubo del eje y es capaz de procesar medios con una viscosidad alta, las posiciones de agitación de la máquina en el fluido puede ser en posición diagonal desde arriba o vertical fuera del centro. [6]

Figura 4. Máquina de dispersión Ultra Turrax



Fuente: Ultra-turrax janke & kunkel Disponible en Línea [<http://www.ikaproces.com.es/Products/Batch-disperser-dispersing-machine-cph-13/ULTRA-TURRAX-UTC-csb-UTC/>][6]

2.4 FLOTACIÓN COLUMNAR

El proceso de flotación tuvo sus inicios en el procesamiento de minerales y se usó por largo tiempo en separadores líquido -sólido aplicando espumas estables para la recuperación de las partículas de mineral.

Hoy en día, la flotación en columna es particularmente atractiva para aplicaciones que implican múltiples etapas de limpieza en celdas convencionales. Los mismos principios de fisicoquímica de superficie que se aplica a flotación en celdas convencionales son válidos para la flotación en celda-columna, siendo la cinética de flotación mucho más rápida en esta última; de esa manera las partículas hidrofóbicas son adheridas a las burbujas, las cuales ascienden y son removidas como concentrado.

En la flotación inducida, se aprovecha la capacidad que tienen ciertas partículas sólidas o líquidas para unirse a burbujas de gas (generalmente, aire) y formar conjuntos partícula-gas menos densos que el líquido que constituye la fase dispersa. La resultante de las fuerzas (gravedad, empuje de Arquímedes, fuerza de resistencia) conduce a un desplazamiento ascendente de los conjuntos partícula-gas que se concentran en la superficie libre del líquido. [3]

2.4.1 Etapas del proceso de flotación

- Generación y distribución de microburbujas en el agua por tratar
- Colisión entre las microburbujas y las partículas suspendidas en el agua
- Contacto interfacial del sistema partícula/burbuja
- Arrastre de otras partículas que se encuentran en la trayectoria de las gotas que ya se han formado y están ascendiendo
- Ascenso del aglomerado de partículas aceite/burbuja a la superficie donde debe removerse. [7]

2.4.2 Forma de la celda columna

Se caracteriza por su forma rectangular, cuadrada o cilíndrica con una baja relación diámetro/altura.

2.4.3 Aireación de la celda

El sistema de inyección de aire es la parte fundamental de la celda y se realiza mediante inyectores internos o externos que buscan mejorar la producción del enjambre de burbujas y el tamaño de las mismas, El sistema consiste en la disolución de aire en agua alimentados convenientemente a una cámara pequeña que genera una diferencia de presión; a presiones que fluctúan entre 60 a 70 PSI, También es importante el burbujeador, un mezclador estático para disponerse fuera de la columna formando microburbujas que van desde 1000 a 600 micras.

2.5 DENSIDAD

Es una magnitud escalar referida a la cantidad de masa contenida en un determinado volumen de una sustancia, para este tipo de fluido, la densidad media es la razón entra la masa de un cuerpo y el volumen que ocupa. Entonces:

$$\rho = \frac{m}{v} \text{ en } \frac{Kg}{m^3} \quad \text{Ecuación 1.}$$

La densidad se puede calcular mediante un picnómetro o botella de gravedad específica, es un frasco con un cierre sellado de vidrio que dispone de un tapón provisto de un finísimo capilar, de tal manera que puede obtenerse un volumen con gran precisión y así calcular la densidad del fluido. [33]

2.6. PARÁMETROS DE LA NORMA AMBIENTAL VIGENTE PARA EL VERTIMIENTO DE EFLUENTES EN FUENTES HÍDRICAS

Según el decreto 1594 establecido en junio 26 de 1984 por la República de Colombia que habla sobre las normas de vertimiento de aguas residuales industriales y domésticas, el artículo 72 demanda que todo vertimiento a un cuerpo de agua deberá cumplir, con las siguientes normas [35]:

Tabla 2. Normas de vertimiento de aguas residuales

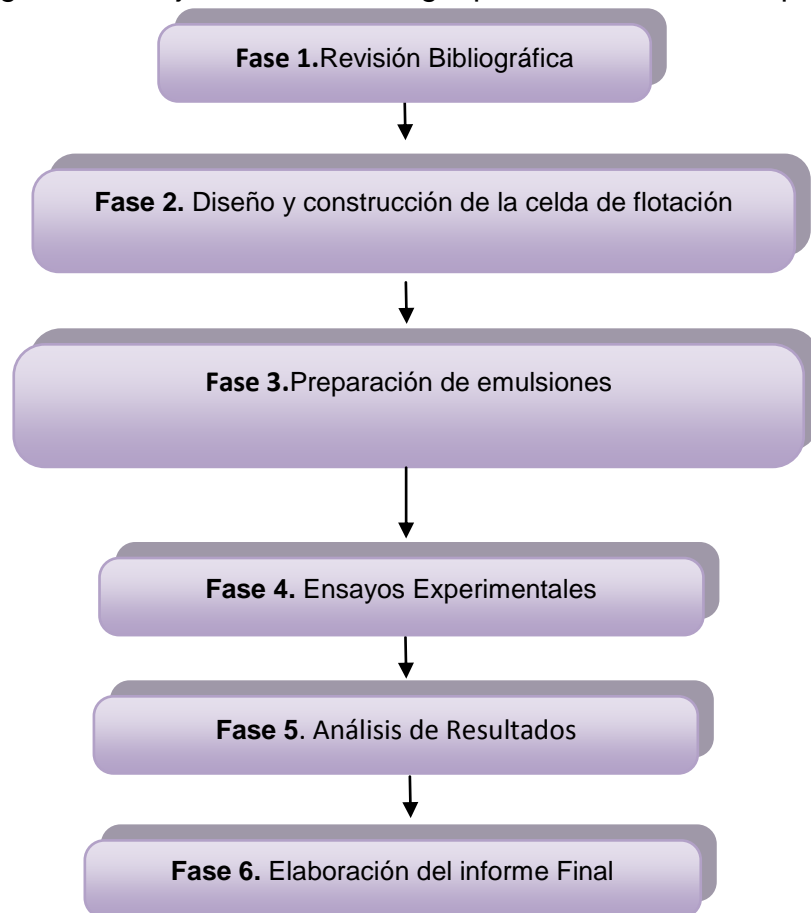
Referencia	Usuario Existente	Usuario Nuevo
pH	5 a 9 unidades	5 a 9 unidades
Temperatura	<40°C	<40°C
Material flotante	Ausente	Ausente
Grasas y aceites	Remoción >80% en carga	Remoción >80% en carga
Sólidos suspendidos domésticos o industriales	Remoción >50% en carga	Remoción >80% en carga
<i>Demanda bioquímica de oxígeno:</i>		
Para desechos domésticos	Remoción >30% en carga	Remoción >80% en carga
Para desechos industriales	Remoción >20% en carga	Remoción >80% en carga

Fuente: Decreto 1594 establecido en junio 26 de 1984 por la República de Colombia [35]

3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

El presente estudio tiene como finalidad realizar el diseño y construcción de una celda de flotación y la preparación de emulsiones aceite/agua (aceite de palma) con el propósito de evaluar la técnica de flotación columnar con microburbujas como una alternativa en la limpieza de efluentes de aceite de palma. La metodología propuesta para el cumplimiento de los objetivos planteados, está conformada por las siguientes etapas y actividades.

Figura 5. Diagrama de flujo de la metodología para el desarrollo del proyecto.



Fuente: Los autores

3.1 ETAPA 1: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

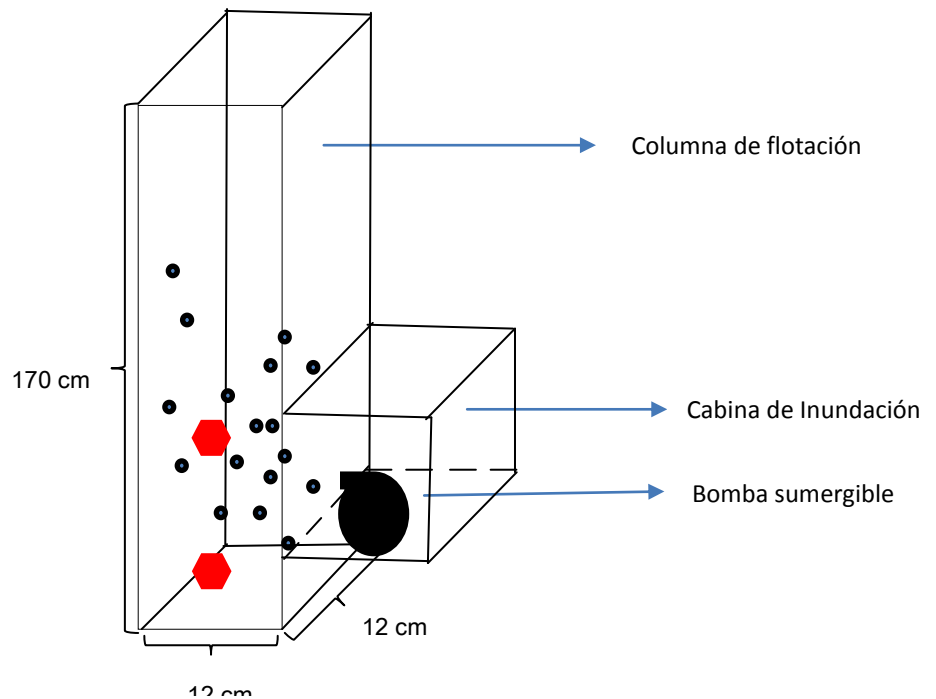
Se realizó la búsqueda y la recopilación de información acerca de los diferentes temas de investigación en libros, revistas, artículos investigativos y trabajos de grado, referentes al proceso de extracción de aceite de palma y aguas residuales, emulsiones y flotación columnar para remoción de aceite emulsionado en agua por medio de la inducción de microburbujas.

Con la documentación encontrada se realizó una lectura y posterior análisis sobre los diferentes aspectos relevantes, generalidades y características del proceso; esto con el fin de realizar un óptimo desempeño durante el proceso de desarrollo de la presente investigación y de afianzar los conocimientos necesarios respecto a los temas a tratar.

3.2 ETAPA 2: CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE FLOTACIÓN COLUMNAR

Después de realizar la respectiva revisión bibliográfica se dio paso a diseñar la celda de flotación columnar, teniendo en cuenta que la investigación se llevaría a cabo a escala de laboratorio.

Figura 6. Diseño de la celda de flotación columnar.



Fuente: Los Autores

Se fabricó una celda-columna rectangular de acrílico (plástico de ingeniería polimetilmetacrilato, conocido por sus siglas PMMA), el cual es capaz de soportar largos periodos de tiempo a la intemperie sin que haya ningún tipo de degradación debido a las emulsiones de trabajo. Además de su buena resistencia se escogió este material por la transparencia que posee, ya que, permite observar las características físicas y llevar un mejor seguimiento visual del proceso de flotación. Las dimensiones de la columna son 12 cm de ancho x 12 cm de profundo x 170 cm de alto y espesor de pared de 5 mm. Se instalaron dos válvulas una a 10 cm y la otra a 40 cm del suelo en la cara frontal de la columna para desagüe y facilidad de limpieza de la misma.

Para el mecanismo de generación de microburbujas se utilizó una bomba de agua sumergible modificada, un esquema general del funcionamiento de la bomba se presenta en la figura 7.

Figura 7. Bomba de agua sumergible modificada



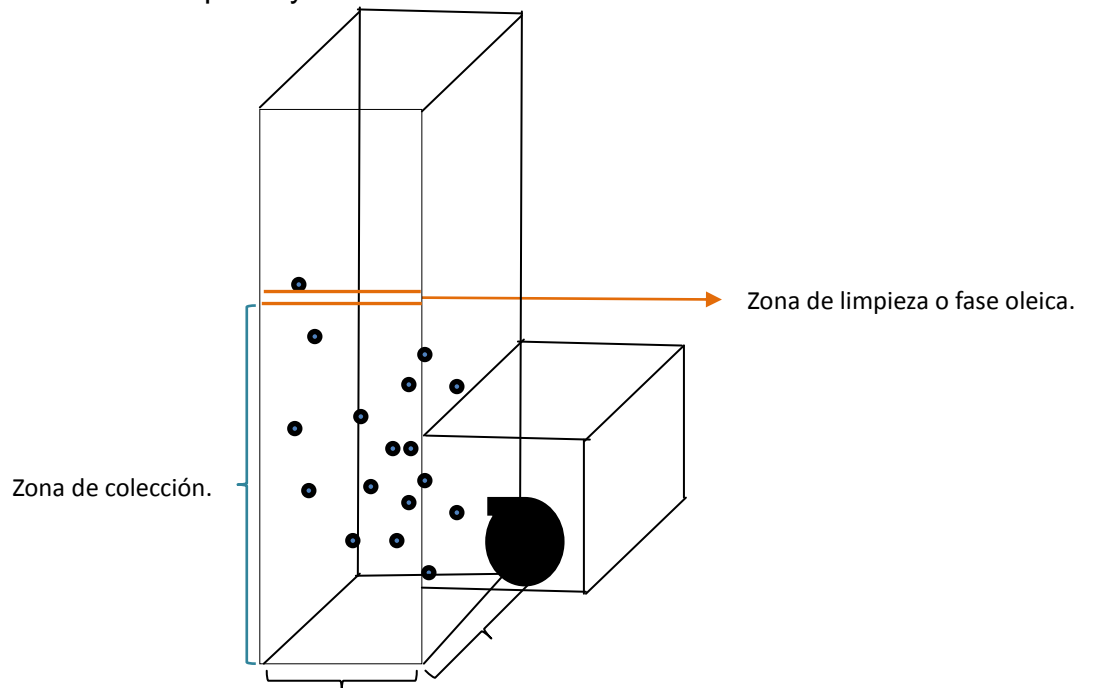
Fuente: Los Autores

Se adaptó una bomba sumergible modelo SP-5200 con voltaje 100-120/220-240 V, frecuencia de 50/60 Hz, potencia de 60 W, cabeza total de 3.2 m y un rendimiento de 2800L/H, a una altura de 45 cm al lado derecho de la columna en una cabina inundada con entrada y salida de agua, con una modificación de inyección de aire por medio de una manguera (diámetro =3 milímetros) en la zona interna de bombeo (cámara centrífuga), por la diferencia de presión en esta zona el aire es absorbido desde el exterior de la columna, controlándose el flujo de aire mediante un regulador al final de la manguera, de esta manera se generan las microburbujas, siendo controlado su tamaño por el flujo de aire introducido al sistema de bombeo. El montaje se realizó para una capacidad de trabajo de 12 litros de volumen por emulsión. Una vez se logró construir el sistema de flotación columnar se dio paso a la ubicación de las diferentes zonas básicas como son la zona de colección o de fase oleica y la zona de limpieza.

La zona de colección es la región que se extiende hacia la parte superior de la columna, desde el sistema de bombeo y generación de microburbujas hasta la zona de limpieza.

La zona de limpieza comprende el volumen en donde se concentra la mayor cantidad de aceite que constantemente está siendo arrastrada por las microburbujas de aire inyectadas al sistema, ver Figura 8.

Figura 8. Zona de limpieza y zona de colección en la columna.



Fuente: Los Autores.

3.3 ETAPA 3: PREPARACIÓN DE EMULSIONES

Se prepararon emulsiones con concentraciones similares a las encontradas en las aguas residuales provenientes de la etapa de clarificación en el proceso de extracción de aceite de palma, las cuales varían desde 0.2% hasta un máximo de 1.55 aproximadamente. Para esto se utilizó un aceite virgen de palma de densidad calculada a temperatura ambiente (25°C) de 0,8787.

Para lograr la estabilidad en las emulsiones preparadas el medio de agitación debe generar gran turbulencia para dispersar las partículas de aceite. Se utilizó una ultra-turrax janke & kunkel ultra-turrax t50 mixer / homogenizer type t50 s1 con un rango de velocidad [13500 a 20000] rpm. Para cada emulsión se usaron 12 litros de agua, con tiempo de agitación de 12 minutos, siguiendo una relación de 1:1 litro a minuto.

3.4 ETAPA 4: ENSAYOS EXPERIMENTALES

El desarrollo de esta etapa se realizó para cada una de las emulsiones anteriormente preparadas.

El proceso de separación mediante el sistema de flotación columnar construido, se trabajó con un tiempo total del ensayo 4 horas, tomándose dos muestras de 40 mL cada 30 minutos dando un total de 16 muestras analizadas por cada emulsión. Este proceso se llevó a cabo a temperatura ambiente (25°C).

Para cuantificar la cantidad de aceite presente en cada muestra extraída se realizó la evaporación de agua en la emulsión en un rango de temperatura de 110-120° C en una plancha de calentamiento. Mediante este proceso se logró hacer el seguimiento a la eficiencia de remoción de aceite en agua por el sistema construido.

3.5 ETAPA 5: ANÁLISIS DE RESULTADOS

En esta etapa se realizó el análisis correspondiente a los diferentes ensayos experimentales y la interpretación de los resultados obtenidos.

3.6 ETAPA 6: ELABORACIÓN DEL INFORME FINAL

La etapa final del proyecto investigativo se enfocó en la redacción y corrección del informe escrito y la elaboración del soporte audiovisual para la sustentación del presente trabajo.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

El desarrollo de este trabajo se enfocó en la construcción y el estudio de la técnica de flotación columnar por microburbujas para el rompimiento de emulsiones, desestabilizándolas y así acelerar el proceso de separación de aceite para cumplir las normas ambientales de vertimiento de aguas residuales.

4.1 CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA

Para la realización de las pruebas, se construyó una celda de flotación rectangular de acrílico (plástico de ingeniería polimetilmetacrilato), que permite el seguimiento visual del proceso de separación, con una capacidad de trabajo de 12 litros de emulsión por cada prueba, además de esto se adecuaron dos válvulas en la cara frontal para facilitar el vaciado y limpieza de la celda.

Las bombas centrífugas convencionales tienen el sistema de inyección de aire acoplado a un costado de la tubería de paso de agua, generando grandes turbulencias en el centro del impulsor o de la cámara centrífuga. Este tipo de sistemas necesita de un ajuste de presión externo para controlar el paso de la cantidad de aire y evitar que salga una mezcla no homogénea entre agua y aire. Requiere además de un tanque de disolución presurizado, un compresor y un sistema de agua más potente por lo que a su vez requiere un alto consumo de energía y mayor contaminación auditiva debida a los equipos acoplados al sistema.

El trabajo de investigación propuso un sistema modificado que puede succionar, mezclar/disolver y alimentar el sistema de presión en un solo paso gracias a un nuevo acoplamiento de inyección de aire a la bomba y a unas modificaciones realizadas a la cámara centrífuga. Las ventajas que presenta este sistema en comparación con el sistema convencional son las siguientes:

- Este tipo de bomba modificada fácilmente mezcla y disuelve el aire en el agua.
- No se necesitan de inyectores suplementarios, mezcladores estáticos o recipientes de grandes tamaños para obtener una mezcla homogénea de aire y agua.
- Se elimina el uso de un compresor (o presión a gas) o el uso de una bomba a altas presiones.
- Debido a que se reduce el uso de diferentes equipos en el proceso, el funcionamiento se hace más sencillo y fácil de operar.

Figura 9. Bomba centrífuga convencional



Fuente: Los Autores

Figura 10. Bomba centrífuga modificada



Fuente: Los Autores

4.2 VOLUMEN DE AIRE

El regulador de flujo de aire ubicado al final de la manguera se graduó para dos posiciones, una mínima y una máxima entrada de aire, de esta forma se controló el tamaño de burbuja. Para un menor flujo de aire inyectado la burbuja generada es de menor tamaño.

El volumen de aire introducido es calculado por la diferencia de volumen en el momento en que el sistema está en reposo y luego de introducirle aire en microburbujas, el cambio de altura ocupada en la columna por el fluido es el volumen ocupado por el aire. El sistema de inyección de aire de microburbujas introdujo a la emulsión durante cada experimento un volumen constante de aire que determina un tamaño de burbuja adecuado para el estudio. Para un volumen de aire introducido de 52,44 cm³ con presión de 8,81 Lb-f el tamaño de burbuja fue de 684,234 micras, el siguiente volumen trabajado fue de 65,55 cm³ con una presión de 11.01 Lb-f produciendo una burbuja con tamaño 1522,9339 micras.

4.3 PRESIÓN DE AIRE

La presión de aire introducida para cada caso se calculó mediante el principio de Arquímedes, donde la presión ejercida por el aire es proporcional al volumen ocupado en el fluido; la variación del volumen solo se ve afectada en la altura.

$$p = \rho gh \text{ Ecuación 2.}$$

Dónde: ρ =densidad del fluido, g = gravedad y h = altura ocupada por el aire

El valor calculado de presión para la mínima entrada de aire (volumen 52,44 cm³) fue de 8,81 Lb-f y de la misma forma se calculó para la entrada máxima de aire dando una presión de 11,01 Lb-f.

4.4 TAMAÑO DE BURBUJA

Las variables operacionales determinantes en el proceso de flotación para este proyecto son: el flujo de aire, el cual determina el tamaño de burbuja, la cantidad de aceite dispersa en el agua (emulsión) y la estabilidad de la zona separada (sin turbulencia).

La determinación de los tamaños de burbuja en la columna de flotación a escala de laboratorio, se realizaron por medio de un análisis semi-empírico.

4.4.1 Movimiento de una burbuja de aire en un fluido

Consideremos una burbuja de forma esférica de radio r , que está a una profundidad x_0 . La presión del aire en el interior de la burbuja es igual a la presión debida a la columna de fluido de altura x_0 . La burbuja se expande isotérmicamente a medida que asciende. Si suponemos que el aire es un gas ideal tendremos que:

$$\rho g x * \frac{4}{3} \pi r^3 = \rho g x_0 * \frac{4}{3} \pi R^3$$

Siendo R el radio de la burbuja a la profundidad x_0 .

Supondremos que la velocidad de ascenso de la burbuja es suficientemente lenta para que el flujo sea laminar. La burbuja experimenta una fuerza de rozamiento F_r que se opone a su velocidad v . De acuerdo con la ley de Stokes.

$$F_r = 6\pi r\eta v$$

También se experimenta una fuerza de empuje E sobre la burbuja. De acuerdo al principio de Arquímedes.

$$E = \rho g \frac{4}{3} \pi r^3$$

Despreciando la masa m y el peso mg , la segunda ley de Newton se escribe:

$$E - Fr = ma = 0$$

Se supone que la burbuja permanece en estado de equilibrio, el empuje y la fuerza de rozamiento son prácticamente iguales y de sentido contrario en régimen laminar, al cabo de cierto tiempo alcanza una velocidad límite, la resultante de las fuerzas que actúan sobre dicho cuerpo es cero.

$$\rho g \frac{4}{3} \pi r^3 - 6\pi r \eta \frac{dx}{dt} = 0$$

Como el radio r de la burbuja es función de la profundidad x , la ecuación del movimiento se escribe en forma diferencial:

$$\frac{dx}{dt} + \frac{2}{9} \frac{\rho g}{\eta} \frac{x_0^{\frac{2}{3}}}{x} R^2 = 0$$

Separando variables e integrando, con la condición de que se empieza a contar el tiempo $t=0$ en el instante en el que la burbuja está a una profundidad X_0 .

$$\int_{x_0}^x x^{\frac{2}{3}} dx = - \frac{2\rho X_0^{\frac{2}{3}} R^2}{9\eta} \int_0^t dt$$

$$X^{\frac{5}{3}} = X_0^{\frac{5}{3}} - \frac{10\rho g}{27\eta} X_0^{\frac{2}{3}} R^2 t$$

Para el cálculo del tamaño de burbuja se dispuso de una columna llena de agua, las burbujas de aire se inyectan por la parte inferior. El movimiento

ascendente de las burbujas de radio muy pequeño es suficientemente lento para que sigan una trayectoria rectilínea. Otras burbujas de radio mayor empiezan a oscilar, perdiendo su forma esférica a medida que se acercan a la superficie del líquido. Calculando el tiempo de ascensión de una burbuja desde la profundidad X_0 hasta la superficie del agua, se calculó el radio de la burbuja.

$$R = \frac{\sqrt[5]{\frac{27\eta X_0^5}{10\rho g t X_0^2}}}{\sqrt[5]{\frac{27\eta X_0}{10\rho g t}}} \quad \text{Ecuación 3.}$$

La viscosidad y la densidad del agua son: $n = 0,1 \text{ Pas} \cdot m$ y $\rho = 1000 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$ respectivamente.

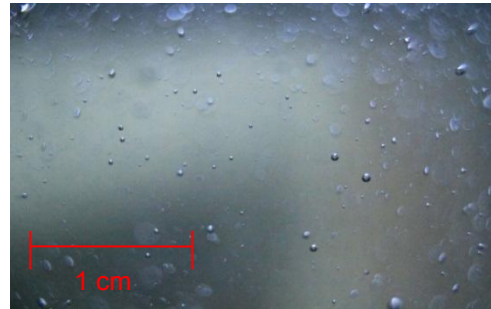
Este cálculo se realizó para cada presión de aire y varias distancias recorridas por la burbuja el tiempo que la burbuja demoraba en ascender la altura correspondiente.

Tabla 3. Cálculo del radio de las burbujas para volumen de aire introducido de 38.2 cm³ con presión de 8,81Lb-f

x [m]	t [s]	radio [m]	radio [micras]
0,115	8,43	0,000613	613,061
0,115	8,78	0,000601	600,718
0,115	9,61	0,000574	574,190
0,143	6,86	0,000758	757,835
0,175	6,95	0,000833	832,905
0,175	9,13	0,000727	726,695
promedio			684,234

Fuente: Los Autores

Figura 11. Fotografía de las microburbujas a menor presión de aire en el sistema.



Fuente: Los Autores.

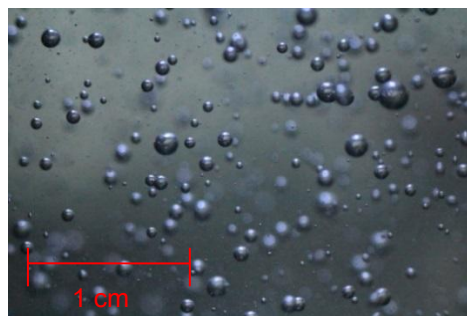
En la Figura 11. Se observa la distribución de las microburbujas con un radio de 684.234 micras en la celda de flotación en funcionamiento.

Tabla 4. Cálculo del radio de las burbujas para volumen de aire introducido de 49 cm³ con una presión de 11.01 Lb-f

x [m]	t [s]	radio [m]	radio [micras]
0,143	1,28	0,00175441	1754,412
0,143	1,58	0,00157909	1579,094
0,143	1,92	0,00143247	1432,471
0,175	2,48	0,00139432	1394,318
0,175	2,35	0,00143237	1432,365
0,175	2,02	0,00154494	1544,941
promedio			1522,933

Fuente: Los Autores.

Figura 12. Fotografía de las microburbujas a mayor presión de aire en el sistema.



Fuente: Los Autores.

En la Figura 12, se observa la distribución de las burbujas en la celda de flotación en funcionamiento con un radio aproximado de 1522,933 micras, el tamaño es más del doble que en el sistema anterior de microburbujas; claramente se puede establecer la diferencia en cuanto a los tamaños de las burbujas para las diferentes presiones de aire manejadas en el sistema.

Las imágenes fueron tomadas con una cámara *Cannon Rebel T2i*, con un lente especial para cada tamaño de burbuja: para tamaños inferiores a un milímetro (burbujas pequeñas) se usó un lente de 1855mm con un simulador macro de 7mm e ISO 6400 con velocidad de 1/2500. Para tamaños superiores a un milímetro (burbujas grandes) el lente usado fue de 55-250mm con simulador macro de 7mm e ISO 6400 con velocidad de 1/2000.

La eficiencia del proceso de flotación está condicionada principalmente por el tamaño de burbuja, el cual influye de manera directa en el proceso de colisión burbuja-gotas de aceite. Hay dos consideraciones a tener en cuenta en cuanto al efecto del tamaño de burbuja:

- Cuando el tamaño de burbuja disminuye, se incrementa el área superficial por unidad de volumen, proporcionando mayor área disponible para la adhesión de las gotas de aceite para un volumen específico.
- La hidrodinámica de la burbuja de aire predice que cuando las gotas de aceite son muy pequeñas dentro de la emulsión, nunca van a colisionar con las burbujas grandes, ya que las pequeñas son de menor masa y por lo tanto se desvían de la corriente ascendente principal para ser llevadas por otras microburbujas de aire suspendidas en el volumen de la columna.

4.5 PREPARACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LAS EMULSIONES

Para los ensayos experimentales se realizaron 3 emulsiones con aceite virgen de palma por cada concentración dando un total de 12 mezclas preparadas a

temperatura ambiente. Para cada emulsión de 12 litros el tiempo de agitación fue de 12 minutos.

Tabla 5. Muestras de Emulsiones para el proceso de flotación columnar.

Emulsión #	Concentración %	Velocidad de agitación [rpm]
1	0.2	13500
2	0.2	17000
3	0.2	20000
4	0.5	13500
5	0.5	17000
6	0.5	20000
7	1.0	13500
8	1.0	17000
9	1.0	20000
10	1.5	13500
11	1.5	17000
12	1.5	20000

Fuente: Los Autores

A mayor velocidad de agitación las emulsiones son más estables y la dispersión de las partículas de aceite es mayor, por esta razón se escogieron las emulsiones agitadas con velocidad de 20.000 [rpm] obteniéndose un total de 4 emulsiones (emulsión al 0,2%, emulsión al 0,5%, emulsión al 1,0%, y emulsión al 1,5%) y de esta manera realizar el proceso de remoción de aceite con emulsiones completamente estables a temperatura ambiente.

4.5.1 Medición de la densidad

La medición de la densidad del aceite y de las emulsiones preparadas se realizó con un picnómetro calibrado con volumen de 9,873 ml. El procedimiento seguido fue: inicialmente se midió en una balanza de precisión el valor de la masa para el picnómetro vacío. El picnómetro debía estar totalmente seco y limpio para no introducir errores, posteriormente se llenó completamente el

picnómetro con el fluido; aceite o emulsión, luego se colocó cuidadosamente la tapa del picnómetro; el fluido sobrante sale por el capilar que este posee y este residuo se secó con papel absorbente, teniendo cuidado de no extraer el fluido que hay dentro del capilar, finalmente se midió el valor de la masa del picnómetro, pero ahora lleno.

Figura13. Picnómetro



Fuente: Grupo de Investigaciones en Minerales Biohidrometalurgia y Ambiente (GIMBA)

Este proceso se realizó de igual forma para cada una de las emulsiones. Finalmente conocido el volumen del fluido y su masa se calculó la densidad para el aceite virgen y las emulsiones. Los datos calculados se encuentran en la tabla 6.

Tabla 6. Densidad de las emulsiones y aceite de palma virgen.

Fluido	Masa picnómetro vacío [gr]	Masa picnómetro con muestra [gr]	Masa muestra [gr]	Densidad del fluido [gr/ml]
Emulsión [0,2]	25,3108	34,8578	9,5470	0,9670
Emulsión [0,5]	25,3108	34,8569	9,5461	0,9669
Emulsión [1,0]	25,3110	34,8559	9,5449	0,9668
Emulsión [1,5]	25,3108	34,8421	9,5313	0,9654
Aceite virgen	25,3111	33,9867	8,6756	0,8787

Fuente: Los Autores

Para las emulsiones preparadas la cantidad de aceite dispersa es mínima lo cual, se vio reflejado en la densidad calculada, ya que esta es muy cercana a la densidad del agua ($\rho = 1,0$ [gr/ml]), a mayor cantidad de aceite en la emulsión la densidad es menor. La densidad teórica para el aceite de palma virgen es de $0,8790$ [gr/ml] [Indupalma] y la densidad calculada fue de $0,8787$ [gr/ml]. Con esto se observa que a mayor cantidad de aceite en las emulsiones la densidad se acerca a la del aceite de palma virgen y mientras se disminuye la concentración de aceite en las emulsiones la densidad es similar a la del agua.

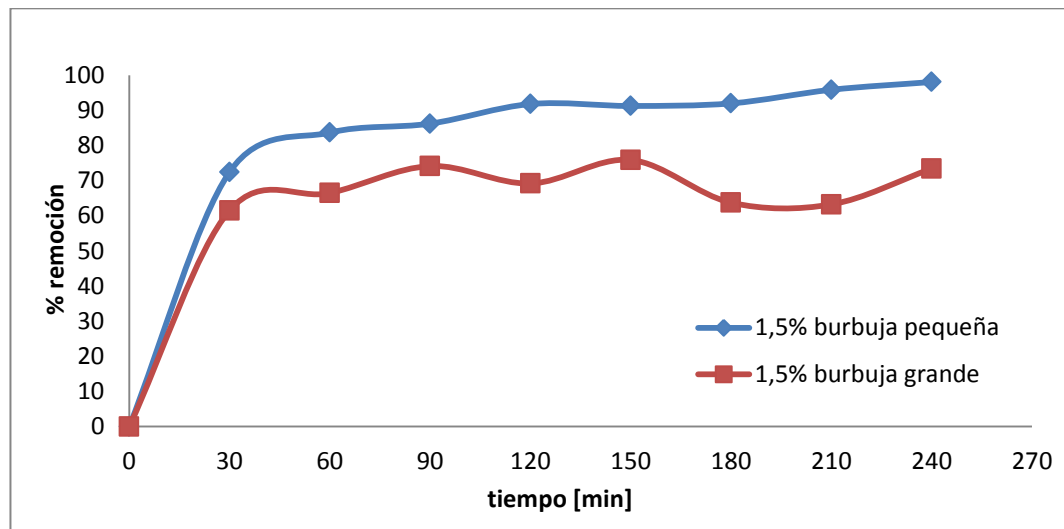
4.6 ANÁLISIS DEL SISTEMA DE FLOTACIÓN

Luego de definir y analizar los aspectos importantes en el proceso de remoción mediante el sistema planteado por la investigación. Se llevó a cabo el proceso de flotación columnar mediante microburbujas para la separación de aceite disperso en agua.

Se realizaron 8 procesos de remoción en total, la separación se llevó a cabo con los dos tamaños de burbuja establecidos inicialmente (burbujas y microburbujas) para cada emulsión preparada, tomando dos muestras de 40 ml cada 30 minutos para realizar el seguimiento a la eficiencia de remoción. Las tablas de registro de datos se observan en el anexo 1.

El efecto del tamaño de la burbuja de aire sobre la remoción de la solución acuosa, se observa en la Figura 14.

Figura 14. Porcentaje de remoción para emulsión 1,5% de concentración para cada tamaño de burbuja.



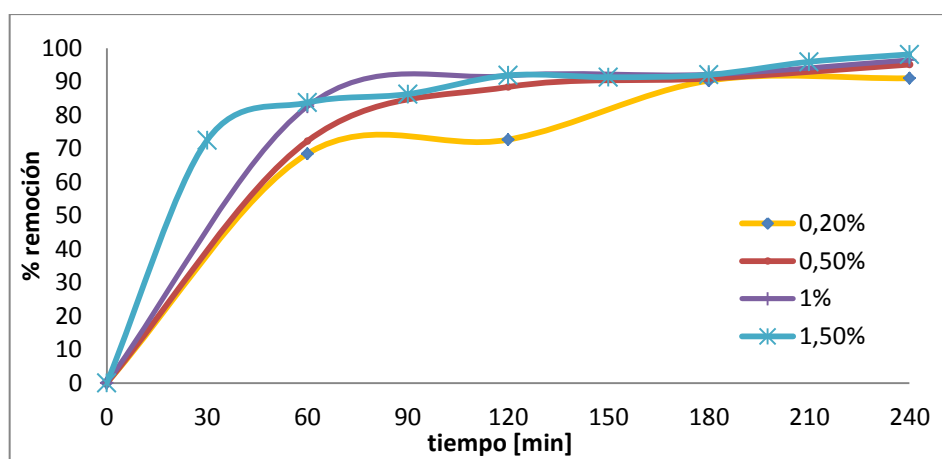
Fuente: Los Autores.

En la Figura 14, se observa el efecto del tamaño de la burbuja en la eficiencia de remoción para emulsiones con 1.5% de aceite disperso. La mayor velocidad de remoción se observa entre 0 y 30 minutos.

El porcentaje de remoción más alto se da para el sistema que trabajó con tamaños de burbuja más pequeños y el sistema muestra estabilidad durante todo el proceso, mientras que para el sistema en que hubo presencia de burbujas de mayor tamaño se observa una variación en cuanto al porcentaje de remoción, esto se debe a que en este sistema hay mayor turbulencia y en diferentes intervalos de tiempo hay procesos de re-emulsión por lo que se ve afectado en la variación de la cantidad de aceite presente en las muestras finales.

En esta gráfica se evidencian las ventajas de la utilización de flotación columnar con microburbujas, lográndose mayores porcentajes de remoción para tiempos más cortos de operación.

Figura 15. Porcentaje de remoción a menor presión de aire en el sistema.



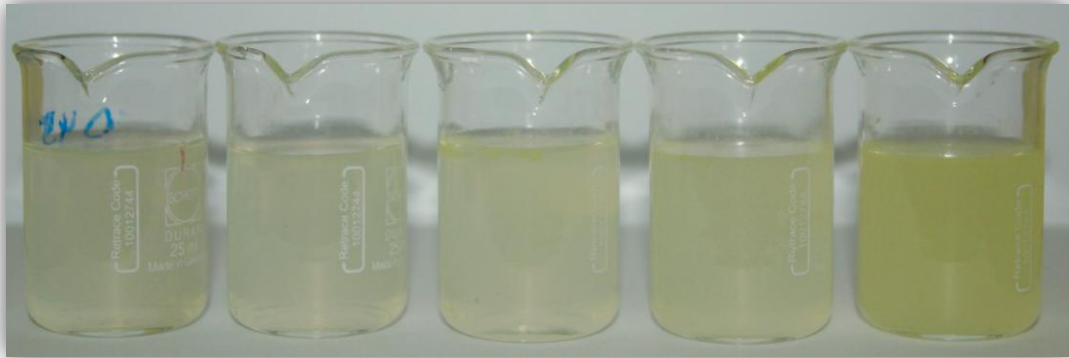
Fuente: Los Autores.

En la figura 15 se observa el efecto que tiene la concentración de las cuatro emulsiones con respecto al tiempo en la eficiencia de remoción de aceite. En el rango de tiempo entre 0 y 30 minutos se logra la mayor velocidad de remoción en todas las emulsiones, siendo mayor para la emulsión de 1.5% la cual alcanza un porcentaje de remoción a los 60 minutos de 83.72%, por lo que es válido afirmar que a mayor concentración en la emulsión el tiempo de remoción es menor.

Transcurrida una hora se observa que la eficiencia del proceso de remoción permanece estable para todas las concentraciones sin que haya algún cambio considerable.

En este caso, la eficiencia de remoción es proporcional a la concentración inicial de aceite en la emulsión.

Figura 16. Seguimiento de la eficiencia durante el proceso de remoción



Fuente: Los Autores

En la figura 16. se evidencia la remoción de aceite mediante el proceso de flotación, en los vasos de precipitados de derecha a izquierda se nota la diferencia en cuanto al porcentaje de aceite final presente en cada muestra transcurrido un tiempo de 5 horas, dando como resultado una solución limpia y con porcentajes de aceite mínimos.

4.7 MODELO CINÉTICO

Para realizar un modelo cinético al proceso de flotación columnar realizado, se supone la columna como un reactor, y la variación de la concentración en función del tiempo, dejando los demás parámetros inmersos en una constante. La cinética de flotación estudia la variación de la concentración de aceite de palma en las emulsiones de acuerdo al tiempo de flotación.

Si todas las variables operacionales permanecen constantes, la relación algebraica de esos parámetros es una ecuación de la velocidad de flotación. La evaluación de la ecuación de velocidad puede estar basada en algunas suposiciones sobre datos conocidos en el mecanismo del proceso, o más comúnmente, a través de determinaciones empíricas o por analogías con

algunos procesos similares.

La siguiente ecuación representa la cinética de flotación y puede ser expresada por una analogía de la cinética química:

$$\frac{dC}{dt} = -K * C^n \text{ Ecuación 4.}$$

Donde,

C = Concentración de la emulsión del aceite de palma

t = Tiempo de flotación

n = Orden de la reacción

K = Constante de velocidad de flotación que incluye parámetros operaciones como el tiempo de residencia de la burbuja, aireación, tamaño de burbuja y diseño de la celda, entre otros.

Esta constante puede ser determinada teniendo en cuenta 3 órdenes diferentes: ecuación de primer orden ($n=1$), ecuación de segundo orden ($n=2$) y ecuación de orden no integral.

Todos los experimentos fueron realizados en la celda de flotación columnar para los cuales se describe el desarrollo de las ecuaciones de primer y segundo orden.

Primer orden

$$\frac{dC}{dt} = -K * C$$

$$\frac{1}{C} dC = -K dt$$

$$\ln C = -Kt$$

Evaluado desde C_0 hasta C ,

$$\ln \frac{C}{C_0} = -Kt$$

$$C = e^{-Kt + \ln C_0} \text{ Ecuación 5.}$$

Segundo orden

$$\frac{dC}{dt} = -K * C^2$$

$$\frac{1}{C^2} dC = -K dt$$

$$-\frac{1}{C} = -Kt$$

Evaluado desde C_0 hasta C ,

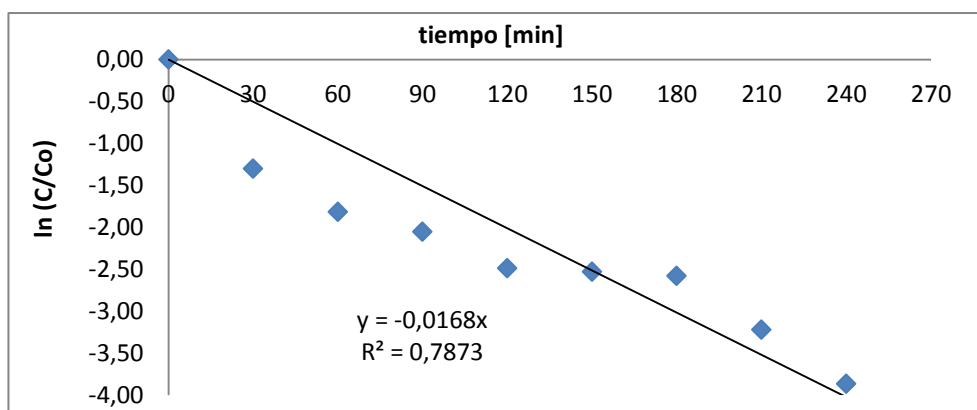
$$\frac{1}{C_0} - \frac{1}{C} = -Kt$$

$$\frac{1}{C} = Kt + \frac{1}{C_0}$$

$$\frac{1}{C} = \frac{K * t * C_0 + 1}{C_0}$$

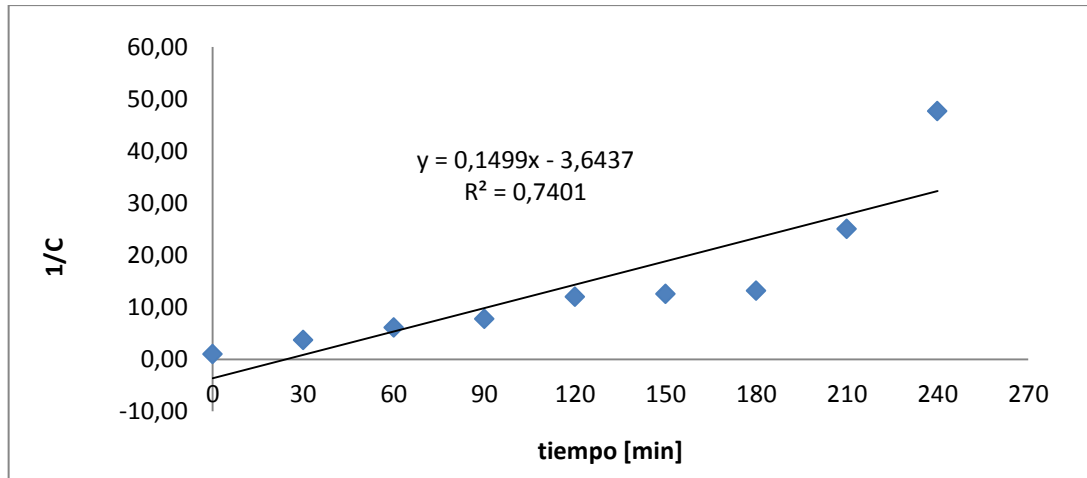
$$C = \frac{C_0}{K * t * C_0 + 1} \text{ Ecuación 6.}$$

Figura 17. Ecuación cinética de primer orden



Fuente: Los Autores.

Figura 18. Ecuación cinética de segundo orden



Fuente: Los Autores

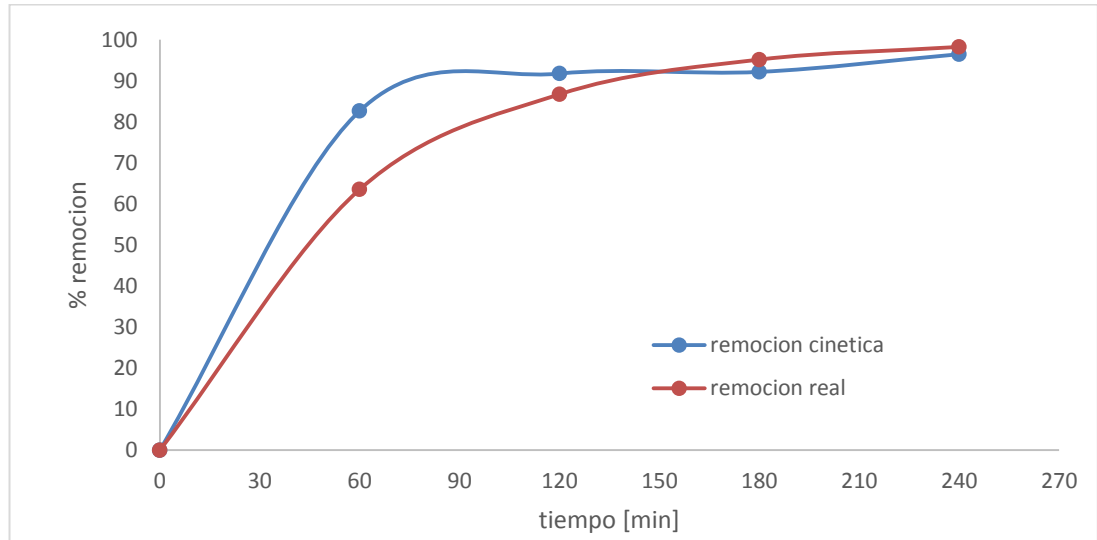
Tabla 7. Comparación del modelo cinético de primer y segundo orden

Modelo	ecuación	K	R
Cinético de primer orden	$C = e^{-Kt + \ln C_0}$	0,0129	0,8872
Cinético de segundo orden	$C = \frac{C_0}{K * t * C_0 + 1}$	2,0270	0,8391

Fuente: Los Autores

Se determinó el orden del modelo cinético para el sistema de flotación desarrollando matemáticamente las ecuaciones cinéticas tanto de primer orden como de segundo orden, llevándolas a la forma de la ecuación lineal $y = mx + b$ para generar una gráfica y así obtener el coeficiente de correlación. De acuerdo al modelo cinético desarrollado la ecuación se ajusta a una cinética de primer orden, donde se observa un coeficiente de correlación r de 0.9498.

Figura 19. Porcentaje de remoción calculados experimentalmente y según modelo cinético.



Fuente: Los Autores

Se observa en la figura 19, la comparación gráfica del modelo cinético de primer orden con los datos experimentales, el modelo generó una buena correlación con los datos para tiempos mayores a una hora, en la hora inicial del proceso la remoción experimental es mayor por la cantidad de aceite presente y la probabilidad de que las burbujas arrastren a la superficie una mayor cantidad de aceite, lo cual no está contemplado en los parámetros iniciales de proposición del modelo.

4.8 MODELO ESTADÍSTICO

A partir de las diferentes variables del sistema como lo son la concentración, el tiempo y el porcentaje de remoción, se dio paso a realizar el modelo estadístico en el programa *StatGraphic*, el cuál arrojó los diferentes modelos ajustados para encontrar un R cuadrado válido de una regresión lineal múltiple que describe la relación que hay entre las diferentes variables adoptadas en el

sistema.

A continuación se describe el proceso realizado por el programa para un número de variables dependientes e independientes del proceso.

Regresión Múltiple- % Remoción

- Variable Dependiente: % Remoción
- Variables Independientes:
 - Concentración
 - Tiempo min
 - Tiempo ²

Tabla 8. Regresión Múltiple- % Remoción

		<i>Error</i>	<i>T</i>	
<i>Parámetro</i>	<i>Estimación</i>	<i>Estándar</i>	<i>Estadístico</i>	<i>Valor- P</i>
Constante	1.36207	5.56462	0.244773	0.8121
Concentración	40.8701	88.1481	0.463653	0.6539
Tiempo min	0.981876	0.0909919	10.7908	0.0000
Tiempo ²	-0.00254629	0.000370513	-6.87232	0.0001

Fuente: Los Autores

Análisis de Variación

Tabla 9. Análisis de la variación

<i>Origen</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Df</i>	<i>Medios cuadrados</i>	<i>F-Radio</i>	<i>Valor -P</i>
Modelo	18017.8	3	6005.93	85.58	0.0000
Residual	631.631	9	70.1812		
Total (Corr.)	18649.4	12			

Fuente: Los Autores

R-cuadrado = 96.6131 porcentaje

R-cuadrado (ajustado para Df.) = 95.4842 porcentaje

Error estándar de Est. = 8.37742

Error medio estándar = 5.70677

Estadística Durbin-Watson = 2.98663 (P=0.9179)

Este resultado muestra los resultados de un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre porcentaje Remoción y 3 variables independientes. La ecuación del modelo ajustado es

$$\% \text{ Remoción} = 1,36207 + 40.8701 * \text{Concentración} + 0.981876 \\ * \text{Tiempo} - 0.00254629 * \text{Tiempo}^2$$

Dado que el valor de p en la tabla es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre las variables en el nivel de confianza del 95,0%.

El R cuadrado estadístico indica que el modelo ajustado expuesto es de 96.6131% de la variabilidad en % de remoción. El ajuste para el R cuadrado estadístico, el cual es más adecuado para la comparación de los modelos con diferentes números de variables independientes es 95.4842%.

El error estándar de la estimación muestra que la desviación estándar de los residuos fue de 8.37742.

El error medio absoluto (MAE) de 5.70677 es el valor promedio de los residuales. La estadística de Durbin-Watson (DW) comprueba los residuos para determinar si hay alguna correlación significativa basada en el orden en el cual aparece el archivo de datos. Puesto que el P-value es mayor de 0.05, no hay una indicación de una autocorrelación serial en los residuos con un nivel de confianza del 95%.

En la determinación si el modelo debe ser simplificado, poner atención que el valor más alto de P sobre las variables independientes es 0.6539 perteneciendo a la Concentración. Dado que el valor de P es mayor o igual a 0.05. Ese término no es estadísticamente significativo al 95.0% o a un nivel de confianza mayor.

Selección del modelo de regresión - % Remoción

Variable dependiente: % Remoción

Variables independientes:

- A=Concentración
- B=Tiempo
- C=Concentración*Tiempo
- D=Tiempo²
- E=Tiempo/Concentración

Número de casos completos: 13

Número de modelos ajustados: 3

Tabla 10. Resultados del modelo

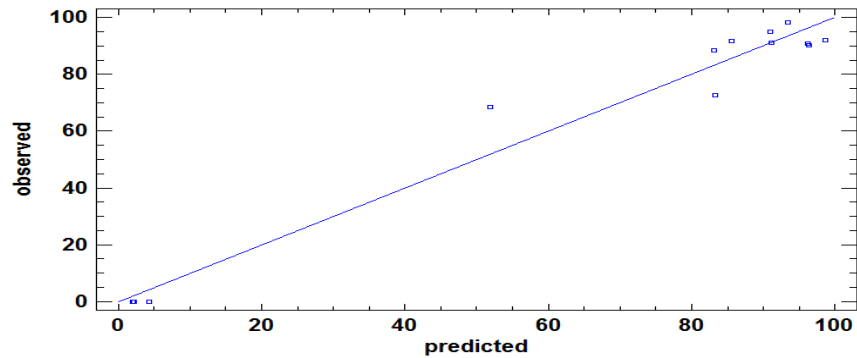
		<i>R- cuadrado</i>	<i>Variables</i>
<i>MSE</i>	<i>R-Cuadrado</i>	<i>ajustado</i>	<i>incluidas</i>
1554.12	0.0	0.0	
1554.12	8.33333	0.0	A
359.03	78.8233	76.8982	B
1151.65	32.0724	25.8972	C
800.616	52.7772	48.4842	D
1005.95	40.6661	35.2722	E
394.621	78.8401	74.6081	AB
859.075	53.9356	44.7227	AC
880.364	52.794	43.3529	AD

738.385	60.4071	52.4885	AE
392.487	78.9545	74.7454	BC
392.984	78.9278	74.7134	BE
822.741	55.8839	47.0606	CD
395.806	78.7765	74.5318	CE
824.025	55.815	46.978	DE
434.096	79.051	72.068	ABC
70.1812	96.6131	95.4842	ABD
435.478	78.9843	71.9791	ABE
812.547	60.7874	47.7166	ACD
436.96	78.9128	71.8838	ACE
793.727	61.6957	48.9276	ADE
68.1947	96.509	95.612	BCD
435.038	79.0056	72.0074	BCE
69.1141	96.6646	95.5528	BDE
109.674	94.7072	92.943	CDE
76.3912	96.7231	95.0846	ABCD
487.077	79.106	68.659	ABCE
77.739	96.6653	94.9979	ABDE

Fuente: Los Autores

Esta tabla muestra los resultados de regresión múltiple variable ajustados para describir la relación entre el % Remoción y 5 variables predichas. Los modelos han sido ajustados para que contengan todas las combinaciones de 0 a 5 variables. La estadística tabulada incluye el error medio cuadrado (MSE), el valor ajustado y el no ajustado de R cuadrado.

Figura 20. Linealización del modelo estadístico



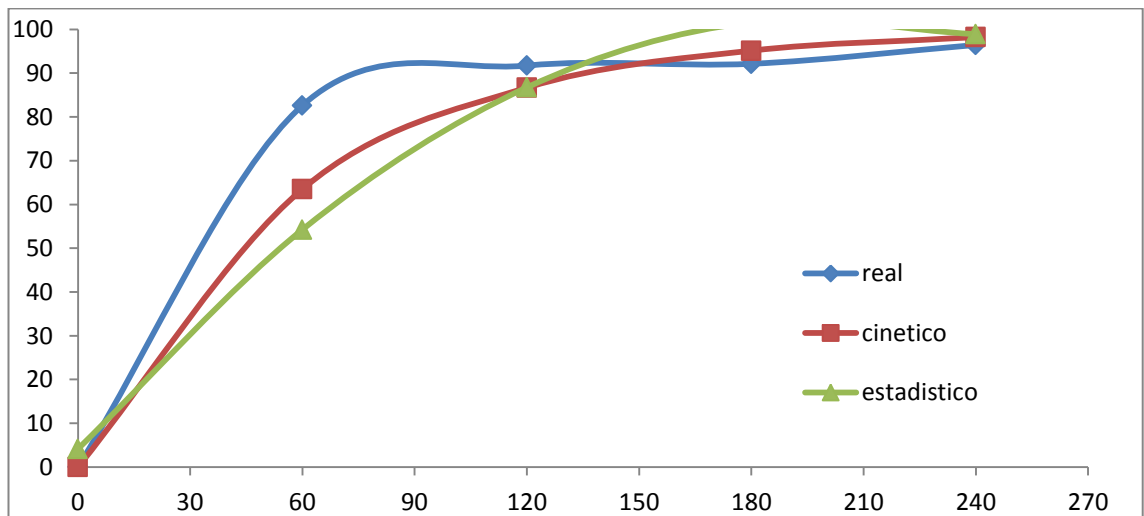
Fuente: Los Autores

La figura 20 es la gráfica obtenida del modelo estadístico el cual indica una linealización entre los datos del modelo predicho y el observado.

4.9 COMPARACIÓN DE LOS MODELOS

Finalmente teniendo la ecuación que simula el modelo estadístico del sistema se realizó una comparación entre los sistemas obtenidos a partir de los datos del porcentaje de remoción en el proceso de flotación columnar. Para probar la veracidad de los modelos, se calculó mediante la ecuación respectiva la remoción para una concentración de emulsión intermedia de 1% de aceite.

Figura 21. Comparación del modelo cinético y estadístico



Fuente: Los Autores

En la figura 21. Se comparó cada modelo con los datos experimentales de la separación columnar a una emulsión de concentración 1% de aceite, se observa una similitud con los datos experimentales a partir de 120 minutos.

Tabla 11. Comparación del modelo cinético y estadístico

TIEMPO	PORCENTAJE DE REMOCION EXPERIMENTAL	PORCENTAJE DE REMOCION CINETICA	PORCENTAJE DE REMOCION ESTADISTICA
0	0	0	4
60	83	63	54
120	92	87	87
180	92	95	102
240	96	98	99

Fuente: Los Autores

Tabla 12. Porcentaje de error para el modelo cinético y estadístico

% Error modelo cinético	% Error modelo estadístico
24,0963855	52,28470927
5,43478261	5,742685146
3,26086957	9,336611532
2,08333333	2,47464561
8,71884276	33,96773031

Fuente: Los Autores

En la tabla 12. Se presentó el porcentaje de error calculado para cada uno de los modelos, cinético y estadístico. Se observó un mayor porcentaje de error para el modelo estadístico de 33,97%, a diferencia del modelo cinético el cual presentó un porcentaje de error de 14,60%. El menor porcentaje de error del modelo cinético brinda mayor validez y se ajusta mejor al desarrollo experimental.

CONCLUSIONES

Los resultados indican que la remoción de aceite de efluentes industriales utilizando flotación con microburbujas es una alternativa viable para su aplicación a nivel industrial. Se obtuvo porcentajes de remoción superiores al 95% en tiempos de residencia inferiores a una hora.

El proceso no requiere la inyección de aditivos químicos, lo cual reduce los costos de operación y la carga química de reactivos al efluente convirtiéndolo en un proceso limpio, además, la modificación del sistema de inyección de aire propuesto en esta investigación reduce el número etapas y equipos con respecto a sistemas convencionales de separación por flotación.

La reducción de la concentración de aceite de una solución acuosa se ajustó a una reacción de primer orden, siendo la constante cinética 0,0129 y el coeficiente de correlación 0,9498. Este orden de reacción es característico de reacciones de conversión en el cual la variación de la concentración depende de un solo reactivo.

El modelo estadístico generado representa la variabilidad del sistema con un 96,61%, siendo función de la concentración y el tiempo. El error experimental y la desviación estándar del modelo propuesto fueron 33.97% y 8,3774%, respectivamente.

Parámetros estadísticos demuestran que el modelo cinético se ajusta mejor al comportamiento del proceso de flotación de aceite que el modelo estadístico. Sin embargo, se observa que el valor de los residuos entre el valor predicho y el valor real es mayor en la zona en la cual se encuentra los máximos porcentajes de separación. De esta forma, los dos modelos generan incertidumbre al momento de tomar decisiones sobre la selección de tiempos óptimos de separación.

RECOMENDACIONES

Una vez comprobado en este trabajo la efectividad del proceso de remoción de aceite para efluentes industriales por medio de flotación con microburbujas se recomienda el estudio de la factibilidad técnica y económica a escala industrial para la limpieza de efluentes generados en las etapas del proceso de extracción de aceite de palma; dado el gran problema ambiental que se presenta hoy en día por la presencia de estas sustancias en los distintos cuerpos de aguas.

Para posteriores trabajos se recomienda la utilización de sistemas continuos de microflotación que incluyan la implementación de colectores de aceite y la modificación de la geometría de la columna.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] Marcela, E. B. Estrategia para la implementación de la norma ISO 14001 en empresas de palma de aceite de la zona oriental colombiana. *Pontificia Universidad Javeriana*. (2009)
- [2] Bonomie Maria, R. M. (Estrategia ambiental en el manejo de efluentes en la extracción de aceite de palma. *Revista de Estudios Interdisciplinarios en Ciencias Sociales* , Vol 14 (3), págs 323-33. (2012).
- [3] Gómez Casallas Alexander, O. M. Proceso de tratamiento de aguas residuales . *Corporación Institucional del Petróleo*. (2010).
- [4] Fedepalma. Anuario Estadístico 2007. *La agroindustria de la palma de aceite en Colombia y en el mundo* , 133. (2007).
- [5] Emulsiones, propiedades y formulación, Cuaderno FIRP # 231. Disponible en línea [http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/FirpEmuls1_5374.pdf.]
- [6] IKA.(UltraTurrax). *Disponible en Línea*. [http://www.ikaprocess.com.es/Products/Batch-disperser-dispersing-machine-cph-13/ULTRA-TURRAX-UTC-csb-UTC/]
- [7] Azañero Ortiz, Á., Nuñez Jara, P. A., & Delgado León, E. Avances en flotación columnar. *Instituto de Investigación de la facultad de Geología, Minas y Metalurgia*, Vol 6 (11) págs 82-90. (2003).
- [8] Hernáinz , F., Calero , M., & Blásquez , G. Kinetic considerations in the flotation of phosphate ore. *Universidad de Granada*. (2004).
- [9] Rodríguez, M. Detalle del sistema de flotación por aire disuelto. *Anexo N° 5*. Disponible en línea [https://www.e-seia.cl/archivos/09e_Anexo_5.pdf].
- [10] Abzueta D., I. C., Dugarte S., M., & Serpa G., Y. *Fenómenos interfaciales; Determinación del tamaño de gota de una nano emulsión base para un protector solar en función del tiempo*. Universidad De Los Andes. (2006).
- [11] Ahmad, A., Sumathi, S., & Haamed, B. *Coagulation of residue oil and suspended solid in palm oil mill effluent by chitosan alum and PAC*. 118 -99-105: *Chemical Engineering Journal* . (2006).
- [12] Alfáro C, M. (s.f.). *Proceso de producción del aceite de palma*. Ministerio de Agricultura, Gerencia de Palma, Disponible en Línea [http://galeon.com/subproductospalma/proceso1.pdf].

- [13] Aranberri, B., Binks, J., Clint, P., & Fletcher, I. *Elaboración y caracterización de emulsiones estabilizadas por polímeros y agentes tensioactivos*. Vol 7(3): Revista Iberoamericana de Polímeros. (2006).
- [14] Castro, M. N., & Gónzales, J. P. *Determinación de la eficiencia en la separación de una dispersión aceitosa a bajas concentraciones utilizando campos electricos de alta intensidad*. Universidad De La Sabana. (2005).
- [15] Coyoy Gómez, G. E. *Evaluación del tratamiento de desechos líquidos de una planta extractora de aceite de palma africana*. Universidad de San Carlos. (1999).
- [16] Da Rosa, J., Santander, M., Souza, M., & Rubio, J. *Flotación como proceso de remoción de contaminantes III. Nuevas Técnicas y Equipos*. Universidad Federal Do Rio Grande Do Soul. (2008).
- [17] Di Scipio, S., Escalona, J., Quijada, K., & Millán, F. *Estudio del mezclado de emulsiones concentradas de aceite en agua aplicando la metodología de superficie de respuesta*. Revisa de la Facultad de Ingenieria de la Universidad Central de Venezuela V.23 N.3. (2008).
- [18] Duarte Rueda, L. E. *Estudio de diferentes métodos de rompimiento de emulsiones en la etapa de clarificación de aceite de palma en la planta extractora de Aceites S.A*. Universidad industrial De Santader. (2010).
- [19] Forero, J., Díaz, J., & Blandón, V. *Diseño de un nuevo sistema de flotación para tratamiento de aguas industriales*. Instituto Colombiano del Petróleo, Vol 1 Pág 67. (1999).
- [20] Mingorance, F., Minelli, F., & Le Du, H., *El cultivo de la palma africana en el Chocò, Legalidad Ambiental, Territorial y Derechos Humanos*. Human Rigths Everywhere. (2004).
- [21] IICA, P. (s.f.). *Palma de Aceite*. Disponible en Linea [http://www.fao.org/inpho_archive/content/documents/vlibrary/ae620s/pfr escos/PALMADEACEITE.HTM].
- [22] Marcela, E. B. *Estrategia para la implementación de la norma ISO 14001 en empresas de palma de aceite de la zona oriental colombiana*. Pontificia Universidad Javeriana. (2009).
- [23] Martínez Gómez, V., Garibay Pérez, R., & Rubio Rojas, J. (s.f.). *Flotación de partículas finas utilizando microburbujas*. Disponible en linea [<http://www.izt.uam.mx/cime21/extensos/Extenso%20PM-3.pdf>].

- [24] Mijaylova Nacheva, P. *Remoción de aceite emulsificado en efluentes de refinerías mediante desestabilización de la emulsión y flotación*. XXVIII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. (2002).
- [25] Minera, T. (s.f.). *Informe de celdas de flotación, Eficiente en la recuperación de minerales*. Tecnología Mínera. Disponible en Línea [<http://www.haug.com.pe/webhaug/pdfs/aviso44.pdf>].
- [26] Murray Brent, S., Dickinson, E., & Wang, Y. *Bubble stability in the presence of oil - in - water emulsions droplets: influence of surface shear Vs dilatational Rheology*. Food Hydrocolloids 23, 1198-1208. (2009).
- [27] Pérez Páez, R. *Aplicación de microondas en el tratamiento de emulsiones del tipo agua en aceite (W/O) y aceite en agua (O/W)*. Universidad Politécnica de Valencia. (2009).
- [28] Pulido, R., & C., D. *Costos ambientales en el proceso de extracción del aceite de palma, Estudio de un caso*. Revista Venezolana de Gerencia, Vol 14 N° 46, Pág 228-247. (2009).
- [29] Saavedra Bolívar, D. X. *Evaluación de una arcilla bentonítica modificada para flocular aceites presentes en efluentes industriales*. Universidad Industrial de Santander. (2009).
- [30] Santander, M., Rodríguez, R., & Rubio, J. *Remoción de Aceites (petróleo) emulsificados en agua por floculación - flotación Jet*. Revista de la Facultad de Ingeniería de Atacama, 24, 33-40. (2010).
- [31] Vallebuona, G., Casali, A., Rodríguez, F., & Endara, D. *Distribuciones de tamaños de burbuja en celda de flotación de laboratorio e industrial y modelación del efecto de las variables de operación*. Revista de Metalúrgica, 44 (3), Pág 233-242. (2008).
- [32] Vanle, T., Tsuyoshilmai, N., Takaya, H., Yamamoto, K., Sekine, M., Doi, R., . . . Wei, J. *Performance of tiny microbubbles enhanced with "normal cyclone bubbles" in separation of fine oil- in water emulsions*. 94, 1-6: Chemical Engineering of Science. (2013).
- [33]. American Society for Testing and Materials, *Standard test Method for Density and Relative Density (Specific Gravity) of Liquids by Bingham Pycnometer*, ASTM D1217-12, USA, (2007).
- [34]. Terminales Portuarios, Guía Ambiental, Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo, Disponible en Línea [http://www.minambiente.gov.co/documentos/40_guia_ambiental_para_terminales_portuarios.pdf]

[35] Ministerio de Agricultura, Decreto 1594 de 1984, Usos del Agua y Residuos Líquidos, República de Colombia. (1984).

BIBLIOGRAFÍA

- Abzueta D., I. C., Dugarte S., M., & Serpa G., Y. Fenómenos interfaciales; Determinación del tamaño de gota de una nano emulsión base para un protector solar en función del tiempo. Universidad De Los Andes. (2006).
- Ahmad, A., Sumathi, S., & Haamed, B. Coagulation of residue oil and suspended solid in palm oil mill effluent by chitosan alum and PAC. 118 - 99-105: Chemical Engineering Journal . (2006).
- Alfáro C, M. (s.f.). Proceso de producción del aceite de palma. Ministerio de Agricultura, Gerencia de Palma, Disponible en Linea [<http://galeon.com/subproductospalma/proceso1.pdf>].
- American Society for Testing and Materials, Standard test Method for Density and Relative Density (Specific Gravity) of Liquids by Bingham Pycnometer, ASTM D1217-12, USA, (2007).
- Aranberri, B., Binks, J., Clint , P., & Fletcher, I. Elaboración y caracterización de emulsiones estabilizadas por polímeros y agentes tensioactivos. Vol 7(3): Revista Iberoamericana de Polímeros. (2006).
- Azañero Ortiz, Á., Nuñez Jara, P. A., & Delgado León, E. Avances en flotación columnar. Instituto de Investigación de la facultad de Geología, Minas y Metalurgia, Vol 6 (11) págs 82-90. (2003).
- Bonomie Maria, R. M. (Estrategia ambiental en el manejo de efluentes en la extracción de aceite de palma. Revista de Estudios Interdisciplinarios en Ciencias Sociales , Vol 14 (3), págs 323-33. (2012).

- Castro , M. N., & Gónzales, J. P. Determinación de la eficiencia en la separación de una dispersión aceitosa a bajas concentraciones utilizando campos electricos de alta intensidad. Universidad De La Sabana. (2005).
- Coyoy Gómez, G. E. Evaluación del tratamiento de desechos líquidos de una planta extractora de aceite de palma africana. Universidad de San Carlos. (1999).
- Da Rosa, J., Santander , M., Souza, M., & Rubio , J. Flotación como proceso de remoción de contaminantes III. Nuevas Técnicas y Equipos. Universidad Federal Do Rio Grande Do Soul. (2008).
- Di Scipio, S., Escalona, J., Quijada, K., & Millán , F. Estudio del mezclado de emulsiones concentradas de aceite en agua aplicando la metodología de superficie de respuesta. Revisa de la Facultad de Ingenieria de la Universidad Central de Venezuela V.23 N.3. (2008).
- Duarte Rueda, L. E. Estudio de diferentes métodos de rompimiento de emulsiones en la etapa de clarificación de aceite de palma en la planta extractora de Aceites S.A. Universidad industrial De Santader. (2010).
- Emulsiones, propiedades y formulación, Cuaderno FIRP # 231.Disponible en línea [http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/FirpEmuls1_5374.pdf.]
- Fedepalma. Anuario Estadístico 2007. La agroindustria de la palma de aceite en Colombia y en el mundo , 133. (2007).
- Forero , J., Díaz, J., & Blandón , V. Diseño de un uevo sistema de flotación para tratamiento de aguas industriales. Instituto Colombiano del Petróleo, Vol 1 Pág 67. (1999).

- Gómez Casallas Alexander, O. M. Proceso de tratamiento de aguas residuales . Corporación Institucional del Petróleo. (2010).
- Hernáinz , F., Calero , M., & Blásquez , G. Kinetic considerations in the flotation of phosphate ore. Universidad de Granada. (2004).
- IICA, P. (s.f.). Palma de Aceite . Disponible en Linea [http://www.fao.org/inpho_archive/content/documents/vlibrary/ae620s/pfr escos/PALMADEACEITE.HTM].
- IKA.(UltraTurrax).Disponible en Linea. [<http://www.ikaprocess.com.es/Products/Batch-disperser-dispersing-machine-cph-13/ULTRA-TURRAX-UTC-csb-UTC/>]
- Marcela, E. B. Estrategia para la implementación de la norma ISO 14001 en empresas de palma de aceite de la zona oriental colombiana. Pontificia Universidad Javeriana. (2009)
- Marcela, E. B. Estrategia para la implementación de la norma ISO 14001 en empresas de palma de aceite de la zona oriental colombiana. Pontificia Universidad Javeriana. (2009).
- Martínez Gómez, V., Garibay Pérez, R., & Rubio Rojas, J. (s.f.). Flotación de partículas finas utilizando microburbujas . Disponible en linea [<http://www.izt.uam.mx/cime21/extensos/Extenso%20PM-3.pdf>].
- Mijaylova Nacheva, P. Remoción de aceite emulsificado en efluentes de refinerías mediante desestabilización de la emulsión y flotación . XXVIII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. (2002).
- Minera, T. (s.f.). Informe de celdas de flotación, Eficiente en la recuperación de minerales. Tecnología Mínera. Disponible en Linea

[<http://www.haug.com.pe/webhaug/pdfs/aviso44.pdf>].

- Mingorance, F., Minelli, F., & Le Du, H., El cultivo de la palma africana en el Chocò, Legalidad Ambiental, Territorial y Derechos Humanos. Human Rigths Everywhere. (2004).
- Ministerio de Agricultura, Decreto 1594 de 1984, Usos del Agua y Residuos Líquidos, República de Colombia. (1984).
- Murray Brent, S., Dickinson , E., & Wang, Y. Bubble stability in the presence of oil - in - water emulsions droplets: influence of surface shear Vs dilatational Rheology . Food Hydrocolloids 23, 1198-1208. (2009).
- Pérez Páez, R. Aplicación de microondas en el tratamiento de emulsiones del tipo agua en aceite (W/O) y aceite en agua (O/W). Universidad Politécnica de Valencia. (2009).
- Pulido, R., & C., D. Costos ambientales en el proceso de extracción del aceite de palma, Estudio de un caso. Revista Venezolana de Gerencia, Vol 14 N° 46 , Pág 228-247. (2009).
- Rodríguez, M. Detalle del sistema de flotación por aire disuelto. Anexo N° 5. Disponible en línea [https://www.e-seia.cl/archivos/09e_Anexo_5.pdf].
- Saavedra Bolivar, D. X. Evaluación de una arcilla bentonítica modificada para flocular aceites presentes en efluentes industriales. Universidad Industrial de Santander. (2009).
- Santander, M., Rodríguez, R., & Rubio , J. Remoción de Aceites (petróleo) emulsificados en agua por floculación - flotación Jet. Revista de la Facultad de Ingeniería de Atacama, 24, 33-40. (2010).

- Terminales Portuarios, Guía Ambiental, Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo, Disponible en Linea [http://www.minambiente.gov.co/documentos/40_guia_ambiental_para_terminales_portuarios.pdf]
- Vallebuona, G., Casali, A., Rodríguez, F., & Endara, D. Distribuciones de tamaños de burbuja en celda de flotación de laboratorio e industrial y modelación del efecto de las variables de operación. Revista de Metalúrgica, 44 (3), Pág 233-242. (2008).
- Vanle, T., Tsuyoshilmai, N., Takaya, H., Yamamoto, K., Sekine, M., Doi, R., . . . Wei, J. Performance of tiny microbubbles enhanced with "normal cyclone bubbles" in separation of fine oil- in water emultions. 94, 1-6: Chemical Engineerinf of Science. (2013).

ANEXOS

A continuación se presentan las tablas de registro de datos para el seguimiento del proceso de remoción a cuatro concentraciones.

Concentración de 0,2%.

0	16:30 PM					
	peso inicial	peso muestra	peso final	cantidad de aceite	peso sln	% aceite en sln
vaso 1	63,9614	103,8679	63,9779	0,0165	39,9065	0,041346648
vaso 26	67,3424	111,2781	67,3624	0,02	43,9357	0,045521068
promedio				0,01825		0,043433858
60	5:30 PM					
	peso inicial	peso muestra	peso final	cantidad de aceite		
vaso 23	48,9712	87,5468	48,9781	0,0069	38,5756	0,017886954
vaso 3	74,5579	112,4565	74,5615	0,0036	37,8986	0,009499032
				0,00525		0,013692993
120	6:30 PM					
	peso inicial	peso muestra	peso final	cantidad de aceite		
vaso 19	49,1813	87,5331	49,1858	0,0045	38,3518	0,011733478
vaso 21	49,0121	88,1508	49,0168	0,0047	39,1387	0,012008575
				0,0046		0,011871026
180	7:30 PM					
	peso inicial	peso muestra	peso final	cantidad de aceite		
vaso 26	67,3686	109,9406	67,3707	0,0021	42,572	0,00493282
vaso 1	63,9622	101,0454	63,9635	0,0013	37,0832	0,003505631
				0,0017		0,004219225
240	8:30 PM					
	peso inicial	peso muestra	peso final	cantidad de aceite		
vaso 23	48,9772	87,5502	48,9791	0,0019	38,573	0,004925725
vaso 3	74,5565	112,6545	74,5576	0,0011	38,098	0,002887291
				0,0015		0,003906508

Concentración de 0,5%.

0		3:00 PM				
	peso inicial	peso muestra	peso final	cantidad de aceite	peso sln	%aceite en sln
vaso 16	55,6438	93,1138	55,6566	0,0128	37,47	0,0342
vaso 21	55,7986	95,0768	55,8168	0,0182	39,2782	0,0463
vaso 23	55,7541	94,2217	55,7686	0,0145	38,4676	0,0377
				0,0152		0,0394
60min		4:00 PM				
	peso inicial	peso muestra	peso final	cantidad de aceite	peso sln	
vaso 22	65,773	101,7488	65,7768	0,0038	35,9758	0,0106
vaso 24	71,5566	112,271	71,5612	0,0046	40,7144	0,0113
				0,0042		0,0109
120min		5:00 PM				
	peso inicial	peso muestra	peso final	cantidad de aceite	peso sln	
vaso 19	55,9702	101,7488	55,9721	0,0019	45,7786	0,0042
vaso 26	74,1298	112,271	74,1317	0,0019	38,1412	0,0050
				0,0019		0,0046
180min		6:00 PM				
	peso inicial	peso muestra	peso final	cantidad de aceite		
vaso 24	71,5623	107,9242	71,5636	0,0013	36,3619	0,003575171
				0,0013		0,003575171
240		7:00 PM				
	peso inicial	peso muestra	peso final	cantidad de aceite		
vaso 22	65,7742	112,2722	65,7751	0,0009	46,498	0,001935567
				0,0009		0,001935567

Concentración de 1, 0%.

0		12:30 PM				
	peso inicial	peso muestra	peso final	cantidad de aceite	peso de sln	% aceite en sln
vaso 20	64,4402	102,4765	64,5122	0,0720	38,0363	0,18929286
vaso 26	67,3554	110,2015	67,4197	0,0643	42,8461	0,150072002
promedio				0,06815		0,169682431
60 min		1:30 PM				
	peso inicial	peso muestra	peso final	cantidad de aceite		
vaso 22	58,9876	96,2278	58,9994	0,0118	37,2402	0,031686189
vaso 4	67,8227	108,4861	67,8338	0,0111	40,6634	0,027297275
				0,01145		0,029491732
120 min		2:30 PM				
	peso inicial	peso muestra	peso final	cantidad de aceite		
vaso 21	49,0140	87,7757	49,0199	0,0059	38,7617	0,015221211
vaso 23	48,9699	87,0936	48,9748	0,0049	38,1237	0,012852897
				0,0054		0,014037054
180 min		3:30 PM				
	peso inicial	peso muestra	peso final	cantidad de aceite		
vaso 22	58,9829	96,1613	58,9903	0,0074	37,1784	0,01990403
vaso 24	64,7678	101,6378	64,7703	0,0025	36,8700	0,00678058
				0,00495		0,013342305
240 min		4:30 PM				
	peso inicial	peso muestra	peso final	cantidad de aceite		
vaso 23	48,9685	87,3508	48,9695	0,0010	38,3823	0,002605368
vaso 0	49,2652	89,4253	49,2690	0,0038	40,1601	0,009462128
				0,0024		0,006033748

Concentración de 1,5%.

0	9:30 AM					
	peso inicial	peso muestra	peso final	cantidad de aceite	peso sln	% aceite en sln
vaso 19	56,532	96,0286	56,6157	0,0837	39,4966	0,211916975
vaso 21	56,3623	94,37	56,4265	0,0642	38,0077	0,168913141
				promedio	0,07395	0,190415058
30	10:00 AM					
	peso inicial	peso muestra	peso final	cantidad de aceite		
vaso 18	53,4431	92,4322	53,4646	0,0215	38,9891	0,055143617
vaso 16	56,2106	93,8927	56,2293	0,0187	37,6821	0,049625684
				0,0201		0,052384651
60	10:30 AM					
	peso inicial	peso muestra	peso final	cantidad de aceite		
vaso 23	56,3191	92,4999	56,3266	0,0075	36,1808	0,020729227
vaso 6	69,699	109,9345	69,7156	0,0166	40,2355	0,041257099
				0,01205		0,030993163
90	11:00 AM					
	peso inicial	peso muestra	peso final	cantidad de aceite		
vaso 4	75,1734	115,3202	75,1808	0,0074	40,1468	0,018432353
vaso 22	66,3376	100,6224	66,3492	0,0116	34,2848	0,033834236
				0,0095		0,026133294
120	11:30 PM					
	peso inicial	peso muestra	peso final	cantidad de aceite		
vaso 1	71,3138	110,9118	71,3216	0,0078	39,598	0,019698
vaso 2	68,7033	108,569	68,7078	0,0045	39,8657	0,011288
				0,00615		0,015493
150	12:00 PM					
	peso inicial	peso muestra	peso final	cantidad de aceite		
vaso 3	81,9104	117,2028	81,9158	0,0054	35,2924	0,0153007
vaso 24	72,1219	108,0904	72,1283	0,0064	35,9685	0,0177933
				0,0059		0,016547
180	12:30 PM					

	peso inicial	peso muestra	peso final	cantidad de aceite		
vaso 16	56,2118	93,0249	56,2204	0,0086	36,8131	0,023361249
vaso 21	56,3721	93,859	56,3747	0,0026	37,4869	0,006935756
				0,0056		0,015148503

210	1:00 PM					
	peso inicial	peso muestra	peso final	cantidad de aceite		
vaso 18	53,4479	91,0927	53,451	0,0031	37,6448	0,008234869
vaso 19	56,5382	94,9195	56,541	0,0028	38,3813	0,007295219
				0,00295		0,007765044

240	1:30 PM					
	peso inicial	peso muestra	peso final	cantidad de aceite		
vaso 0	78,0502	120,5803	78,0522	0,0020	42,5301	0,004702552
vaso 6	69,6996	115,636	69,7007	0,0011	45,9364	0,002394615
				0,00155		0,003548584