



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERIA AMBIENTAL – AGUA

“REMOCIÓN DE ACEITE EN AGUAS RESIDUALES DE REFINACIÓN DEL
PETRÓLEO MEDIANTE ADICIÓN DE REACTIVOS QUÍMICOS Y SEPARACIÓN
POR FLOTACIÓN NATURAL O CON AIRE DISUELTO”

T E S I S
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:

I.Q. RODRIGO MONTALVO SANTIAGO

TUTOR PRINCIPAL

DRA. PETIA MIJAYLOVA NACHEVA, INST. MEXICANO DE TEC. DEL AGUA

COMITÉ TUTOR

DRA. ROSA MARÍA RAMÍREZ ZAMORA, INSTITUTO DE INGENIERÍA
DRA. ALMA CONCEPCIÓN CHÁVEZ MEJÍA, INSTITUTO DE INGENIERÍA
M.I. MERCEDES ESPERANZA RAMÍREZ CAMPEROS, INST. MEXICANO DE
TEC. DEL AGUA
M.I. Ma. RAFAELA GUTIÉRREZ LARA, FACULTAD DE QUÍMICA

MÉXICO, D.F. MARZO 2013

Jurado Asignado:

Presidente: Dra. Ramírez Zamora Rosa María

Secretario: Dra. Chávez Mejía Alma Concepción

Vocal: Dra. Mijaylova Nacheva Petia

1er. Suplente: M. I. Ramírez Camperos Mercedes Esperanza

2do. Suplente: M. I. Gutiérrez Lara Ma. Rafaela

Campus Morelos de la Facultad de Ingeniería, Laboratorio de la Planta Piloto del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Jiutepec, Morelos.

Tutor de Tesis:

Dra. Petia Mijaylova Nacheva

FIRMA



“AGRADECIMIENTOS”

A la Universidad Nacional Autónoma de México por abrirme sus puertas y permitirme seguir realizando mi sueño profesional, por hacer de mí un ser de honor, responsabilidad, ética y compromiso, por ser más que una universidad; por ser mi madre pues de ella he recibido respeto, cariño, sabiduría y conocimiento, la llevare siempre en mi corazón y su nombre quedara plasmado en mi alma.

Al Posgrado UNAM-IMTA por abrigarme de enseñanza, respeto y dedicación, por ser mi segunda casa y llenarme de personas importantes en mi vida, por brindarme todo su conocimiento, por cada momento histórico que recordare por siempre.

A mis profesores por su dedicación, entusiasmo, conocimiento, por compartir sus experiencias de vida, por su comprensión, por su apoyo, respeto y paciencia, por ser más que maestros; amigos inolvidables.

A mi tutora la Dra. Petia Mijaylova Nacheva por su dedicación, empeño y orientación para alcanzar una de mis metas, por su apoyo y perspicacia en cada momento y por su amabilidad que me entregó cada día.

A mi esposa por su apoyo incondicional en cada momento, por su amistad, por estos años que he compartido junto a ella, por ser la pareja ideal y el súper equipo jessy&roy, por ser la media naranja de nuestras vidas.

A la vida por dejarme alcanzar mis sueños, por enseñarme de ella cada día un sinfín de cosas, por dejarme ser parte de ella y disfrutar día con día, por guiarme a ser mejor y prevalecer sus valores.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca otorgada para realizar mis estudios de maestría.



“DEDICATORIAS”

In memoriam
Mater mea
María de Lourdes Santiago Morales[†]

A mis padres por su esfuerzo y dedicación que me han brindado día con día a lo largo de mi preparación profesional, por su apoyo incondicional en momentos difíciles, por brindarme una sonrisa y una chispa de aliento para seguir adelante, por su paciencia, por su amor incondicional y sobre todo por su eterno aprendizaje.

A mis hermanos por su cariño, su amor, su comprensión en cada instante de mi vida, por darme una pequeña lección en días arduos, por estar siempre a mi lado y por ser siempre fieles y mas que solo hermanos, una fortaleza.

A mis seres queridos por estar siempre ahí cuando más los he necesitado, por sus consejos llenos de sabiduría y esperanza, por sus palabras de aliento, por su optimismo y perseverancia, por su apoyo incondicional, por su fe y confianza en mí.

A mis amigos (hermanos) por ser leales en momentos críticos, por su apoyo, honestidad y confianza, por brindarnos un buen consejo, por aquellos días inolvidables, por ser parte de mi vida.

A mi esposa por su apoyo incondicional, su protección y su amor.



Índice

1.	INTRODUCCIÓN	14
2.	OBJETIVOS	16
2.1	Objetivo general	16
2.2	Objetivos particulares	16
2.3	Justificación.....	16
2.4	Alcances	16
3.	MARCO TEÓRICO	17
3.1	¿Qué es el Petróleo?	17
3.1.1	Importancia.....	17
3.1.2	Tipos de petróleo y composición	17
3.2	Refinación	18
3.3	Uso del agua en los procesos de refinación	19
3.3.1	Requerimientos de agua.....	21
3.4	Generación de aguas residuales	22
3.4.1	Impactos en el uso de agua en una refinería	22
3.5	Planta de tratamiento de efluentes en refinería	23
3.5.1.	Límites máximos permisibles de contaminantes en la descarga de efluentes.....	24
3.6	Grasas y Aceites	24
3.6.1.	<i>Propiedades físicas y químicas</i>	24
3.6.2.	Tipos de aceites en aguas residuales de refinería	26
3.6.3.	Tratamientos aplicados a los efluentes aceitosos	26
3.7	Coagulación-Floculación.....	28
3.7.1.	Factores principales dentro de la coagulación-floculación.....	29
3.7.2.	Mecanismos de coagulación	33
3.7.3.	Mecanismos de floculación	35
3.7.4.	Coagulantes y floculantes	36
3.7.5.	Coagulación-floculación para desestabilizar emulsiones de aceite en agua	40
3.8	Flotación.....	41
3.8.1	Aspectos Generales.....	41



“REMOCIÓN DE ACEITE EN AGUAS RESIDUALES DE REFINACIÓN DEL PETRÓLEO MEDIANTE ADICIÓN DE REACTIVOS QUÍMICOS Y SEPARACIÓN POR FLOTACIÓN NATURAL O CON AIRE DISUELTO”



3.8.2	Tipos de Flotación	41
3.8.3	Flotación con aire disuelto	42
3.8.3.1	Factores principales en la flotación por aire disuelto	43
3.8.3.2	Mecanismos de la flotación	46
4.	METODOLOGÍA	50
4.1	Selección del desestabilizante de aceite emulsificado y dosis óptimas	50
4.1.1	Prueba de jarras	50
4.2	Floculación y flotación con aire disuelto	54
4.2.1	Instalación experimental	54
4.2.2	Procedimiento experimental	55
4.2.3	Diseño experimental	55
4.3	Análisis físico-químicos	57
5.	RESULTADOS	59
5.1	Selección del desestabilizante de aceite emulsificado y dosis óptimas	59
5.1.1	Caracterización del agua aceitosa	59
5.1.2	Variación de pH.....	59
5.1.3	Determinación de la cantidad mínima de coagulante	62
5.1.4	Selección de los mejores agentes coagulantes y dosis para la desestabilización de la emulsión y remoción de materia orgánica	63
5.1.5	Pruebas con la adición de floculantes catiónicos individuales	85
5.1.6	Pruebas con la combinación de coagulantes y polímeros.....	91
5.1.7	Pruebas de tratabilidad y rompimiento de la emulsión del agua residual aceitosa del Lote 2 (salida separador 5)	104
5.2	Pruebas de flotación con aire disuelto	108
5.2.1	Caracterización del agua aceitosa	108
5.2.2	FAD con la adición de la combinación Sulfato de Aluminio (SAS) y el polímero catiónico C-1288	108
5.2.3	FAD con la adición del polímero catiónico LACKFLOC C-5100.....	109
5.3	Análisis estadístico Floculación-FAD	115
5.3.1	Análisis de la variable GyA y su remoción	115
5.3.2	Análisis de la variable DQO y su remoción	118



5.3.3	Análisis de la variable Turbiedad y su remoción	121
5.3.4	Análisis de la variable Color y su remoción	123
5.4	Análisis de costos de coagulantes y floculantes	125
6.	CONCLUSIONES	128
7.	RECOMENDACIONES	129
8.	BIBLIOGRAFÍA.....	130

Índice de Tablas

Tabla 3. 1	Tipos y densidades de algunos hidrocarburos líquidos en México	18
Tabla 3. 2	Distribución porcentual del agua según su uso.	19
Tabla 3. 3	Índices de demanda y descarga promedio de agua.	21
Tabla 3. 4	Generación de aguas residuales aceitosas en las 6 refinerías	22
Tabla 3. 5	Límites máximos permisibles para contaminantes básicos (NOM-001-SEMARNAT-1996).	24
Tabla 3. 6	Características físicas y químicas de algunos aceites cíclicos ligeros de acuerdo con la refinería en estudio. (Laredo, 2002)	25
Tabla 3. 7	Tiempos de decantación de diferentes partículas	29
Tabla 3. 8	Dosis de coagulantes a diferentes valores de pH y alcalinidad	32
Tabla 3. 9	Características de los polímeros orgánicos	39
Tabla 3. 10	Tipos de coagulante y floculantes para tratar emulsiones de agua en aceite	40
Tabla 4. 1	Reactivos químicos usados en las pruebas de jarras.	51
Tabla 4. 2	Combinaciones de coagulantes y floculantes evaluados	53
Tabla 4. 3	Condiciones de operación del FAD.	56
Tabla 4. 4	Orden aleatorizado de las pruebas FAD.	57
Tabla 4. 5	Técnicas utilizadas para la medición de cada parámetro	57
Tabla 5. 1	Caracterización fisicoquímica del agua aceitosa.	59
Tabla 5. 2	Volumen de ácido-base utilizado para ajustar el pH del agua residual a diferentes valores.	60
Tabla 5. 3	Parámetros de respuesta de la variación del pH en 2 L de agua residual.	60
Tabla 5. 4	Determinación de dosis mínima utilizando diferentes coagulante minerales.	62
Tabla 5. 5	Resultados de la prueba de dosis de coagulante SAS en 1 L.	63
Tabla 5. 6	Resultados de la prueba de dosis de coagulante SAS en 2 L.	64
Tabla 5. 7	Resultados de porcentaje de remoción para cada dosis de SAS añadido.	64
Tabla 5. 8	Resultados de la prueba de dosis de coagulante PIX-145 en 1 L.	68
Tabla 5. 9	Resultados de la prueba de dosis de coagulante PIX-145 en 2 L.	68
Tabla 5. 10	Porcentajes de remoción de los parámetros de respuesta para cada dosis PIX-145 añadido.	69
Tabla 5. 11	Resultados de la prueba de dosis de coagulante PIX-111 en 1 L.	72



Tabla 5. 12 Resultados de la prueba con el coagulante PIX-111 en 2 L.	72
Tabla 5. 13 Resultados de porcentaje de remoción para cada dosis de PIX-111 añadido.....	73
Tabla 5. 14 Resultados de la prueba con el coagulante PAX-260XLS en 1 L.	76
Tabla 5. 15 Resultados de la prueba de dosis de coagulante PAX-260XLS en 2 L.	77
Tabla 5. 16 Resultados de porcentaje de remoción para cada dosis de PAX-260 XLS añadido.....	77
Tabla 5. 17 Resultados de la prueba con el coagulante PAX-16S en 1 L.	80
Tabla 5. 18 Resultados de la prueba con el coagulante PAX-16S en 2 L.	81
Tabla 5. 19 Resultados de porcentaje de remoción para cada dosis de PAX-16 S añadido.....	82
Tabla 5. 20 Dosis óptimas de los coagulantes para la desestabilización de la emulsión.	85
Tabla 5. 21 Determinación de dosis mínima utilizando diferentes floculantes catiónicos.	86
Tabla 5. 22 Comparación de los resultados obtenidos con los Mejores Floculantes Catiónicos probados individualmente aplicando dosis de 2.5 mg.L ⁻¹	91
Tabla 5. 23 Comparación de los mejores coagulantes y floculantes catiónicos.	99
Tabla 5. 24 Comparación de los mejores coagulantes y floculantes aniónicos.	102
Tabla 5. 25 Comparación de los mejores coagulantes y floculantes para el rompimiento de la emulsión del agua residual aceitosa del Lote 2.....	105
Tabla 5. 26 Caracterización fisicoquímica del agua aceitosa.....	108
Tabla 5. 27 Tratamiento del agua residual aceitosa con FAD con previa coagulación-floculación mediante la combinación de SAS y C-1288.....	108
Tabla 5. 28 Regresión Superficial Mixta para el parámetro GyA (mg.L ⁻¹).....	116
Tabla 5. 29 Regresión Superficial Mixta con el parámetro % de Remoción de GyA.	117
Tabla 5. 30 Regresión Superficial Mixta con el parámetro DQO (mg.L ⁻¹).	119
Tabla 5. 31 Regresión Superficial Mixta con el parámetro % de Remoción de DQO.	120
Tabla 5. 32 Regresión Superficial Mixta con el parámetro Turbiedad (UNT).....	121
Tabla 5. 33 Regresión Superficial Mixta para el parámetro % de Remoción de Turbiedad.....	123
Tabla 5. 34 Regresión Superficial Mixta con el parámetro Color (nm).	124
Tabla 5. 35 Regresión Superficial Mixta con el parámetro % de Remoción de Color.	125
Tabla 5. 36 Costos de reactivos químicos por m ³ de agua tratada.	126
Tabla 5. 37 Costos de Tratamiento Coagulación/Floculación en cuanto a reactivos.	127

Índice de Figuras

Figura 3. 1 Procesamiento de petróleo	19
Figura 3. 2 Esquema del uso del agua en la Refinería “General Lázaro Cárdenas del Río”, Minatitlán, Veracruz	21
Figura 3. 3 Diagrama del sistema de pre-tratamiento de las aguas residuales aceitosas	23
Figura 3. 4 La acción de un rompedor de emulsión catiónica al neutralizar las cargas superficiales sobre una gotita de aceite coloidal en un agua de desecho aceitosa.....	29
Figura 3. 5 Doble capa de una partícula coloidal.....	30
Figura 3. 6 Fuerzas de atracción y repulsión	33
Figura 3. 7 Neutralización de carga.....	34



Figura 3. 8 Reestabilización de partículas	34
Figura 3. 9 Interacción de las partículas en un floc	35
Figura 3. 10 Efecto de puente de las partículas en suspensión	35
Figura 3. 11 Floculación.....	36
Figura 3. 12 Química de la coagulación de las sales metálicas (Fe y Al)	37
Figura 3. 13 Sistemas de flotación por aire disuelto. Presurización parcial del efluente.....	42
Figura 3. 14 Sistemas de flotación por aire disuelto. Presurización total del efluente.	42
Figura 3. 15 Sistemas de flotación por aire disuelto. Presurización de la recirculación.....	43
Figura 3. 16 Dispositivo para la medición de la cantidad de aire liberado.....	44
Figura 3. 17 Cámara de flotación rectangular.....	45
Figura 3. 18 Cámara de flotación circular	46
Figura 3. 19 Ángulo entre la superficie del sólido y la burbuja de gas	47
Figura 3. 20 Influencia de la presión en el diámetro de las burbujas de aire.....	49
Figura 3. 21 Influencia del pH en el tamaño de las Burbujas	49
Figura 4. 1 Equipo Phipps & Bird para la prueba de jarras.	50
Figura 4. 2 Fotografía del equipo para la determinación de la dosis mínima.	53
Figura 4. 3 Esquema del sistema de flotación con aire disuelto.....	54
Figura 5. 1 Desestabilización de la emulsión aplicando Sulfato de Aluminio.	67
Figura 5. 2 Desestabilización de la emulsión aplicando PIX 111.	76
Figura 5. 3 Desestabilización de la emulsión aplicando PAX 260 XLS.	80
Figura 5. 4 Desestabilización de la emulsión aplicando PAX 16S.	84
Figura 5. 5 Desestabilización de la emulsión aplicando floculantes catiónicos.	89
Figura 5. 6 Pruebas con combinaciones de coagulantes y floculantes catiónicos.	100
Figura 5. 7 Pruebas con combinaciones de coagulantes y floculantes aniónicos.	104
Figura 5. 8 Rompimiento de la emulsión y formación del floc con la aplicación de floculante LACKFLOC-C-5100 (fotografía izquierda) y otros coagulantes y floculantes (fotografía derecha).	107
Figura 5. 9 Agua residual aceitosa sin tratamiento (fotografía izquierda) y agua residual aceitosa después del proceso de coagulación-FAD (fotografía derecha).....	115

Índice de Gráficos

Gráfico 5. 1 Resultados de las pruebas de la variación del pH del agua residual: a) Valores de DQO, GyA y SST; b) Valores de color del agua después del ajuste del pH; c) Valores de la turbiedad del agua después del ajuste del pH.....	61
Gráfico 5. 2 Remociones obtenidas por la variación del pH sin adición de un coagulante.	62
Gráfico 5. 3 Concentraciones de GyA y SST, y valores de DQO obtenidos en el agua tratada con diferentes dosis de SAS.....	65
Gráfico 5. 4 Dosis ($\text{mgAl}^{3+} \cdot \text{L}^{-1}$) vs [Color (Pt-Co) y Turbiedad (UNT)].	66
Gráfico 5. 5 Remociones obtenidas con la aplicación de SAS en diferentes dosis.	66



Gráfico 5. 6 Volumen de lodos formados con la aplicación de diferentes dosis de SAS.	67
Gráfico 5. 7 Concentraciones de GyA y SST, y valores de DQO obtenidos en el agua tratada con diferentes dosis de PIX-145.	70
Gráfico 5. 8 Dosis ($\text{mgFe}^{3+} \cdot \text{L}^{-1}$) vs [Color (Pt-Co) y Turbiedad (UNT)].	70
Gráfico 5. 9 Remociones obtenidas con la aplicación de PIX-145 en diferentes dosis.	71
Gráfico 5. 10 Volumen de lodos formados con la aplicación de diferentes dosis de PIX-145.	71
Gráfico 5. 11 Concentraciones de GyA y SST, y valores de DQO obtenidos en el agua tratada con diferentes dosis de PIX-111.	74
Gráfico 5. 12 [Color (Pt-Co) y Turbiedad (UNT)] vs Dosis ($\text{mgFe}^{3+} \cdot \text{L}^{-1}$).	74
Gráfico 5. 13 Remociones obtenidas con la aplicación de PIX-111 en diferentes dosis.	75
Gráfico 5. 14 Volumen de lodos formados con la aplicación de diferentes dosis de PIX-111.	75
Gráfico 5. 15 Concentraciones de GyA y SST, y valores de DQO obtenidos en el agua tratada con diferentes dosis de PAX-260 XLS.	78
Gráfico 5. 16 [Color (Pt-Co) y Turbiedad (UNT)] vs Dosis ($\text{mgAl} \cdot \text{L}^{-1}$).	79
Gráfico 5. 17 Remociones obtenidas con la aplicación de PAX-260 XLS en diferentes dosis.	79
Gráfico 5. 18 Volumen de lodos formados con la aplicación de diferentes dosis de PAX-260 XLS.	80
Gráfico 5. 19 Concentraciones de GyA y SST, y valores de DQO obtenidos en el agua tratada con diferentes dosis de PAX-16 S.	82
Gráfico 5. 20 [Color (Pt-Co) y Turbiedad (UNT)] vs Dosis ($\text{mgAl} \cdot \text{L}^{-1}$).	83
Gráfico 5. 21 Remociones obtenidas con la aplicación de PAX-16 S en diferentes dosis.	83
Gráfico 5. 22 Volumen de lodos formados con la aplicación de diferentes dosis de PAX-16 S.	84
Gráfico 5. 23 Remociones de GyA, DQO y Color obtenidas en las pruebas con los floculantes OPTIFLOC-C-1288, OPTIFLOC-C-1781, SUPERFLOC-C-498 y OPTIFLOC-C-1392.	87
Gráfico 5. 24 Remociones de Turbiedad y SST obtenidos en las pruebas con los floculantes OPTIFLOC-C-1288, OPTIFLOC-C-1781, SUPERFLOC-C-498 y OPTIFLOC-C-1392.	88
Gráfico 5. 25 Lodos aceitosos generados después de la adición de los floculantes catiónicos.	88
Gráfico 5. 26 Resultados de las pruebas con LARKFLOC-C-5100 para la desestabilización de la emulsión (agua residual Lote 1).	89
Gráfico 5. 27 Resultados de las pruebas con LARKFLOC-C-5100 para la desestabilización de la emulsión (agua residual Lote 2).	90
Gráfico 5. 28 Remociones de los diferentes parámetros de las pruebas con LARKFLOC-C-5100 para la desestabilización de la emulsión (agua residual Lote 2).	91
Gráfico 5. 29 Remociones de las pruebas con combinaciones de coagulantes y floculantes catiónicos para la remoción de DQO.	93
Gráfico 5. 30 Remociones de las pruebas con combinaciones de coagulantes y floculantes catiónicos para la remoción de GyA.	94
Gráfico 5. 31 Remociones de las pruebas con combinaciones de coagulantes y floculantes catiónicos para la remoción de SST.	95
Gráfico 5. 32 Remociones de las pruebas con combinaciones de coagulantes y floculantes catiónicos para la remoción de color.	96



Gráfico 5. 33 Remociones de las pruebas con combinaciones de coagulantes y floculantes catiónicos para la remoción de turbiedad.	97
Gráfico 5. 34 Resultados de los Lodos aceitosos generados después de la pruebas con combinaciones de coagulantes y floculantes catiónicos.	98
Gráfico 5. 35 Comparación de los mejores coagulantes y floculantes catiónicos.	100
Gráfico 5. 36 Comparación de los mejores coagulantes y floculantes catiónicos.	101
Gráfico 5. 37 Comparación de los mejores coagulantes y floculantes aniónicos.	103
Gráfico 5. 38 Comparación de los mejores coagulantes y floculantes aniónicos.	104
Gráfico 5. 39 Comparación de los mejores coagulantes y floculantes para el rompimiento de la emulsión del agua residual aceitosa del Lote 2.....	106
Gráfico 5. 40 Comparación de los mejores coagulantes y floculantes para el rompimiento de la emulsión del agua residual aceitosa del Lote 2.....	107
Gráfico 5. 41 Tratamiento del agua residual aceitosa mediante FAD con previa coagulación-floculación mediante C-5100 bajo diferentes condiciones de operación con TRH de 15 min.	110
Gráfico 5. 42 Tratamiento del agua residual aceitosa mediante FAD con previa coagulación-floculación mediante C-5100 bajo diferentes condiciones de operación con TRH de 20 min.	111
Gráfico 5. 43 Tratamiento del agua residual aceitosa mediante FAD con previa coagulación-floculación mediante C-5100 bajo diferentes condiciones de operación con TRH de 25 min.	112
Gráfico 5. 44 Tratamiento del agua residual aceitosa mediante FAD con previa coagulación-floculación mediante C-5100 bajo diferentes condiciones de operación con TRH de 30 min.	113
Gráfico 5. 45 Tratamiento del agua residual aceitosa mediante FAD con previa coagulación-floculación mediante C-5100 bajo diferentes condiciones de operación con TRH de 35 min.	114
Gráfico 5. 46 Análisis de la variable GyA (mg.L^{-1}) vs los factores THR y Presión.....	116
Gráfico 5. 47 Análisis de la variable % de Remoción de GyA (mg.L^{-1}) vs los factores THR y Presión.	117
Gráfico 5. 48 Análisis de la variable DQO (mg.L^{-1}) vs los factores TRH y Presión.....	118
Gráfico 5. 49 Análisis de la variable DQO (mg.L^{-1}) vs los factores TRH y Recirculación.....	119
Gráfico 5. 50 Análisis del parámetro % Remoción de DQO vs los factores Presión y Recirculación.	120
Gráfico 5. 51 Análisis de la variable Turbiedad (UNT) vs los factores THR y Presión.....	121
Gráfico 5. 52 Análisis del parámetro % de Remoción de Turbiedad vs los factores THR y Recirculación.	122
Gráfico 5. 53 Análisis de la variable Color (nm) vs los factores TRH y Presión.	123
Gráfico 5. 54 Análisis del parámetro % de Remoción de Color vs los factores TRH y Presión. ...	124
Gráfico 5. 55 Análisis del parámetro % de Remoción de Color vs los factores TRH y Recirculación.	125



Nomenclatura

Abreviatura	Significado
GyA	Parámetro Grasa y Aceite (miligramos/Litro)
DQO	Demanda Química de Oxígeno (miligramos/Litro)
DBO	Demanda Biológica de Oxígeno (miligramos/Litro)
SST	Sólidos Suspendidos Totales
SSV	Sólidos Suspendidos Volátiles
SDT	Sólidos Disueltos Totales
FAD	Flotación por Aire Disuelto
UNT	Unidades Nefelométricas de Turbidez
TRH	Tiempo de Residencia Hidráulico
API	American Petroleum Institute
TBP	True Boiling Point
LP	Licuado de Petróleo
Q	Caudal (Litros/seg.)
PTAR	Planta Tratadora de Aguas Residuales
ppm	partes por millón
rpm	revoluciones por minuto
LMP	Límite Mínimo Permisible
T	Temperatura
ASTM	Destilación
TIE	Temperatura Inicial de Ebullición
TFE	Temperatura Final de Ebullición
AG	Agua
AC	Aceite
ANOVA	Análisis de la varianza



RESUMEN

En el siguiente trabajo de tesis se presentan los conceptos teóricos y los resultados de un estudio de la aplicación de la flotación con aire disuelto con coagulación-floculación previa, para la remoción del aceite disperso y emulsificado. Para la desestabilización de la emulsión se probaron productos químicos, inorgánicos y orgánicos, con propiedades coagulantes y floculantes. Se obtuvieron buenos resultados entre 85 y 90% de remoción de GyA con las combinaciones del sulfato de aluminio y polímeros, cloruro férrico y polímeros, así como con los polímeros catiónicos aplicados de forma individual. Sin embargo, el empleo de un floculante catiónico (LARKFLOC-C-5100) proporciona la ventaja de reducir el volumen de los lodos y de obtener remociones de Grasas y Aceites (GyA) por arriba del 79%, además el costo unitario del tratamiento es menor. El proceso de flotación por aire disuelto se estudió con previa desestabilización de la emulsión. Para esto se llevaron a cabo pruebas utilizando un diseño cuadrado latino 3*5 con tres factores (presión, relación de recirculación y tipo de tiempo de residencia hidráulico), considerando una variación en 5 niveles. Se determinó que el factor con influencia significativa es la selección del polímero, después el Tiempo de Residencia Hidráulico (TRH), la relación de recirculación y por último la presión en el tanque de saturación. La combinación de los procesos coagulación-flotación con aire disuelto, permiten obtener una remoción de GyA (80%) y DQO (55%) adecuado para cumplir con las concentraciones requeridas en la alimentación de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la industria. Las mejores remociones del aceite se obtienen a presiones bajas en el tanque de saturación 14.2 y 28.4 lb/in² y con una recirculación alrededor de 30% y con TRH menores a 25 min.

ABSTRACT

The following thesis presents the theoretical concepts and results of a study of the application of dissolved air flotation with coagulation-flocculation prior to removal dispersed and emulsified oil. For the destabilization of the emulsion were tested chemicals, inorganic and organic coagulants and flocculants properties. Good results were obtained between 85 and 90% removal of GyA with combinations of polymers and aluminum sulfate, ferric chloride and polymers, as well as cationic polymers applied individually. However, the use of a cationic flocculant (LARKFLOC-C-5100) provides the advantage of reducing the volume of sludge and removal Fats and Oils obtaining (GYA) above 79%, besides the unit cost of treatment is low. The process for dissolved air flotation was studied upon destabilization of the emulsion. For this test were conducted using a Latin square design with three 3*5 factors (pressure, recycle ratio and type of hydraulic residence time), considering a variation in 5 levels. It was determined that significantly influential factor is the selection of polymer, after the hydraulic residence time (HRT), the recycle ratio and finally the pressure in the saturation tank. The combination of coagulation processes, dissolved air flotation, provide a GyA removal (80%) and COD (55%) adequate to meet the required concentrations to feed the plant wastewater treatment of the industry. The best removals of oil at are obtained low pressure in the saturation tank 14.2 and 28.4 lb/in² with a recirculation about 30% and with HRT less than 25 min.



1. INTRODUCCIÓN

Los impactos ambientales provocados por las refinerías en los diversos ecosistemas, son consecuencia de la actividad petrolera y se asocian a la producción de emisiones a la atmósfera por los diversos procesos de refinación y a descargas de efluentes a cuerpos receptores. En las refinerías se utilizan grandes cantidades de agua para lavar los equipos de proceso y retirar los materiales indeseados, generando a su vez grandes cantidades de agua residual con diversos contaminantes como: aceites, grasas, amoniaco, compuestos fenólicos, sulfuros, ácidos orgánicos, cromo y otros metales. Se generan desechos sólidos, ruido y frecuentemente se provocan efectos estéticos visuales.

Para mitigar el efecto crucial de los contaminantes en el agua de las refinerías de petróleo se han empleado los siguientes procesos:

Para las refinerías de petróleo las sales en el crudo son compuestos indeseables que corroen y ensucian los equipos de proceso. Debido a esta causa, el tratamiento que se le da al crudo como primer paso de la refinación es la desalación, donde con flujo de agua caliente se extraen las sales; siempre y cuando no se hayan utilizado inhibidores, antioxidantes o compuestos que eviten la corrosión en el combustible. Si la materia base contiene productos aromáticos con buenas solubilidades como el benceno o el tolueno entonces serán desalados en el efluente y este será la mayor fuente de compuestos orgánicos volátiles en el agua residual de una refinería. Por lo que para esta corriente de agua con concentraciones salinas altas, se utiliza un tratamiento fisicoquímico avanzado como la electro-floculación ^(www.lentech.es).

En compuestos aromáticos, orgánicos, aceites y grasas: Un tratamiento directo en aguas residuales se da con carbón activado, ya que reduce el contenido de los compuestos aromáticos debajo de los límites permisibles. Además, el carbón también captura el aceite, la grasa y otros compuestos orgánicos. El carbón activado también se utiliza para quitar los hidrocarburos pesados del hidrógeno y de corrientes de gases ligeros en la refinería (Tratamiento del gas de la refinería). Otro uso del carbón activado es acentuar el lodo activado de la refinería, esto está determinado por la adición de CAA (carbón activado accionado) en el lodo.

En cuanto a los contaminantes orgánicos e inorgánicos de aguas residuales de la refinería; un proceso para eliminarlos es el empleo de tratamientos como la ultrafiltración y la ósmosis inversa. Antes del paso de la ultra filtración, primero las aguas residuales se pasan a través de un sistema que las ablanda para quitar cationes metálicos bivalentes y trivalentes antes de ser enviado al proceso de ósmosis inversa para evitar que se ensucie ^(www.lentech.es).

Uno de los mayores temas de la industria de refinación del petróleo es eliminar el aceite del agua después de los procesos o en caso de fugas en la red de tuberías. Para resolver este gran desafío se puede utilizar tecnología de separación por membranas. En cuanto a la limpieza alcalina de petróleo, los niveles de contaminación por emulsionantes son extremadamente altos, la corrección del pH es importante y puede ser necesario utilizar un coagulante mineral por ejemplo.

La eliminación de aceite en el efluente pluvial de la refinería se puede realizar por medio de la filtración o la flotación; para evitar la oxidación catalítica debido al alto contenido de S en este tipo de aguas, se utilizan dos procesos principalmente: el primero es la purificación fisicoquímica en la que se combina la filtración y la FAD. El segundo tratamiento es el reciclaje; que se realiza



“REMOCIÓN DE ACEITE EN AGUAS RESIDUALES DE REFINACIÓN DEL PETRÓLEO MEDIANTE ADICIÓN DE REACTIVOS QUÍMICOS Y SEPARACIÓN POR FLOTACIÓN NATURAL O CON AIRE DISUELTO”



por la separación de caudales del agua de lastre (salina pero baja en DOB_5) y reciclaje parcial, después de dos estados de purificación biológica del proceso del agua y la lluvia aceitosa del agua (bajo contenido salino) para la torre de enfriamiento.

En las refinerías se cuenta con plantas de tratamiento primario para aguas residuales aceitosas, las cuales se someten a una etapa de igualación de flujos y cargas orgánicas, seguido de un proceso con etapas de desarenado y tamizado para la remoción de sólidos. Posteriormente, se pasa a la etapa de remoción de aceite mediante separadores tipo Instituto Americano del Petróleo (API por sus siglas en Inglés) donde se lleva a cabo la separación del aceite libre completando esta separación por medio de separadores de placas corrugadas. Finalmente, el aceite recuperado en los separadores es recolectado para su reprocesamiento. No obstante, este tipo de tratamientos no remueve el aceite emulsificado de los efluentes, lo que hace que no se cumplan con las especificaciones de las diferentes normas ambientales. Por lo anterior, actualmente en la industria petrolera se han implementado filosofías ambientales correctivas para disminuir la contaminación por descargas residuales. Ello mediante una combinación de tratamientos para la eliminación del aceite en sus diferentes formas: libre, en dispersión de gotas finas, en emulsión químicamente estable y en sólidos aceitosos. Esto se realiza con el fin de disminuir los efectos causados en el medio ambiente para recolectar, tratar y usar los efluentes provenientes de las plantas de proceso de acuerdo con la normatividad mexicana y poder realizar descargas a cuerpos receptores o simplemente reutilizarla en los procesos de refinación del petróleo.



2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Determinar la remoción de aceite en aguas residuales de refinación del petróleo mediante adición de diferentes reactivos químicos (coagulantes/floculantes) para la desestabilización del aceite disperso y emulsificado y su separación por flotación natural o con aire disuelto.

2.2 Objetivos particulares

- Establecer los mejores reactivos químicos (coagulantes/floculantes) y las mejores dosis para la desestabilización del aceite en el efluente aceitoso de una refinería.
- Determinar la remoción del aceite mediante desestabilización de la emulsión y separación por flotación natural usando el mejor reactivo químico aplicado en diferentes dosis.
- Determinar la remoción del aceite mediante desestabilización de la emulsión y separación por flotación con aire disuelto usando el mejor reactivo químico y diferentes parámetros de operación (presión, relación de recirculación del efluente y tiempo de residencia hidráulica en el tanque de flotación).
- Determinar las mejores condiciones de operación del sistema de flotación con aire disuelto.

2.3 Justificación

Debido a la gran cantidad de aceite presente en las aguas residuales de las refinerías, el primer objetivo de su tratamiento es la remoción de la mayor cantidad de aceite posible con la finalidad de recuperarlo para su aprovechamiento y para implementar sin problemas los procesos biológicos y avanzados que se utilizan generalmente después del tratamiento primario de las aguas residuales, ya que actualmente no se cuenta con un control de estos problemas en las refinerías, debido a que es muy escasa la información y evaluación de estos procesos, por tal motivo se realiza el estudio para dar una alternativa al tratamiento de aguas residuales aceitosas y de esta manera disminuir los efectos causados en el medio ambiente.

2.4 Alcances

En una instalación a escala laboratorio se determinó la remoción de aceite en agua aceitosa de refinería, mediante la desestabilización de la emulsión por medio de reactivos químicos (coagulantes-floculantes) para posteriormente llevar a cabo el proceso de flotación por aire disuelto. Y de esta manera determinar las mejores condiciones de operación del proceso para la remoción del aceite en el agua de refinería cumpliendo con los parámetros especificados en la Normatividad vigente.



3. MARCO TEÓRICO

Para entender más afondo la problemática que se aborda en este trabajo de tesis es necesario analizar primero varios conceptos básicos importantes, como son:

- ¿Qué es el petróleo?
- ¿Qué es una refinería?
- ¿Qué es un efluente en una refinería?
- ¿Qué son las grasas y aceites residuales?, entre otros.

A continuación se presenta un compendio de información para ampliar el panorama del trabajo.

3.1 ¿Qué es el Petróleo?

Es una mezcla de compuestos gaseosos, líquidos y sólidos de carbono e hidrógeno que se formó hace miles de años por medio de la “cocción” de grandes cantidades de seres orgánicos que habitaron la tierra que quedaron almacenados en el subsuelo, tanto en tierra firme como abajo del lecho marino ^(Valdés, 2009).

3.1.1 Importancia

En México, cerca del 88% de la energía primaria que se consume proviene del petróleo. Llega a nosotros cada día en una gran variedad de formas. Es la principal fuente de insumos para generar energía eléctrica, permite la producción de combustibles para los sectores de transporte e industrial. Además, es materia prima de una gran cantidad de productos como telas, medicinas o variados objetos de plástico. ^(PEMEX, 2008). El petróleo ha transformado la vida de las personas y la economía de las naciones.

3.1.2 Tipos de petróleo y composición

El petróleo se compone por miles de compuestos químicos y entre sus propiedades, éstos se diferencian por su volatilidad (dependiendo de la temperatura de ebullición). Las curvas de destilación TBP (del inglés “true boiling point”, temperatura de ebullición real) distinguen a los diferentes tipos de petróleo y definen los rendimientos que se pueden obtener de los productos por separación directa ^(www.imp.mx).

Dependiendo del número de átomos de carbono y de la estructura de los hidrocarburos que integran el petróleo, se tienen diferentes propiedades que los caracterizan y determinan su comportamiento como combustibles, lubricantes, ceras o solventes ^(Rodríguez, 2007).

La industria mundial de hidrocarburos líquidos clasifica el petróleo de acuerdo con su densidad API (parámetro internacional del Instituto Americano del Petróleo, que diferencia las calidades del crudo). En la Tabla 3.1 se muestran las densidades de hidrocarburos líquidos de acuerdo a la clasificación y los tipos de crudo que existen en México ^(www.imp.mx).



Tabla 3. 1 Tipos y densidades de algunos hidrocarburos líquidos en México ^(Valdés, 2009).

Aceite crudo	Densidad (g/cm ³)	Densidad grados API	Tipo de crudo
Extrapesado	>1.0	10.0	-
Pesado	1.0 - 0.92	10.0 - 22.3	Maya
Mediano	0.92 - 0.87	22.3 - 31.1	-
Ligero	0.87 - 0.83	31.1 - 39	Itsmo
Superligero	< 0.83	> 39	Olmeca

3.2 Refinación

La destilación es un proceso fundamental en la industria de refinación del petróleo, pues permite hacer una separación de los hidrocarburos aprovechando sus diferentes puntos de ebullición (temperatura a la cual hierve una sustancia) ^(Valdés, 2009). El petróleo se separa en fracciones por medio de los diversos procesos como son:

- **Destilación primaria de crudo:** inicia la refinación del petróleo donde se separan los diferentes componentes del crudo en una torre de destilación.
- **Destilación al vacío:** se alimenta el crudo reducido de la destilación primaria realizando una destilación al vacío, para destilar compuestos por debajo de su punto de ebullición normal.
- **Hidrodesulfuración:** se purifica la corriente alimentada eliminando básicamente los compuestos de azufre, nitrógeno, oxígeno y metales pesados.
- **Reformación:** Reforma la estructura molecular de las naftas por medio de la desintegración en catalizadores para producir gasolina de alto octanaje.
- **Isomerización:** Convierte la cadena lineal de los hidrocarburos en una cadena ramificada en presencia de un catalizador para obtener gasolina de alto octano y gas combustible.
- **Desintegración catalítica:** se rompen los hidrocarburos del gasóleo con ayuda de un catalizador.
- **Alquilación:** se forma el alquilado ligero por medio de los compuestos de cuatro átomos de carbono en una unidad de alquilación. Para producir octanos superiores a 87.
- **Polimerización:** Los polipropilenos reaccionan entre sí y en presencia de un catalizador forman gasolina de polimerización de alto octano y Gas Licuado de Petróleo (LPG).
- **Coquización:** los residuos son integrados térmicamente para convertirlos en combustibles ligeros y en coque.
- **Recuperación de Azufre:** se recolecta y se convierte el H₂S en azufre y ácido sulfúrico.

dando origen a los productos principales que se venden en el mercado como se muestra en la Figura 3.1.



“REMOCIÓN DE ACEITE EN AGUAS RESIDUALES DE REFINACIÓN DEL PETRÓLEO MEDIANTE ADICIÓN DE REACTIVOS QUÍMICOS Y SEPARACIÓN POR FLOTACIÓN NATURAL O CON AIRE DISUELTO”

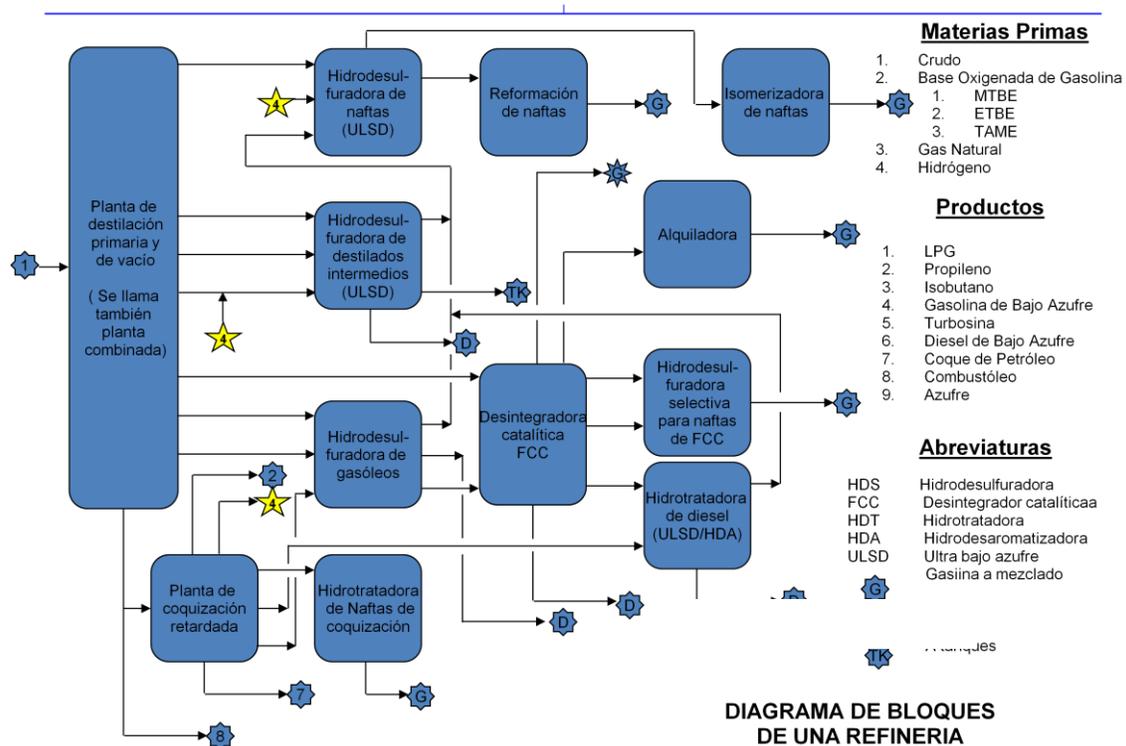


Figura 3. 1 Procesamiento de petróleo (www.pemex.com)

3.3 Uso del agua en los procesos de refinación

Actualmente las refinerías consumen grandes cantidades de agua en los distintos procesos de refinación, como craqueo catalítico e hidrotratamiento, así como para el uso de calentamiento (mediante calderas), enfriamiento, para proceso y para servicios auxiliares, dando como resultado un consumo aproximado de 2 Hm³/año para uso en el proceso de refinado (PEMEX, 2008). La cantidad de agua requerida puede variar de acuerdo a las características particulares del crudo y de los productos que se obtienen. En la Tabla 3.2 se muestra un aproximado de la distribución porcentual del uso del agua en las 6 refinerías de México (PEMEX, 2008).

Tabla 3. 2 Distribución porcentual del agua según su uso.

Refinería	Calderas	Enfriamiento	Proceso	Servicios
Salamanca	17.8	50.0	23.0	7.0
Minatitlán	13.8	67.9	17.7	0.5
Cd. Madero	14.4	52.6	11.9	21.0
Salinas Cruz	17.0	60.0	15.0	8.0
Promedio	15.3	56.8	17.5	9.5

Fuente: (Baron, 2000), (Jiménez, 2001)

Agua de calderas

El agua requerida para la generación de vapor debe tener bajos niveles de salinidad para evitar la formación de incrustaciones y corrosión. Por esta razón es tratada previamente mediante desmineralización y ajuste de pH.



Agua de enfriamiento

Las operaciones de enfriamiento consumen la mayor parte del agua demandada en una refinería, es decir, alrededor del 40-75%^(Pemex, 2008). Generalmente el agua de enfriamiento no está en contacto directo con el petróleo y suele recircularse en gran proporción, ya que un pequeño porcentaje que son las purgas de las torres de enfriamiento se desechan al drenaje. Las principales fuentes de aportación de agua son pozos, ríos, mares y aguas residuales domésticas e industriales apropiadamente tratadas.

Agua de proceso

El agua de proceso participa de manera diferente en cada etapa de la refinación tal y como se describe a continuación.

Desalación. La desalación se practica añadiendo agua en proporciones de 6 a 15% con respecto al petróleo para evitar depósitos de sal y reducir la corrosión^(Jimenez, 2001). El efluente de la desalación contiene hidrocarburos, fenoles y sales minerales.

Destilación. En las torres de destilación se usa vapor de agua, el cual se contamina con hidrocarburos, amoniaco, cianuros, fenoles, compuestos sulfurados y mercaptanos generando aguas amargas.

Craqueo térmico y catalítico: Se requiere de agua de enfriamiento y vapor en las torres de fraccionamiento para separar los productos, generando a la vez una gran cantidad de agua amarga con pH alcalinos y contenido de hidrocarburos, sulfuros, fenoles, amoniaco y cianuros.

Alquilación. Los alquilatos generados se lavan con sosa y agua para neutralizar y extraer el ácido usado como catalizador. El agua residual proveniente de los acumuladores contiene aceite, sulfuros y otros contaminantes en bajos niveles. Además las unidades de alquilación cuentan con sistemas de refrigeración, por lo que otra fuente de contaminación del agua es a través de fugas en el sistema de enfriamiento.

Agua de servicios auxiliares

El agua destinada a los servicios generales es básicamente para uso en sanitarios, laboratorios, comedores y riego de jardines. El agua contra incendio se extrae de un cuerpo de agua cercano o se suministra mediante depósitos de agua y no se contabiliza dentro del balance de agua residual generada por considerarse de carácter accidental. Esta agua puede contaminarse al ser utilizada o durante su almacenamiento.



En la Figura 3.2 se presenta de forma esquemática el uso del agua en la refinería de estudio.

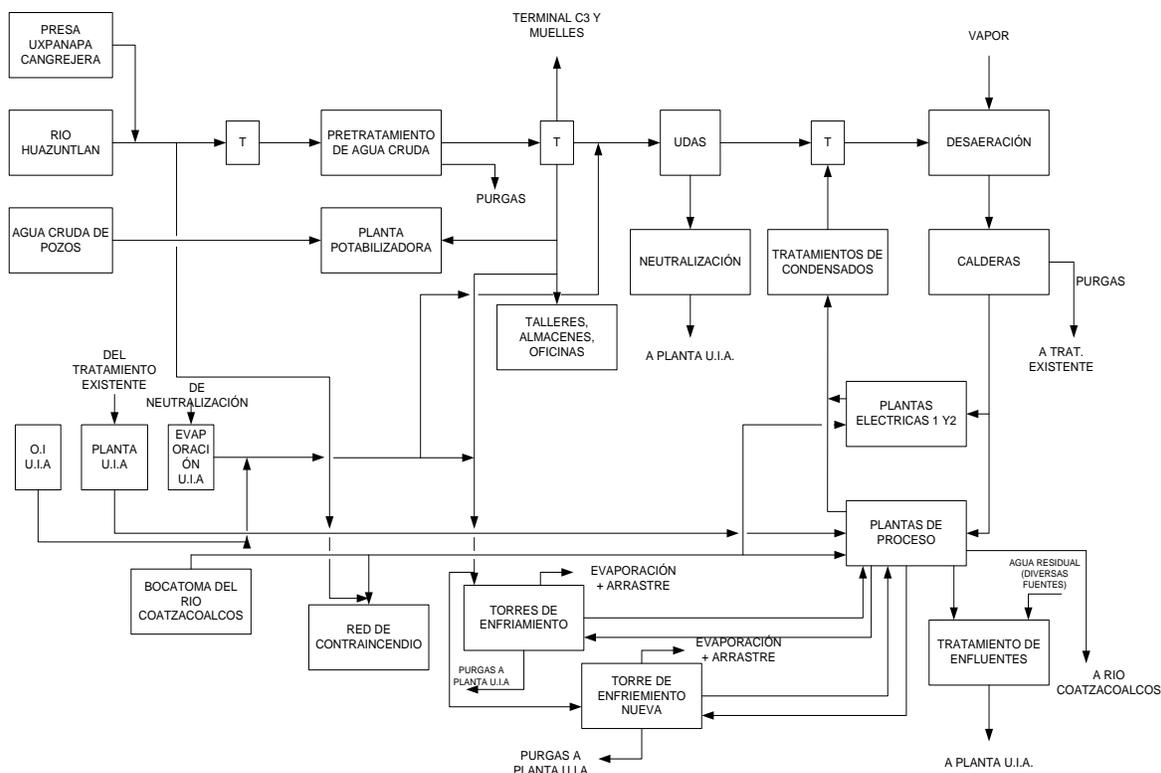


Figura 3. 2 Esquema del uso del agua en la Refinería “General Lázaro Cárdenas del Río”, Minatitlán, Veracruz (PEMEX-Refinación).

3.3.1 Requerimientos de agua

La cantidad de agua que se requiere dentro de una refinería, depende de las características particulares de esta, como son la capacidad, los procesos involucrados y los tipos de productos generados. En la Tabla 3.3 se muestran los índices de demanda y descarga promedio de agua en algunas refinerías de México.

Tabla 3. 3 Índices de demanda y descarga promedio de agua.

Refinería	Demanda (Barriles de agua/Barriles de crudo)	Descarga (Barriles de agua/Barriles de crudo)
Salamanca	2.5	0.99
Minatitlán	11.6	11.3
Cd. Madero	1.7	0.96

Fuente: (Villalobos, 2005)



3.4 Generación de aguas residuales

Las aguas residuales generadas en las diferentes refinerías se clasifican de la manera siguiente:

- **Pluviales:** Son efluentes libres de aceite y de otros contaminantes como el agua de lluvia, procedente de zonas que están fuera del área de proceso, de forma que pueden ser descargadas directamente a un cuerpo receptor.
- **Sanitarios:** Comprenden las aguas residuales provenientes de oficinas, cocinetas e instalaciones para uso del personal.
- **Aceitosos:** Comprenden las aguas que escurren sobre las superficies de las áreas de proceso, patios con tanques, así como el agua de enfriamiento que se ha contaminado con aceite ya sea por fugas en intercambiadores o por derrames.
- **Proceso:** Efluentes provenientes de las diferentes etapas de proceso que han estado en contacto directo con el petróleo y poseen alta concentración de sulfuros y fenoles.

Las aguas residuales aceitosas representan más del 69% del total del agua residual que se genera en las refinerías, en la Tabla 3.4 se muestran los datos registrados del flujo de agua residual aceitosa generada en las refinerías de México.

Tabla 3. 4 Generación de aguas residuales aceitosas en las 6 refinerías (Arriaga, 2011)

Refinería	Q (L/s) generación total de agua residual	Q (L/s) efluente aceitoso	Flujo porcentual del efluente aceitoso
Cd. Madero	162	112	69
Minatitlán	244	206	92
Salamanca	111	66	59
Salina Cruz	281	114	41
Tula	997	388	39
Cadereyta	249	180	72

3.4.1 Impactos en el uso de agua en una refinería

Datos de la industria muestran que una refinería podría generar aproximadamente 2 Hm³/año aguas residuales, las cuales llegan a ser vertidas en cuerpos de agua (Villagomez, 2005). Normalmente, este tipo de aguas residuales contienen hidrocarburos, sulfuro de hidrógeno, materiales disueltos, sólidos en suspensión, fenoles, amoníaco, sulfuros y otros compuestos. Dichas aguas pueden proceder diferentes fuentes siendo estas:

- ❖ Vapor condensado;
- ❖ Agua de separación;
- ❖ Purga de torres de refrigeración y calderas;
- ❖ Agua de lavado;
- ❖ Aguas procedentes del proceso de desalación del crudo;
- ❖ Agua de neutralización de residuos ácidos y alcalinos.

Por lo anterior, el tratamiento de estas aguas residuales resulta un gran reto debido a que no se puede usar un tratamiento primario para la eliminación de los contaminantes. Actualmente en las refinerías el sistema de tratamiento de efluentes tiene deficiencias ya que el proceso de remoción es



simple y no se remueve el aceite disuelto, y a su vez provocan contaminación y la extinción de diferentes especies acuáticas a consecuencia de verter estos efluentes a cuerpos de agua como ríos y lagos cercanos a ella.

3.5 Planta de tratamiento de efluentes en refinería

La Refinería de PEMEX “Gral. Lázaro Cárdenas del Río” en Minatitlán, Veracruz, tiene como parte de su filosofía ambiental y de operación, la optimización de la reutilización del agua en la refinería con la consiguiente minimización de la generación de efluentes líquidos, los cuales se procesarán en el sistema de tratamiento de efluentes de la refinería con el propósito de remover los contaminantes para así cumplir con las especificaciones requeridas para su reúso, minimizando así las descargas (PEMEX, 2008).

El efluente aceitoso proveniente de una refinería, que fue usado como modelo en esta investigación, involucra una serie de tratamientos para su recuperación: principalmente es tratado en los separadores primarios tipo API, donde se lleva a cabo la separación del aceite del agua por medio de la diferencia en densidades, posteriormente pasa por separadores de placas corrugadas en donde se remueve el aceite que queda en las aguas residuales. Después de los separadores de placas corrugadas, el agua va a un canal (Separador No.6), una parte del efluente pasa por los separadores Monar y se entrega a la PTAR; el resto del efluente se descarga al río. En el diagrama de la Figura 3.3 muestra el tratamiento al efluente aceitoso:

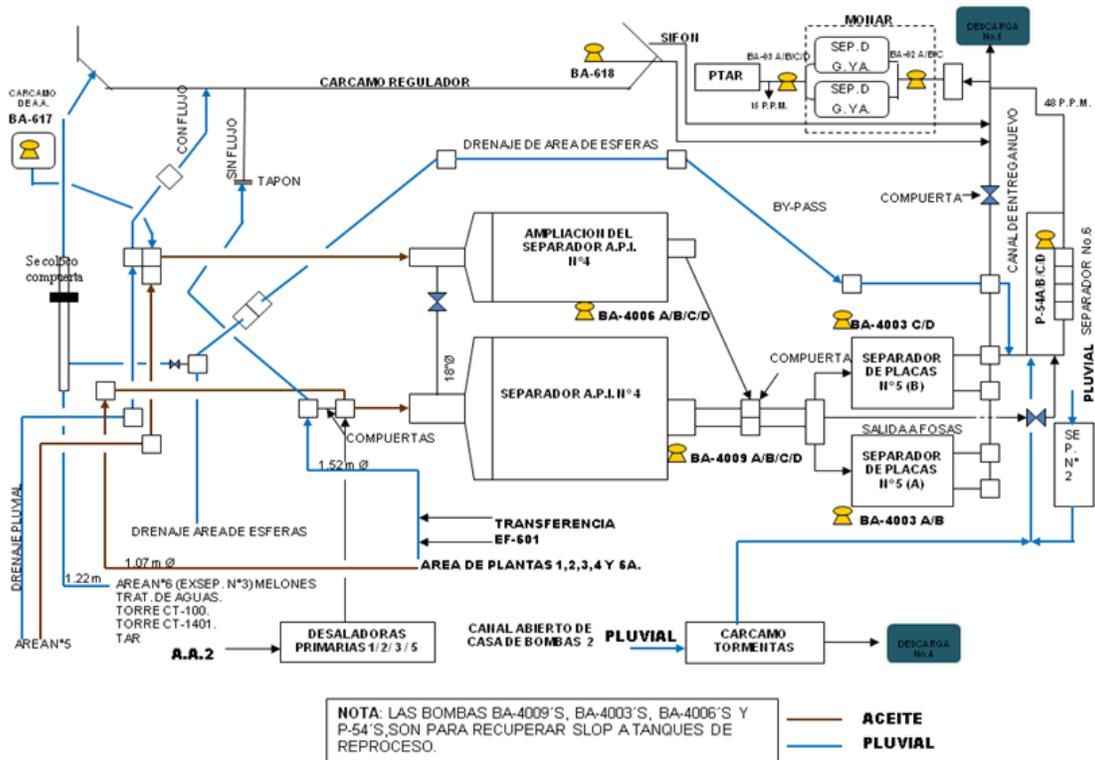


Figura 3. 3 Diagrama del sistema de pre-tratamiento de las aguas residuales aceitosas (PEMEX-Refinación).



3.5.1. Límites máximos permisibles de contaminantes en la descarga de efluentes

La descarga de efluentes fuera de límite de baterías de la Refinería de Minatitlán, debe de cumplir con los máximos contenidos permisibles de compuestos contaminantes, para uso en riego agrícola, de acuerdo a la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en la descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales (ver Tabla 3.5.).

Tabla 3. 5 Límites máximos permisibles para contaminantes básicos (NOM-001-SEMARNAT-1996).

Parámetro (mg.L ⁻¹ , excepto cuando se especifique)	Ríos	
	Uso en riego agrícola (A)	
	P.M.	P.D.
Temperatura °C (1)	N.A.	N.A.
Grasas y Aceites (2)	15	25
Materia Flotante (3)	AUSENTE	AUSENTE
Sólidos Sedimentables (mL/l)	1	2
Sólidos Suspendidos Totales	150	200
Demanda Bioquímica de Oxígeno ₅	150	200
Nitrógeno Total	40	60
Fósforo Total	20	30

(1) Instantáneo

(2) Muestra Simple Promedio Ponderado

(3) Ausente según el Método de Prueba definido en la NMX-AA-006.

P.D.=Promedio Diario; P.M.=Promedio Mensual; N.A.= No es aplicable.

(A), (B) y (C): Tipo de Cuerpo Receptor según la Ley Federal de Derechos.

3.6 Grasas y Aceites

Las grasas y aceites son compuestos orgánicos constituidos principalmente por ácidos grasos de origen animal y vegetal, así como los hidrocarburos del petróleo. Algunas de sus características más representativas son baja densidad, poca solubilidad en agua, baja o nula biodegradabilidad. Por ello, si no son controladas se acumulan en el agua formando natas en la superficie del líquido y dificultando etapas posteriores de tratamiento. Los efluentes de la refinería en su mayoría son aceitosos.

3.6.1. Propiedades físicas y químicas

Se deben tomar en cuenta las propiedades tanto físicas como químicas de las grasas y aceites, ya que estas influyen de manera directa en el tratamiento de aguas residuales aceitosas para cumplir con las especificaciones que marca la normatividad vigente, por lo que el proceso de tratamiento de estas aguas estará dado por la naturaleza de las grasas y aceites. A continuación se presentan las propiedades físicas más relevantes de los aceites son:

- Solubilidad

Los aceites se caracterizan principalmente por su virtual inmiscibilidad en el agua, sin embargo, son miscibles en muchos solventes orgánicos no polares. La solubilidad es dependiente de las propiedades termodinámicas del soluto y disolvente, y de las fuerzas de atracción entre las moléculas.



“REMOCIÓN DE ACEITE EN AGUAS RESIDUALES DE REFINACIÓN DEL PETRÓLEO MEDIANTE ADICIÓN DE REACTIVOS QUÍMICOS Y SEPARACIÓN POR FLOTACIÓN NATURAL O CON AIRE DISUELTO”



- Tensión superficial e interfacial

Los aceites comerciales tienden a tener más baja tensión superficial e interfacial debido a la presencia de componentes polares de superficie activa, tales como monoglicéridos, fosfolípidos y jabones. Los monoglicéridos y jabones pueden reducir la tensión interfacial entre agua y aceite.

- Densidad

Los valores de densidad para aceites están generalmente en el intervalo entre 0.920 y 0.964 g/L. La densidad se incrementa cuando decrece el peso molecular e incrementa con la insaturación (Rodríguez, 2007). La densidad se incrementa aproximadamente en forma lineal con el incremento de la temperatura (Rodríguez, 2007).

Muchas de las grasas y aceites tienen solo dos grupos funcionales reactivos; el doble enlace influye en la reactividad del átomo de carbono alílico, particularmente cuando hay dobles enlaces múltiples presentes. La Tabla 3.6 muestra las características físicas y químicas de mayor importancia para la caracterización de los aceites cíclicos ligeros presentes en las refinerías:

Tabla 3. 6 Características físicas y químicas de algunos aceites cíclicos ligeros de acuerdo con la refinería en estudio. (Laredo, 2002)

Refinería	Tula	Cd. Madero	Salina Cruz	Cadereyta	Salamanca	Minatitlán
Propiedad						
Peso específico (20 / 4 °C), g / mL	0.9338	0.9442	0.9336	0.9573	0.9448	0.9373
Azufre total, %p	2.98	2.93	2.73	3.52	2.90	2.14
Nitrógeno total, ppm	903	445	675	972	833	566
Nitrógeno básico, ppm	64	38	38	70	58	230
Índice de cetano	30	25	29	25	29	30
T. de inflamación, °C		112	116	127	129	93
T. de escurrimiento, °C		-21	-6	0	-6	3
T. de anilina, °C	39.2	14.8		24	25.4	34.2
Índice de refracción	1.546	1.5841				
Color	> -16	L 2.0	> -16	L 3.0	L 2.0	L 2.0
Aromáticos totales, % p	67.38	74.98	67.74	74.72	71.69	68.81
Distribución de compuestos, % p						
Saturados	32.28	20.1	30.46	20.23	30.01	27.44
Monoaromáticos	17.59	17.03	15.31	15.21	14.89	17.33
Diaromáticos	26.28	53.01	35.35	38.91	32	33.77
Poliaromáticos	10.84	6.52	9.8	15.94	11.77	12.19
Polares	13.01	3.34	9.08	9.71	11.33	9.27
Totales	100	100	100	100	100	100
Destilación ASTM D-86						
TIE	211	226	226	216	206	179
10	263	264	263	259	269	255
30	292	284	286	284	283	285
50	334	297	299	302	298	314
70	341	308	320	327	313	341
90	362	333	347	355	335	368
TFE	396	362	372	380	363	402

Nota.- T= Temperatura; ASTM= Destilación; TIE= Temperatura inicial de ebullición; TFE=Temperatura final de ebullición.

La variación de las características fisicoquímicas de los aceites se debe a los diferentes tipos de crudo o petróleo que se tratan en las 6 refinerías del país; así mismo la composición del crudo depende de la cantidad de hidrocarburos pesados y ligeros y del procesamiento del mismo.



3.6.2. Tipos de aceites en aguas residuales de refinería

Los efluentes de la refinería en su mayoría son aceitosos, el aceite se encuentra en estado libre (depende de su densidad), disuelto (depende de las propiedades termodinámicas para ser soluble) y emulsionado (relacionado con la tensión superficial). A continuación se describen brevemente algunas características correspondientes a cada uno de ellos:

Aceite libre. El petróleo está en forma de pequeñas gotas, de un tamaño suficiente para que estas puedan elevarse como resultado de las fuerzas de la flotación formando una capa de aceite sobre el agua. En condiciones de flujo estable, el aceite libre puede eliminarse por flotación. Esta eliminación está en función de tiempo de residencia, de las diferencias en la gravedad específica, temperatura y la estabilidad de la emulsión. Algunos sólidos (grasas gruesas) tienen un peso específico superior a 1.0 y se sedimentan en la parte baja de un separador. La mayoría de los sólidos finos en aguas residuales de la refinería y el petróleo tiene una gravedad específica de menos de 1.0 por lo que flotan en la superficie del agua.

Aceite emulsionado. Se encuentra en forma de pequeñas gotitas de aceite o flóculos con un diámetro menor a 20 micras (principalmente en el intervalo de 1-10 micras). Estos flóculos forman una suspensión estable en el agua como resultado del predominio de las fuerzas de la partícula sobre fuerzas de flotación. La presencia de partículas contribuye a la formación de la emulsión. Una emulsión agua-aceite, contiene una fase de petróleo independiente del aceite emulsionado que puede ser eliminado por adición de químicos, coalescencia o por flotación pero no por separación de gravedad por sí sola.

Aceite disuelto. Es la fracción de petróleo que forma una solución molecular con agua. No se puede quitar petróleo disuelto por separación de gravedad; Además el tratamiento de aguas residuales (por ejemplo, tratamiento biológico) requiere la extracción de petróleo disuelto ^(Mijaylova, 2001). La fracción del petróleo que es extraíble de una corriente de aguas residuales por separación de gravedad se ve afectada por el tipo de material oleoso presente. Los separadores de petróleo convencionales quitan sólo el aceite pero las emulsiones estables y aceite disuelto requieren un tratamiento adicional.

3.6.3. Tratamientos aplicados a los efluentes aceitosos

Los contaminantes aceitosos en las aguas residuales pueden ser caracterizados por la polaridad, biodegradabilidad y características físicas. Los contaminantes polares tienen usualmente un origen vegetal o animal y sus fuentes son principalmente las operaciones industriales de alimentos. Los contaminantes no polares, provienen del petróleo o fuentes minerales, siendo la fuente principal la industria petrolera y aquellas industrias que consumen los bienes producidos por la primera y generalmente no son biodegradables.

En ausencia de agentes surfactantes (superficie activa), ya sean naturales o sintéticos y bajas condiciones de agitación es muy probable que los aceites no sean altamente dispersados y por consiguiente serán fácilmente separables por gravedad o flotación. Los influentes provienen de operaciones de limpieza o de proceso, con frecuencia tienen una mayor proporción de aceites que se fija en emulsiones estables y entonces su separación es más compleja y requiere un proceso físico.



❖ Tratamientos físicos

Estos tratamientos se aplican cuando el contenido de materia grasa separable es considerable. En ese caso es siempre deseable instalar como primera etapa un sistema de separación de grasa-aceite y agua, reduciendo de esta manera la carga contaminante que está siendo descargada, y permitiendo la recuperación de las grasas y/o aceites potencialmente útil.

Separadores API y de placas corrugadas

Históricamente, el diseño de separadores de agua de petróleo convencionales se basaba en criterios desarrollados a partir de un estudio de investigación financiado por la API iniciado en 1948; numerosos separadores de aceite-agua basados en los criterios de diseño han sido puestos en funcionamiento a lo largo de la industria del petróleo (Perry, 2001).

Una función principal del separador de aceite-agua es quitar grandes cantidades de aceite libre antes del tratamiento adicional, teniendo en cuenta que solo puede retener gotas con un tamaño $>20\mu\text{m}$. El separador de aceite-agua protege a los procesos subsecuentes de tratamiento de aguas residuales, sensibles a cantidades excesivas de aceite. Las espumas del separador y aceite no recuperado, son típicamente recicladas y pueden terminar como lodos (ATAS, 1986).

Para grandes flujos los separadores API necesitan grandes áreas de superficie, por lo que se han modificado a través de la introducción de placas planas paralelas, inclinadas o placas corrugadas, especialmente diseñadas, con lo que se ha mejorado la situación hidráulica en estas trampas y a la vez la capacidad de carga (Perry, 2001).

❖ Tratamientos físico-químicos

Este tipo de tratamiento se aplica a sistemas altamente emulsificados y dispersos, tal que el tamaño de las partículas de materia grasa o aceite es menor que $20\mu\text{m}$, donde los procesos de separación por gravedad son absolutamente ineficientes. La estabilidad de los sistemas emulsificados puede ser explicado en términos de las cargas electrostáticas transportadas por las partículas. Las sustancias grasas en los influentes de la industria petrolera son invariablemente negativamente cargadas, por tanto ocurre una repulsión partícula-partícula tal que inhibe la coagulación espontánea. La desestabilización de los sistemas emulsificados se alcanza a través de la neutralización de la carga por ajuste de pH, o la adición de un ión de carga opuesta. La efectividad de agregar iones se incrementa de acuerdo a la valencia que tenga el ión, tal que los iones trivalentes cargados positivamente como el hierro o el aluminio son frecuentemente empleados (Rodríguez, 2007).

A continuación se describen los tratamientos fisicoquímicos estudiados en este trabajo de tesis con el fin de lograr un tren de tratamiento para aguas residuales de refinería mas eficiente que el actual. Dentro de estos tratamientos se encuentra la coagulación-floculación y la flotación por aire disuelto.



3.7 Coagulación-Floculación

Generalmente las aguas residuales tienen color y turbidez a causa de pequeñas partículas llamadas coloides; estas partículas permanecen en suspensión en el agua por tiempo prolongado y pueden atravesar un medio filtrante muy fino. Por otro lado aunque su concentración es muy estable, no presentan la tendencia de aproximarse unas a otras, debido a que cada partícula se encuentra estabilizada por una serie de cargas de igual signo sobre su superficial.

Para eliminar estas partículas se recurre a los procesos de coagulación y floculación, la coagulación tiene por objeto desestabilizar las partículas en suspensión es decir facilitar su aglomeración. En la práctica este procedimiento es caracterizado por la inyección y dispersión rápida de productos químicos. La floculación tiene por objetivo favorecer con la ayuda de la mezcla lenta el contacto entre las partículas desestabilizadas. Estas partículas se aglutinan para formar un floc que pueda ser fácilmente eliminado por los procedimientos de decantación y filtración (Sartori, 1997).

Aun cuando ambos procesos son esencialmente diferentes (en la coagulación se agregan sustancias químicas y la floculación ocurre por procesos puramente físicos), casi siempre se encuentran asociados.

Mediante la coagulación-floculación se remueve del 80 al 90% del total de la materia suspendida, del 40 al 70% de DBO₅, del 30 al 60% de DQO y del 80 al 90% de bacterias, con respecto a la cantidad de sólidos coloidales presentes en el agua residual (Al-Shamrani, 2002). La coagulación-floculación se aplica en situaciones específicas, por ejemplo:

- Como pretratamiento o como ayuda del tratamiento primario con el fin de aumentar la eficiencia de los procesos subsecuentes mediante la eliminación de la materia coloidal.
- Cuando los componentes del agua residual no son biodegradables.
- Si se desea garantizar la sedimentación de los sólidos suspendidos y coloidales.
- Cuando el agua residual contiene gran cantidad de compuestos tóxicos.
- Si los reactivos para el tratamiento están disponibles a bajo costo.

Desestabilización de la emulsión

La desestabilización de los sistemas emulsificados se alcanza a través de la neutralización de la carga por ajuste de pH, o introduciendo una carga eléctrica de signo opuesto a la de las gotitas emulsificadas. Las cargas eléctricas de las gotitas emulsificadas se neutralizan por medio de una carga eléctrica de signo opuesto a la de la gotita. Las características dieléctricas del agua y las del aceite hacen que las gotitas emulsificadas de aceite porten cargas negativas como se muestra en la Figura 3.4. En consecuencia, para desestabilizar una emulsión aceite-agua debe emplearse un desemulsificante catiónico (Kemmer, 1993). Los iones trivalentes cargados positivamente como el hierro o el aluminio son frecuentemente empleados. Preferentemente, el sulfato de aluminio se usa en el tratamiento de sistemas emulsificados.

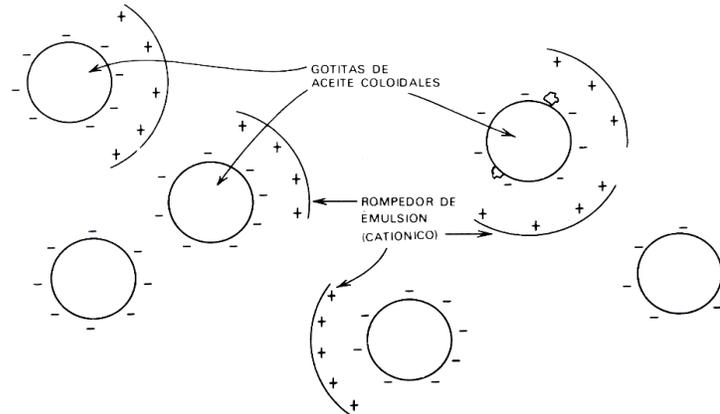


Figura 3. 4 La acción de un rompedor de emulsión catiónica al neutralizar las cargas superficiales sobre una gotita de aceite coloidal en un agua de desecho aceitosa (Kemmer, 1993).

A rangos de pH (4-7), el aluminio disociado en agua producirá complejos de aluminio cargados positivamente los cuales son utilizados para neutralizar las partículas de grasas y aceites cargadas negativamente. En presencia de polielectrolitos de aluminio se forman flóculos de grasas y/o aceites en el agua residual aceitosa, al formarse flóculos de un tamaño específico pueden ser separados por flotación o sedimentación. Otros compuestos que son usados para romper las emulsiones de grasas son el cloruro férrico, sulfato ferroso, el aluminato de sodio y la caliza.

El uso de otras sales inorgánicas tales como $AlCl_3$ y $CaCl_2$ para desestabilizar las emulsiones de aceites de corte en agua y con ello iniciar el proceso de coagulación y lograr el proceso de sedimentación de los aceites presente, muestra resultados satisfactorios en lo relativo a la separación de la fase aceitosa de la fase acuosa, se ha usado como parámetro indicador del nivel de depuración, la turbiedad, disminuyendo esta desde 900 a 120 UNT, en un tiempo de 80 minutos (Odegaar, 1995).

3.7.1. Factores principales dentro de la coagulación-floculación

Existen varios factores para llevar a cabo el proceso de la coagulación-floculación como se muestra en los siguientes párrafos.

Tamaño de las partículas en suspensión

Las partículas se clasifican de acuerdo a su tamaño; así las partículas con diámetro inferior a 1 micrómetro que corresponden a partículas de materias orgánicas o inorgánicas, se depositan muy lentamente. La Tabla 3.7 indica los tiempos de decantación de las diferentes partículas en función de: sus dimensiones; densidad y de la temperatura del agua.

Tabla 3. 7 Tiempos de decantación de diferentes partículas (Han, 2001).

Tipo de partícula	Diámetro (mm)	Tiempo de caída	
		Densidad 2.65	Densidad 1.1
Grava	1.0	0.013 s.	0.2 s.
Arena gruesa	1.0	1.266 s.	20.9 s.
Arena fina	0.1	126.66 s.	34.83 min.
Lodo fino	0.01	3.52 h.	58 h.
Bacterias	0.001	14.65 d.	249.1 d.
Coloides	0.0001	4.12 a.	66.59 d.



Se observa fácilmente que a la misma densidad, las partículas más pequeñas tienen un tiempo de duración de caída más grande, esto imposibilita la decantación sin la adición de un factor externo. Por otra parte los coloides son suspensiones estables, por lo que es imposible su sedimentación natural, presentan una gran superficie de contacto entre la fase sólida y la fase líquida; por ejemplo 1 cubo de 1 cm³, tiene una superficie total de 6 cm²; si está dividido en pequeños cubos elementales, la superficie total de todos aquellos es mucho más grande ^(Han, 2001).

Afinidad de las partículas coloidales por el agua

Las partículas coloidales se caracterizan por ser hidrofílicas (tienen afinidad por el agua) e hidrófobas (es decir que rechazan al agua), los primeros se dispersan espontáneamente dentro del agua y son rodeados de moléculas de agua que previene todo contacto posterior entre estas partículas, son generalmente partículas de material orgánico; las partículas hidrofóbicas no son rodeados de moléculas de agua, su dispersión dentro del agua no es espontánea por lo que requieren de la ayuda de medios químicos y físicos y por lo general son de material inorgánico. En realidad son pocas las partículas que son exclusivamente hidrofílicas o hidrofóbicas; se tienen más bien partículas hidratadas a diferentes grados ^(Al-Shamrani, 2002).

Carga eléctrica y doble capa

Las partículas coloidales poseen normalmente una carga eléctrica negativa situada sobre su superficie. Estas cargas llamadas cargas primarias, atraen los iones positivos del agua, los cuales se adhieren fuertemente a las partículas y atraen a su alrededor iones negativos acompañados de una pequeña cantidad de iones positivos ^(Demirci, 1998) (Fig. 3.5).

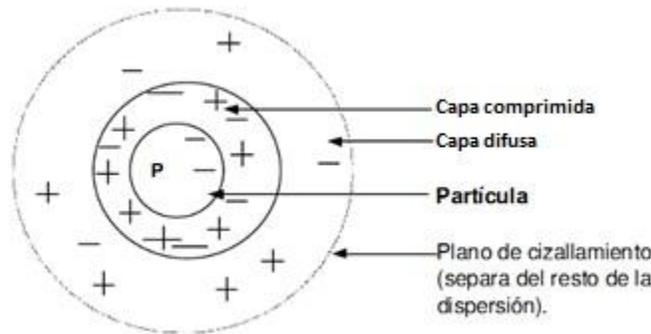


Figura 3. 5 Doble capa de una partícula coloidal ^(Demirci, 1998).

Los iones que se adhieren fuertemente a la partícula y se desplazan con ella, forman la capa adherida o comprimida, mientras que los iones que se adhieren débilmente constituyen la capa difusa, por lo tanto hay un gradiente o potencial electrostático entre la superficie de la partícula y la solución, llamado Potencial Zeta.

Factores de estabilidad e inestabilidad

Las partículas coloidales están sometidas a dos tipos de fuerzas:



- Fuerzas de atracción de Van der Waals: Son fuerzas de atracción producidas por el movimiento continuo de las partículas. E_a (factores de Inestabilidad)
- Fuerzas de repulsión electrostáticas: Son fuerzas que impiden la aglomeración de las partículas cuando estas se acercan unas a otras; por ejemplo 2 partículas de igual signo no se pueden aproximar, estas se rechazan. E_b (columbicas – factor de estabilidad) ^(Desjardins, 1992)

El equilibrio de una suspensión coloidal depende de la fuerza resultante entre la fuerza de atracción y la fuerza de repulsión: E_r , (ver Figura 3.7).

$$E_r = E_a + E_b \quad \text{Ec. 3. 1}$$

Influencia del pH

El pH es una medida de la actividad del ión hidrógeno en una solución, y es igual a:

$$\text{pH} = -\log \{H^+\} \quad \text{Ec. 3. 2}$$

El mejor intervalo de pH para el proceso de coagulación es función del tipo de coagulante a ser utilizado y de la naturaleza del agua a tratar. Si la coagulación se realiza fuera del intervalo de pH óptimo entonces se debe aumentar la cantidad del coagulante; por lo tanto la dosis requerida es alta. Para sales de aluminio el intervalo de pH para la coagulación es de 5.0 a 7.5 y para las sales de hierro, el intervalo de pH óptimo es de 4.0 a 9.5 unidades ^(Di Bernardo, 1993).

Influencia de las sales disueltas

Las sales contenidas dentro del agua ejercen las influencias siguientes sobre la coagulación y floculación ^(Kent, 1984).

- Modificación del intervalo de pH óptimo.
- Modificación del tiempo requerido para la floculación.
- Modificación de la cantidad de coagulantes requeridos.
- Modificación de la cantidad residual del coagulante dentro del efluente.

Influencia de la temperatura del agua

La variación de 1°C en la temperatura del agua conduce a la formación de corrientes de densidad (variación de la densidad del agua) de diferentes grados que afectan a la energía cinética de las partículas en suspensión, por lo que la coagulación se hace más lenta; temperaturas muy elevadas desfavorecen igualmente a la coagulación. Una disminución de la temperatura del agua en una unidad de decantación conlleva a un aumento de su viscosidad; esto explica las dificultades de la sedimentación de un floc ^(ATAS, 1986).

Influencia de la dosis del coagulante

La cantidad del coagulante a utilizar tiene influencia directa en la eficiencia de la coagulación, así ^(Bunker, 1995):

- Poca cantidad del coagulante, no neutraliza totalmente la carga de la partícula, la formación de los microfloculos es muy escaso, por lo tanto la turbiedad residual es elevada.



- Alta cantidad de coagulante produce la inversión de la carga de la partícula, conduce a la formación de gran cantidad de microfloculos con tamaños muy pequeños con velocidades de sedimentación muy bajas, por lo tanto la turbiedad residual es igualmente elevada.
- La selección del coagulante y la cantidad óptima de aplicación se determinan mediante los ensayos de pruebas de jarra.

La selección del coagulante y la dosis juegan un rol muy importante sobre:

- La buena o mala calidad del agua clarificada.
- El buen o mal funcionamiento de los decantadores.

Por ejemplo: en la Tabla 3.8 se observa para Turbiedad inicial de $T_o = 20$ UNT, los valores de dosis de coagulantes son diferentes para los valores de alcalinidad y los diferentes valores de pH ^(Bunker, 1995).

Tabla 3. 8 Dosis de coagulantes a diferentes valores de pH y alcalinidad ^(Bunker, 1995).

pH: Unidades	Alcalinidad	Dosis Óptima FeCl₃ Solución	Dosis Óptima Al₂(SO₄)₃ Solución
7.46	91 ppm CaCO ₃	14 ppm	26 ppm
7.29	91 ppm CaCO ₃	16 ppm	30 ppm

Influencia de la mezcla

El grado de agitación que se da a la masa de agua durante la adición del coagulante, determina si la coagulación es completa; turbulencias desiguales hacen que cierta porción de agua tenga mayor concentración de coagulantes y la otra parte tenga poco o casi nada; la agitación debe ser uniforme e intensa en toda la masa de agua, para asegurar que la mezcla entre el agua y el coagulante haya sido adecuada y se haya producido la reacción química de neutralización de cargas correspondiente.

En el transcurso de la coagulación y floculación, se procede a la mezcla de productos químicos en dos etapas. En la primera etapa, la mezcla es enérgica y de corta duración (alrededor de 60 s), llamada mezcla rápida; esta mezcla tiene por objeto dispersar la totalidad del coagulante dentro del volumen del agua a tratar, y en la segunda etapa la mezcla es lenta y tiene por objeto desarrollar los microfloculos. La mezcla rápida se efectúa para la inyección de productos químicos dentro de la zona de fuerte turbulencia, una inadecuada mezcla rápida conlleva a un incremento de productos químicos ^(Eckenfelder, 1989).

Influencia de la turbiedad

Turbiedad.- Es una forma indirecta de medir la concentración de las partículas suspendidas en un líquido; mide el efecto de la dispersión que estas partículas presentan al paso de la luz; y es función del número, tamaño y forma de partículas ^(Eckenfelder, 1989).

La variación de la concentración de las partículas permite hacer las siguientes predicciones:

- ❖ Para cada grado o nivel de turbiedad existe una dosis de coagulante, con la que se obtiene la turbiedad residual más baja, que corresponde a la dosis óptima.
- ❖ Cuando la turbiedad aumenta se deben adicionar pequeñas cantidades de coagulante debido a que la probabilidad de colisión entre las partículas es muy elevada; por lo que la coagulación se

realiza con facilidad; por el contrario cuando la turbiedad es baja la coagulación se realiza muy difícilmente, y la cantidad del coagulante deberá ser en la mismas proporciones o mayores que si la turbiedad fuese alta.

- ❖ Cuando la turbiedad es muy alta, conviene realizar una pre-sedimentación natural o forzada, en este caso con el empleo de un polímero aniónico.
- ❖ Es siempre más fácil coagular las aguas de baja turbiedad y aquellas contaminadas por desagües domésticos, que los industriales, porque requieren mayor cantidad de coagulante que los no contaminados. (Bunker, 1995)

3.7.2. Mecanismos de coagulación

La desestabilización de las partículas coloidales se puede llevar a cabo por los siguientes mecanismos fisicoquímicos:

- Compresión de la doble capa.
- Adsorción y neutralización de cargas.
- Interacción de partículas en un precipitado.
- Adsorción y puente.

Compresión de la Doble Capa

Cuando se aproximan dos partículas semejantes, sus capas difusas interactúan y generan una fuerza de repulsión, cuyo potencial de repulsión está en función de la distancia que los separa y cae rápidamente con el incremento de iones de carga opuesta al de las partículas, esto se consigue sólo con los iones del coagulante (Han, 2001) (ver Fig. 3.7).

Existe por otro lado un potencial de atracción o fuerzas de atracción E_a , entre las partículas llamadas fuerzas de Van der Waals, que dependen de los átomos que constituyen las partículas y de la densidad de estos últimos. Si la distancia que separa a las partículas es superior a “L”, entonces las partículas, no se atraen. E es la energía que los mantiene separados. Las fuerzas de Van der Waals no son afectadas por las características de la solución (Metcalf y Eddy, 2003). (ver Fig. 3.6)

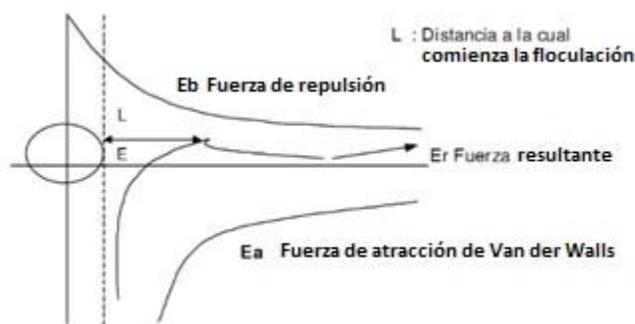


Figura 3. 6 Fuerzas de atracción y repulsión (Metcalf y Eddy, 2003)

Absorción y neutralización de cargas

Las partículas coloidales poseen carga negativa en sus superficies, estas cargas llamadas primarias atraen los iones positivos que se encuentran en solución dentro del agua y forman la primera capa adherida al coloide. El potencial en la superficie del plano de cizallamiento es el potencial electrocinético – potencial ZETA, este potencial rige el desplazamiento de coloides y su interacción mutua ver Figura 3.7 (Eckenfelder, 1989).

Después de la teoría de la doble capa la coagulación es la considerada como la anulación del potencial obtenido por adición de productos de coagulación – floculación, en la que la fuerza natural de mezcla debido al movimiento browniano no es suficiente requiriéndose una energía complementaria necesaria; por ejemplo realizar la agitación mecánica o hidráulica (Eckenfelder, 1989).

Cuando se adiciona un exceso de coagulante al agua a tratar, se produce la reestabilización de la carga de la partícula; esto se puede explicar debido a que el exceso de coagulante es absorbido en la superficie de la partícula, produciendo una carga invertida a la carga original (ver Fig. 3.8).

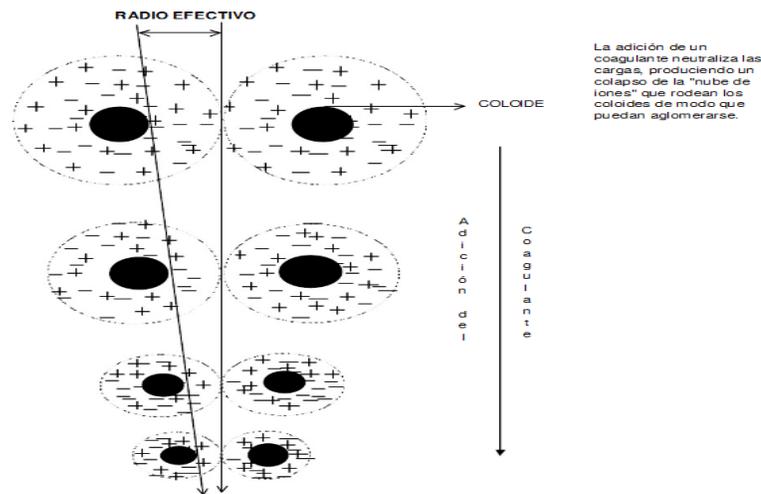


Figura 3. 7 Neutralización de carga (Eckenfelder, 1989).



Figura 3. 8 Reestabilización de partículas (Eckenfelder, 1989).

Interacción de partículas dentro de un precipitado

Las partículas coloidales desestabilizadas se pueden atrapar dentro de un floc. Cuando se adiciona una cantidad suficiente de coagulantes, habitualmente sales de metales trivalente como el sulfato de aluminio $Al_2(SO_4)_3$, o Cloruro Férrico $FeCl_3$, el floc está formado de moléculas de $Al(OH)_3$ o de $Fe(OH)_3$. La presencia de ciertos aniones y de las partículas coloidales acelera la formación del precipitado (ver Figura 3.9). Las partículas coloidales juegan el rol de anillo durante la formación del floc; este fenómeno puede tener una relación inversa entre la turbiedad y la cantidad de coagulante requerida. En otras palabras, una concentración importante de partículas en suspensión puede requerir menor cantidad de coagulante (Han,2001).

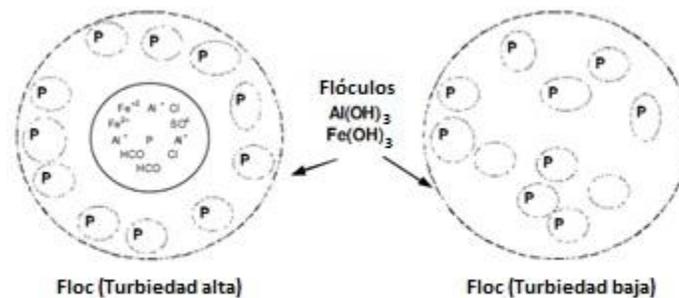


Figura 3. 9 Interacción de las partículas en un floc (Han,2001).

Adsorción y formación de puentes

En cualquier caso, se obtiene el tratamiento más económico utilizando un polímero aniónico, cuando las partículas están cargadas negativamente. Este fenómeno es explicado por la teoría del “puente”. Las moléculas del polímero muy largas contienen grupos químicos que pueden absorber las partículas coloidales. La molécula de polímero puede así absorber una partícula coloidal en una de sus extremidades, mientras que los otros sitios son libres para absorber otras partículas (Han,2001). Por eso se dice que las moléculas de los polímeros forman el “puente” entre las partículas coloidales. Esto puede tener una restabilización de la suspensión, por una excesiva carga de polímeros (ver Figura 3.10).

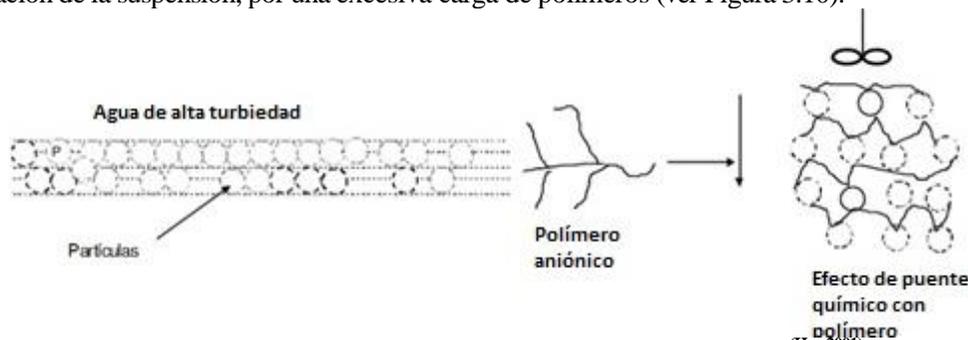


Figura 3. 10 Efecto de puente de las partículas en suspensión (Han,2001).

3.7.3. Mecanismos de floculación

La floculación es el proceso que sigue a la coagulación, consiste en la agitación de la masa coagulada que sirve para permitir el crecimiento y aglomeración de los flóculos recién formados con la finalidad de aumentar el tamaño y peso necesarios para sedimentar con facilidad (Odegaard, 1995).



El empleo de un floculante es necesario cuando los flóculos formados por la aglomeración de varios coloides no son lo suficientemente grandes como para sedimentar con la rapidez deseada, para reunir en forma de red, formando puentes de una superficie a otra enlazando las partículas individuales en aglomerados, tal como se muestran en la Figura 3.11.

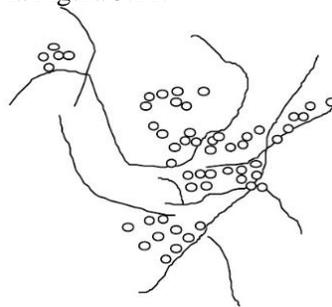


Figura 3. 11 Floculación

La floculación es favorecida por el mezclado lento que permite juntar poco a poco los flóculos; un mezclado demasiado intenso los rompe y raramente se vuelven a formar en su tamaño y fuerza óptimos. La floculación no solo incrementa el tamaño de las partículas del flóculo, sino que también aumenta su peso. Existen 2 mecanismos para llevar a cabo la floculación:

Floculación pericinética

Está producida por el movimiento natural de las moléculas del agua y está inducida por la energía térmica, este movimiento es conocido como el movimiento browniano.

Floculación ortocinética

Se basa en las colisiones de las partículas debido al movimiento del agua, el que es inducido por una energía exterior a la masa de agua y que puede ser de origen mecánico o hidráulico.

Después de que el agua es coagulada es necesario que se produzca la aglomeración de los microflóculos; para que esto suceda se produce primero la floculación pericinética y luego se produce la floculación ortocinética.

3.7.4.Coagulantes y floculantes

Los coagulantes y floculantes son sustancias que desestabilizan los coloides y favorecen la formación de los flóculos, logrando una buena separación por lo que se pueden clasificar de acuerdo a sus características químicas como se presentan a continuación:

a) Coagulantes inorgánicos

Los dos coagulantes principalmente usados en el tratamiento de aguas son las sales de aluminio y de hierro en forma de sulfatos y cloruros, los cuales actúan como coagulantes y floculantes a la vez (Kemmer, 1993). Cuando las sales metálicas de hierro y aluminio se agregan al agua, primeramente se hidrolizan. El proceso de hidrólisis es bastante complejo y se forman varios productos intermedios como los complejos hidroxialuminosos (para el caso del aluminio). Una representación general de este proceso se muestra en la Figura 3.12 ^(Metcalf y Eddy, 2003).

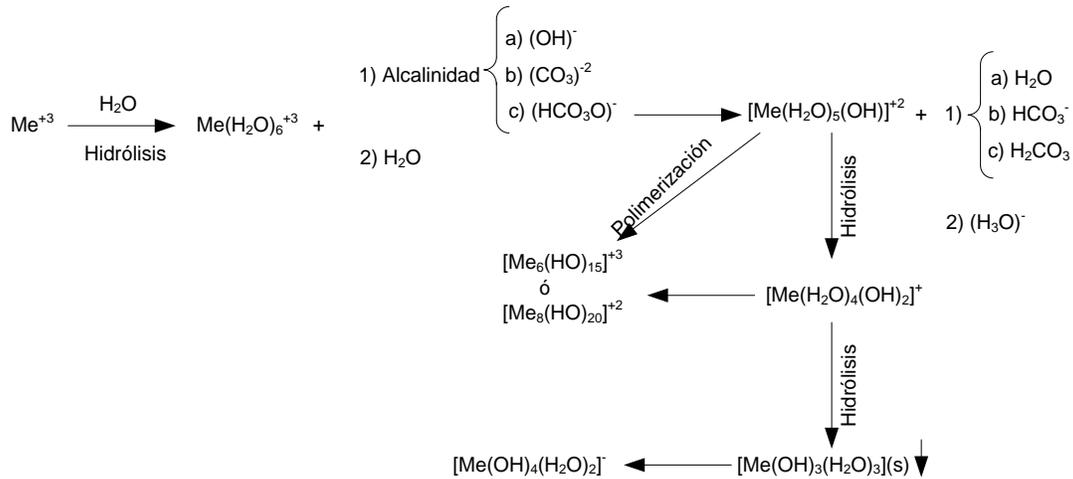


Figura 3. 12 Química de la coagulación de las sales metálicas (Fe y Al) (Metcalf y Eddy, 2003)

Las reacciones de hidrólisis siguen un proceso por etapas y la efectividad de la hidrólisis del hierro y del aluminio varía con el tiempo (Metcalf y Eddy, 2003). Tanto los iones metálicos hidratados, como los compuestos poliméricos pueden ser adsorbidos rápidamente por las partículas de agua produciendo su desestabilización.

Los coagulantes metálicos son muy sensibles al pH y a la alcalinidad. Si el pH no está dentro del intervalo adecuado, la clarificación es pobre y el hierro o el aluminio puede solubilizarse y generar problemas al usuario del agua (Kemmer, 1993).

Los intervalos de pH convenientes para la zona de coagulación óptima de algunas sales son:

- Alumbre: entre 5 y 7.5.
- Sulfato férrico: entre pH 4.0 y 7.0 y por arriba de 9.0.
- Cloruro férrico: desde pH 4.0 a 6.5 y por arriba de 8.5.
- Sulfato ferroso: por encima de pH 8.5 (alrededor de 9.5).

El uso de estos coagulantes generan lodos voluminosos que crean problemas de disposición, además de las dificultades que tiene su desecación (Mijaylova, 2001).

b) Coagulantes orgánicos

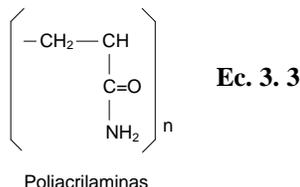
Un coagulante orgánico es un polímero que está constituido de cadenas de pequeñas sub-unidades o monómeros. Las cadenas pueden ser lineales o ramificadas. De acuerdo con su origen, los poli-electrólitos se dividen en naturales y sintéticos (Metcalf y Eddy, 2003). Los primeros son de origen biológico entre ellos, los derivados de almidón, celulosa y alginatos, y los segundos son monómeros simples que se polimerizan para formar sustancias de alto peso molecular. Su eficacia es mayor que la de los polímeros naturales (entre 10 a 15 veces más), pero considerablemente más costosos.

Los polielectrólitos se clasifican según el carácter iónico de su grupo activo en polímeros no iónicos, polielectrólitos catiónicos, polímeros aniónicos:



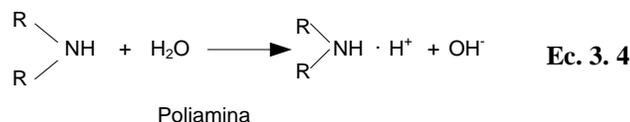
- Polímeros no iónicos:

Este grupo comprende las poliacrilaminas de masa molecular entre 1 y 30 millones. Son floculantes efectivos por su capacidad de atraer y mantener partículas coloidales en sitios polares de la molécula. Los no iónicos y cuaternarios sólo son influidos débilmente por el pH.



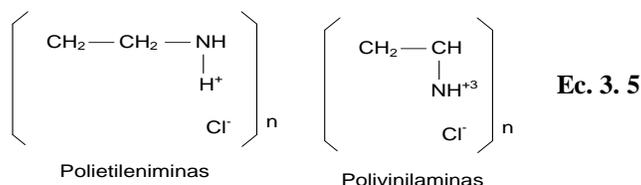
- Polielectrólitos catiónicos:

En sus cadenas tienen una carga eléctrica positiva debida a la presencia de grupos amino, imino o amonio cuaternario, como el polivinil piridina y bromuro de butil. Una poliamina se hidroliza en agua como sigue:



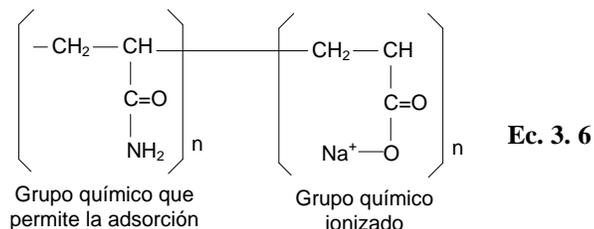
Puesto que la hidrólisis genera grupos OH^- , cuando el pH es alto, la reacción es forzada hacia la izquierda y el polímero se vuelve no iónico. Sin embargo los polímeros cuaternarios son menos sensibles al pH permaneciendo activos en rangos más amplios de pH (Kemmer, 1993).

Los polímeros catiónicos son utilizados frecuentemente para la neutralización de las partículas suspendidas cargadas negativamente formando microfloculos. Los polímeros de alta carga son requeridos para la desestabilización de las suspensiones en mayor estabilidad y poseen más cargas disponibles a lo largo de su longitud. Estos últimos forman macrofloculos y son utilizados principalmente como floculantes.



- Polímeros aniónicos

Tienen masa molecular de algunos millones, caracterizados por la coexistencia de grupos que permiten la adsorción y grupos ionizados negativamente (grupos carboxílicos y sulfúricos), cuyo papel consiste en provocar la extensión del polímero. Por esta razón, son usados como floculantes y en la desecación de lodos. El más conocido es la poliacrilamina parcialmente hidrolizada en sosa. A pH bajos tienden a volverse no iónicos.



Los polielectrolitos pueden funcionar como coagulantes primarios y/o floculantes. El tipo de carga por unidad de masa (densidad de carga) y el peso molecular determinan la aplicabilidad de cada polímero para un uso específico. Un polímero con una alta densidad de carga no es necesariamente mejor que uno con baja densidad de carga; lo mismo aplicable para el peso molecular (ver Tabla 3.9).

Tabla 3. 9 Características de los polímeros orgánicos (Kemmer, 1993)

	Clase	Intervalo PM	Forma y Disponibilidad
1	Coagulantes catiónicos:	Menor que 100 000	Todos disponibles como soluciones acuosas
	Poliaminas Policuaternarios Poli CDADMA Epi-DMA		
2	Floculantes catiónicos:	Mayor que 1000 000	Polvos o emulsiones
	Copolímeros de: Acrilamina y DMAEM Acrilamina y CDADMA Aminas Mannich		
3	Floculantes no iónicos:	Mayor que 1000 000	Polvos o emulsiones
	Poliacrilaminas		
4	Floculantes aniónicos:	Mayor que 1000 000	Polvos o emulsiones
	Poliacrilatos Copolímeros de acrilamina y acrilato		

Nota: CDADMA: cloruro de dialil-dimetil amonio; Epi:epiclorhidrina
DMA: dimetilamina; DMAEM: dimetil-aminoetil-metacrilato

Los polielectrolitos pueden clasificarse en diversas categorías de dependiendo de sus propiedades fisicoquímicas como se muestra a continuación:

Primera categoría: Los polielectrolitos que actúan como coagulantes reduciendo la carga de las partículas. Puesto que las partículas del agua residual están cargadas negativamente, se empan polielectrolitos catiónicos de bajo peso molecular y se considera que estos son coagulantes primarios (Kemmer, 1993). Estos son utilizados principalmente en el tratamiento de aguas residuales provenientes de la explotación minera, los molinos de papel y la producción de azúcar.

Segunda categoría: Los polielectrolitos que están construyendo puentes entre partículas. En este caso, los polímeros son aniónicos y no iónicos. Un puente es formado cuando dos o más partículas llegan a ser absorbidas a lo largo de la longitud del polímero. Son utilizados en los procesos de potabilización de agua.



Tercera categoría: La acción de los polielectrolitos puede ser clasificada como una coagulación-formación de puentes, los cuales resultan del uso de polímeros catiónicos de peso molecular extremadamente alto. Además de disminuir la carga, estos polielectrolitos también construyen puentes y son utilizados en el tratamiento de lodos residuales.

A diferencia de las sales minerales, los polímeros no producen flóculos voluminosos y no afectan al pH, ni su desempeño es muy sensible al pH del agua. En general reducen de 50 a 75% la cantidad de lodo (Kemmer, 1993). La dosis de los polielectrolitos depende del tipo de agua, pero en general cuando se usa como ayuda de la clarificación de aguas naturales su dosis varía de 0.5 a 1 ppm, y de 1 a 2 ppm cuando se usa como coagulante. Para el tratamiento de aguas residuales las dosis son mayores (Kemmer, 1993).

3.7.5. Coagulación-floculación para desestabilizar emulsiones de aceite en agua

Es frecuente o de un uso común el empleo del ácido sulfúrico en las plantas de tratamiento de agua de desecho aceitosa como el primer paso en el rompimiento de la emulsión. El ácido convierte al ión carboxílico, permitiendo que se aglomeren las gotitas de aceite (AWWA, 1992). Agentes químicos, coagulantes tales como las sales de hierro o de aluminio, se pueden ocupar en lugar del ácido, con la ventaja adicional que son auxiliares en la aglomeración de las gotitas de aceite. Sin embargo, son difíciles de desecar los lodos de hidróxido formados por el aluminio o el hierro. En general, los ácidos son rompedores de emulsiones más efectivos que las sales coagulantes, pero el agua de desecho debe neutralizarse después de la separación aceite/agua (Kemmer, 1993).

Entre los desémulsificadores, los orgánicos son en grado extremo efectivos ya que producen resultados más firmes y una calidad mayor del efluente que los inorgánicos. Además de producir un efluente de mayor calidad, la dosificación del rompedor de emulsiones orgánico es menor que en el tratamiento inorgánico correspondiente. Los rompedores orgánicos de emulsiones reducen en un 50 a 75% la cantidad de lodo generado en un proceso de tratamiento. En la Tabla 3.10 se enlistan los rompedores de emulsiones empleados en los procesos para su tratamiento (Kemmer, 1993).

Tabla 3. 10 Tipos de coagulante y floculantes para tratar emulsiones de agua en aceite (Kemmer, 1993).

Tipo principal	Descripción	Carga	Usado para
Inorgánico	Sales metálicas polivalentes como Alumbre, $AlCl_3$, $FeCl_3$, $Fe_2(SO_4)_3$	Catiónica	AC/AG
	Ácidos minerales como H_2SO_4 , HCl , HNO_3	Catiónica	AC/AG y AG/AC
	Adsorbentes (añadiendo sólidos) arcilla pulverizada, cal	Ninguna	AC/AG
Orgánico	Poliamidas, poliacrilatos y sus copolímeros sustituidos	Catiónica	AC/AG
	Ácidos bencensulfónicos sustituidos con alquilo y sus sales	Aniónica	AG/AC
	Resinas alquil fenólicas, polialcoholes sustituidos	No iónica	AG/AC

Nota.- AG: Agua; AC: Aceite.



3.8 Flotación

La flotación es un proceso de clarificación primaria particularmente efectivo para tratar aguas con baja turbiedad, altamente coloreadas y con gran contenido de algas. Consiste en la separación de las partículas naturales presentes en el agua cruda, coaguladas o floculadas, mediante el uso de sales de aluminio o de hierro y de polímeros. (Edzwald, 1995).

3.8.1 Aspectos Generales

En el tratamiento de aguas residuales, la flotación se emplea para la eliminación de la materia suspendida y para la concentración de los lodos biológicos. La principal ventaja del proceso de flotación frente al de sedimentación es que permite eliminar mejor y en menos tiempo las partículas pequeñas o ligeras cuya deposición es lenta. Principalmente se emplea para aguas industriales (Ferguson, 1995).

3.8.2 Tipos de Flotación

La flotación puede ser realizada por aire disperso, por burbujas generadas a través del proceso electrolítico y por aire disuelto, cuyas características principales son presentadas a continuación (Fukushi, 1995).

Flotación por aire disperso

En estos sistemas usualmente se emplean rotores que promueven simultáneamente, dispersión, aireación y agitación de la suspensión, con producción de burbujas de aire que tienen cerca de un μm de diámetro. Es posible, también, el uso de un medio poroso para difundir el aire, aunque las burbujas resultan con un diámetro mayor ($\sim 50 \mu\text{m}$). La flotación por aire disperso comúnmente es utilizada en la industria minera.

Flotación electrolítica

La oxidación anódica del ion clorato de una suspensión con pH alrededor de 7.5 con producción de ion hipoclorito y oxígeno ha sido investigada como unidad de generación de las burbujas en la flotación de suspensiones en las que fueron usados cloruro férrico como coagulante primario y polímero orgánico como auxiliar de floculación. El tren de flotación con aire disuelto dio carreras de filtración más largas que la filtración directa. Se alcanzó en ambos casos la meta de 0,10 UNT de calidad de agua filtrada. El empleo de preozonización fue beneficioso para la filtración directa. El uso de cloruro férrico no presentó ventajas sobre el sulfato de aluminio como coagulante primario. Como se utilizaron dosis similares, el empleo de sulfato de aluminio sería más económico en las plantas. Este sistema requiere investigaciones futuras que tengan en cuenta, principalmente, la calidad del agua por tratar. (Jokela, 1999).

Flotación por aire disuelto

La separación se consigue introduciendo finas burbujas de gas (normalmente aire) en la fase líquida trayendo como consecuencia que las burbujas se adhieren a las partículas y por medio de la fuerza ascensional entre el conjunto partícula-burbuja de aire suban a la superficie del líquido, haciendo de esta manera que partículas con cuya densidad es mayor que la del líquido asciendan a

la superficie, favoreciendo la ascensión de las partículas cuya densidad es inferior, como el caso del aceite en el agua. Posteriormente las partículas en la superficie, pueden recogerse mediante un rascado (Ferguson, 1995).

3.8.3 Flotación con aire disuelto

El sistema de flotación por aire disuelto es un tratamiento muy efectivo tanto para la separación de sólidos en suspensión como para grasas y aceites de un efluente industrial.

Existen tres tipos básicos de sistemas de flotación por aire disuelto:

- a) con presurización parcial del afluente (Figura 3.13);
- b) con presurización total del afluente (Figura 3.14);
- c) con presurización de la recirculación (Figura 3.15).

Entre los tipos de flotación mostrados en las Figuras 3.13 a la 3.15, aquella con presurización de la recirculación es la más aconsejable en el tratamiento de las aguas, pues los flóculos podrían romperse en la bomba (Metcalf y Eddy, 2003).

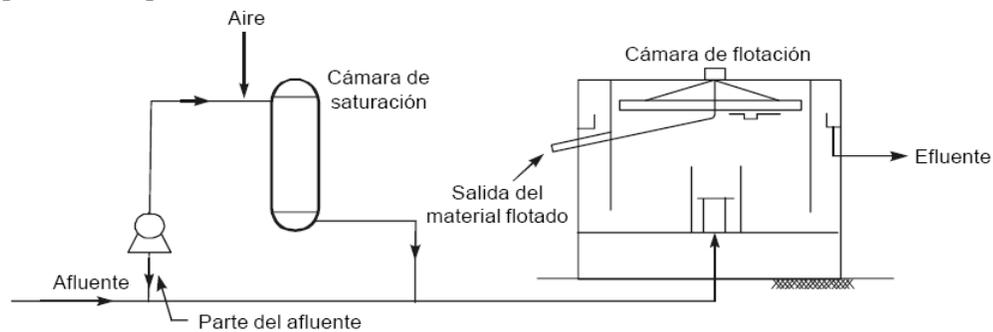


Figura 3. 13 Sistemas de flotación por aire disuelto. Presurización parcial del efluente.

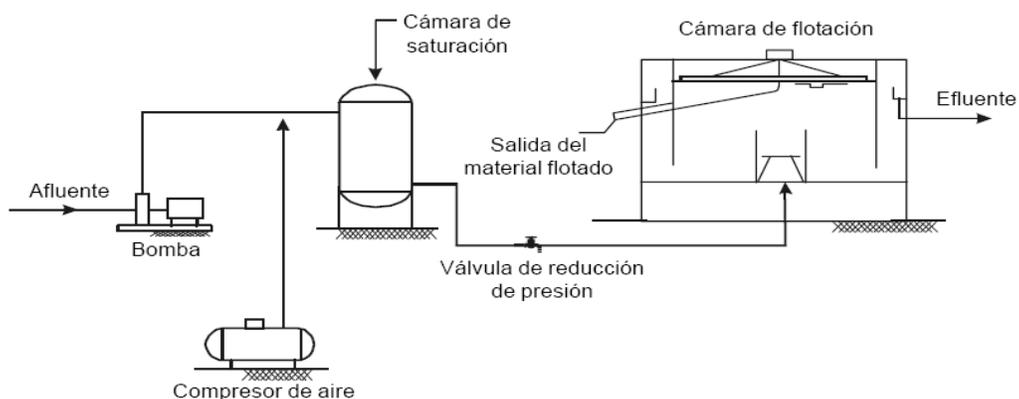


Figura 3. 14 Sistemas de flotación por aire disuelto. Presurización total del efluente.

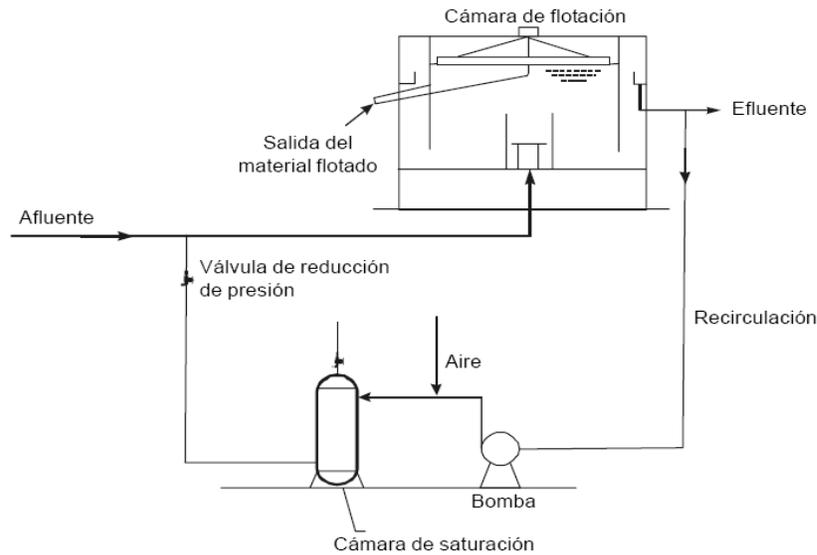


Figura 3. 15 Sistemas de flotación por aire disuelto. Presurización de la recirculación.

3.8.3.1 Factores principales en la flotación por aire disuelto

El proceso de flotación por aire disuelto depende de la concentración de partículas suspendidas, la cantidad de aire suministrado, la unidad de saturación, la velocidad ascensional de las partículas, la tasa de aplicación y el tratamiento químico ^(Amato, 2001).

Volumen mínimo de gas necesario para la flotación

El volumen mínimo de gas V_g , de masa volumétrica ρ_g , necesario para conseguir la flotación de una partícula de masa S y de masa volumétrica ρ_p , en un líquido de masa volumétrica ρ_l , viene dado por la siguiente relación (Ec. 3.7):

$$\frac{V_g}{S} = \frac{(\rho_p - \rho_l)}{(\rho_l - \rho_p) \left(\frac{1}{\rho_p}\right)} \quad \text{Ec. 3. 7}$$

Relación aire- sólido

La relación aire–sólidos en un sistema de flotación por aire disuelto con presurización de la recirculación depende principalmente del valor de la relación entre el volumen de aire y la masa de sólidos (A/S) necesario para obtener un determinado nivel de clarificación, como se muestra en la ecuación 3.8 ^(Metcalf y Eddy, 2003):

$$\frac{Aar}{Sso} = \frac{1.3Sar(f.P - 1)FREC}{Sa.Qaf} \quad \text{Ec. 3. 8}$$

Donde:

Aar/Sso : cantidad de aire/cantidad de sólidos (mg/mg).

Sar : solubilidad del aire en el agua, en función de la temperatura, la altitud y la presión atmosférica (mL/L).

f : fracción de aire disuelto a la presión P (usualmente de 0.5 a 0.8)



P : presión atmosférica (atm).
 Sa : concentración de sólidos suspendidos ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$).
 $FREC$: caudal de recirculación (m^3/s).
 Qaf : caudal afluente (m^3/s).

Los valores típicos de la relación A/S para los espesadores de lodos de las plantas de tratamiento de aguas residuales varían entre 0.005 y 0.006 ATV (Norma Alemana A-131E). Se recomienda que la relación A/S en tratamiento de aguas residuales de refinería sea de 0.01 a 0.04 (Galil, 2001).

Unidad de saturación y tasa de aplicación

La cámara de saturación de aire depende de la presión y del uso de elementos de gran superficie específica en su interior. La presión habitualmente usada está entre 250 y 500 kPa, la tasa de escurrimiento superficial varía de 1,000 a 2,000 $\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{d}$ y el tiempo de retención es inferior a 5 minutos (Arora, 1995).

El dispositivo de distribución de agua presurizada en la unidad ó cámara de flotación es muy importante pues en la salida de este el agua presurizada es reducida a la presión atmosférica, por lo que se requiere el uso de difusores para que el aire disuelto forme microburbujas con tamaños de entre 20 y 80 μm . Entre las cámaras de presurización y de flotación, es recomendable la instalación de una válvula reductora de presión, que permita ajustar el caudal de recirculación y la presión que se va a mantener en la cámara de presurización. Se debe evitar que se produzca una turbulencia excesiva en la mezcla de las dos aguas, ya que los flocúlos pueden romperse (Klute, 1995).

El caudal de recirculación recomendado varía de 5 a 15% del caudal de agua que va a ser clarificado. En función del caudal de recirculación y de la presión en el interior de la cámara de presurización, la cantidad de aire necesaria podría ser optimizada a través de una derivación de la tubería de salida de esa cámara y de la instalación de un dispositivo para la medición de la cantidad de aire y de agua, como se muestra esquemáticamente en la Figura 3.16 (Sartori, 1997).

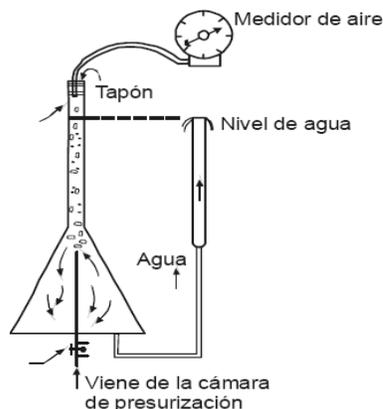


Figura 3. 16 Dispositivo para la medición de la cantidad de aire liberado (Sartori, 1997).

Tratamiento químico

Esta etapa involucra la desestabilización de suspensiones coloidales o emulsiones, condición necesaria para que estas se puedan unir en agregados de mayor tamaño susceptibles de ser capturadas por las microburbujas. La agregación puede ser realizada vía coagulantes, floculantes o ambos y el tiempo de residencia en esta etapa dependerá del grado de dispersión de los sólidos (o emulsiones) a remover, del tipo y concentración de reactivos y de la hidrodinámica requerida (Al-Shamrani, 2002).

La eficiencia de la flotación depende del pretratamiento realizado y este, a su vez, está relacionado con la calidad del agua cruda. La realización de investigaciones piloto, aunque no sean de escurrimiento continuo, pueden proporcionar información fundamental en cuanto al tipo de coagulante primario, la dosis y el pH de coagulación, el tipo y la dosis de polímero. Además de la mezcla rápida, un tiempo de floculación comprendido entre 5 y 20 minutos puede ser necesario para que los flóculos alcancen un tamaño de 0.5 y 1 mm, considerado ideal para la flotación (Fukushi, 1995).

El diseño de coaguladores o floculadores depende de las características del efluente, la cinética de adsorción de contaminantes, en el caso de usar precipitados coloidales adsorbentes y del punto de adición de los reactivos (Green, 2001).

La cámara de flotación puede ser de sección rectangular o circular. En el caso de cámaras rectangulares es recomendable la instalación de una pantalla con un ángulo de inclinación de 60° con la horizontal y con 30 a 50 cm de largo, conforme se muestra en la Figura 3.17. El ancho de la cámara depende del tipo de equipo usado para el raspado del material flotante y rara vez excede de 8 metros (Edzwald, 1995).

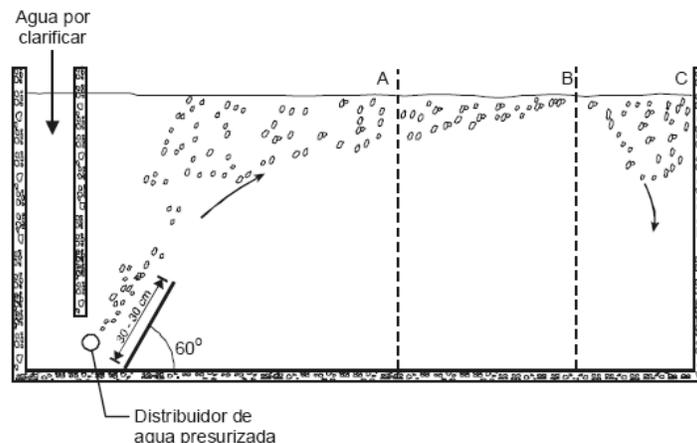


Figura 3. 17 Cámara de flotación rectangular (Edzwald, 1995).

El largo puede variar entre 4 y 12 metros siempre que no ocurran las situaciones A o C (véase la Figura 3.17). En el primer caso, el largo es insuficiente, y en el segundo, hay deposición de material flotante. La profundidad varía entre 1 y 3 metros, dependiendo del tipo de dispositivo para la distribución de agua presurizada en el interior de la cámara de flotación.

En la Figura 3.18 se muestra el esquema de una cámara de flotación circular. La mezcla de agua presurizada con el agua por clarificar se hace en un punto próximo a la entrada de la cámara de flotación, que en el centro posee un ducto también circular, para conducir el agua a la parte superior y evitar cortocircuitos.

El material flotante es continuamente raspado hacia una o más canaletas de colección. Mientras el agua hace un movimiento descendente, pasa por la parte inferior del cilindro intermedio y es colectada en la canaleta localizada en la periferia del cilindro externo (Ferguson, 1995).

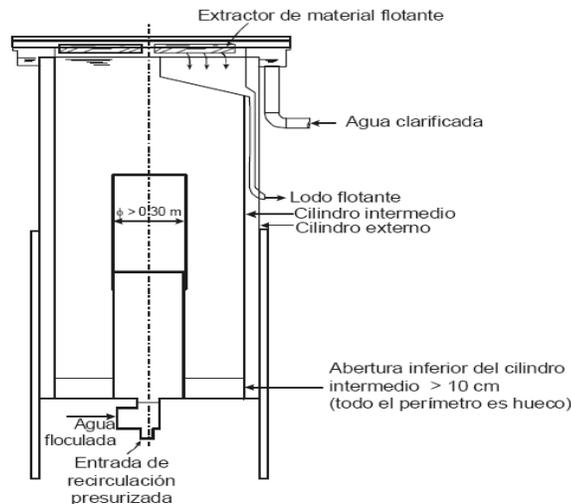


Figura 3. 18 Cámara de flotación circular (Ferguson, 1995).

La cámara de flotación, independientemente de la forma que tenga, es proyectada para un tiempo medio de retención comprendido entre 10 y 20 minutos y una carga hidráulica superficial de 100 a 300 $\text{m}^3/\text{m}^2/\text{d}$ (Jokela, 1999). La calidad del agua cruda y las condiciones de pretratamiento influyen tanto en el tiempo de retención como en la carga hidráulica superficial, razón por la cual es fundamental realizar una investigación antes de elaborar el proyecto definitivo.

Es posible que otras características, como el tamaño y la distribución de tamaños de las partículas, puedan influir en la eficiencia de la flotación, pero ello todavía necesita ser investigado (Bunker, 1995).

3.8.3.2 Mecanismos de la flotación

Los mecanismos de flotación con aire disuelto implican cuatro etapas esenciales, las cuales son descritas a continuación:

Formación del flóculo

Los mecanismos para la formación del flóculo (coagulación floculación) fueron descritos en la sección 3.7.2 y 3.7.3.



Tamaño y formación de la burbuja

El tamaño de las burbujas de aire formadas en el seno del líquido oscila entre los 10 y 100 μm (Edzwald, 1995 y Kermer y McCallion, 1993). Las pequeñas burbujas (100 μm o menos), ascienden como esferas bajo condiciones laminares. Su formación implica dos pasos: la nucleación, esta ocurre espontáneamente tras liberar la presión del agua sobresaturada; por otra parte está el crecimiento el cual se lleva en el tanque de flotación, las burbujas experimentan un crecimiento debido al decremento de la presión hidrostática (durante su ascenso) o por coalescencia.

Interacción flóculo-burbuja

En esta etapa se pueden llevar a cabo dos mecanismos para la formación de los agregados flóculo-burbuja:

- Entrapamiento.- Ocurre cuando las burbujas quedan atrapadas en las estructuras crecientes de flóculos. Este mecanismo se produce donde hay grandes partículas o bien se forman flóculos grandes en corto tiempo, lo cual puede ocurrir en aguas muy concentradas como lo son las aguas residuales municipales e industriales.
- Colisión y adhesión.- Ocurre cuando el flóculo formado es pequeño (20 μm o menores) por lo que es baja la probabilidad de que la burbuja se forme dentro de él. Las fuerzas de adhesión de la burbuja tienen que ser mayores que las de cohesión, para que se forme el agregado flóculo-burbuja. El ángulo que se forma entre el flóculo y la burbuja de aire se conoce con el nombre de ángulo de contacto (α) y se muestra en la Figura 3.19 (Santory, 1997)

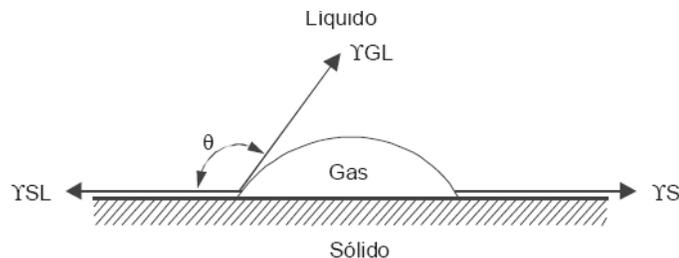


Figura 3. 19 Ángulo entre la superficie del sólido y la burbuja de gas (Santory, 1997).

Si $\theta = 0$, el contacto entre el sólido y el líquido se realiza de forma perfecta; es imposible la adherencia sólido-gas.

Si $\theta = 180^\circ$, el contacto entre el sólido y el líquido es nulo; es óptimo el contacto sólido-gas.

Se trata de un caso límite que nunca se da en la práctica, puesto que ningún líquido da un ángulo θ mayor de 110° (caso del mercurio).

- Flotación del agregado (flóculo-burbuja).-El tanque de flotación se divide en dos zonas: la zona de reacción, en donde se produce la interacción de las burbujas y los flóculos y la zona de separación en donde se lleva a cabo la clarificación y flotación de los agregados flóculo-burbuja (Edzwald, 1995; Fukushi, 1995).

El fenómeno de flotación se puede describir por medio de la Ley de Stokes, así la velocidad de flotación de una partícula es descrita por la ecuación 3.9 (Haarhoff, 1995).



$$V = \frac{(\rho_e - \rho_s)gd^2}{18\mu} \quad \text{Ec. 3.9}$$

Donde:

- V: es la velocidad de caída de las partículas (velocidad límite).
- g: es la aceleración de la gravedad.
- ρ_e : es la densidad de las partículas.
- ρ_s : es la densidad del fluido.
- μ : es la viscosidad del fluido.
- d: es el radio equivalente de la partícula.

Mediante esta ecuación, se aprecia la influencia de los diferentes factores: la velocidad (V) es directamente proporcional a (d^2) y ($\rho_e - \rho_s$), y es inversamente proporcional a μ . Considerando el efecto de la temperatura sobre μ (al aumentar t disminuye μ), se puede concluir que la velocidad varía en el mismo sentido que la temperatura.

El tamaño de las burbujas de aire es muy importante en la flotación, pues burbujas pequeñas, además de presentar mayor superficie para una misma cantidad de aire, necesitan desplazar menor cantidad de agua de la superficie de la partícula donde se van a adherir. La relación entre el tiempo de contacto entre las burbujas y las partículas en una cámara de flotación depende de la velocidad ascensional de las burbujas, que, a su vez, es proporcional al cuadrado del diámetro de las mismas como se muestra en la Ec.3.10 ^(Edzwald, 1995).

$$\frac{Tas_1}{Tas_2} = \frac{Vas_1}{Vas_2} = \frac{(db_2)^2}{db_1} \quad \text{Ec. 3.10}$$

Donde:

- Tas_1 , Tas_2 : tiempo de ascensión de las burbujas 1 y 2, respectivamente (s).
- Vas_1 , Vas_2 : velocidad ascensional de las burbujas 1 y 2, respectivamente (m/s).
- db_1 , db_2 : diámetro de las burbujas 1 y 2, respectivamente (m).

El tamaño de las burbujas depende, principalmente, de la presión de disolución del aire en el agua y del pH. A una mayor presión el diámetro de las burbujas se engrandece por lo que el desplazamiento de la burbuja es más rápido, llegando al rompimiento de los flóculos formados; por el contrario, cuando se tiene una presión más baja el tamaño de la burbuja es pequeña de manera que su desplazamiento es lento y presenta mayor superficie para la misma cantidad de agua sin tener un rompimiento de flóculos como se muestra en la Figura 3.20.

El pH también puede influir en el tamaño de las burbujas formadas en el interior de la cámara de disolución, como se muestra en la Figura 3.21 el tamaño de la burbuja es menor cuando de trabaje en pH menores de 5, mientras que a mayor pH el tamaño de las burbujas es mayor llegando a medir entre los 40-45 μm ^(Fukushi, 1995).

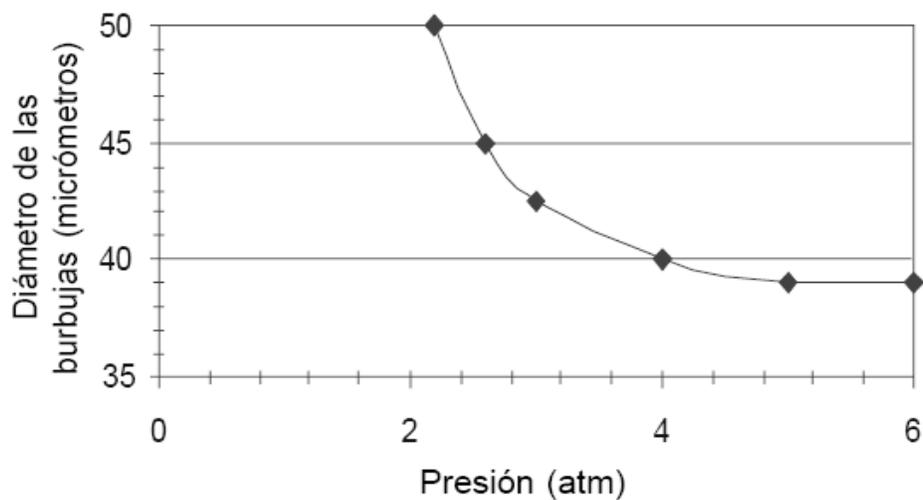


Figura 3. 20 Influencia de la presión en el diámetro de las burbujas de aire (Fukushi, 1995).

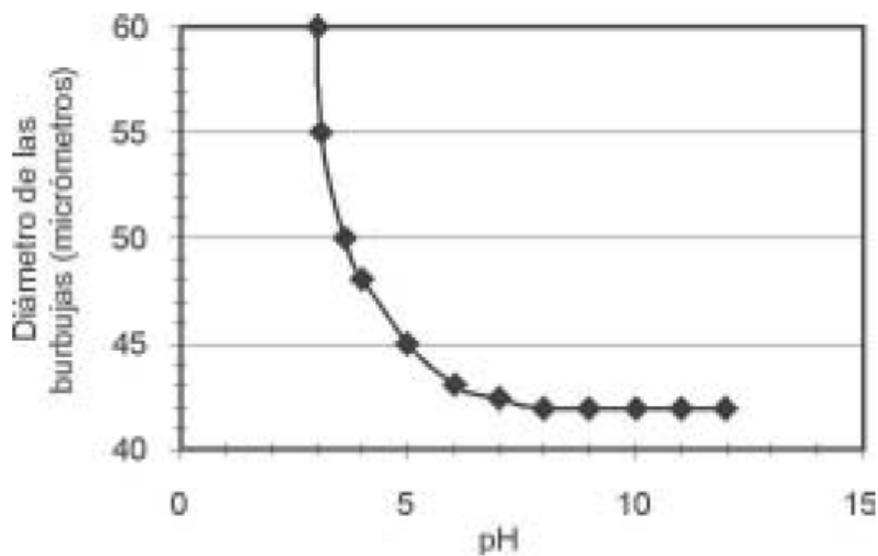


Figura 3. 21 Influencia del pH en el tamaño de las Burbujas (Fukushi, 1995).

4. METODOLOGÍA

4.1 Selección del desestabilizante de aceite emulsificado y dosis óptimas

El objetivo de esta parte del estudio fue determinar los adecuados reactivos químicos y sus dosis óptimas para lograr el rompimiento o la desestabilización de la emulsión del aceite en agua y remover GyA, DQO y SST en las aguas aceitosas de la Refinería de Minatitlán, Veracruz. Para esto se realizaron pruebas de jarras usando diferentes coagulantes minerales tales como sales de Al y Fe, polialuminatos, así como polímeros catiónicos. Las pruebas con adición de coagulantes y floculantes catiónicos se realizaron de forma individual y en combinaciones, usando agua residual aceitosa de refinería transportada hasta el laboratorio del IMTA en barriles de 200 L. Cada lote de agua transportada se caracterizó previamente y homogeneizó antes de cada serie de pruebas.

4.1.1 Prueba de jarras

4.1.1.1 Equipo requerido

- Aparato Phipps & Bird, modelo 7790-400 con seis paletas de 7.5 x 2.5 cm, con tacómetro integrado y base con iluminación.
- Cronómetro.
- Jarras de 1 o 2 L.
- Para una prueba se usan 6 jarras.



Figura 4. 1 Equipo Phipps & Bird para la prueba de jarras.

4.1.1.2 Reactivos químicos usados

En el estudio se probaron 5 coagulantes inorgánicos, 6 polímeros orgánicos catiónicos y 4 aniónicos (Tabla 4.1). Todos los productos son comercialmente disponibles en el país.



Tabla 4. 1 Reactivos químicos usados en las pruebas de jarras.

Reactivo Químico	Naturaleza	Función	Características
SAS	Inorgánico	Coagulante	Sulfato de Aluminio ($Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$) $Al_2(SO_4)_3$ (9.0% de Al^{3+}) Apariencia Polvo granular blanco.
PIX-145	Inorgánico	Coagulante	Sulfato férrico $Fe_2(SO_4)_3$ (9.7% de Fe^{3+})
PIX-111	Inorgánico	Coagulante	Cloruro férrico ($FeCl_3 \cdot 6H_2O$) $FeCl_3$ (13.6% de Fe^{3+}) Apariencia Líquido café rojizo. Densidad (25 °C) 1.40 – 1.50 g/cm ³
PAX-260XLS	Inorgánico	Coagulante	7.5 % de Aluminio Policloruro de aluminio de basicidad medio en presentación líquida. $\rho=1.31$ g/mL
PAX-16S	Inorgánico	Coagulante	Policloruro de aluminio de basicidad media en presentación líquida. 8.2 % de Aluminio $\rho=1.33$ g/mL
OPTIFLOC-C-1288	Orgánico	Floculante Catiónico	Poliacrilamina catiónica de alto peso molecular Apariencia Polvo granular blanco. ρ a granel= 750 ± 50 kg/m ³
SUPERFLOC-C-498	Orgánico	Floculante Catiónico	Poliacrilamida Catiónico Apariencia Polvo granular blanco. Peso molecular alto Densidad a granel (kg/L) 0.75.
OPTIFLOC-1781	Orgánico	Floculante Catiónico	Poliacrilamina catiónica de alto peso molecular Líquido $\rho=1.02$ g/mL
OPTIFLOC-1392	Orgánico	Floculante Catiónico	Líquido $\rho=1.02$ g/mL
OPTIFLOC-A-1638	Orgánico	Floculante Aniónico	Poliacrilamina aniónica de alto peso molecular Apariencia Polvo granular blanco. Densidad a granel 0.83 g/L.
FENNOLPOL A-305	Orgánico	Floculante Aniónico	Líquido Densidad= 0.6-0.9 kg/dm ³
OPTIFLOC-AE-1488	Orgánico	Floculante Aniónico	Líquido Densidad = 1.02 g/mL
SUPERFLOC-A-100	Orgánico	Floculante Aniónico	Poliacrilamida Aniónica Apariencia Polvo granular blanco. Densidad a granel = 1.03 – 1.0 0.75 kg/L
LARKFLOC 5100-C	Orgánico	Floculante Catiónico	Apariencia/color: Líquido viscoso cristalino Densidad a 25°C 1.15- 1.20 g/mL.



4.1.1.3 Procedimiento experimental

1. Toma de muestra. El agua residual transportada de la Refinería se conservó en barriles de 200 litros en una cámara fría. La cantidad de agua requerida para realizar diariamente las pruebas de jarras se extraía de los barriles, homogeneizada (agitación) en el tambo. La cantidad extraída de agua para las pruebas se dejaba afuera de la cámara hasta que llegara a temperatura ambiente para poder realizar las pruebas.
2. Al llegar a temperatura ambiente, la muestra se volvió a homogeneizar (agitación) y se prosiguió a la prueba.
3. Dosis mínima. Con todos y cada uno de los productos se realizaron pruebas preliminares para determinar las dosis mínimas del producto con las cuales se forman los primeros flóculos. Estas pruebas se llevaron a cabo en vasos de precipitados a los que se adicionó un volumen de 200 mL de agua residual aceitosa con agitación constante. Con agitación se adicionaron secuencialmente pequeños volúmenes (1 ó 0.5 mL) de la solución de un producto hasta la aparición de los primeros flóculos. Para cuantificar la cantidad de producto a utilizar. Se considero el volumen inicial del agua residual y se calculó la dosis mínima requerida del producto. En la Figura 4.2 se ilustra la determinación de la dosis mínima. Con base en las dosis mínimas se seleccionaron los intervalos de dosis en las pruebas de jarras realizadas con la adición de reactivos en forma individual.
4. Pruebas en jarras. Para la determinación de las remociones mediante floculación y sedimentación/flotación aplicando diferentes productos en forma individual o combinada, se realizaron pruebas a las cuales se adicionó agua residual aceitosa homogeneizada y se acondicionó a temperatura ambiente a 6 jarras. A la primera jarra se le agregó la dosis mínima de coagulante y a las siguientes jarras dosis mayores, incrementando la dosis desde la jarra 2 hasta la jarra 6. Para cada reactivo químico se hizo primero una serie de pruebas preliminar en jarras de 1 L usando como parámetro de respuesta la Turbiedad. En base a los resultados se precisó el intervalo de variación de las dosis y se realizaba una segunda serie de pruebas en jarras de 2L de volumen. En estas pruebas se determinaron todos los parámetros de interés: Grasas y Aceites (GyA), Demanda Química de Oxígeno (DQO), Sólidos Suspendidos Totales (SST), Sólidos Suspendidos Volátiles (SSV), Sólidos Disueltos Totales (SDT), Turbiedad, Color, pH y Alcalinidad.
5. Agitación. La agitación se realizó de la misma manera en todas las pruebas de jarras. Mezcla rápida de 3 minutos a 150 rpm y mezcla lenta durante 25 minutos a 20 rpm. Al comienzo de la mezcla rápida se adicionó el reactivo químico al agua residual en las cantidades previamente determinadas para cada jarra.
6. Reposo. Al término del tiempo del mezclado se dejaron reposar sin agitación las muestras en las seis jarras durante un tiempo de 30 minutos, después se midió la cantidad de sólidos sedimentables y aceite en la superficie.
7. Muestreo. Al finalizar los 30 min de reposo se midieron los parámetros de pH, temperatura y conductividad y se tomaron muestras del agua clarificada en todas las jarras para la determinación de los siguientes parámetros: DQO, Turbiedad, Color, SST, así como para GyA.

8. Determinación de las remociones. Con base en los resultados obtenidos de los parámetros GyA, DQO, SST, Turbiedad y Color en el agua inicial y tratada en todas las jarras, se determinaron las remociones en todas las series de pruebas, así como las dosis óptimas para cada producto o combinación de productos evaluados.



Figura 4. 2 Fotografía del equipo para la determinación de la dosis mínima.

En la Tabla 4.2 se presentan las combinaciones de coagulantes y floculantes evaluadas. Las pruebas se realizaron adicionando un coagulante y un floculante, los dos se adicionaron durante la mezcla rápida: al inicio de la mezcla *el coagulante* y al final de la mezcla *el floculante*.

Tabla 4. 2 Combinaciones de coagulantes y floculantes evaluados

Coagulante	Floculante
PIX-111	OPTIFLOC-C-1288
PIX-111	SUPERFLOC-C-498
SAS	OPTIFLOC-C-1288
SAS	SUPERFLOC-C-498
PAX-260 XLS	OPTIFLOC-C-1288
PAX-260XLS	SUPERFLOC-C-498
PIX-111	OPTIFLOC-C-1392
PIX-111	OPTIFLOC-C-1781
SAS	OPTIFLOC-C-1392
SAS	OPTIFLOC-C-1781
PAX-260 XLS	OPTIFLOC-C-1392
PAX-260 XLS	OPTIFLOC-C-1781
PAX-260 XLS	OPTIFLOC-A-1638
PAX-260 XLS	FENNOLPOL A-305
PAX-260 XLS	OPTIFLOC-AE-1488
PAX-260 XLS	SUPERFLOC-A-100
SAS	OPTIFLOC-A-1638
SAS	FENNOLPOL A-305

Coagulante	Floculante
SAS	OPTIFLOC-AE-1488
SAS	SUPERFLOC-A-100
PIX-111	OPTIFLOC-A-1638
PIX-111	FENNOLPOL A-305
PIX-111	OPTIFLOC-AE-1488
PIX-111	SUPERFLOC-A-100

4.2 Floculación y flotación con aire disuelto

Los objetivos de estas pruebas fueron evaluar la eficiencia de remoción del aceite GyA, DQO, SST, turbiedad, color, así como establecer las mejores condiciones de operación del sistema de flotación con aire disuelto (DAF por sus siglas en inglés) con previa desestabilización de la emulsión (floculación). Se variaron la presión en el tanque de saturación, la relación de recirculación y el tiempo de retención hidráulico en el tanque de flotación. Los parámetros de respuesta fueron: GyA, DQO, SST, Turbiedad y Color. En las pruebas se usaron las dos mejores opciones de reactivos químicos y dosis determinados en la etapa anterior.

4.2.1 Instalación experimental

El esquema de la instalación experimental para la realización de las pruebas floculación-FAD se presenta en la Figura 4.3. La instalación consistió básicamente de un tanque de saturación (saturador) del agua con aire aplicando alta presión y de un tanque de flotación. El tanque de saturación estaba construido de acero inoxidable con un volumen de 3 L. El saturador contaba con 4 válvulas, una para regular el flujo del aire del compresor al saturador a una determinada presión, otra fue para regular el ingreso del agua a saturar, una válvula de alivio y por último una válvula para regular la descarga del agua saturada con aire al tanque de flotación. En la tapa del saturador se instaló un manómetro para la medición de la presión. El tanque de flotación era una columna cilíndrica elaborada de vidrio, con un volumen útil de 8.5 L. En la parte superior del tanque de flotación, se instaló un agitador mecánico con el objetivo de realizar la floculación en este tanque antes de proceder al proceso de flotación.

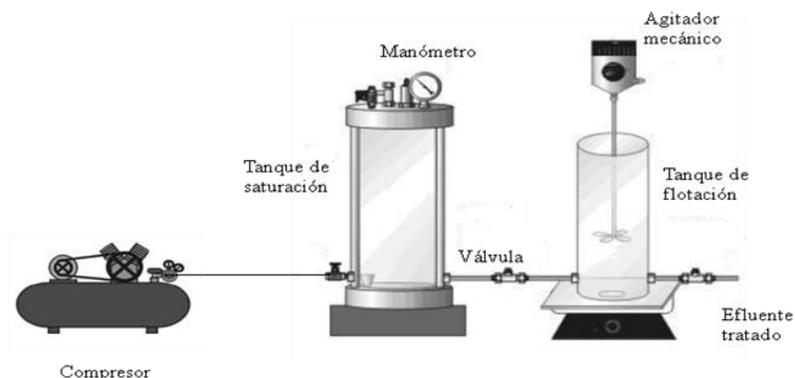


Figura 4. 3 Esquema del sistema de flotación con aire disuelto.



4.2.2 Procedimiento experimental

1. Toma de muestra. El agua residual traída de la refinería se conservó en barriles en una cámara fría. De esta se tomaban diariamente los volúmenes requeridos para la realización de las pruebas programadas. Al abrir el recipiente que contenía el agua residual, primero se homogeneizaba la muestra y después se extraía el volumen del agua requerido para los experimentos. Esta cantidad se dejaba por un tiempo en el laboratorio para que la muestra de agua residual llegara a una temperatura ambiente para después poder realizar las pruebas.
2. Proceso de floculación. El proceso FAD se estudió con previa floculación utilizando para esto la columna de flotación. El agua residual aceitosa a tratar fue de 5 L, sin modificaciones previas del pH. Esta cantidad se adicionaba a la columna de flotación. El arranque del proceso de floculación comenzó con la adición del agente químico aplicando una mezcla rápida de 150 rpm durante 3 minutos y una mezcla lenta a 20 rpm durante 15 minutos. Los agentes químicos utilizados fueron primero el coagulante mineral Sulfato de aluminio (SAS) (solución al 1%) más el polímero catiónico C-1288 (solución al 0.5%). Después, se utilizó el floculante catiónico LACKFLOC C-5100 (emulsión).
3. Agua para la saturación con aire. Esta agua se preparaba antes de arrancar la floculación. Para esto se realizaba un tratamiento previo de un determinado volumen de agua aceitosa con los productos químicos que se usaban en la prueba floculación-FAD. Se obtenía el clarificado y 3 L de este se adicionaba al tanque de saturación.
4. Presurización. Tres minutos antes de que terminara la mezcla lenta del proceso de floculación el cual se llevaba a cabo en la columna de flotación, se inyectaba aire al tanque de saturación a una determinada presión (ver diseño experimental) con un tiempo de duración de 3 min.
5. Inyección de agua saturada. Después se inyectaba el volumen de agua saturada con aire previamente definido (igual a la relación de reciclo multiplicado por el volumen del agua aceitosa por tratar de 5 L) al fondo de la celda de flotación. Para esto se abría una de las válvulas del tanque de saturación. Al entrar el agua saturada con aire al tanque de flotación ocurría la despresurización y la generación de pequeñas burbujas.
6. Reposo. Una vez mezclada el agua saturada (reciclo) con el agua procesada químicamente dentro de la celda de flotación, se esperaba un determinado tiempo (tiempo de residencia hidráulico, *TRH*) para que se llevara a cabo la separación de los aglomerados de aceite y el agua. Después del proceso de flotación, fueron tomadas las muestras para su posterior análisis.

4.2.3 Diseño experimental

Una parte esencial en el estudio de un proceso es el diseño experimental ya que en él se planea la forma en que se va llevar a cabo el experimento tomando en cuenta las variables involucradas y la influencia de ellas en el experimento, el número de muestras a tomar, etc. Existen varios tipos de diseños experimentales en este apartado se mencionan los utilizados en esta experimentación:



Cuadrado Latino.

Este diseño se utiliza para conducir experimentos en condiciones heterogéneas donde las propiedades cambian en dos direcciones como ocurre en la toma de muestras para análisis de laboratorio.

En el diseño en cuadrado latino (DCL) se controlan dos factores de bloque y se estudia un factor de tratamientos, por lo que se tiene cuatro fuentes de variabilidad que pueden afectar la respuesta observada, estas son: Tratamientos, Factor de bloque I (columnas), Factor de bloque II (renglones), Error aleatorio.

Se llama cuadrado latino por dos razones, es un cuadrado debido a que tiene la restricción adicional de que los tres factores involucrados se prueban en la misma cantidad de niveles; se utilizan letras latinas para denotar a los tratamientos o niveles del factor de interés.

En conclusión cuando dos factores interactúan y el efecto de uno de ellos depende del nivel en que se encuentre el otro, esto implicaría la interpretación del resultado de la comparación de los métodos, ya que debido a la interacción puede ocurrir que el mejor método no lo sea con todos.

En nuestra experimentación de las pruebas de Floculación-FAD se utilizó un diseño cuadrado latino 5x3 debido a la cantidad de factores que se tenían, es decir tres factores en cinco niveles, ayudándonos de esta manera a no realizar una gran cantidad de pruebas, sino solo las concisas minimizando el error en la experimentación. A continuación se explica con más detalle en que consistió el mismo.

Para determinar la eficiencia del proceso de flotación por aire disuelto y realizar las pruebas se utilizó un diseño cuadrado latino 3*5 con tres factores (presión, relación de recirculación y tiempo de residencia hidráulica), considerando una variación de 5 niveles (Tabla 4.3). Los valores de los niveles y los puntos centrales se ordenaron en bloques, llevándose a cabo posteriormente la aleatorización para ejecutar en ese orden el experimento hasta completar un total de 25 pruebas (Tabla 4.4) por duplicado. Las variables de respuesta del FAD fueron los parámetros Grasas y Aceite (G y A), Demanda Química de Oxígeno (DQO), turbiedad, color, Sólidos Suspendidos Totales (SST). Se determinaba el pH, conductividad eléctrica, temperatura, volumen de lodos y capa de aceite.

Tabla 4. 3 Condiciones de operación del FAD.

Factores	Niveles				
	1	2	3	4	5
Presión en el saturador (lb/in ²)	14.2	21.3	28.4	35.5	40
Presión en el saturador (atm)	1	1.5	2	2.5	2.8
Relación de recirculación	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
TRH en la celda de flotación (min)	15	20	25	30	35



Pruebas realizada con el mejor polímero y dosis constante.

Tabla 4. 4 Orden aleatorizado de las pruebas FAD.

No. De Prueba	F1	F2	F3	P, (lb/in ²)	R	TRH (min)
1	1	1	1	14.7	0.10	15
2	1	2	2	14.7	0.20	20
3	1	3	3	14.7	0.30	25
4	1	4	4	14.7	0.40	30
5	1	5	5	14.7	0.50	35
6	2	1	2	22	0.10	20
7	2	2	3	22	0.20	25
8	2	3	4	22	0.30	30
9	2	4	5	22	0.40	35
10	2	5	1	22	0.50	15
11	3	1	3	29.4	0.10	25
12	3	2	4	29.4	0.20	30
13	3	3	5	29.4	0.30	35
14	3	4	1	29.4	0.40	15
15	3	5	2	29.4	1	20
16	4	1	4	36.7	0.10	30
17	4	2	5	36.7	0.20	35
18	4	3	1	36.7	0.30	15
19	4	4	2	36.7	0.40	20
20	4	5	3	36.7	0.50	25
21	5	1	5	44.1	0.10	35
22	5	2	1	44.1	0.20	15
23	5	3	2	44.1	0.30	20
24	5	4	3	44.1	0.40	25
25	5	5	4	44.1	0.50	30

Se realizó el análisis estadístico de los datos de las pruebas de Flotación por aire disuelto por medio de gráficos de superficie y el método estadístico ANOVA, por medio del software *STATISTICA 8* de acuerdo al diseño ya establecido.

4.3 Análisis físico-químicos

En la Tabla 4.5 se presenta la técnica con que fueron medidos los parámetros de respuesta.

Tabla 4. 5 Técnicas utilizadas para la medición de cada parámetro

Parámetro	Técnica
pH	NMX-AA-008-SCFI-2000
Turbiedad	NMX-AA-038-SCFI-2001
Temperatura	NMX-AA-007-SCFI-2000
Conductividad	NMX-AA-093-SCFI-2000



“REMOCIÓN DE ACEITE EN AGUAS RESIDUALES DE REFINACIÓN DEL PETRÓLEO MEDIANTE ADICIÓN DE REACTIVOS QUÍMICOS Y SEPARACIÓN POR FLOTACIÓN NATURAL O CON AIRE DISUELTO”



Parámetro	Técnica
GyA	NMX-AA-005-SCFI-2000
DQO	NMX-AA-030-SCFI-2001
SST	NMX-AA-004-SCFI-2000
Color	NMX-AA-045-SCFI-2001



5. RESULTADOS

5.1 Selección del desestabilizante de aceite emulsificado y dosis óptimas

5.1.1 Caracterización del agua aceitosa

En la Tabla 5.1 se muestra la caracterización fisicoquímica del agua aceitosa del Lote 1 y Lote 2. Cabe mencionar que la caracterización se realizó en cada extracción de muestra de agua de cada lote, determinando que el contenido de grasas y aceites (GyA) fue similar para ambos lotes, mientras que en los parámetros SST y DQO fueron ligeramente mayores en el Lote 2. La principal diferencia entre ambos lotes fue el pH (Lote 1=ácido; Lote 2=básico), esto pudo ser posible a las condiciones climatológicas (temporada de lluvias, etc) en que se muestreo.

Tabla 5. 1 Caracterización fisicoquímica del agua aceitosa.

Parámetro	Lote 1	Lote 2
Grasas y Aceites (mg.L ⁻¹)	63-220	114-200
DQO (mg.L ⁻¹)	357-650	638-864
SST (mg.L ⁻¹)	50-94	100-116
Color (Pt-Co)	1563-3610	1800-2680
Turbiedad (UNT)	127-425	227-268
pH	5.6-7.1	8.8-9.2
Conductividad eléctrica (mS.cm ⁻¹)	1-3.2	1.7
SDT (mg.L ⁻¹)	573-1520	844-884
Dureza total	478*	402*
Dureza de Ca	292*	290*
Dureza de Mg	186*	112*

Nota: *Valores determinados en muestras compuestas de 24 horas, obtenidas en los puntos de muestreo del Lote 1 y 2.

5.1.2 Variación de pH

La prueba consistió en determinar el efecto del pH en la desestabilización de la emulsión de aceite y su remoción, así como la remoción de DQO, SST, Color y Turbiedad. Para realizar esta prueba se utilizó Ácido Sulfúrico (H₂SO₄) 1 N para acidificar la muestra e Hidróxido de Sodio (NaOH) 1 N para alcalinizar la muestra, de tal manera que se obtuvieran valores de pH en un intervalo de 2 hasta 13 unidades.

Para determinar la cantidad de ácido o base necesaria para cada jarra con una muestra de 2 L se realizaron pruebas preliminares usando un volumen de 200 mL de agua. En la Tabla 5.2 se muestran los volúmenes de ácido sulfúrico e hidróxido de sodio gastado para alcanzar un determinado pH.



Tabla 5. 2 Volumen de ácido-base utilizado para ajustar el pH del agua residual a diferentes valores.

pH inicial	7.6											
Temperatura (°C)	22											
volumen de muestra	200 mL											
pH	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Volumen gastado (mL)	5	0.9	0.55	0.45	0.3	0.1	0.01	0.1	0.5	1.1	2.3	12
Normalidad solución	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
	Ácido sulfúrico						Hidróxido de sodio					

En la Tabla 5.3 se presentan los parámetros de respuesta a la variación del pH obtenidos, agregando cierto volumen de ácido sulfúrico o de hidróxido de sodio, así como los valores de pH en las diferentes etapas de la prueba: durante la mezcla rápida, en la mezcla lenta y al término del tiempo de sedimentación.

Tabla 5. 3 Parámetros de respuesta de la variación del pH en 2 L de agua residual.

PRUEBAS EN VASOS DE 2 L	rpm.	tiempo de mezclado											
Mezcla rápida	150	3 min											
Mezcla lenta	20	15 min											
Tiempo de sedimentación		30 min											
Jarra	Muestra inicial	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
pH	7.6	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Volumen utilizado solución (mL)	n.a	21	9	5.5	4.5	3	1	0.1	1	5	5	12	55.5
Normalidad solución	n.a	1	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	1	1	1
pH después mezcla rápida	7.65	3	6	6	6	6	7	7	6	8	8	8	10
pH después mezcla lenta	7.5	3	6	6	6	7	7	6	6	8	8	8	10
pH después sedimentación	7.56	3	5	5	5	7	7	8	8	9	9	10	11
Volumen de lodo (mL)	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	215	180
Color (Pt-Co)	3570	2410	1710	1370	2920	1420	1060	1600	1280	1470	1930	332	40
Turbiedad (UNT)	138	138	71	82	68	94	75	71	70	64	71	14	2
Conductividad (mS.cm⁻¹)	3.2	4	3.1	3	2.9	2.8	2.7	2.7	2.7	2.8	2.8	2.9	4.8
DQO (mg.L⁻¹)	530	451	489	468	433	502	403	393	372	406	410	177	225
SST (mg.L⁻¹)	65	34	40	37	40	33	37	33	37	30	27	17	10
SSV (mg.L⁻¹)	37	33	37	27	33	30	33	26	33	23	20	10	7
Interfase aceite-agua		Poco	Poco	Poco	Poco	Poco	Poco	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
G y A (mg.L⁻¹)	88	66	88	69	78	65	74	70	67	70	85	6	14

En el Gráfico 5.1 se presenta la variación de los valores para los parámetros DQO, GyA, SST, color y turbiedad a diferentes valores de pH durante las pruebas, obteniendo resultados



favorables a pH de 12 y 13 con concentraciones de 177, 225 mg.L⁻¹ para DQO, de 6 y 14 mg.L⁻¹ para GyA, en cuanto a SST de 17 y 10 mg.L⁻¹.

En el Gráfico 5.2 se presentan las remociones calculadas por parámetro (Tabla E.1 en Anexo E), observándose que a un pH igual a 12 y 13 se obtuvieron altas remociones de todos los parámetros.

La literatura, menciona que el rompimiento de la emulsión se da a $\text{pH} \leq 2$. Se observa que a un pH entre 2 y 11 las remociones de GyA estuvieron entre un 20 y 26%. Asimismo, la DQO, SST, Color y Turbiedad presentan un comportamiento semejante en porcentaje de remoción. Con pH de 12 y 13 se observó la formación de un precipitado, este fenómeno se lo podemos atribuir a la dureza de Mg, ya que a $\text{pH} > 10.5$ al adicionar NaOH, se precipita el $\text{Mg}(\text{OH})_2$ y por consiguiente la precipitación. La solubilidad del CaCO_3 que se forma en el agua al adicionar NaOH debido a la presencia de $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ también depende del pH, pero al aumentar el valor de pH a más de 9.5, la solubilidad aumenta. Por lo anterior no se puede atribuir la formación de precipitado en los experimentos a pH 12 y 13 a la formación de CaCO_3 .

Los precipitados formados en los dos últimos experimentos provocaron la remoción del aceite sobre los flocúlos por lo cual se obtuvieron altas remociones de todos los parámetros.

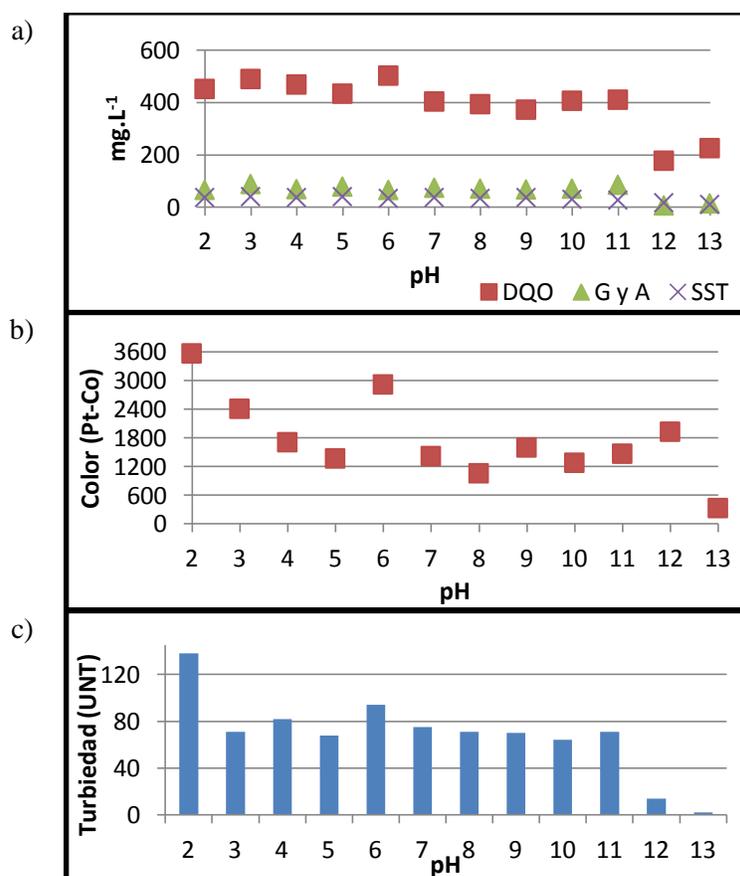


Gráfico 5. 1 Resultados de las pruebas de la variación del pH del agua residual: a) Valores de DQO, GyA y SST; b) Valores de color del agua después del ajuste del pH; c) Valores de la turbiedad del agua después del ajuste del pH.

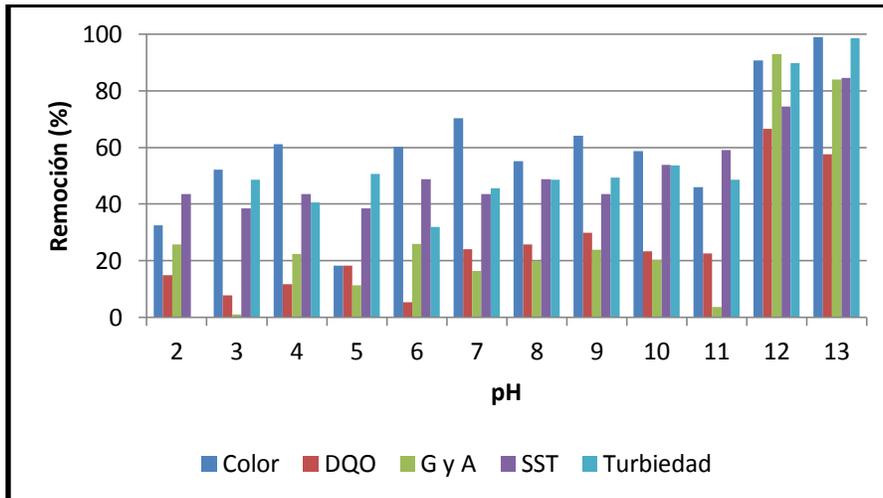


Gráfico 5. 2 Remociones obtenidas por la variación del pH sin adición de un coagulante.

Se puede observar que a valores de pH igual a 12 y 13 se obtuvieron 108 y 90 (mL.L⁻¹) en volumen de lodos respectivamente para cada litro de agua residual, para valores de pH de 2-11 no se observa volumen de lodos debido a que hubo formación de flóculos no sedimentables.

5.1.3 Determinación de la cantidad mínima de coagulante

En la Tabla 5.4 se muestran los resultados para la determinación de las dosis mínimas de cada coagulante de acuerdo a la formación de flóculos. El volumen mínimo para el SAS, PAX 16S y PAX 260XLS fue de 2.5, 1.5 y 1.5 mL.L⁻¹. Mientras que para el PIX 145 y PIX 111 el volumen mínimo fue de 3 y 2 mL.L⁻¹.

Tabla 5. 4 Determinación de dosis mínima utilizando diferentes coagulante minerales.

Tipo de Coagulante	Volumen de la muestra (mL)	Volumen de coagulante (mL)	Volumen de coagulante (mL.L ⁻¹)	Formación de flóculos
SAS	200	0.4	2	No
		0.5	2.5	Sí (dosis mínima)
		1	5	Sí
PIX 145	200	0.5	2.5	No
		0.6	3	Sí (dosis mínima)
		1	5	Sí
PIX 111	200	0.3	1.5	No
		0.4	2	Sí (dosis mínima)
		0.5	2.5	Sí
		1	5	Sí
PAX 16S	200	0.1	0.5	No
		0.2	1	No
		0.3	1.5	Sí (dosis mínima)



Tipo de Coagulante	Volumen de la muestra (mL)	Volumen de coagulante (mL)	Volumen de coagulante (mL.L ⁻¹)	Formación de flocúlos
PAX 260 XLS	200	0.1	0.5	No
		0.3	1.5	Si (dosis mínima)
		0.5	2.5	Si
		1	5	Si

5.1.4 Selección de los mejores agentes coagulantes y dosis para la desestabilización de la emulsión y remoción de materia orgánica

5.1.4.1 Pruebas para la determinación de la dosis de coagulante SAS (Sulfato de Aluminio) usando jarras de 1L

En la Tabla 5.5 se muestran los resultados de la prueba en un litro de agua residual para la determinación de la dosis del coagulante SAS. Podemos observar que en la jarra No. 5 se obtuvo la mejor dosis para la remoción de Turbiedad en un litro de agua residual, de 11 mL.L⁻¹ de SAS, equivalente a 9.9 mg Al.L⁻¹ como concentración de aluminio, ya que presentó la menor turbiedad, de 3 UNT, en comparación del resto de las jarras.

Tabla 5. 5 Resultados de la prueba de dosis de coagulante SAS en 1 L.

SOLUCIÓN DE SAS (%)	1						
Concentración de SAS (mg.L ⁻¹)	10,000						
Porcentaje de Aluminio presente en SAS (%)	9						
Concentración de aluminio presente en la solución (mg.L ⁻¹)	900						
JARRA	Muestra inicial	1 (dosis mínima)	2	3	4	5	6
Dosis SAS (mL.L ⁻¹)	n.a.	2.5	5	7	9	11	15
Dosis de aluminio (mg Al.L ⁻¹)	n.a.	2.25	4.5	6.3	8.1	9.9	13.5
Volumen de lodos	n.a.	N.D.	N.D.	50	50	50	50
Turbiedad	360	87	22	5	5	3	5
Mezcla rápida 3 min a 150 rpm.							
Mezcla lenta 15 min 20 rpm.							
Tiempo de sedimentación 30 min							

5.1.4.1.1 Pruebas para la determinación de las dosis de coagulantes SAS (Sulfato de Aluminio) usando jarras de 2L

En la Tabla 5.6 se presentan los resultados de la prueba en dos litros de agua residual para la determinación de la dosis óptima del coagulante SAS. Se observa que en la jarra No. 6 se obtuvo la mejor dosis, ya que presentó la mínima concentración de GyA que fue de 7.7 mg.L⁻¹ y también valores bajos para los demás parámetros con respecto a las pruebas, bajo esta misma condición la DQO presentó un valor de 169 mg.L⁻¹.



Tabla 5. 6 Resultados de la prueba de dosis de coagulante SAS en 2 L.

SOLUCIÓN DE SAS (%)		1					
Concentración de SAS (mg.L ⁻¹)		10,000					
Porcentaje de Aluminio presente en SAS (%)		9					
Concentración de aluminio presente en la solución (mg.L ⁻¹)		900					
JARRA	Muestra inicial	1 (dosis mínima)	2	3	4	5	6
Dosis de aluminio (mg Al.L ⁻¹)		2.25	4.5	6.3	8.1	9.9	13.5
pH final	7.3	6.9	6.8	6.6	6.4	6.1	5.3
Volumen de lodo (mL)	n.a.	N.D.	N.D.	100	80	100	80
Color (Pt-Co)	2180	2920	1890	332	137	132	83
Turbiedad (UNT)	301	251	51	24	9	12	8
Conductividad (mS.cm ⁻¹)	2.9	2.9	2.8	2.3	2.9	2.2	2.1
DQO (mg.L ⁻¹)	411	534	247	189	145	185	169
SST (mg.L ⁻¹)	65	30	20	16.6	13.33	16.6	10
SSV (mg.L ⁻¹)	37	14	13.33	10	10	16	6.66
Interfase aceite-agua	n.a.	Poco	Poco	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
G y A (mg.L ⁻¹)	63.3	58	25.4	9.8	23.8	18.1	7.78
SDT (mg.L ⁻¹)		1480	850	1132	1495	830	512
Alcalinidad (mg CaCO ₃ .L ⁻¹)	21.6	14.85	13.5	16.2	6.75	2.7	N.D

En la Tabla 5.7 se presentan los resultados de porcentaje de remoción para cada dosis de SAS añadido en las pruebas de determinación de la dosis óptima, donde se observa un porcentaje de remoción de 72.8% de DQO con una dosis de 8.1 mgAl.L⁻¹, la mayor comparada con las dosis presentadas en la tabla para cada jarra, se observa un 87.7% de remoción de GyA con una dosis de 13.5mgAl.L⁻¹ y 68.4% de remoción de DQO para esta misma dosis. Se obtuvo un porcentaje bajo para DQO pero debido a que el parámetro en respuesta fue el de GyA seleccionamos la jarra 6 como la mejor por sus resultados.

Tabla 5. 7 Resultados de porcentaje de remoción para cada dosis de SAS añadido.

Dosis (mg Al.L ⁻¹)	Remociones, %					Volumen de lodos (mL.L ⁻¹)
	Color	DQO	GyA	SST	Turbiedad	
2.25	0.0	0.0	8.4	53.8	16.6	0
4.5	35.3	53.7	59.9	69.2	83.1	0
6.3	88.6	64.6	84.5	74.5	92.0	50
8.1	95.3	72.8	62.4	79.5	97.0	40
9.9	95.5	65.4	71.4	74.5	96.0	50
13.5	97.2	68.4	87.7	84.6	97.3	40



En los Gráficos 5.3-5.6 se muestran los resultados para la desestabilización de la emulsión, remoción de GyA, DQO y otros parámetros utilizando Sulfato de Aluminio (SAS). Se observa que al incrementar la dosis de SAS existe un incremento en los parámetros de respuesta. Utilizando una dosis 15 mL.L^{-1} de la solución de SAS (dosis de Al de 13.5 mg.L^{-1}) se obtuvieron las mayores remociones de GyA, SST, color y turbiedad las cuales fueron del 88%, 85%, 97%, 98% respectivamente. La cantidad de GyA determinada con esta dosis después de la adición de SAS fue de 7.8 mg.L^{-1} . Bajo estas condiciones, la remoción de DQO fue del 68% con una concentración después de la coagulación de 170 mg.L^{-1} . Por otra parte se observó que con dosis de SAS por arriba de 6.3 mLAl.L^{-1} los resultados eran semejantes para la DQO, color y turbiedad. Con dosis menores de 4.5 mgAl.L^{-1} las remociones de todos los parámetros de respuesta fueron menores de 80%, esto debido a la poca formación de flóculos (Figura 5.1). Con dosis mayores de 6.3 mgAl.L^{-1} se observó la presencia de flóculos y para dosis de 8.1 y 9.9 mg.L^{-1} no presentaron un aumento significativo en cuanto a los porcentajes de remoción. Con base en estos resultados la mejor dosis para la desestabilización de la emulsión es de 13.5 mg.L^{-1} , y considerando la remoción de todos los parámetros la dosis óptima es de 6 mgAl.L^{-1} .

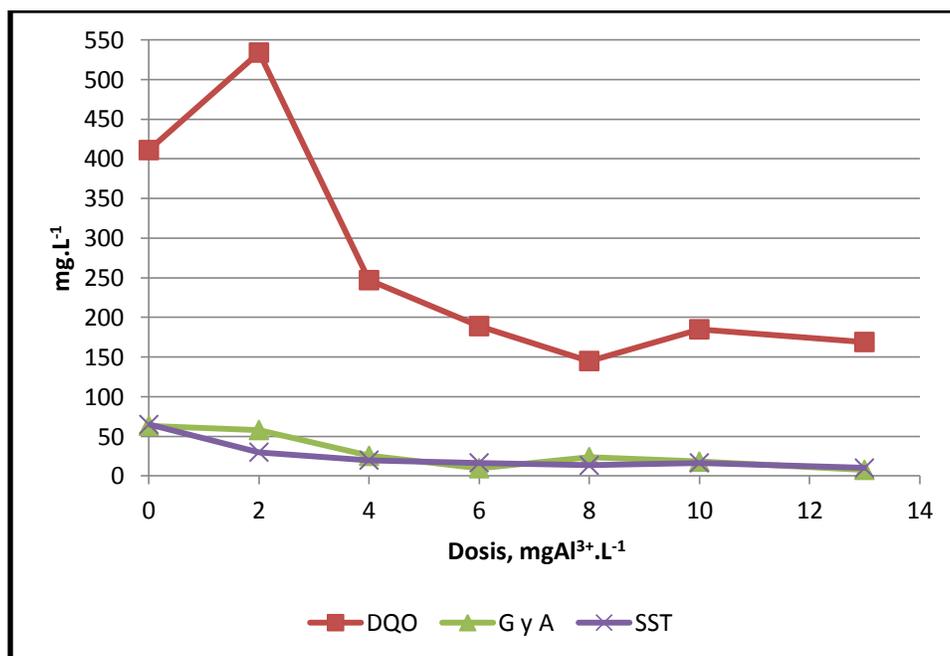


Gráfico 5. 3 Concentraciones de GyA y SST, y valores de DQO obtenidos en el agua tratada con diferentes dosis de SAS.



En el Gráfico 5.4 se observan los resultados obtenidos en cuanto a color Pt-Co y Turbiedad, que para la dosis máxima el color disminuyó de 2180 a 83 unidades Pt-Co y la turbiedad disminuyó de 301 a 8 UNT.

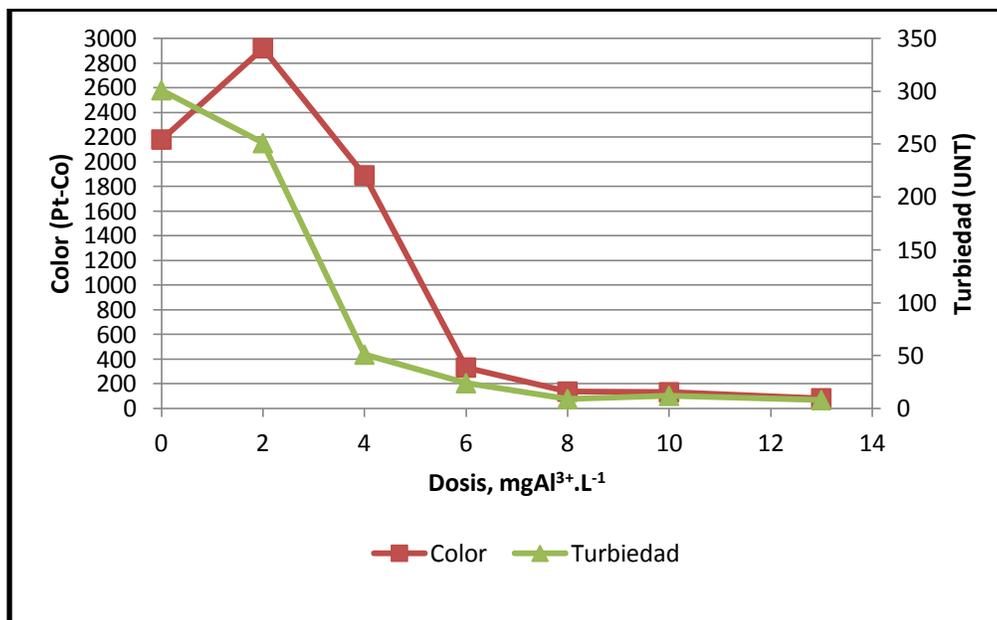


Gráfico 5. 4 Dosis (mgAl³⁺.L⁻¹) vs [Color (Pt-Co) y Turbiedad (UNT)].

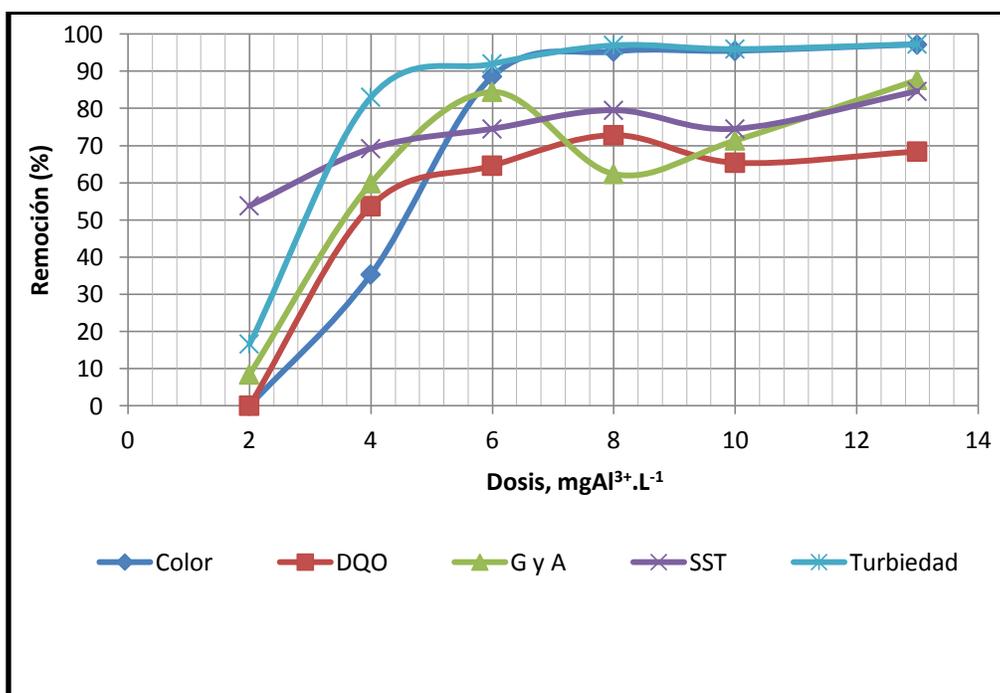


Gráfico 5. 5 Remociones obtenidas con la aplicación de SAS en diferentes dosis.

Se observó la formación de flóculos para las dos primeras dosis, sin embargo, estos fueron pequeños, lo que dificultaba su sedimentación, por esa razón en el Gráfico 5.6 se observa que para las concentraciones de 2 y 4 (mg Al.L^{-1}) no se presentaron resultados cuantitativos. Al término del tiempo de sedimentación la cantidad de lodos aceitosos generados fueron entre 40 y 50 mL.L^{-1} .

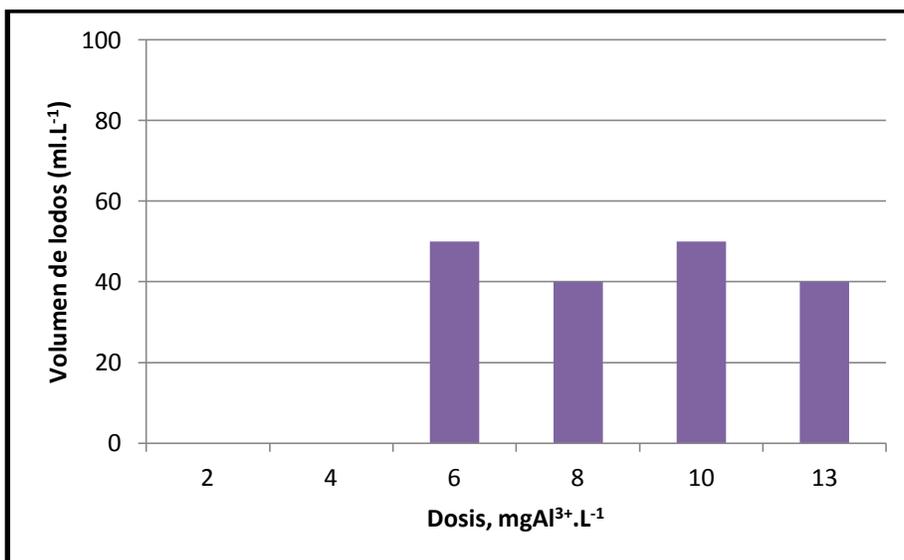


Gráfico 5. 6 Volumen de lodos formados con la aplicación de diferentes dosis de SAS.



Figura 5. 1 Desestabilización de la emulsión aplicando Sulfato de Aluminio.

5.1.4.1.2 Pruebas para la determinación de las dosis de coagulantes PIX-145 (sulfato férrico) usando jarras de 1L

En la Tabla 5.8 se muestran los resultados de la prueba en un litro de agua residual para la determinación de la dosis del coagulante PIX-145, en la jarra No. 5 se obtuvo la dosis óptima en un litro de agua residual con 11 (mL.L^{-1}) de PIX-145 y 15.4 (mg Fe.L^{-1}) en dosis de Fierro 3, ya que presentó la menor turbiedad con 3 UNT y un volumen de lodos de 60 mL.L^{-1} en comparación de las dosis restantes.



Tabla 5. 8 Resultados de la prueba de dosis de coagulante PIX-145 en 1 L.

SOLUCIÓN DE PIX-145 (%)	1						
Concentración de PIX-145 (mg.L⁻¹)	14500						
Porcentaje de Hierro presente en PIX-145 (%)	9.7						
Concentración de Fe³⁺ presente en la solución (mg.L⁻¹)	1406						
JARRA	Muestra inicial	1 (dosis mínima)	2	3	4	5	6
Dosis PIX-145 (mL.L ⁻¹)	n.a.	3	5	7	9	11	15
Dosis de Hierro 3 (mg Fe ³⁺ .L ⁻¹)	n.a.	4.2	7.0	9.8	12.6	15.4	21.1
Volumen de lodos	n.a.	N.D.	N.D.	40	60	60	60
Turbiedad	291	229	19	5	4	3	3
Mezcla rápida 3 min a 150 rpm.							
Mezcla lenta 15 min 20 rpm.							
Tiempo de sedimentación 30 min							

5.1.4.1.3 Pruebas para la determinación de las dosis de coagulantes PIX-145 (sulfato férrico) usando jarras de 2L

En la Tabla 5.9 se presentan los resultados de la prueba en dos litros de agua residual para la determinación de la dosis óptima del coagulante PIX-145. Se observa que la desestabilización de la emulsión se logró satisfactoriamente aplicando la dosis mínima, pero los valores del resto de los parámetros fueron altos. Al aumentar la dosis a 9.8 mgFe⁺³.L⁻¹ se logran buenos resultados no solo para la remoción de GyA, sino también para la de DQO, SST, SSV y Turbiedad pero el color permanece alto. Con la siguiente dosis de 12.6 mgFe⁺³.L⁻¹ el color disminuye significativamente manteniéndose los valores del resto de los parámetros. Los mejores resultados con base en todos los parámetros se obtuvieron con las dosis de 15.4 mgFe⁺³.L⁻¹. Se observa que para las dosis de 9.8 y 12.6 mgFe⁺³.L⁻¹ se obtienen buenas concentraciones de GyA que es el parámetro más importante pero tenemos que cuidar también la respuesta en los demás parámetros como la DQO, etc., debido a las condiciones establecidas por la PTAR de la refinería para recibir agua previamente tratada por esa razón se menciona anteriormente que la mejor dosis fue la que se obtuvo en la jarra No.5.

Tabla 5. 9 Resultados de la prueba de dosis de coagulante PIX-145 en 2 L.

SOLUCIÓN DE PIX-145 (%)	1						
Concentración de PIX-145 (mg.L⁻¹)	14500						
Porcentaje de Hierro presente en PIX-145 (%)	9.7						
Concentración de Fe³⁺ presente en la solución (mg.L⁻¹)	1406						
JARRA	Muestra inicial	1 (dosis mínima)	2	3	4	5	6
Dosis de Hierro 3 (mg Fe ³⁺ .L ⁻¹)		4.2	7.0	9.8	12.6	15.4	21.1
pH final	7.3	6.5	6.7	6.6	6.4	6.2	5.3
Volumen de lodo (mL)	n.a.	N.D.	50	50	70	70	70
Color (Pt-Co)	2180	1470	1140	315	192	51	51
Turbiedad (UNT)	301	192	24	10	6	4	4
Conductividad (mS.cm ⁻¹)	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	3



“REMOCIÓN DE ACEITE EN AGUAS RESIDUALES DE REFINACIÓN DEL PETRÓLEO MEDIANTE ADICIÓN DE REACTIVOS QUÍMICOS Y SEPARACIÓN POR FLOTACIÓN NATURAL O CON AIRE DISUELTO”



SOLUCIÓN DE PIX-145 (%)		1						
Concentración de PIX-145 (mg.L⁻¹)		14500						
Porcentaje de Fierro presente en PIX-145 (%)		9.7						
Concentración de Fe³⁺ presente en la solución (mg.L⁻¹)		1406						
JARRA		Muestra inicial	1 (dosis mínima)	2	3	4	5	6
DQO (mg.L ⁻¹)		411	366	223	171	185	171	182
SST (mg.L ⁻¹)		65	20	16.6	10	14	15	15
SSV (mg.L ⁻¹)		37	16.6	13.3	10	7	6	6
Interfase aceite-agua		n.a.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
G y A (mg.L ⁻¹)		63.3	6.1	12.6	9	9	12.6	15.2
SDT (mg.L ⁻¹)		1513	1488	1477	1475	1489	1492	1510
Alcalinidad (mg CaCO ₃ .L ⁻¹)		21.6	22.95	21.6	18.9	13.5	8.1	N.D
Mezcla rápida 3 min a 150 rpm.								
Mezcla lenta 15 min 20 rpm.								
Tiempo de sedimentación 30 min								

La Tabla 5.10 presenta los resultados de las remociones obtenidas para cada dosis de fierro añadido en las pruebas. Se observa que el máximo % de remoción fue de 58.4% de DQO para una dosis de 9.8 y 15.5 mgFe³⁺.L⁻¹, se observa un 90.4% de remoción de GyA con una dosis de 4.2 mgFe³⁺.L⁻¹ y 11% de remoción de DQO para esta misma dosis, valor considerado bajo por lo cual no se elije esta dosis.

Tabla 5. 10 Porcentajes de remoción de los parámetros de respuesta para cada dosis PIX-145 añadido.

Dosis mgFe ³⁺ .L ⁻¹	Remociones, %					Volumen de lodos (mL.L ⁻¹)
	Color	DQO	GyA	SST	Turbiedad	
4.2	32.6	11.0	90.4	55.1	36.2	0
7.0	47.7	45.7	80.1	64.0	92.0	25
9.8	85.5	58.4	85.8	73.0	96.7	25
12.6	91.2	55.0	85.8	81.0	98.0	35
15.5	97.7	58.4	80.0	83.8	98.7	35
21.1	97.7	55.7	76.0	83.8	98.7	35

En el Gráfico 5.7 se muestran las concentraciones de Fe³⁺ tres parámetros de respuesta (DQO, GyA y SST) obtenidas. Se puede observar que al ir aumentando las dosis de Fe disminuyen considerable las concentraciones de los parámetros DQO, GyA y SST hasta llegar a una dosis de 9.8 mgFe³⁺.L⁻¹, ya que a dosis mayores no hay una variación significativa en los porcentajes de remoción para los parámetros antes mencionados.



“REMOCIÓN DE ACEITE EN AGUAS RESIDUALES DE REFINACIÓN DEL PETRÓLEO MEDIANTE ADICIÓN DE REACTIVOS QUÍMICOS Y SEPARACIÓN POR FLOTACIÓN NATURAL O CON AIRE DISUELTO”

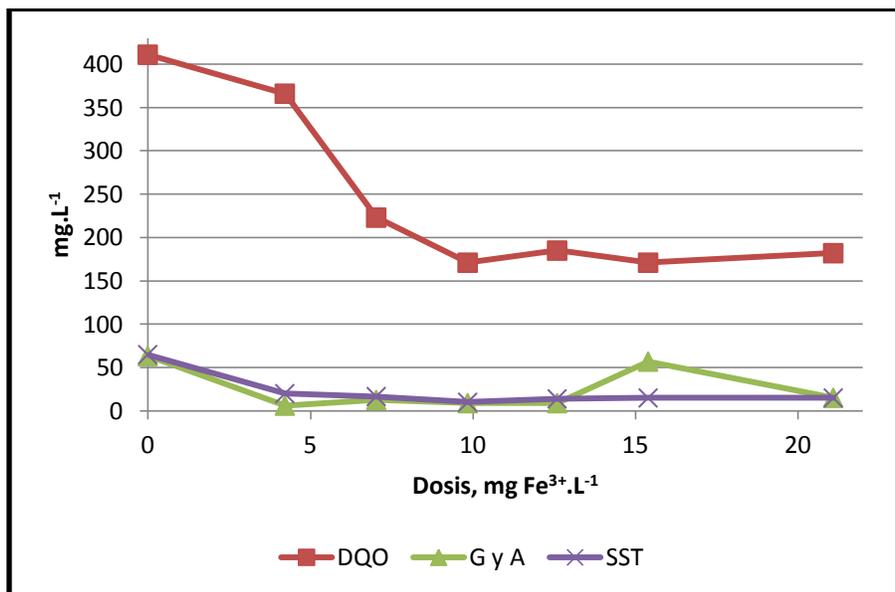


Gráfico 5. 7 Concentraciones de GyA y SST, y valores de DQO obtenidos en el agua tratada con diferentes dosis de PIX-145.

En el Gráfico 5.8 se observa que la turbiedad del agua se puede reducir a 10 UNT con una dosis de 9.8 mgFe³⁺.L⁻¹ mientras que para disminuir el color del agua a 51 UC Pt-Co se requiere de una dosis de significativamente mayor, de 15.4 mgFe³⁺.L⁻¹.

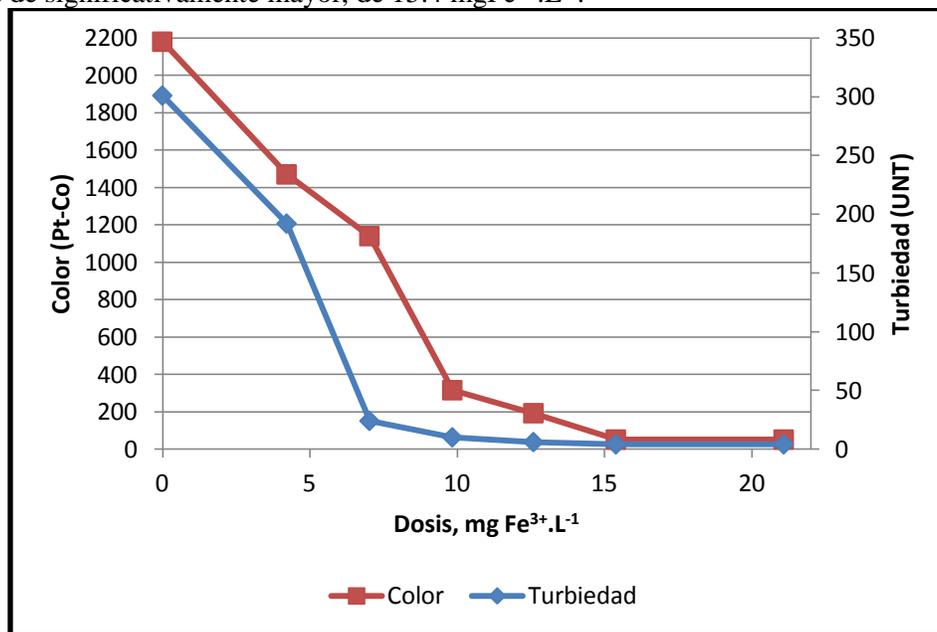


Gráfico 5. 8 Dosis (mgFe³⁺.L⁻¹) vs [Color (Pt-Co) y Turbiedad (UNT)].

Como se puede observar en el Gráfico 5.9, la remoción de DQO aplicando diferentes dosis de PIX-145 fue menor de 60% aun con concentraciones altas de Hierro. Las remociones de G y A fueron de hasta el 90% con la dosis mínima. Al incrementarse la dosis de PIX-145 las remociones de grasas y aceites se encontraron entre un 76% y 86% con una ligera tendencia de disminuir al aumentar las dosis de Fe. Considerando todos los parámetros se puede seleccionar como óptima la



dosis de $9.8 \text{ mgFe}^{3+} \cdot \text{L}^{-1}$. Las remociones tanto de los SST, color y turbiedad se incrementaron de manera proporcional a la dosis de coagulante aplicado.

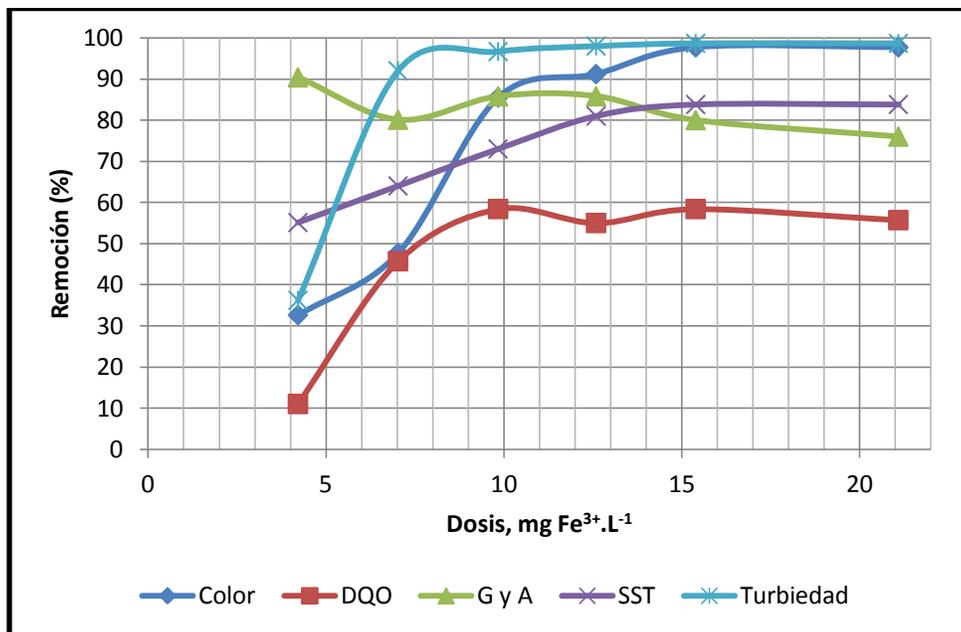


Gráfico 5. 9 Remociones obtenidas con la aplicación de PIX-145 en diferentes dosis.

En el Gráfico 5.10 se presentan las concentraciones de hierro contra el volumen de lodos formados en la adición del coagulante, se observa que para dosis de 12.6 , 15.5 y $21.1 \text{ mgFe} \cdot \text{L}^{-1}$ se obtuvieron volúmenes de $35 \text{ mL} \cdot \text{L}^{-1}$ y para dosis de 7.0 y $9.8 \text{ mg Fe} \cdot \text{L}^{-1}$ se obtuvieron volúmenes de $25 \text{ mL} \cdot \text{L}^{-1}$, en cuanto a la dosis de $4.2 \text{ mg Fe} \cdot \text{L}^{-1}$ no se reportó volumen de lodos debido a que se formaron flóculos no sedimentables.

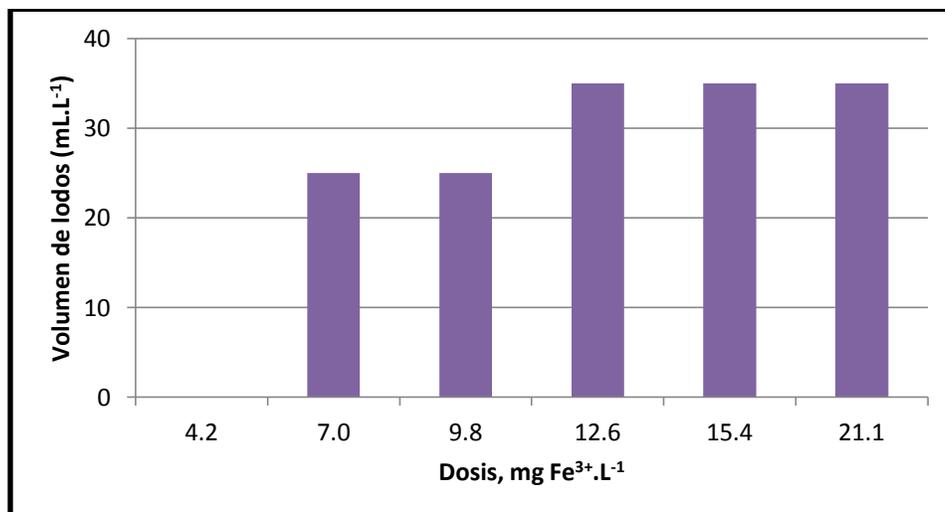


Gráfico 5. 10 Volumen de lodos formados con la aplicación de diferentes dosis de PIX-145.



5.1.4.1.4 Pruebas para la determinación de las dosis de coagulantes PIX-111 (cloruro férrico) usando jarras de 1L

En la Tabla 5.11 se muestran los resultados de la prueba en un litro de agua residual para la determinación de la dosis del coagulante PIX-111. Podemos observar que en la jarra No. 3 se obtuvo la dosis óptima para la remoción de turbiedad en un litro de agua residual, con 13.8 mgFe³⁺.L⁻¹, ya que presentó la menor turbiedad de 4 UNT, con un volumen de lodos formados de 60 mL.L⁻¹.

Tabla 5. 11 Resultados de la prueba de dosis de coagulante PIX-111 en 1 L.

SOLUCIÓN DE PIX-111 (%)		1						
Concentración de PIX-111 (mg.L ⁻¹)		14,500						
Porcentaje de Hierro presente en PIX-111 (%)		13.6						
Concentración de Fe ³⁺ presente en la solución (mg.L ⁻¹)		1972						
JARRA	Muestra inicial	1 (dosis mínima)	2	3	4	5	6	
Dosis PIX-111 (mL.L ⁻¹)	n.a.	2	5	7	9	11	15	
Dosis de Hierro3 (mg Fe ³⁺ .L ⁻¹)	n.a.	3.9	9.8	13.8	17.7	21.6	29.5	
Volumen de lodos	n.a.	N.D.	N.D.	60	60	50	50	
Turbiedad	291	253	12	4	4	4	5	
Mezcla rápida 3 min a 150 rpm.								
Mezcla lenta 15 min 20 rpm.								
Tiempo de sedimentación 30 min								

5.1.4.1.5 Pruebas para la determinación de las dosis de coagulantes PIX-111 (cloruro férrico) usando jarras de 2L

En la Tabla 5.12 se presentan los resultados de la prueba en dos litros de agua residual para la determinación de la dosis óptima del coagulante PIX-111. Los valores de los parámetros graficados se presentan en los Gráficos 5.12 y 5.13. Se observa que la desestabilización de la emulsión se logró de forma efectiva con una dosis de 9.8 mgFe³⁺.L⁻¹. Con esta dosis se logró disminuir satisfactoriamente la DQO, SST, SSV y Turbiedad, pero no el color del agua. Para disminuir el Color a 38 CU Pt-Co se requirió de una dosis mayor, de 13.8 mgFe³⁺.L⁻¹. El aumento posterior de las dosis no disminuyó los valores de la mayoría de los parámetros.

Tabla 5. 12 Resultados de la prueba con el coagulante PIX-111 en 2 L.

SOLUCIÓN DE PIX-111 (%)		1						
Concentración de PIX-111 (mg.L ⁻¹)		14500						
Porcentaje de Hierro presente en PIX-111 (%)		13.6						
Concentración de Fe ³⁺ presente en la solución (mg.L ⁻¹)		1972						
JARRA	Muestra inicial	1 (dosis mínima)	2	3	4	5	6	
Dosis de Hierro3 (mg Fe ³⁺ .L ⁻¹)		3.9	9.8	13.8	17.7	21.6	29.5	
pH final	7.3	7	6.5	6.4	5.9	5.6	3.8	
Volumen de lodo (mL)	n.a.	N.D.	20	50	50	50	50	
Color (Pt-Co)	2180	1260	256	38	98	87	59	
Turbiedad (UNT)	301	206	13	7	5	6	8	
Conductividad (mS.cm ⁻¹)	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	3	3	



“REMOCIÓN DE ACEITE EN AGUAS RESIDUALES DE REFINACIÓN DEL PETRÓLEO MEDIANTE ADICIÓN DE REACTIVOS QUÍMICOS Y SEPARACIÓN POR FLOTACIÓN NATURAL O CON AIRE DISUELTO”



SOLUCIÓN DE PIX-111 (%)			1				
Concentración de PIX-111 (mg.L ⁻¹)			14500				
Porcentaje de Hierro presente en PIX-111 (%)			13.6				
Concentración de Fe ³⁺ presente en la solución (mg.L ⁻¹)			1972				
JARRA	Muestra inicial	1 (dosis mínima)	2	3	4	5	6
DQO (mg.L ⁻¹)	411	345	202	169	221	213	171
SST (mg.L ⁻¹)	65	26.6	13.3	10	16.6	13.3	13.3
SSV (mg.L ⁻¹)	37	16.6	13.3	3.3	3.3	4	4
Interfase aceite-agua	n.a.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
G y A (mg.L ⁻¹)	63.3	48.3	5.5	15.8	4	18.9	11.9
SDT (mg.L ⁻¹)	1520	1501	1505	1479	1456	1515	1558
Alcalinidad (mg CaCO ₃ .L ⁻¹)	21.6	20.2	14.85	17.5	10.8	N.D.	N.D.
Mezcla rápida 3 min a 150 rpm.							
Mezcla lenta 15 min 20 rpm.							
Tiempo de sedimentación 30 min							

En la Tabla 5.13 se presentan los resultados de remoción para cada dosis añadida en las pruebas con PIX-111. Se observa que con la dosis de 13.8 mgFe³⁺.L⁻¹ se obtiene un porcentaje de remoción de 58.9% de DQO que es el más alto en todas jarras, para el parámetro de GyA se obtuvo de 75% lo que es poco bajo con respecto a la jarra 2 y 4 pero es favorable por que estamos obteniendo buenos resultados para el parámetro de DQO, por lo que sería la mejor opción de dosis para emplear. La mayor remoción de GyA se obtuvo con una dosis de 17.7 mgFe³⁺.L⁻¹ pero implicaría un costo mayor de reactivo por la cantidad necesaria que se necesitaría, otra limitante sería que se obtuvo 46.2% de remoción de DQO para esta misma dosis lo que no sería conveniente elegir esta dosis como la mejor. La mayor remoción de Turbiedad se logró con 17.7 mgFe³⁺.L⁻¹. La mayor remoción de Color se obtuvo con 13.8 mgFe³⁺.L⁻¹

Tabla 5. 13 Resultados de porcentaje de remoción para cada dosis de PIX-111 añadido.

Dosis mgFe ³⁺ .L ⁻¹	Remociones, %					Volumen de lodos (mL.L ⁻¹)
	Color	DQO	GyA	SST	Turbiedad	
3.9	42.2	16.0	23.7	59.0	31.6	0
9.8	88.3	50.9	91.3	79.5	95.7	10
13.8	98.3	58.9	75.0	84.6	97.7	25
17.7	95.5	46.2	93.7	74.4	98.3	25
21.6	96.0	48.2	70.1	79.5	98.0	25
29.5	97.3	58.4	81.2	79.5	97.3	25

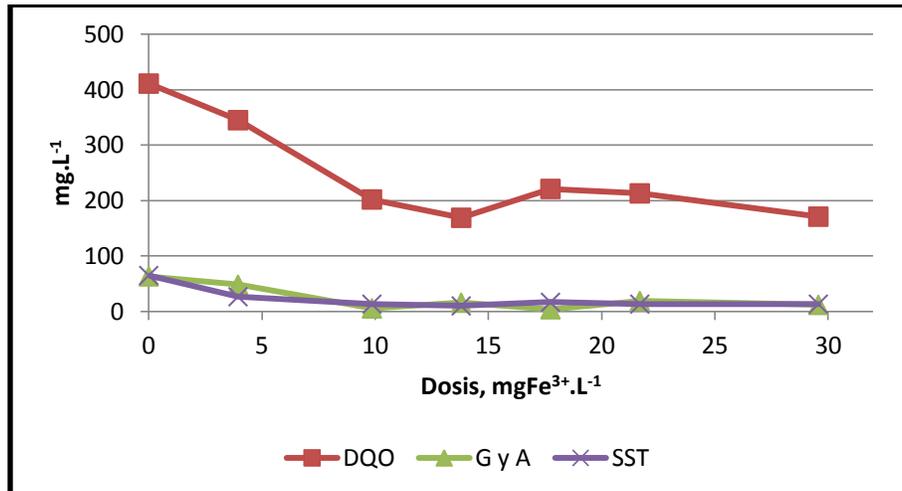


Gráfico 5.11 Concentraciones de GyA y SST, y valores de DQO obtenidos en el agua tratada con diferentes dosis de PIX-111.

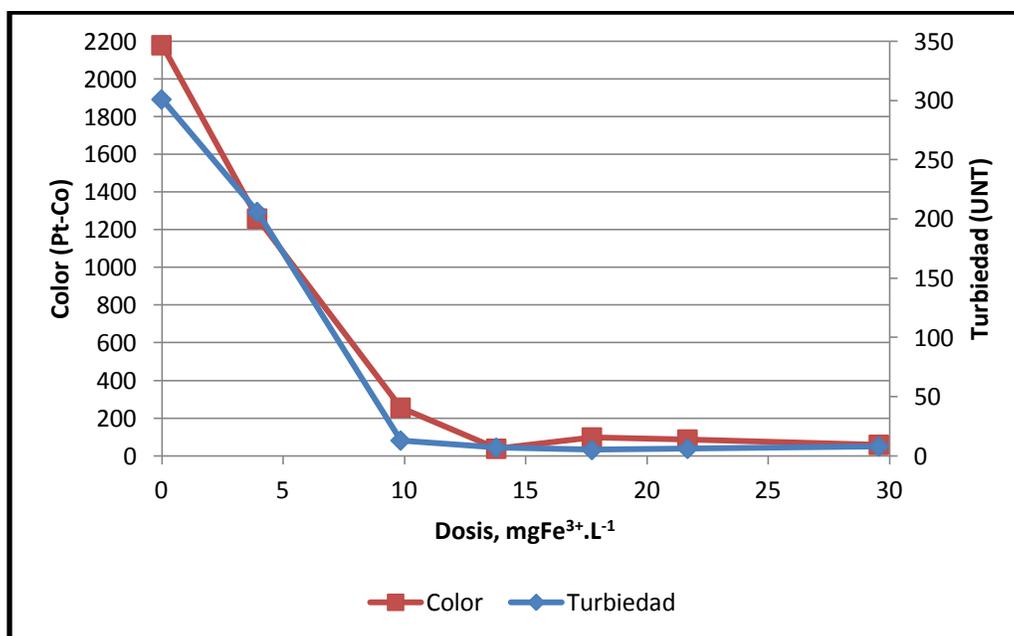


Gráfico 5.12 [Color (Pt-Co) y Turbiedad (UNT)] vs Dosis (mgFe³⁺.L⁻¹).

En el Gráfico 5.13 se presentan las remociones obtenidas en la prueba por parámetro. Se observa que la mejor dosis en la remoción de GyA fue de 17.7 mgFe³⁺.L⁻¹ con una remoción del 94%, seguida por una dosis de 9.8, 13.8 y 29.5 mgFe³⁺.L⁻¹ con remociones de 91%, 75% y 81% respectivamente. Las mejores remociones de DQO fueron del 59% aplicando una dosis de 13.8 y 29.5 mgFe³⁺.L⁻¹. Mientras que para los SST, color y turbiedad remociones por arriba del 79% fueron obtenidas con dosis de PIX 111 mayores a 9.8 mgFe³⁺.L⁻¹.

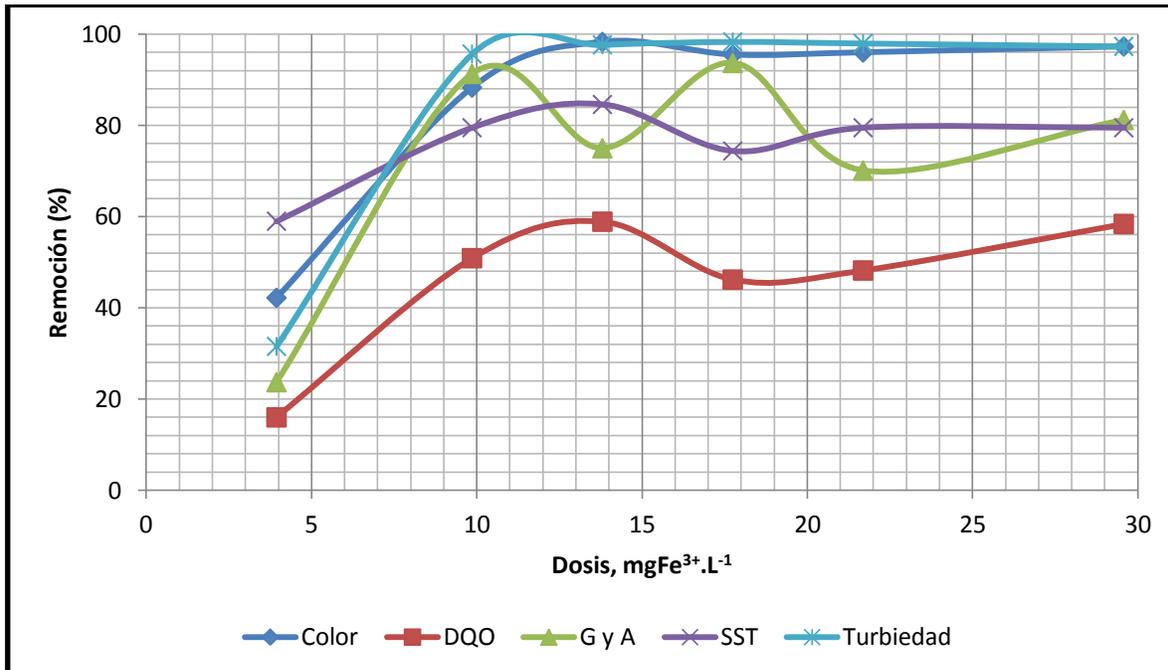


Gráfico 5.13 Remociones obtenidas con la aplicación de PIX-111 en diferentes dosis.

En el Gráfico 5.14 se presentan los volúmenes de lodo determinados en las pruebas aplicando diferentes dosis del coagulante. Se observa que para una concentración de 13.8, 17.7, 21.6 y 29.5 mgFe³⁺.L⁻¹ se obtuvieron volúmenes de 25 mL.L⁻¹. En cuanto a las concentraciones de 3.9 mgFe³⁺.L⁻¹ no se formó capa de lodos debido a que se formaron flóculos no sedimentables. Para una concentración de 9.8 mgFe³⁺.L⁻¹ se obtuvo un volumen de lodos de 10 mL.L⁻¹.

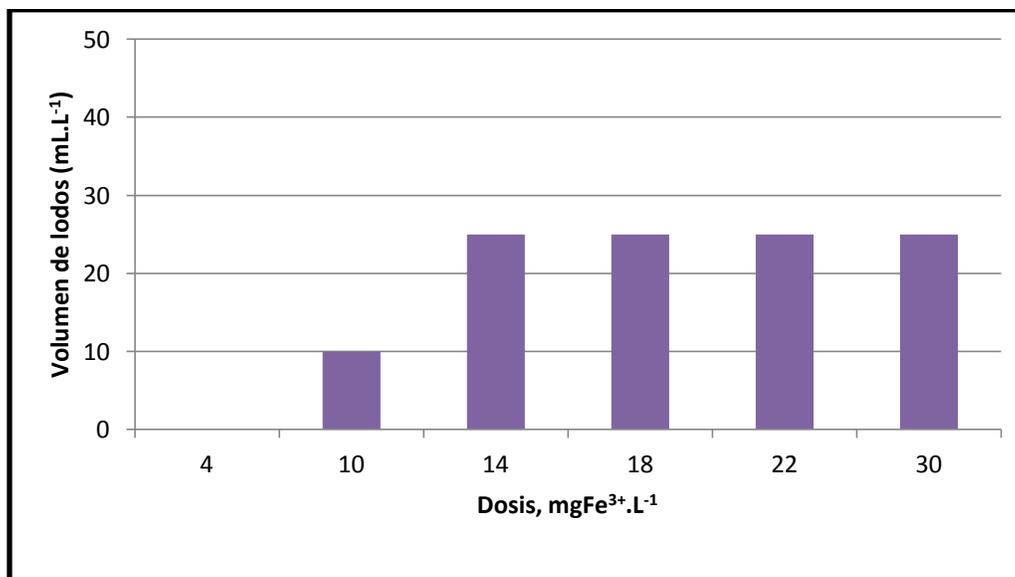


Gráfico 5.14 Volumen de lodos formados con la aplicación de diferentes dosis de PIX-111.



Figura 5. 2 Desestabilización de la emulsión aplicando PIX 111.

Se observó que con la misma dosis de $9.8 \text{ mgFe}^{3+} \cdot \text{L}^{-1}$ tanto para el PIX-111 como para el PIX-145, se obtuvieron altas remociones de los parámetros de respuesta, teniendo en cuenta que al ir aumentando la dosis de ambos coagulantes se obtuvieron resultados no significativos, por lo tanto en cuanto al consumo de coagulante no sería una opción viable agregar una dosis más alta por el costo que representaría, por lo que se opta que la dosis antes mencionada sea la óptima.

5.1.4.1.6 Pruebas para la determinación de las dosis de coagulantes PAX-260XLS usando jarras de 1L

En la Tabla 5.14 se muestran los resultados de la prueba en un litro de agua residual para la determinación de la dosis del coagulante PAX 260XLS. Podemos observar que en la jarra No. 5 se obtuvo la mejor dosis para la remoción de la turbiedad del agua en un litro de muestra, de $9.8 \text{ mgAl} \cdot \text{L}^{-1}$.

Tabla 5. 14 Resultados de la prueba con el coagulante PAX-260XLS en 1 L.

SOLUCIÓN DE PAX-260 (1 %)	1							
Concentración de PAX ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	13100							
Porcentaje de Al presente en PAX-260 (%)	7.5							
Concentración de Al presente en la solución ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	982.5							
JARRA	Muestra inicial	1 (dosis mínima)	2	3	4	5	6	7
Dosis de PAX-260 ($\text{mgAl} \cdot \text{L}^{-1}$)	n.a.	1.5	2.5	4.9	6.9	9.8	11.8	14.7
Volumen de lodos	n.a.	N.D.	N.D.	50	75	80	80	80
Turbiedad	160	56	13	2	3	1	1	1
Mezcla rápida 3 min a 150 rpm.								
Mezcla lenta 15 min 20 rpm.								
Tiempo de sedimentación 30 min								



5.1.4.1.7 Pruebas para la determinación de las dosis de coagulantes PAX-260XLS usando jarras de 2L

En la Tabla 5.15 se presentan los resultados de la prueba en dos litros de agua residual para la determinación de la dosis óptima del coagulante PAX-260XLS. Se observa que en la jarra No. 6 se obtuvo la mejor dosis, ya que presentó la mínima concentración de GyA y DQO y resultados bajos en cuanto a SST, SSV, color y turbiedad. Sin embargo, los valores de todos los parámetros fueron satisfactorios en las jarras 4 y 5, por lo que como dosis óptima se puede seleccionar la de 8.8 mgAl.L⁻¹.

Tabla 5. 15 Resultados de la prueba de dosis de coagulante PAX-260XLS en 2 L.

SOLUCIÓN DE PAX-260 (1 %)		1					
Concentración de PAX (mg.L ⁻¹)		13100					
Porcentaje de Al presente en PAX-260 (%)		7.5					
Concentración de Al presente en la solución (mg.L ⁻¹)		982.5					
JARRA	Muestra inicial	1	2	3	4	5	6
Dosis de PAX(mg Al.L ⁻¹)		1.5	3.0	6.0	8.8	11.8	14.7
pH final	7.1	6.9	6.9	6.8	6.7	6.5	6.4
Volumen de lodo (mL)	n.a.	N.D.	50	50	50	50	50
Color (Pt-Co)	3610	2510	454	251	133	104	104
Turbiedad (UNT)	272	108	10	5	4	4	2
Conductividad (mS.cm ⁻¹)	3.11	3.07	3.1	3.1	3.2	3.1	3.1
DQO (mg.L ⁻¹)	566	320	151	186	159	127	100
SST (mg.L ⁻¹)	74	51	15	13	10	8	9
SSV (mg.L ⁻¹)	48	29	5	6	5	1	1
Interfase aceite-agua	n.a.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
G y A (mg.L ⁻¹)	95.8	58.4	34.8	32	18.4	21.1	16.9
SDT (mg.L ⁻¹)	1594	1571	1590	1600	1622	1611	1594
Alcalinidad (mg CaCO3.L ⁻¹)	49.9	44.5	40.5	32.4	32.4	18.9	20.25
Temperatura (°C)	24	24	24	24	24	24	24
Mezcla rápida 3 min a 150 rpm.							
Mezcla lenta 15 min 20 rpm.							
Tiempo de sedimentación 30 min							

En la Tabla 5.16 se presentan los resultados de porcentaje de remoción para cada dosis añadida en las pruebas de determinación de la dosis óptima para el coagulante PAX-260XLS. La mayor remoción de DQO, se obtuvo con una dosis de 14.7 mgAl.L⁻¹, con esta dosis se obtuvo un 82.4% de remoción de GyA, así como las mejores remociones de color, turbiedad y SST. Se observó que a partir de la dosis de 8.8 mgAl.L⁻¹ se alcanzan remociones satisfactorias, por lo que esta sería la dosis óptima.

Tabla 5. 16 Resultados de porcentaje de remoción para cada dosis de PAX-260 XLS añadido.

Dosis mgAl.L ⁻¹	Remociones, %					Volumen de lodos (mL.L ⁻¹)
	Color	DQO	GyA	SST	Turbiedad	
1.5	30.5	43.4	39.0	30.6	60.3	0
3.0	87.4	73.3	63.7	79.7	96.3	25



Dosis mgAl.L ⁻¹	Remociones, %					Volumen de lodos (mL.L ⁻¹)
6.0	93.0	67.2	66.6	82.4	98.2	25
8.8	96.3	71.8	80.8	86.5	98.5	25
11.8	97.1	77.5	78	89.2	95.5	25
14.7	97.1	82.2	82.4	87.8	99.3	25

En el Gráfico 5.15 se muestran las concentraciones de tres parámetros de respuesta (DQO, GyA y SST) obtenidas en las aguas tratadas con las diferentes jarras de la prueba de determinación de la dosis óptima de coagulante. Se puede observar que al ir aumentando la dosis de Aluminio disminuyen las concentraciones de los parámetros de respuesta. El valor de DQO disminuye lentamente en el intervalo de dosis entre 3 y 14 mgAl.L⁻¹. Una tendencia similar se observa para los parámetros de GyA y SST.

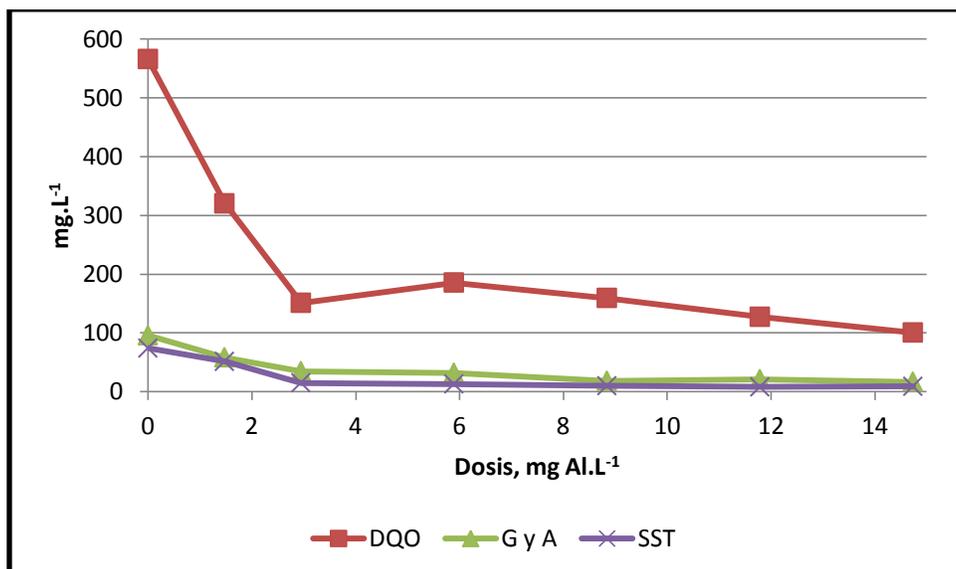


Gráfico 5. 15 Concentraciones de GyA y SST, y valores de DQO obtenidos en el agua tratada con diferentes dosis de PAX-260 XLS.

En el Gráfico 5.16 se observa la disminución del color aparente y turbiedad con el incremento de la dosis del coagulante. Se puede observar que el color pasó de 3610 a 104 unidades Pt-Co con turbiedades menores a 10 UNT. Con una dosis de 3 mgAl.L⁻¹ se obtuvo una turbiedad de 10 UNT, pero el color fue todavía alto, de 454 UC Pt-Co. El incremento de la dosis a 6 mgAl.L⁻¹ permitió obtener una turbiedad de 5 UNT, pero el color obtenido fue todavía alto, de 251 UC Pt-Co. Para lograr una reducción del color a 133 UC Pt-Co se necesitó de 8.8 mgAl.L⁻¹ con lo cual la turbiedad permaneció baja de 4 UNT.

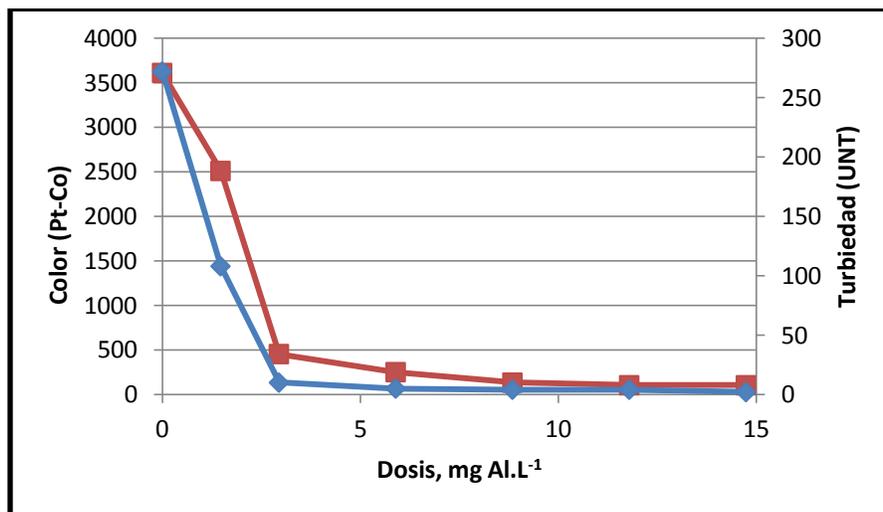


Gráfico 5.16 [Color (Pt-Co) y Turbiedad (UNT)] vs Dosis (mgAl.L⁻¹).

En el Gráfico 5.17 se observa que en la remoción de GyA fue de 14.7 mgAl.L⁻¹ con una remoción del 82.4%, seguida por una dosis de 8.8 y 11.8 mgAl.L⁻¹ con remociones de 80.8% y 78% respectivamente. El resultado obtenido con 14.7 mgAl.L⁻¹ es mejor que el obtenido con 8.8 mgAl.L⁻¹ pero la diferencia en las dosis es grande y al ser escalado para una operación normal tendría un impacto en el costo del coagulante, el cual no se justifica para obtener un aumento en solo 1% en remoción de aceite. Las mejores remociones de DQO fueron del 82.2, 77.5 y 71.8% aplicando dosis de 14.7, 11.84 y 8.8 mgAl.L⁻¹ respectivamente. Mientras que para los SST, color y turbiedad remociones por arriba del 73% fueron obtenidas con dosis de PAX-260 XLS mayores a 3.0 mgAl.L⁻¹. Considerando a la remoción obtenida de todos los parámetros como dosis óptima se puede seleccionar la de 8.8 mgAl.L⁻¹.

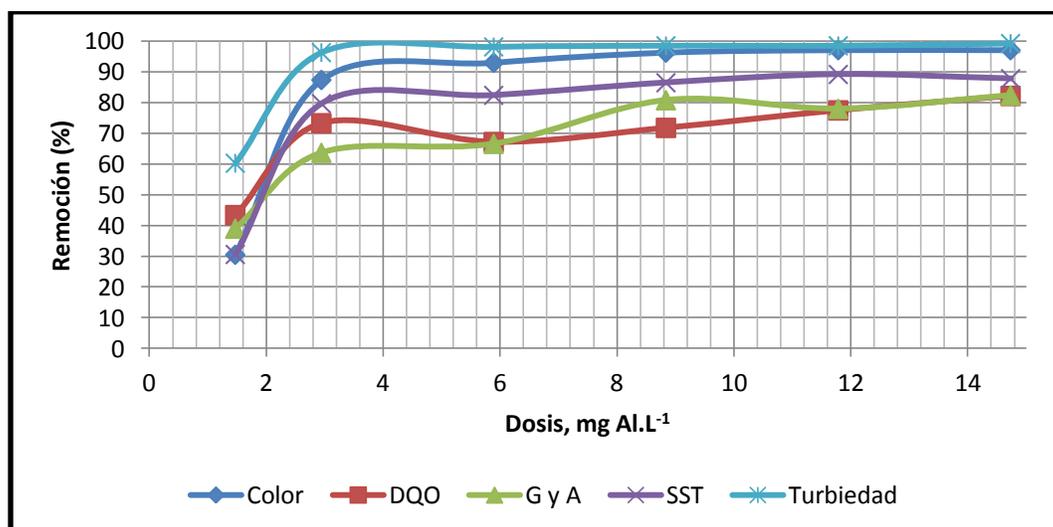


Gráfico 5.17 Remociones obtenidas con la aplicación de PAX-260 XLS en diferentes dosis.

En el Gráfico 5.18 se presentan los volúmenes de lodos formados con la adición del coagulante. Se observa que el incremento en las dosis del coagulante no generó más lodos, manteniéndose en 25

mL.L⁻¹ de lodos formados. En cuanto a la dosis de 1.5 mg Al.L⁻¹ no se reportó volumen de lodos debido a que se formaron flóculos no sedimentables.

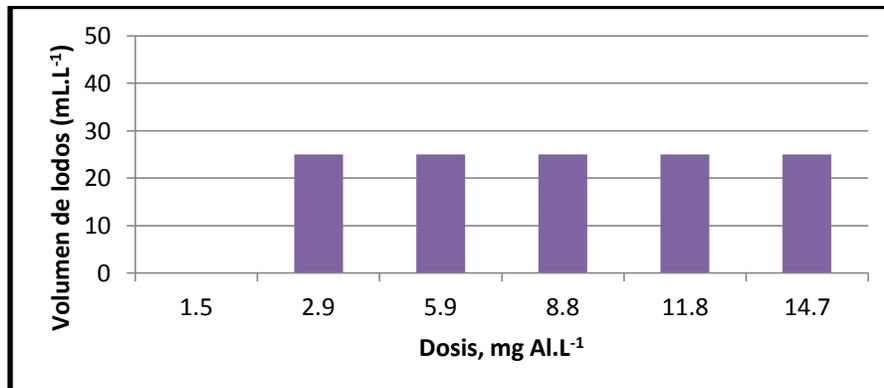


Gráfico 5.18 Volumen de lodos formados con la aplicación de diferentes dosis de PAX-260 XLS.



Figura 5.3 Desestabilización de la emulsión aplicando PAX 260 XLS.

5.1.4.1.8 Pruebas para la determinación de las dosis de coagulantes PAX-16S usando jarras de 1L

En la Tabla 5.17 se muestran los resultados de la prueba en un litro de agua residual para la determinación de la dosis del coagulante PAX-16S. Podemos observar que en la jarra No. 3 con una dosis de 6.5 mg Al.L⁻¹ logró la máxima disminución de la turbiedad observada en esta serie de pruebas, se obtuvo una turbiedad de 6 UNT.

Tabla 5.17 Resultados de la prueba con el coagulante PAX-16S en 1 L.

SOLUCIÓN DE PAX-16 S (%)	1						
Concentración de PAX-16 S (mg.L ⁻¹)	13300						
Porcentaje de Aluminio presente en PAX-16 S (%)	8.2						
Concentración de Al presente en la solución (mg.L ⁻¹)	1090.6						
JARRA	Muestra inicial	1 (dosis mínima)	2	3	4	5	6
Dosis de PAX-16 (mgAl.L ⁻¹)	n.a.	1.6	3.3	6.5	9.8	13.1	16.4
Volumen de lodos	n.a.	N.D.	N.D.	25	25	25	25
Turbiedad	163	81	17	6	6	6	6
Mezcla rápida 3 min a 150 rpm.							
Mezcla lenta 15 min 20 rpm.							
Tiempo de sedimentación 30 min							



5.1.4.1.9 Pruebas para la determinación de las dosis de coagulantes PAX-16S usando jarras de 2L

En la Tabla 5.18 se presentan los resultados de la prueba en dos litros de agua residual para la determinación de la dosis óptima del coagulante PAX-16 S. Se observa que en la jarra No. 4 se obtuvo la dosis óptima, ya que presentó una concentración relativamente baja de 30.4, 109.8, 12 y 3 mg.L⁻¹ para los parámetros de GyA, DQO, SST, SSV respectivamente y resultados bajos en cuanto a color y turbiedad de 46 Pt-Co, 8 UNT respectivamente. Se observa que para la jarra No.3 (6.5 mgAl.L⁻¹) se obtuvieron resultados más bajos con lo que respecta al parámetro de interés que es GyA, que los obtenidos para la jarra No.4 pero una concentración de DQO (143.1 mg.L⁻¹) más alta.

Tabla 5. 18 Resultados de la prueba con el coagulante PAX-16S en 2 L.

SOLUCIÓN DE PAX-16 S (%)		1					
Concentración de PAX-16 S (mg.L ⁻¹)		13300					
Porcentaje de Aluminio presente en PAX-16 S (%)		8.2					
Concentración de Al presente en la solución (mg.L ⁻¹)		1090.6					
JARRA	Muestra inicial	1 (dosis mínima)	2	3	4	5	6
Dosis de Aluminio (mg Al.L ⁻¹)	n.a.	1.6	3.3	6.5	9.8	13.1	16.4
pH final	7.1	6.9	6.9	6.6	6.4	6	6
Volumen de lodo (mL)	n.a.	N.D.	40	40	40	40	40
Color (Pt-Co)	3610	295	275	231	46	49	45
Turbiedad (UNT)	272	134	25	14	8	8	8
Conductividad (mS.cm ⁻¹)	3.1	3	3.1	3.1	3.1	3.2	3.1
DQO (mg.L ⁻¹)	565.6	313.4	142.1	143.1	109.8	110	115.7
SST (mg.L ⁻¹)	74	63.7	10	12	12	11	7
SSV (mg.L ⁻¹)	48	41.2	8	6	3	2	1
Interfase aceite-agua	n.a.						
G y A (mg.L ⁻¹)	95.8	53	32.7	24.3	30.4	23.1	20.8
SDT (mg.L ⁻¹)	1594	1570	1598	1612	1612	1614	1611
Alcalinidad (mg CaCO ₃ .L ⁻¹)	49.95	51.3	44.5	40.5	67.5	27	14.8
Temperatura (°C)	23	23	23	23	23	23	23
Mezcla rápida 3 min a 150 rpm.							
Mezcla lenta 15 min 20 rpm.							
Tiempo de sedimentación 30 min							

En la Tabla 5.19 se presentan los resultados de porcentaje de remoción para cada dosis añadida en las pruebas de determinación de la dosis óptima para el coagulante PAX-16 S. Se observa que se obtienen los mejores resultados, con una dosis de 9.8 mgAl.L⁻¹. Para la dosis antes mencionada se obtuvo una remoción de 68.3% para el parámetro de GyA y para DQO de 80.6%. Se observa en la tabla que se tienen mejores resultados con mayores dosis para GyA y SST, pero esto impacta en un mayor costo monetario por la cantidad de coagulante.



Tabla 5. 19 Resultados de porcentaje de remoción para cada dosis de PAX-16 S añadido.

Dosis mgAl.L ⁻¹	Remociones, %					Volumen de lodos (mL.L ⁻¹)
	Color	DQO	GyA	SST	Turbiedad	
1.6	91.8	44.6	44.7	13.9	50.7	0
3.3	92.4	74.9	65.9	86.5	90.8	20
6.5	93.6	74.7	74.6	83.8	94.9	20
9.8	98.7	80.6	68.3	83.8	97.1	20
13.1	98.6	80.5	75.9	85.1	97.1	20
16.4	98.8	79.5	78.3	90.5	97.1	20

En los Gráficos 5.19 y 5.22 se muestran los resultados obtenidos con diferentes dosis de PAX 16S. Los mejores resultados utilizando este coagulante mineral fue con 16.4 mg Al.L⁻¹. La remoción de GyA y de DQO para esta dosis fue de 78% y 79% respectivamente. Para los SST, color y turbiedad se obtuvieron remociones por arriba del 91%. A partir de la segunda dosis de PAX 16 S que corresponde a 3.3 mgAl.L⁻¹, la concentración de DQO después de la coagulación disminuyó de 570 a 140 mg.L⁻¹ (75% de remoción de DQO) permaneciendo con valores parecidos con dosis de 6.5, 9.8, 13.1 y 16.4 mgAl.L⁻¹. Mientras que para las GyA disminuyeron de 96 hasta 21 mg.L⁻¹. Con dosis más bajas se obtuvieron remociones de GyA y de DQO del 45%, la cual no fue observada con el SAS. La generación de lodos utilizando PAX 16S fue 50% menor que el SAS.

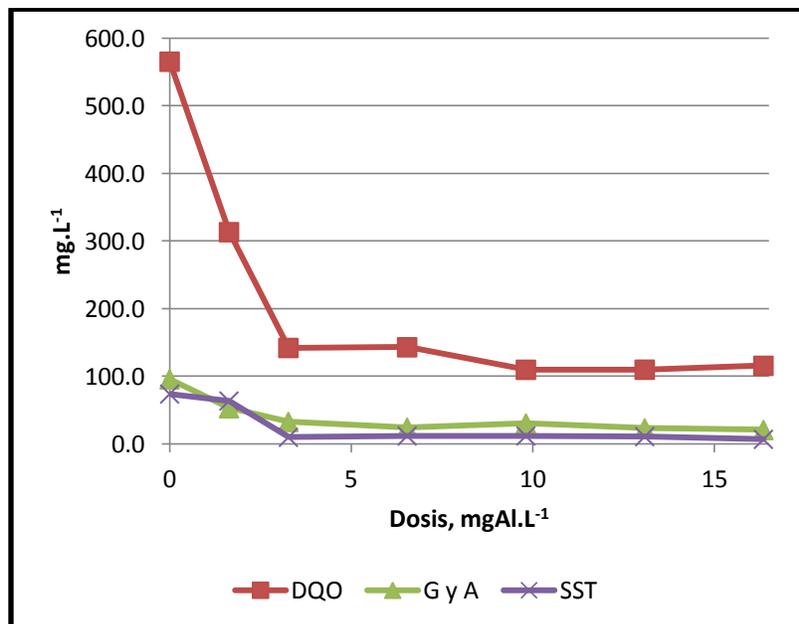


Gráfico 5. 19 Concentraciones de GyA y SST, y valores de DQO obtenidos en el agua tratada con diferentes dosis de PAX-16 S.

En el Gráfico 5.20 se observa el color aparente y turbiedad en el agua tratada de cada una de las jarras. Se puede observar que se obtuvieron valores después de la coagulación de 50 unidades Pt-Co y 8 unidades nefelométricas.

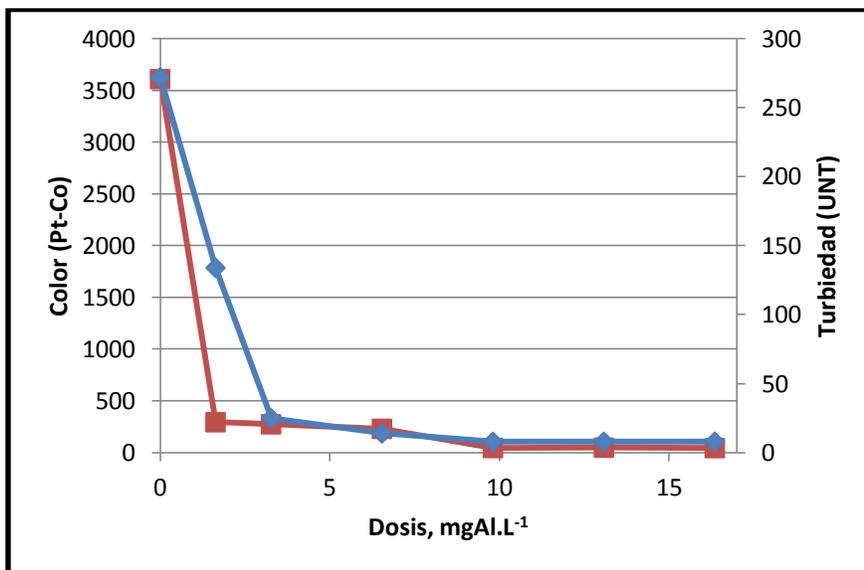


Gráfico 5. 20 [Color (Pt-Co) y Turbiedad (UNT)] vs Dosis (mgAl.L⁻¹).

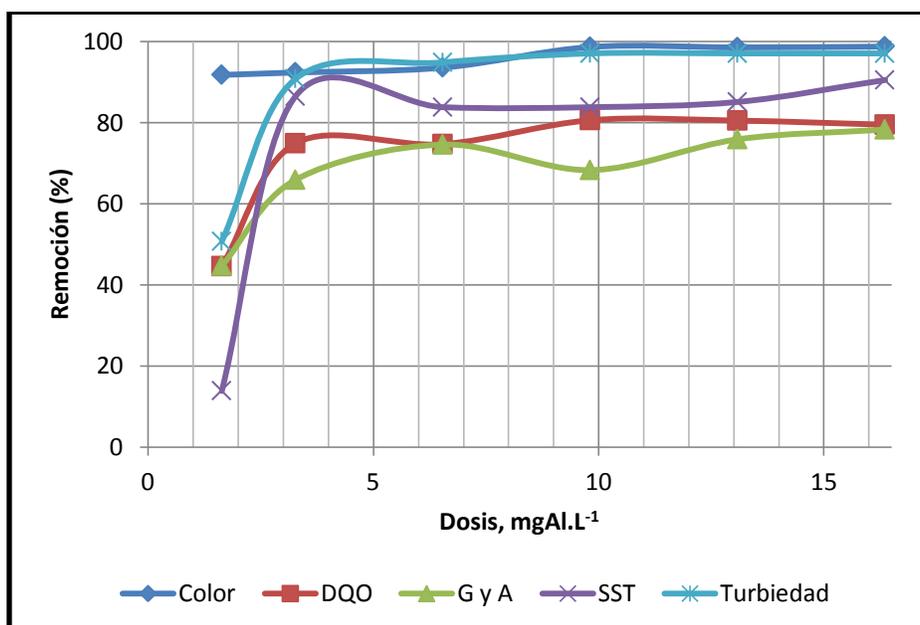


Gráfico 5. 21 Remociones obtenidas con la aplicación de PAX-16 S en diferentes dosis.

En el Gráfico 5.22 se presentan los volúmenes de lodos formados con la adición del coagulante. Se observa que para las concentración de 3.3-16.4 mg Al.L⁻¹ se obtuvo un volumen de 20 mL.L⁻¹. Con una dosis de 1.6 mg Al.L⁻¹ no se reportó volumen de lodos debido a que se formaron flóculos no sedimentables.

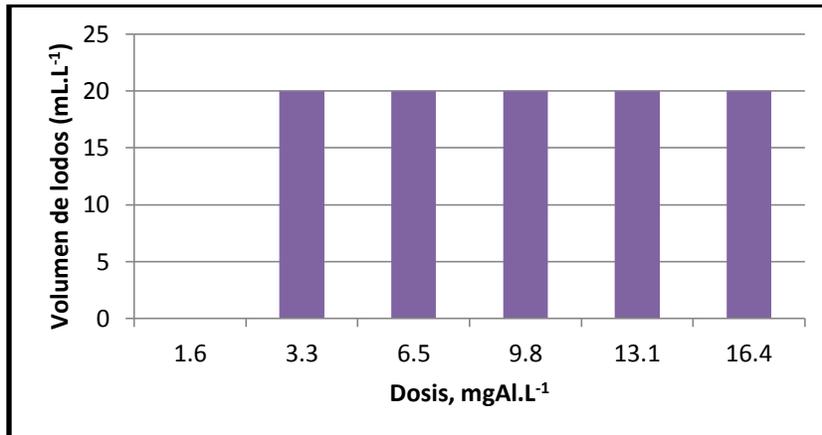


Gráfico 5. 22 Volumen de lodos formados con la aplicación de diferentes dosis de PAX-16 S.



Figura 5. 4 Desestabilización de la emulsión aplicando PAX 16S.

Los resultados obtenidos con el coagulante PAX-260 XLS indicaron un mejor desempeño comparados con los obtenidos para PAX-16 S, ya que aplicando menores dosis PAX 260XLS se obtuvieron resultados parecidos que al trabajar con dosis altas de PAX-16 S.

Sin embargo, comparando los resultados con SAS y PAX-16 S con una dosis de 16.4 mg Al.L⁻¹ los mejores resultados obtenidos para la desestabilización de la emulsión DQO fueron con el SAS.

Al comparar los resultados con PAX y SAS con dosis similares (8.1-9.9 mgAl.L⁻¹) se observan mayores remociones con PAX en todos los parámetros excepto DQO y Color. Estos últimos casos los resultados son similares.

La aplicación de Aluminio, Polialuminatos y Fierro para la desestabilización de la emulsión y remoción de DQO fue satisfactoria en la formación de flóculos grandes, siendo los polialuminatos los que generaron resultados satisfactorios con respecto a todos los parámetros de respuesta.

En la Tabla 5.20 se presentan las dosis óptimas obtenidas en las pruebas de desestabilización de la emulsión, en donde se observa que los mejores coagulantes probados individualmente fueron los Polialuminatos con un porcentaje de remoción de GyA del orden del 68-80%, para color de 96-99%, para SST de 84-87%, para turbiedad de 97-98.5%. En cuanto al porcentaje de remoción de DQO fue de 72-80%. Se observó la formación de una cantidad pequeña



de lodos que fue de alrededor de 20-25 mL.L⁻¹, por lo que son convenientes para ser utilizados en las pruebas consecuentes de coagulación-floculación. Se observó que para los coagulantes con Fe y el SAS, se necesitan dosis mayores, por lo que al escalar el proceso, el costo por el reactivo sería más alto para estos compuestos que para los polialuminatos. Se observó que con PAX-260 XLS (3mgAl.L⁻¹) se logra el mismo efecto y resultados similares que con el SAS con una dosis de 8.1 mgAl.L⁻¹. Al comparar las dosis esto tendría un impacto sustancial en el costo del coagulante, y una formación de lodos del 50% más para el SAS que para los polialuminatos.

Tabla 5. 20 Dosis óptimas de los coagulantes para la desestabilización de la emulsión.

Coagulantes	Dosis	Remociones, %					Volumen de lodos (mL.L ⁻¹)
		DQO	GyA	Color	Turbiedad	SST	
SAS	13.5 mgAl.L ⁻¹	68.4	87.7	97.2	97.3	84.6	40
PIX 145	15.4 mgFe.L ⁻¹	58.4	80.0	97.7	98.7	83.8	35
PIX 111	13.8 mgFe.L ⁻¹	58.9	75.0	98.3	97.7	84.6	25
PAX 260 XLS	8.8 mgAl.L ⁻¹	71.8	80.8	96.3	98.5	86.5	25
PAX 16S	9.8 mgAl.L ⁻¹	80.6	68.3	98.7	97.1	83.8	20

Comparando los resultados obtenidos con las dosis óptimas de los diferentes coagulantes se observa que el SAS compite con el PAX-260 XLS con respecto a la remoción de GyA. En lo que respecta al resto de los parámetros los resultados fueron mejores aplicando PAX.

5.1.5 Pruebas con la adición de floculantes catiónicos individuales

En la Tabla 5.21 se muestran los resultados de la determinación de las dosis mínimas de acuerdo con la formación de flóculos aplicando diferentes polímeros catiónicos. La dosis mínima para los 4 primeros floculantes fue de 2.5 mg.L⁻¹ y 2.6 mg.L⁻¹, mientras que para el LARKFLOCC-5100 fue de 0.25 mg.L⁻¹. El polímero LARKFLOC fue el único que se trabajó individualmente con el agua del Lote 1 y 2.

La solución preparada con los floculantes catiónicos sólidos OPTIFLOC-C-1288 y SUPERFLOC-C-498, fue de 0.5% (5 g.L⁻¹). La solución de los floculantes catiónicos líquidos OPTIFLOC-C-1781 y OPTIFLOC-C-1392 que tienen una densidad de 1.02 g.mL⁻¹ fue del 0.5%. La densidad del floculante LARKFLOC—C-5100 es de 1.17 g.mL⁻¹ y la concentración de la solución de 0.5%.



Tabla 5. 21 Determinación de dosis mínima utilizando diferentes floculantes catiónicos.

Tipo de Coagulante	Volumen de la muestra (mL)	Volumen de floculante (mL)	Volumen de floculante (mL.L ⁻¹)	Dosis del polímero orgánico (mg.L ⁻¹)	Formación de flóculos
OPTIFLOC C-1288	200	0.05	0.25	1.3	No
		0.1	0.5	2.5	Si (dosis mínima)
		1	5	25	Si
SUPERFLOC C-498	200	0.05	0.25	1.3	No
		0.1	0.5	2.5	Si (dosis mínima)
		1	5	25	Si
OPTIFLOC C-1781	200	0.05	0.25	1.3	No
		0.1	0.5	2.6	Sí (dosis mínima)
		1	5	25.5	Sí
		2	10	51	Si
OPTIFLOC C-1392	200	0.05	0.25	1.3	No
		0.1	0.5	2.6	Si (dosis mínima)
		1	5	25.5	Sí
		0.1	0.5	0.5	Si
LACKFLOC-C-5100	200	0.001	0.0005	0.025	No
		0.01	0.05	0.25	Si (dosis mínima)
		0.1	0.5	2.5	Si
		1	5	25	Si

Los resultados de los análisis realizados en las pruebas se presentan en el Anexo F y los Gráficos que presentan la variación de los diferentes parámetros dependiendo de la dosis en el Anexo F. En los Gráficos 5.23 y 5.24 se presentan las remociones determinadas aplicando cuatro floculantes en diferentes dosis. Se observa que el aumento en las dosis de los polímeros no influyó significativamente en la remoción de la DQO y GyA. Los 4 polímeros catiónicos permitieron obtener remociones de DQO mayores de 80% y de GyA mayores de 90% con dosis bajas (2.5-7.5 mg.L⁻¹), se logró rápidamente el rompimiento de la emulsión y hubo formación de lodos aceitosos (Gráfico 5.25), ya que se puede observar que para cada dosis suministrada se obtuvieron 7 mL.L⁻¹. Los cuatro floculantes formaron un flóc grande lo cual permitió una sedimentación más rápida. El aumento de las dosis de los polímeros no influyó significativamente sobre la remoción de SST, color y turbiedad y los resultados graficados nos muestran porcentos de remoción mayores de 80%. El pH no se vio afectado por la adición de los polímeros orgánicos catiónicos.

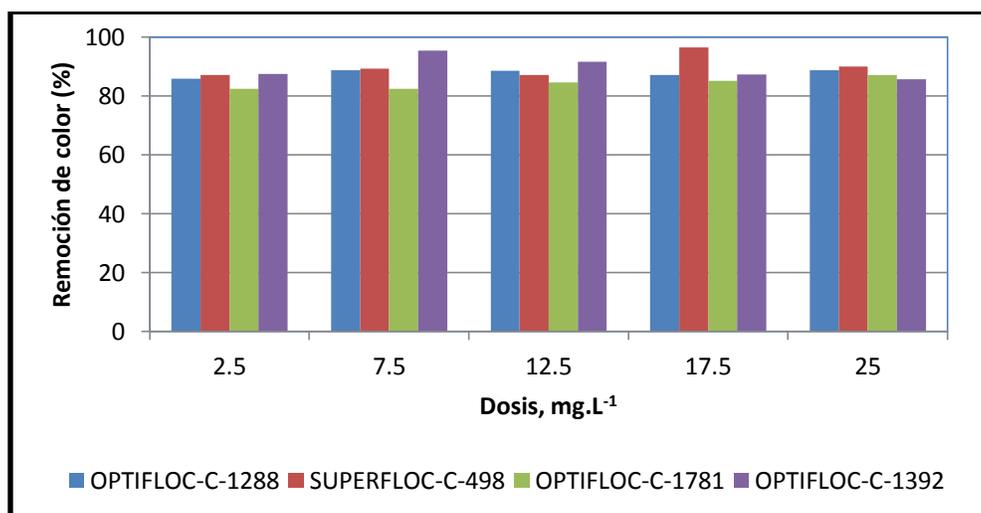
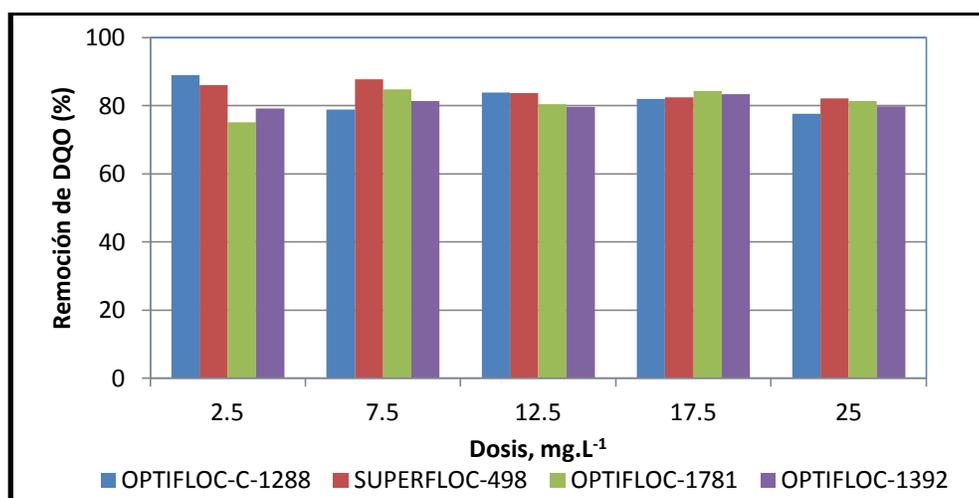
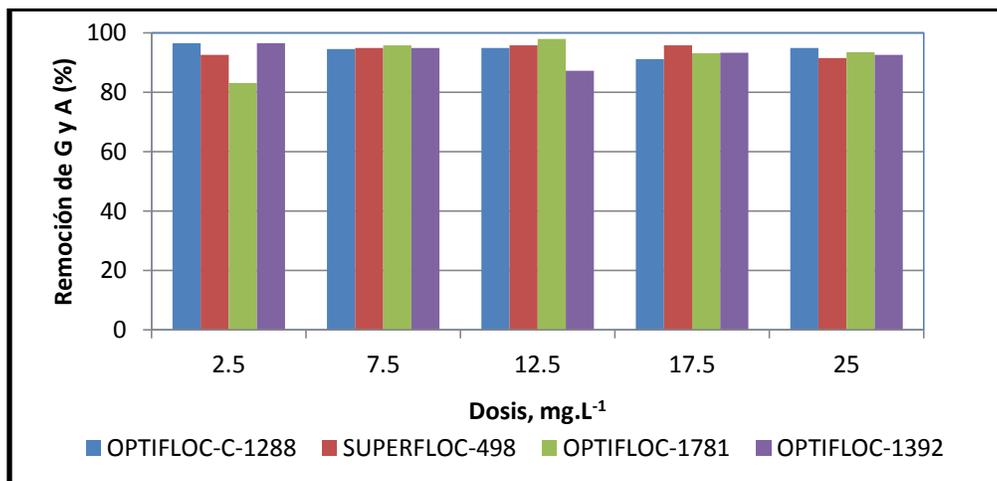


Gráfico 5. 23 Remociones de GyA, DQO y Color obtenidas en las pruebas con los floculantes OPTIFLOC-C-1288, OPTIFLOC-C-1781, SUPERFLOC-C-498 y OPTIFLOC-C-1392.

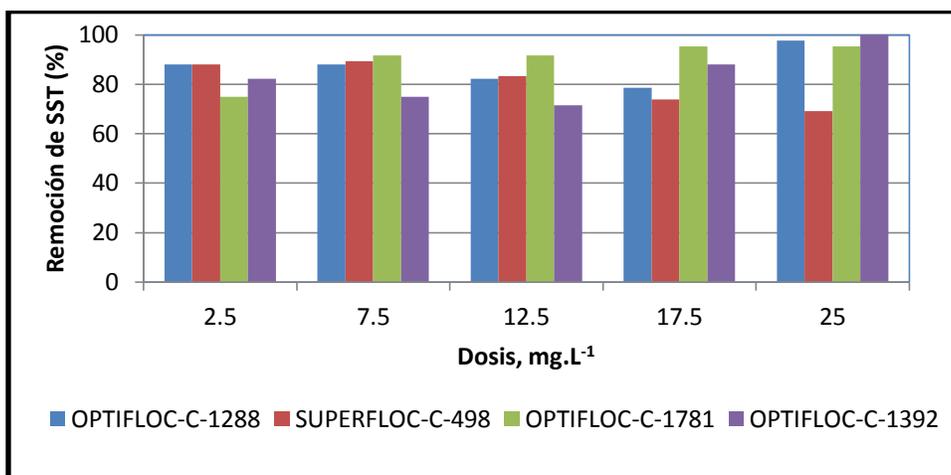
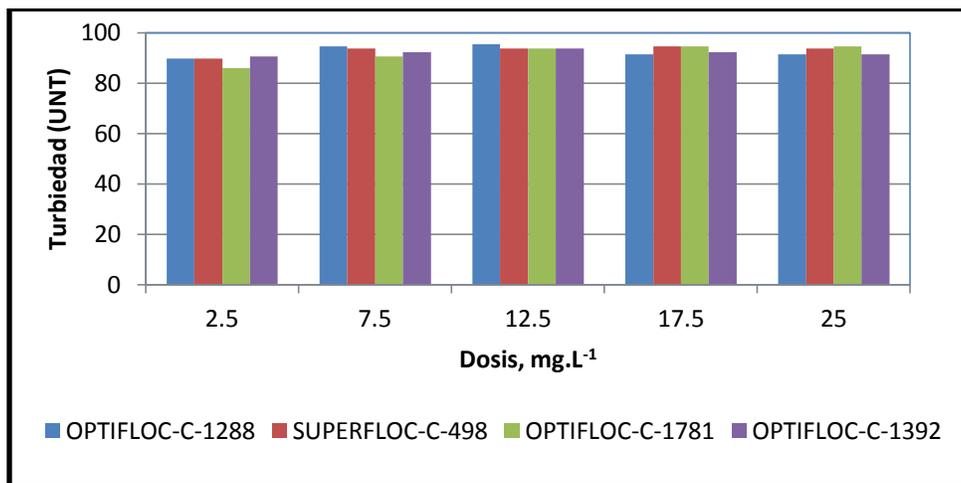


Gráfico 5. 24 Remociones de Turbiedad y SST obtenidos en las pruebas con los floculantes OPTIFLOC-C-1288, OPTIFLOC-C-1781, SUPERFLOC-C-498 y OPTIFLOC-C-1392.

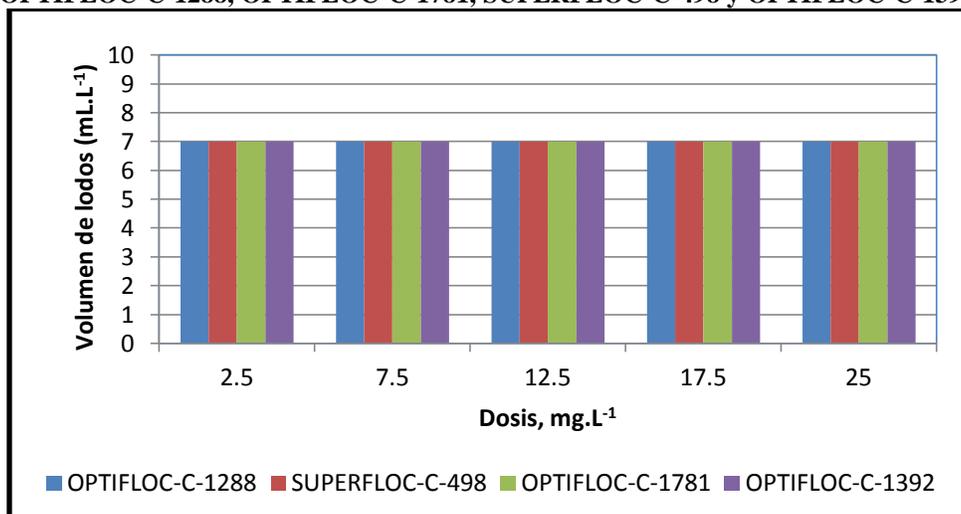


Gráfico 5. 25 Lodos aceitosos generados después de la adición de los floculantes catiónicos.



Figura 5. 5 Desestabilización de la emulsión aplicando floculantes catiónicos.

Los mejores polímeros bajo estas condiciones fueron el OPTIFLOC-C-1288 y SUPERFLOC-C-498. Se observó que desde la aplicación de la primera dosis se logran remociones requeridas para cumplir con las especificaciones requeridas por la PTAR, esto es con 2.5 mg.L^{-1} de los polímeros, es una buena dosis ya que la literatura marca como la dosis mínima empleada en floculación con polímeros de 0.1 mg.L^{-1} , claro teniendo en cuenta que no se han desarrollado estudios con este mismo polímero empleado en esta investigación. En cuanto a los coagulantes se obtenían las remociones requeridas pero con dosis mayores entre $3-8 \text{ mgAl.L}^{-1}$ y $10 \text{ mgFe}^{3+}.\text{L}^{-1}$, además de que con los polímeros se obtuvieron menores volúmenes de lodos (3-5 veces menos volumen de lodos). En el Gráfico 5.26 se observan los porcentajes de remoción para el Lote 1, en la cual se observa que se obtienen remociones del 77 al 87% para el LARKFLOC-C-5100 en cuanto al parámetro de GyA, Turbiedad y SST con una dosis de 2.5 mg.L^{-1} , pero se observa que no se obtuvieron buenas remociones de DQO y color para esta misma dosis, al igual que para las demás pruebas realizadas.

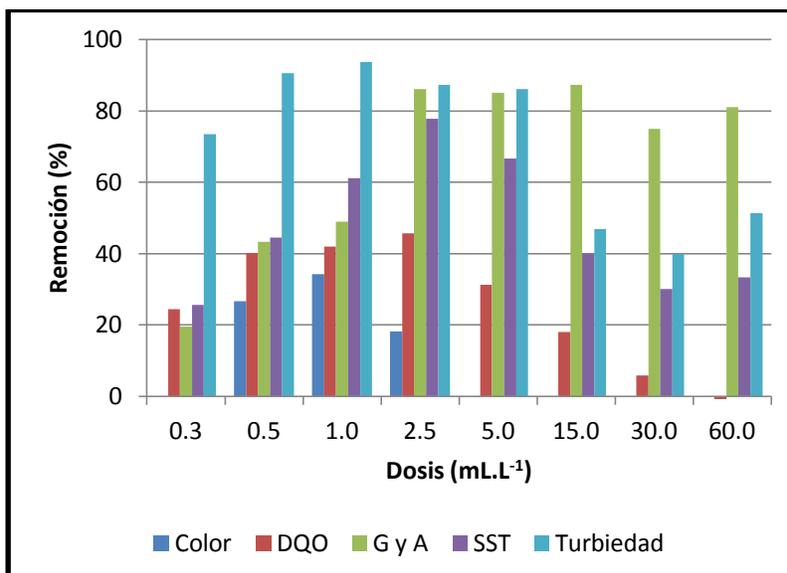


Gráfico 5. 26 Resultados de las pruebas con LARKFLOC-C-5100 para la desestabilización de la emulsión (agua residual Lote 1).

En lo que respecta al floculante LARKFLOC-C-5100 para el agua del Lote 2, se obtuvieron remociones de GyA por arriba del 80% con una dosis de 2.5 mg.L^{-1} indicando un buen desempeño del floculante en la remoción de GyA, sin embargo, con estas misma dosis se obtuvo el porcentaje de remociones más alto que fue del 48% para la remoción de DQO (Gráfico 5.28), para la Turbiedad y el color se presentaron las remociones más altas a esta misma dosis de 2.5 mg.L^{-1} con 97% y 88% respectivamente. Se observó que la dosis se presentó una disminución en los parámetros de respuesta.

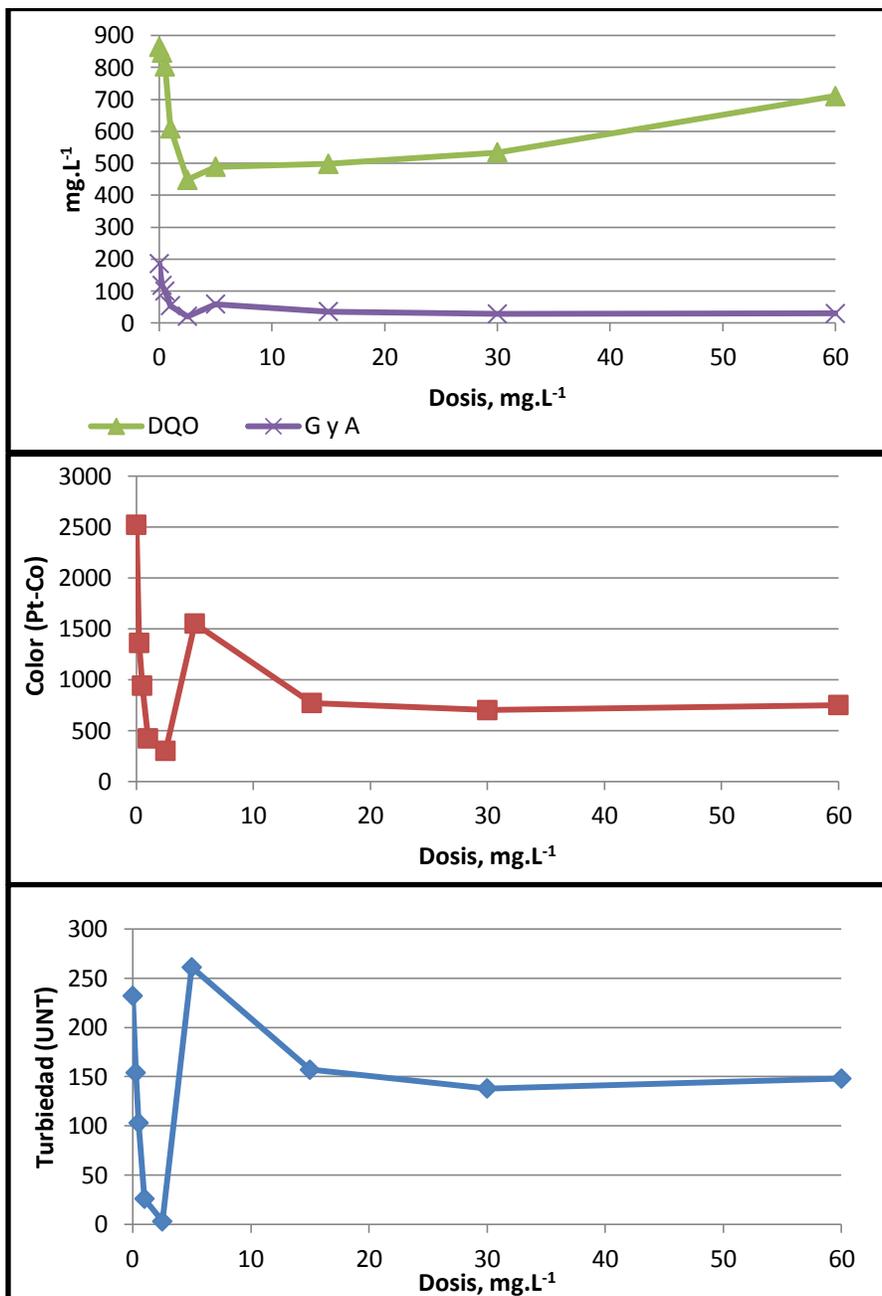


Gráfico 5. 27 Resultados de las pruebas con LARKFLOC-C-5100 para la desestabilización de la emulsión (agua residual Lote 2).

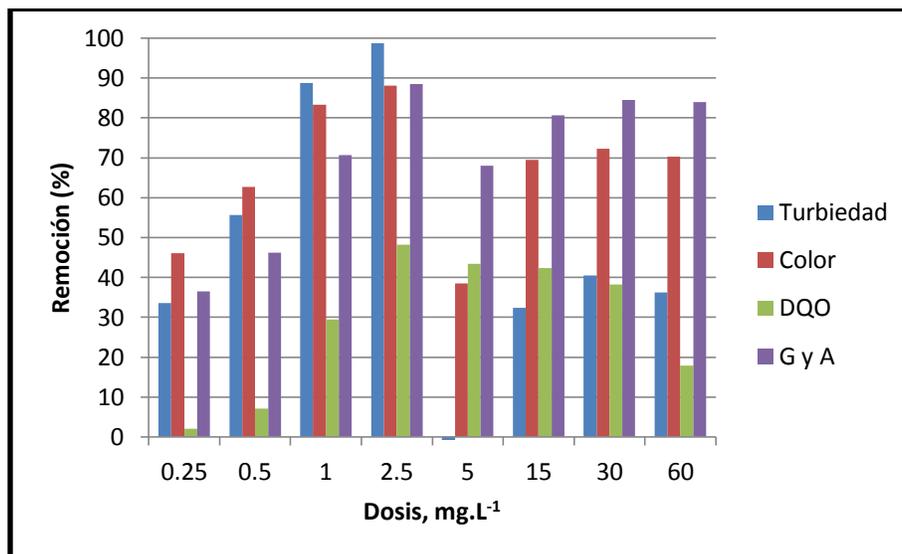


Gráfico 5. 28 Remociones de los diferentes parámetros de las pruebas con LARKFLOC-C-5100 para la desestabilización de la emulsión (agua residual Lote 2).

El incremento en la dosis de 1.0-2.5 mg.L⁻¹ de este floculante generó una disminución en la remoción de DQO, SST, color y turbiedad, provocando un aumento de estos parámetros. Asimismo, el aumento de la dosis del floculante acidificó la muestra del lote 1 disminuyéndose el pH de 6.7 a 4. Por lo tanto, se puede deducir que el floculante LARKFLOC no es efectivo para la desestabilización de la emulsión para un agua con pH menores a 7, es decir, para el agua residual del Lote 1 (Grafico 5.26). Sin embargo, para el agua residual aceitosa del Lote 2, el cual presenta un pH de 9, este floculante resulta ser muy efectivo en la desestabilización de la emulsión obteniéndose una buena formación de floc en tamaño y densidad inmediatamente después de que se dosificó el polímero.

En la Tabla 5.22 se presentan las mejores dosis en las pruebas individuales de floculantes catiónicos, en donde se observa que el mejor floculante probado individualmente fue el SUPERFLOC-C-498 con un porcentaje de remoción de GyA de 98%, para color de 84.7% y turbiedad de 93.7%, en cuanto al porcentaje de remoción de DQO fue 80.9%. Se observó la formación de una cantidad pequeña de lodos de 7 mL.L⁻¹, por lo que el SUPERFLOC-C-498 fue uno de los floculantes empleados en las pruebas consecuentes de coagulación-floculación.

Tabla 5. 22 Comparación de los resultados obtenidos con los Mejores Floculantes Catiónicos probados individualmente aplicando dosis de 2.5 mg.L⁻¹.

Floculantes	Concentración (mg.L ⁻¹)	Remociones, %					Volumen de Lodos (mL.L ⁻¹)
		DQO	GyA	Color	Turbiedad	SST	
SUPERFLOC-C-498	2.5	80.5	98.0	84.7	93.7	91.6	7
OPTIFLOC-C-1288	2.5	89.0	96.5	85.9	89.7	88.09	7
LARKFLOC-C-5100	2.5	48.1	88.5	88.0	98.7	-	-

5.1.6 Pruebas con la combinación de coagulantes y polímeros

Una vez probados a los coagulantes minerales y a polímeros orgánicos de forma individual se realizaron combinaciones de 3 coagulantes y 4 floculantes catiónicos y aniónicos. Para los



coagulantes minerales se mantuvo la dosis constante de acuerdo a los resultados obtenidos de las pruebas individuales. La dosis del Sulfato de Aluminio (SAS) fue de 7 mgAl.L^{-1} , para el Cloruro Férrico (PIX 111) de 5 mgFe.L^{-1} y para el Policloruro de Aluminio (PAX 260 XLS) de 3 mg Al.L^{-1} . Para los polímeros catiónicos las dosis que se probaron fueron entre 0.025 y hasta 2.6 mg.L^{-1} ya que en estas pruebas los polímeros se usaron como ayudantes a la floculación. Los valores de los parámetros GyA, DQO, SST, Color y Turbiedad obtenidos en estas pruebas se reportan en el Anexo G en forma de Gráficos.

En los Gráficos 5.29, 5.30, 5.31, 5.32 y 5.33 se muestran las remociones obtenidas con la combinación de los coagulantes y polímeros catiónicos aplicados en diferentes dosis. Asimismo, en la Tabla 5.23 y en el Gráfico 5.35 se muestra un resumen de los resultados obtenidos en la desestabilización de la emulsión. La adición de coagulantes combinados con los polímeros catiónicos en dosis bajas y con la combinación de los coagulantes permitió lograr el rompimiento de la emulsión eficientemente. Los flóculos eran relativamente grandes en comparación con los obtenidos con la aplicación de coagulantes de forma individual. Después de la agitación, los flóculos no flotaban en la superficie, si no que tendían a sedimentarse debido a la densidad de los flóculos.

Los mejores resultados con las combinaciones de los coagulantes y los floculantes catiónicos fueron el PIX 111-SUPERFLOC-C-498, SAS-OPTIFLOC-C-1288 y PAX 260 XLS-OPTIFLOC-C-1392 con los que se lograron obtener remociones de DQO y GyA mayores al 90% con dosis bajas de los polímeros bajas de 0.1 mg.L^{-1} para el SUPERFLOC-C498 y de 0.03 mg.L^{-1} para los dos restantes. Las remociones de SST, color y turbiedad fueron mayores al 70% con valores de concentración después de los tratamientos menores de 20 mg.L^{-1} para los SST, de 190 Pt-Co para el color y para la turbiedad menor a 6 UNT. En la Figura 5.6 se muestran la calidad de las muestras después de la coagulación-floculación.

Se observó que se obtuvo el menor volumen de lodos para las combinaciones de PAX-260 XLS –OPTIFLOC-C-1288; SUPERFLOC-C-498; OPTIFLOC-C-1392; OPTIFLOC-C-1781 a las diferentes dosis aplicadas que estuvieron entre $0.05\text{-}0.5 \text{ mg.L}^{-1}$ ya que se reportaron volúmenes menores a 20 mL.L^{-1} . Para el PIX-111y el SAS con los 4 floculantes catiónicos se obtuvieron volúmenes de lodos por arriba de los 20 mL.L^{-1} (Gráfico 5.34).

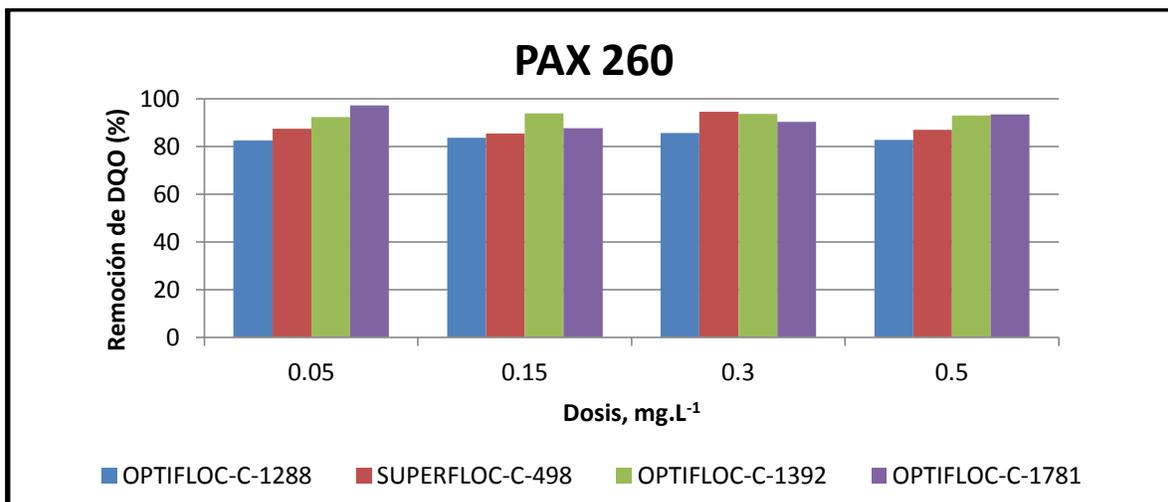
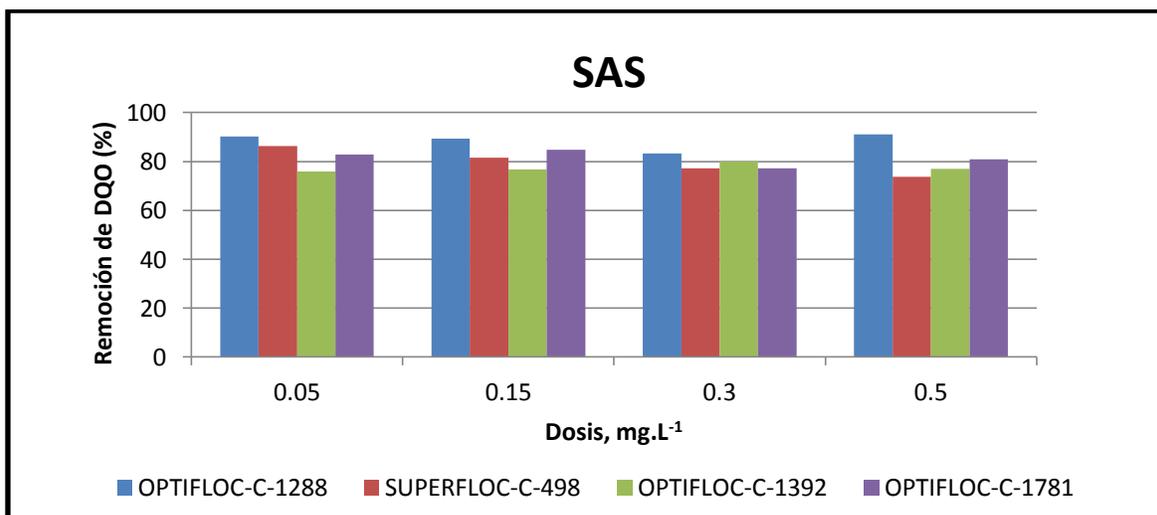
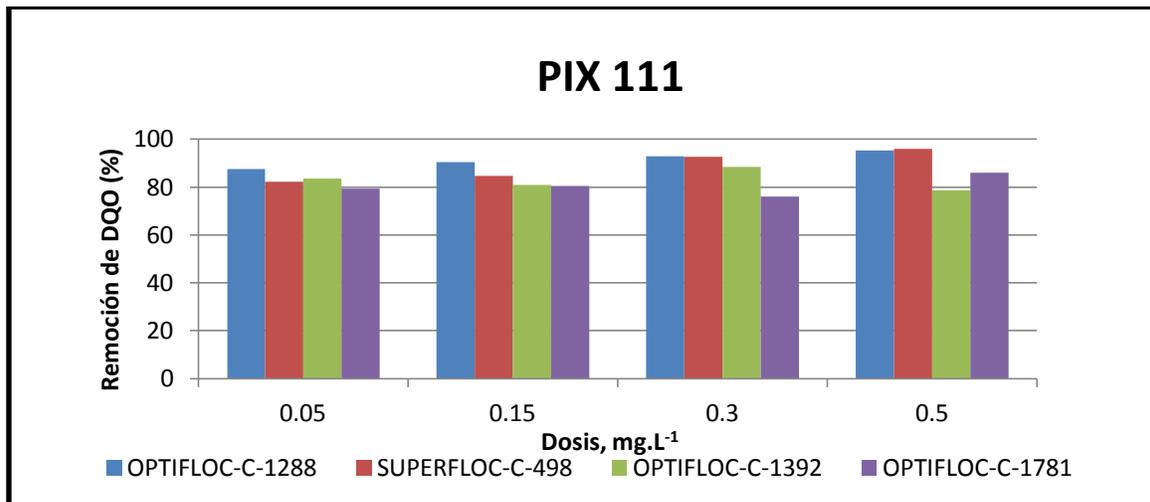


Gráfico 5. 29 Remociones de las pruebas con combinaciones de coagulantes y floculantes catiónicos para la remoción de DQO.

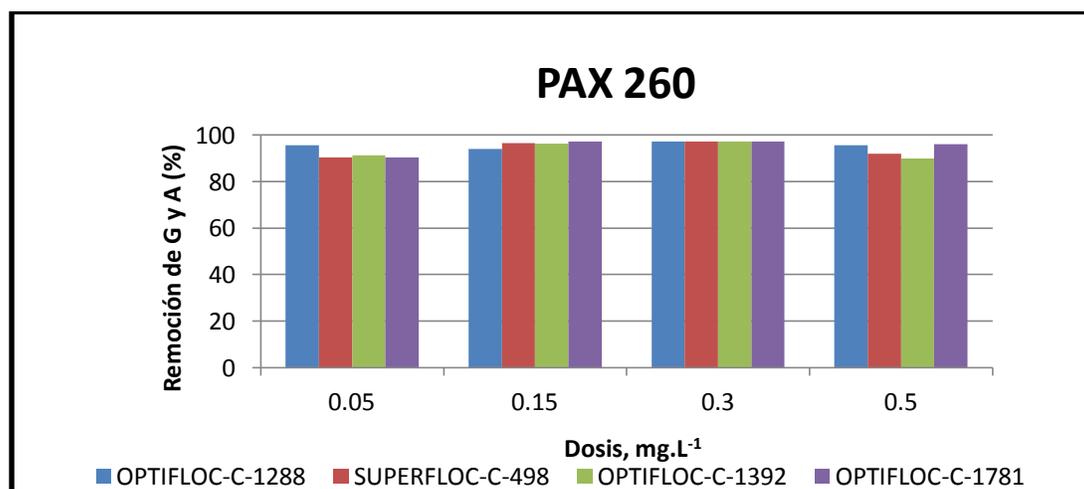
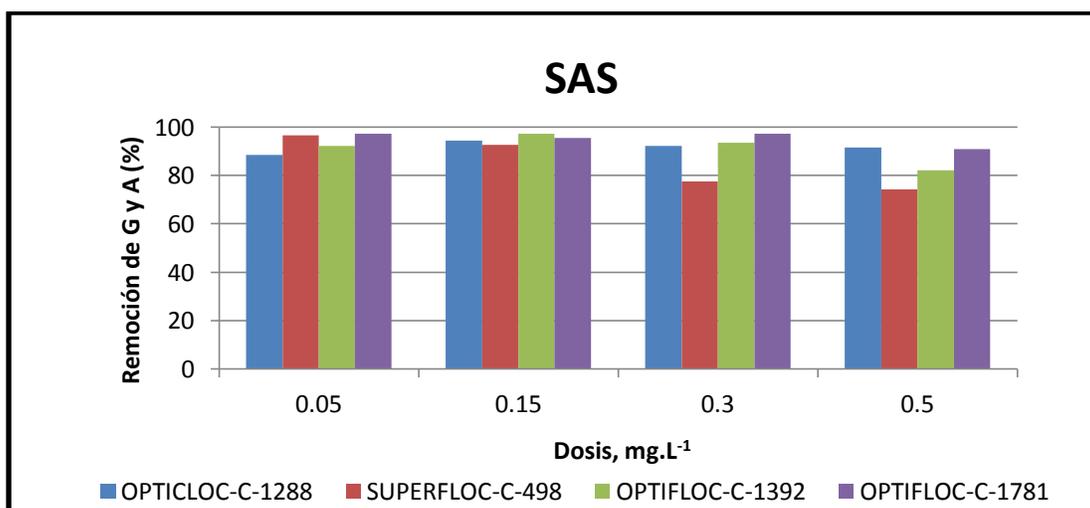
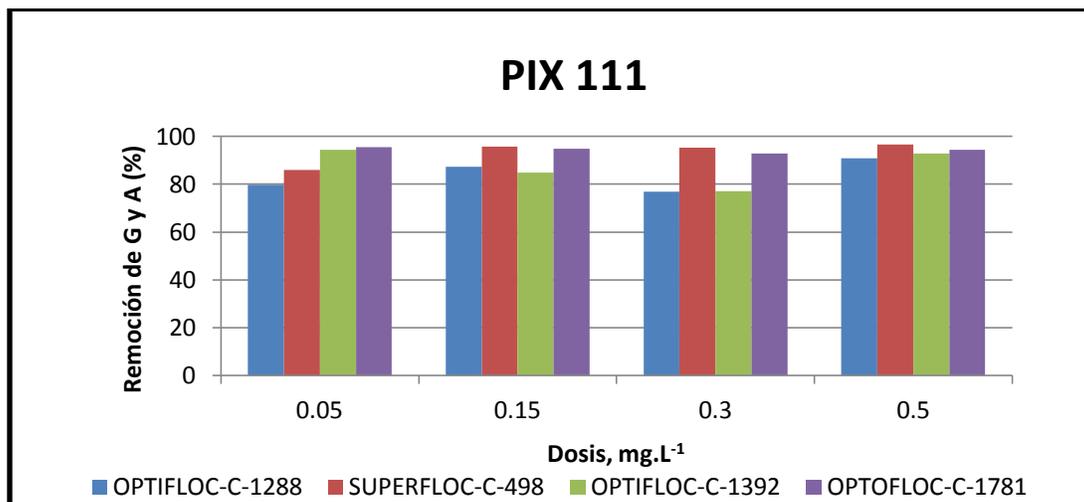


Gráfico 5. 30 Remociones de las pruebas con combinaciones de coagulantes y floculantes catiónicos para la remoción de GyA.

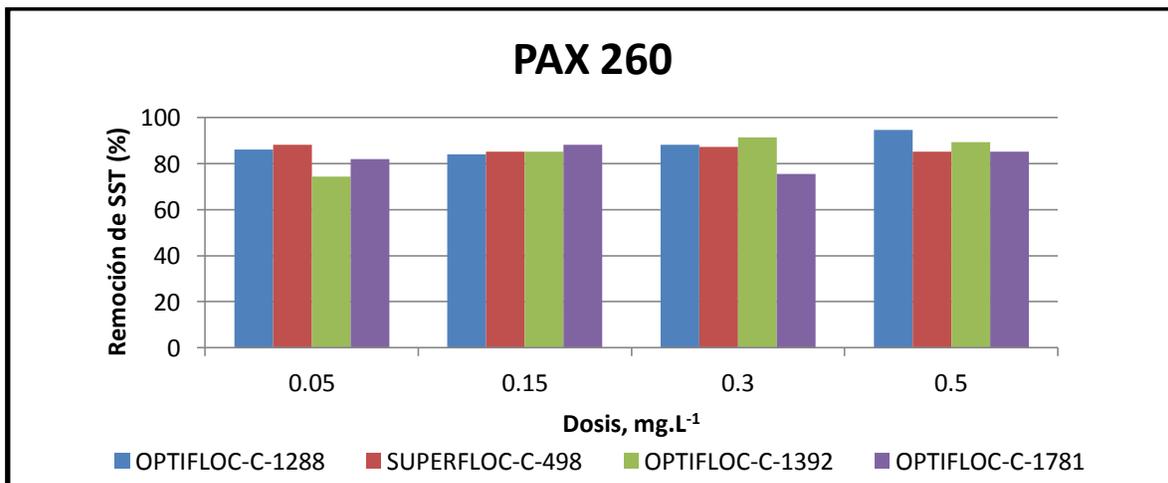
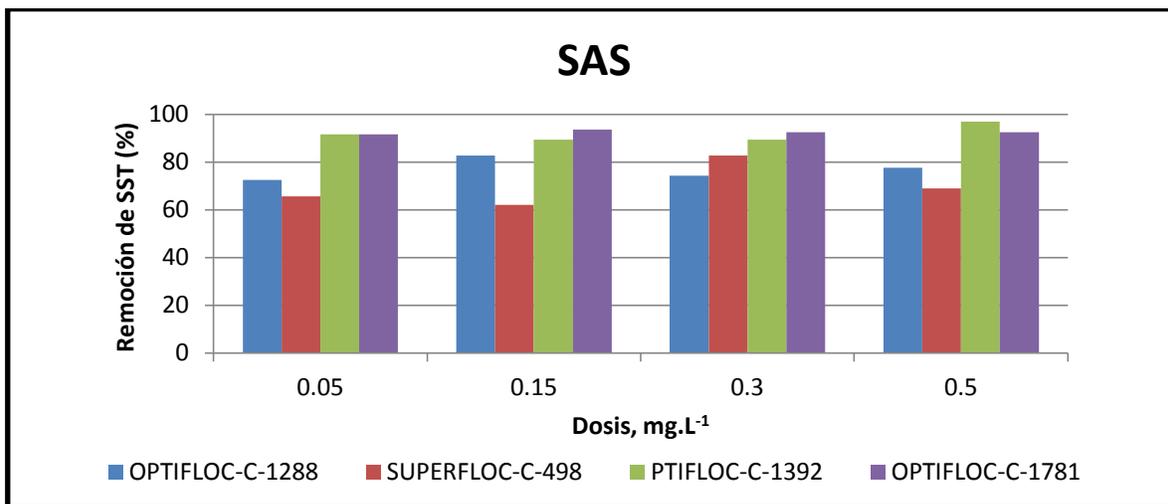
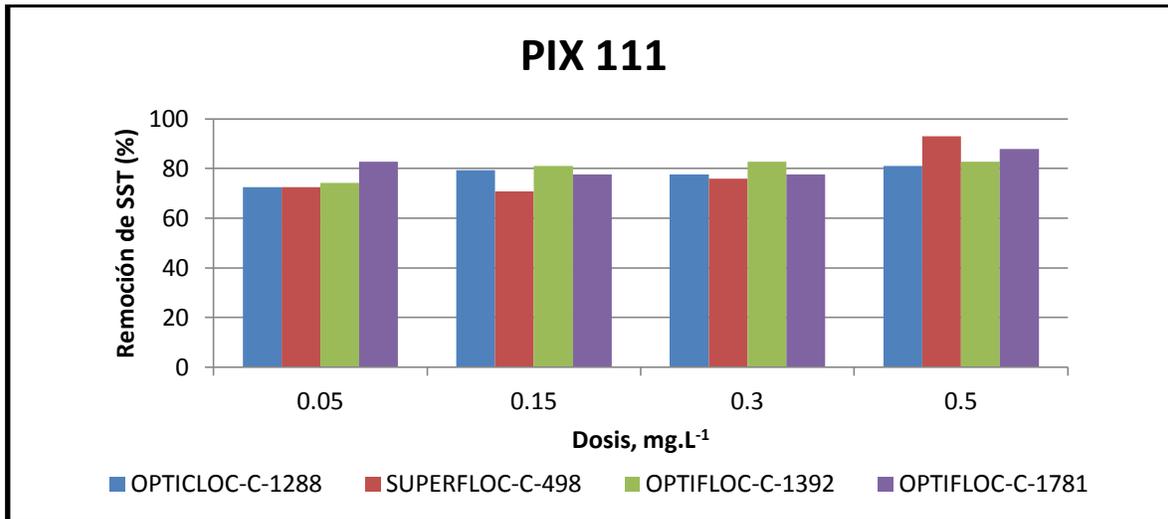


Gráfico 5. 31 Remociones de las pruebas con combinaciones de coagulantes y floculantes catiónicos para la remoción de SST.

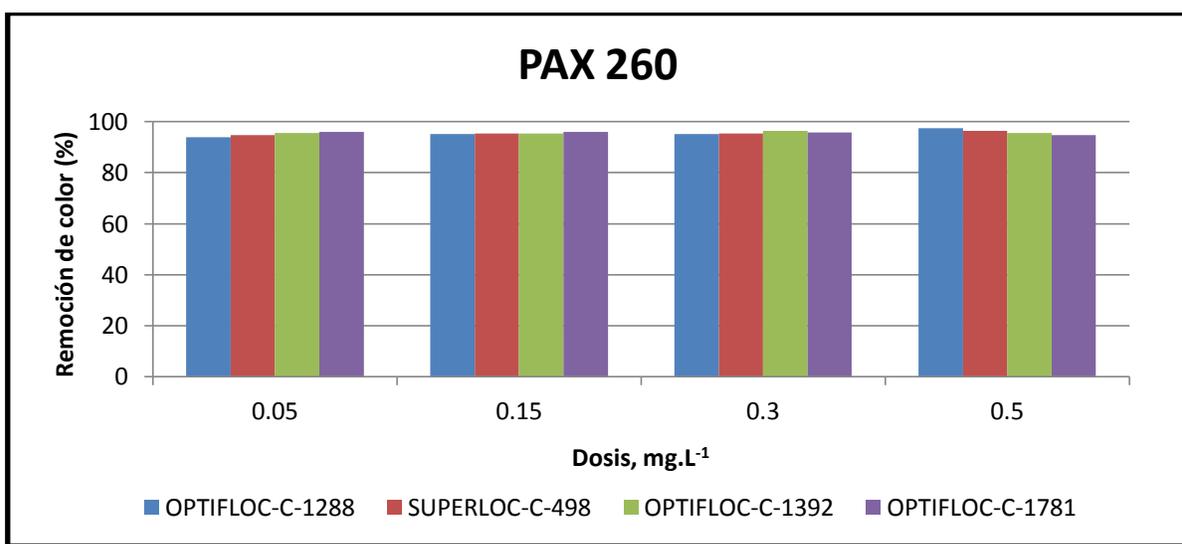
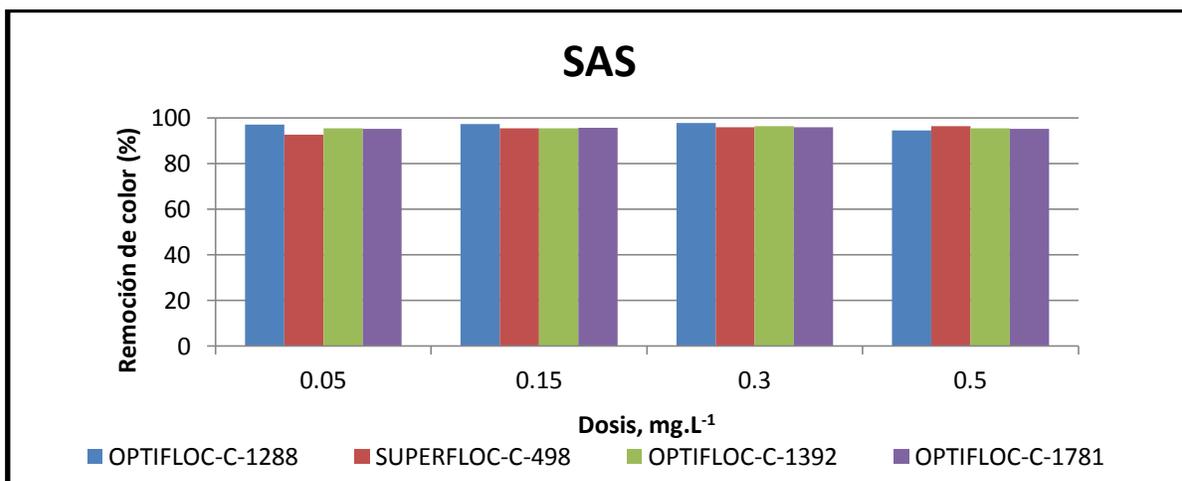
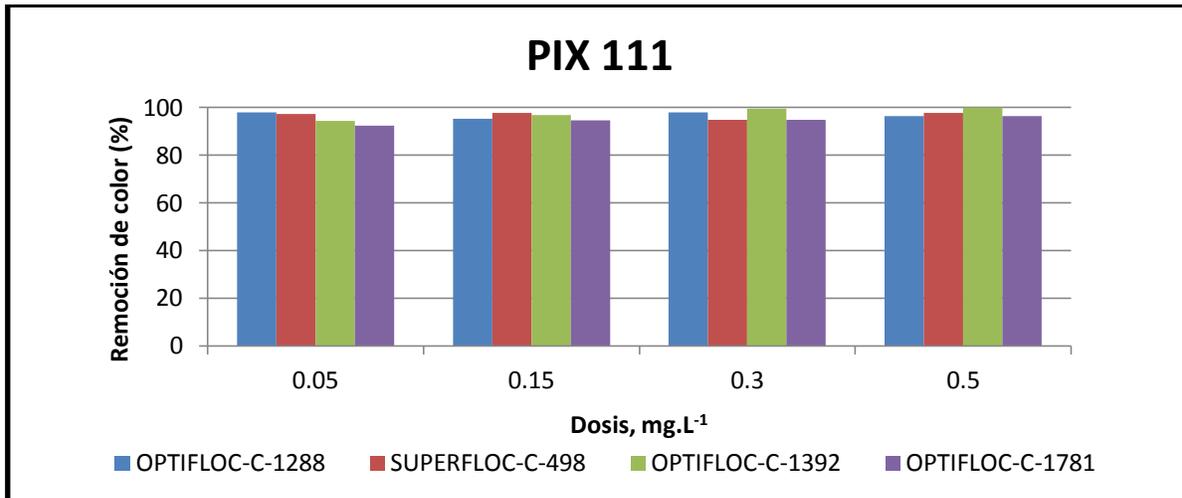


Gráfico 5. 32 Remociones de las pruebas con combinaciones de coagulantes y floculantes catiónicos para la remoción de color.

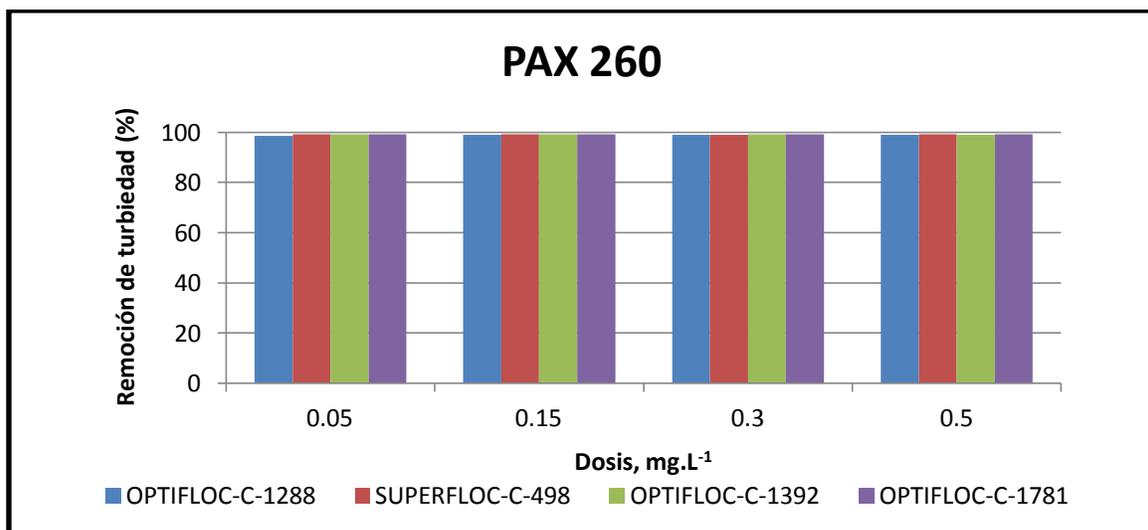
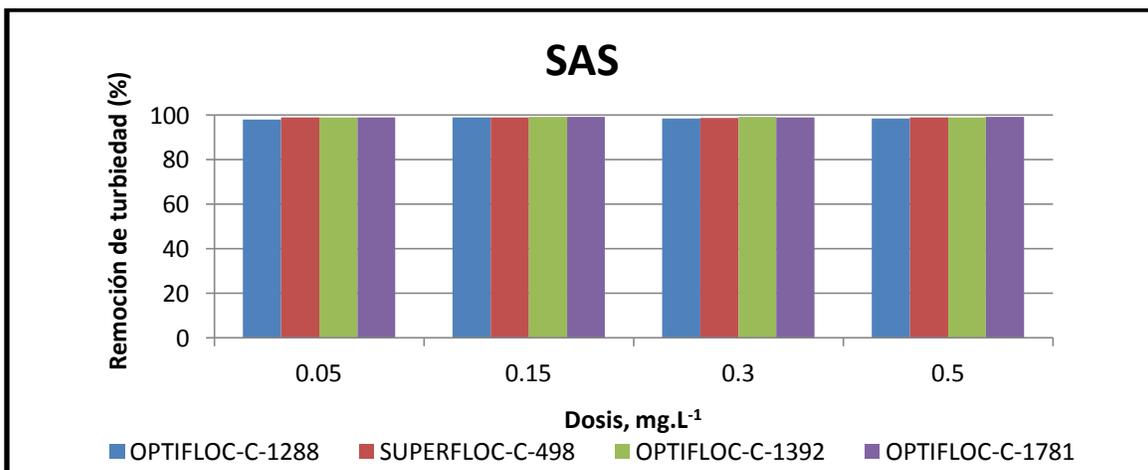
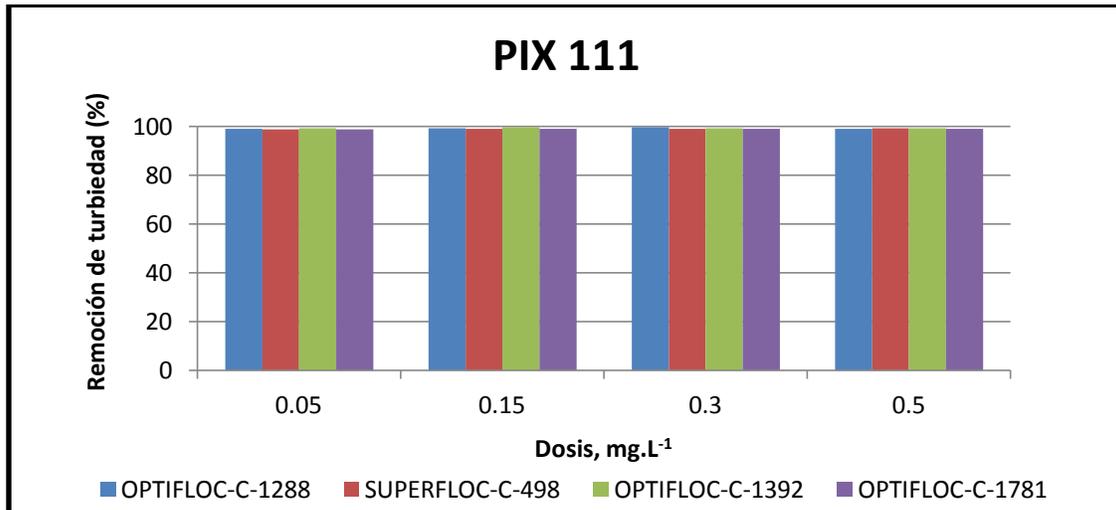


Gráfico 5. 33 Remociones de las pruebas con combinaciones de coagulantes y floculantes catiónicos para la remoción de turbiedad.

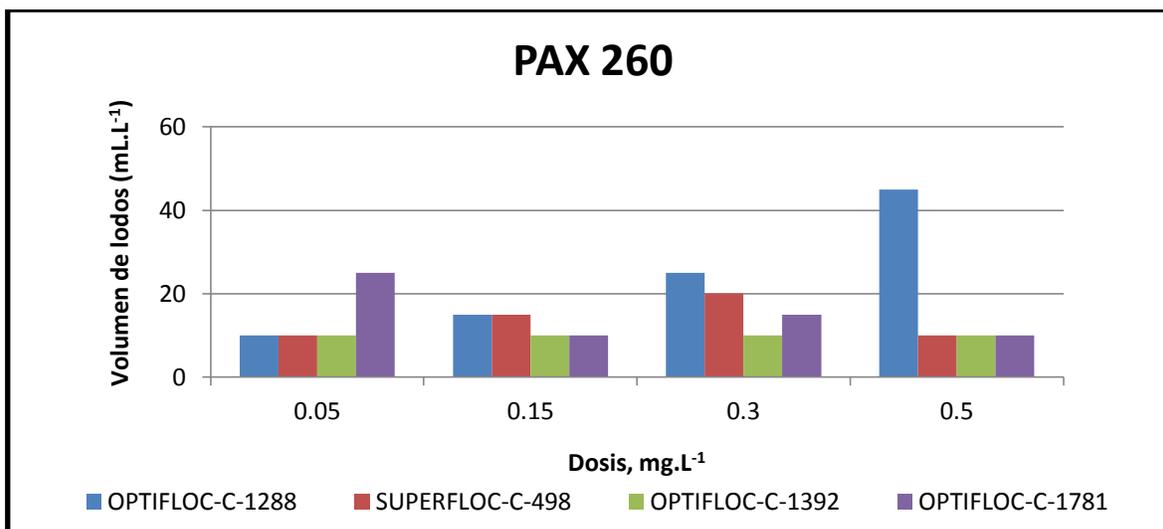
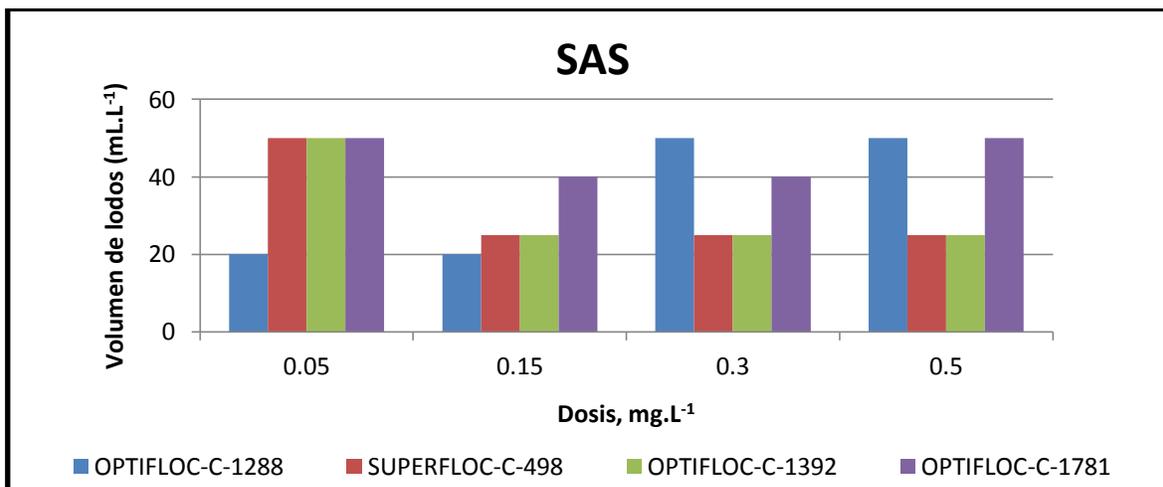
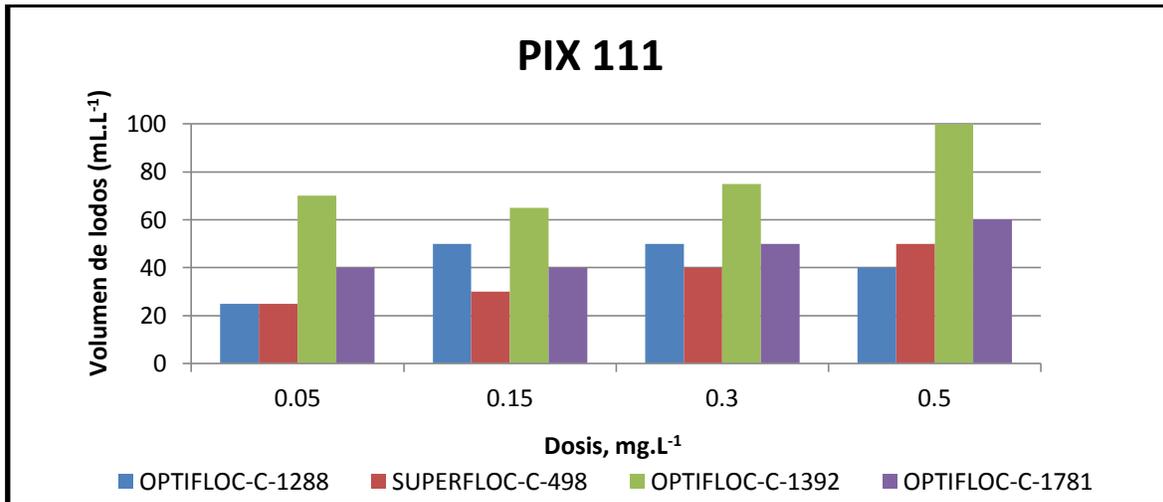


Gráfico 5. 34 Resultados de los Lodos aceitosos generados después de la pruebas con combinaciones de coagulantes y floculantes catiónicos.



“REMOCIÓN DE ACEITE EN AGUAS RESIDUALES DE REFINACIÓN DEL PETRÓLEO MEDIANTE ADICIÓN DE REACTIVOS QUÍMICOS Y SEPARACIÓN POR FLOTACIÓN NATURAL O CON AIRE DISUELTO”



Tabla 5. 23 Comparación de los mejores coagulantes y floculantes catiónicos.

Coagulante			Floculante			Remoción (%)		Lodo (mg.L ⁻¹)
Nombre	Dosis como ión (mg.L ⁻¹)	Dosis como producto (mg.L ⁻¹)	Nombre	Dosis (mL.L ⁻¹)	Dosis (mg.L ⁻¹)	DQO	G y A	
Sulfato de Aluminio (SAS)	7	70	OPTIFLOC C-1288	0.01	0.05	90.3	88.4	20
				0.03	0.15	89.3	94.5	20
				0.06	0.3	83.3	92.2	50
				0.1	0.5	91.1	91.5	50
			SUPERFLOC C-498	0.01	0.05	86.2	96.6	50
				0.03	0.15	81.6	92.5	25
				0.06	0.3	77.1	77.5	25
			OPTIFLOC C-1392	0.1	0.5	73.8	74.3	25
				0.01	0.05	75.8	92.3	50
				0.03	0.15	76.8	97.1	25
			OPTIFLOC C-1781	0.06	0.31	80.1	93.5	25
				0.1	0.51	76.9	82.1	25
				0.01	0.05	82.8	97.1	50
				0.03	0.15	84.7	95.4	40
			Cloruro Férrico (PIX 111)	5	36.2	OPTIFLOC C-1288	0.06	0.3
0.1	0.5	95.3					90.8	40
0.01	0.05	82.2					85.9	25
0.03	0.15	84.7					95.7	30
SUPERFLOC C-498	0.06	0.3				92.6	95.2	40
	0.1	0.5				95.9	96.6	50
	0.01	0.05				83.5	94.2	70
OPTIFLOC C-1392	0.03	0.15				80.9	84.7	65
	0.06	0.31				88.4	77	75
	0.1	0.51				78.6	92.9	100
OPTIFLOC C-1781	0.01	0.05				79.2	95.5	40
	0.03	0.15				80.5	94.7	40
	0.06	0.31				76.1	92.8	50
	0.1	0.51				85.9	94.2	60
Policloruro de Aluminio (PAX 260S)	3	30				OPTIFLOC C-1288	0.01	0.05
			0.03	0.15	83.5		93.9	15
			0.06	0.3	85.7		97.1	25
			SUPERFLOC C-498	0.1	0.5	82.8	95.5	45
				0.01	0.05	87.4	90.3	10
				0.03	0.15	85.4	96.4	15
				0.06	0.3	94.4	97.1	20
			OPTIFLOC C-1392	0.1	0.5	86.9	91.9	10
				0.01	0.05	92.4	91.2	10
				0.03	0.15	93.9	96.2	10
				0.06	0.31	93.5	97.1	10
			OPTIFLOC C-1781	0.1	0.51	92.8	89.8	10
				0.01	0.05	97.2	90.5	25
				0.03	0.15	87.6	97.1	10
				0.06	0.31	90.3	97.1	15
			0.1	0.51	93.4	96.1	10	

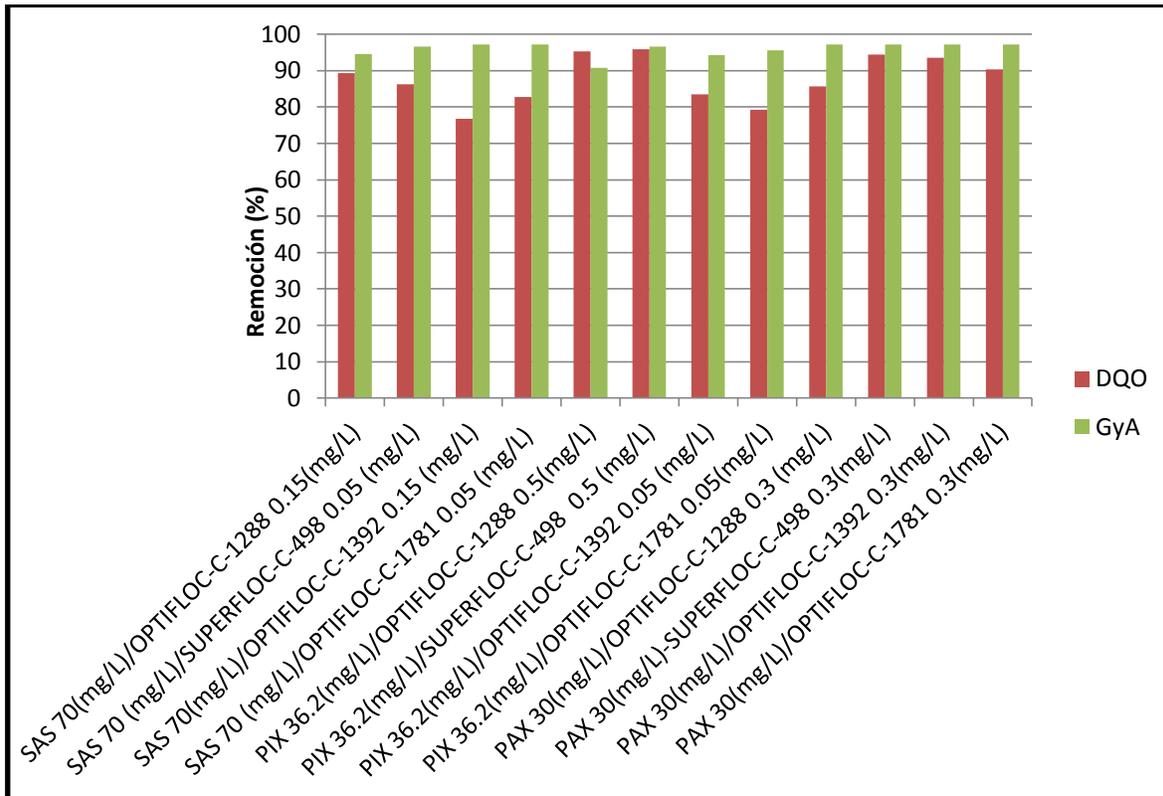


Gráfico 5. 35 Comparación de los mejores coagulantes y floculantes catiónicos.

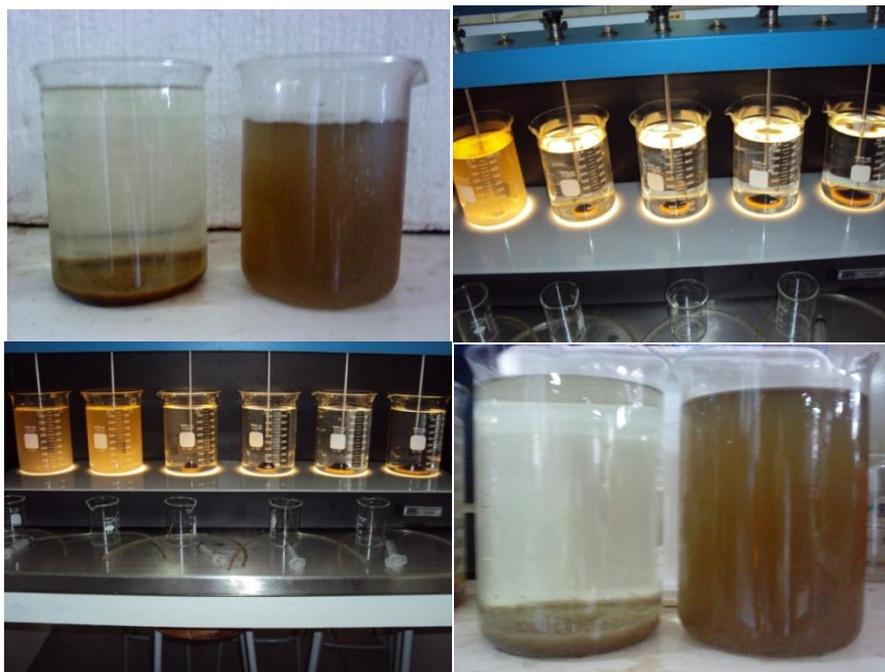


Figura 5. 6 Pruebas con combinaciones de coagulantes y floculantes catiónicos.

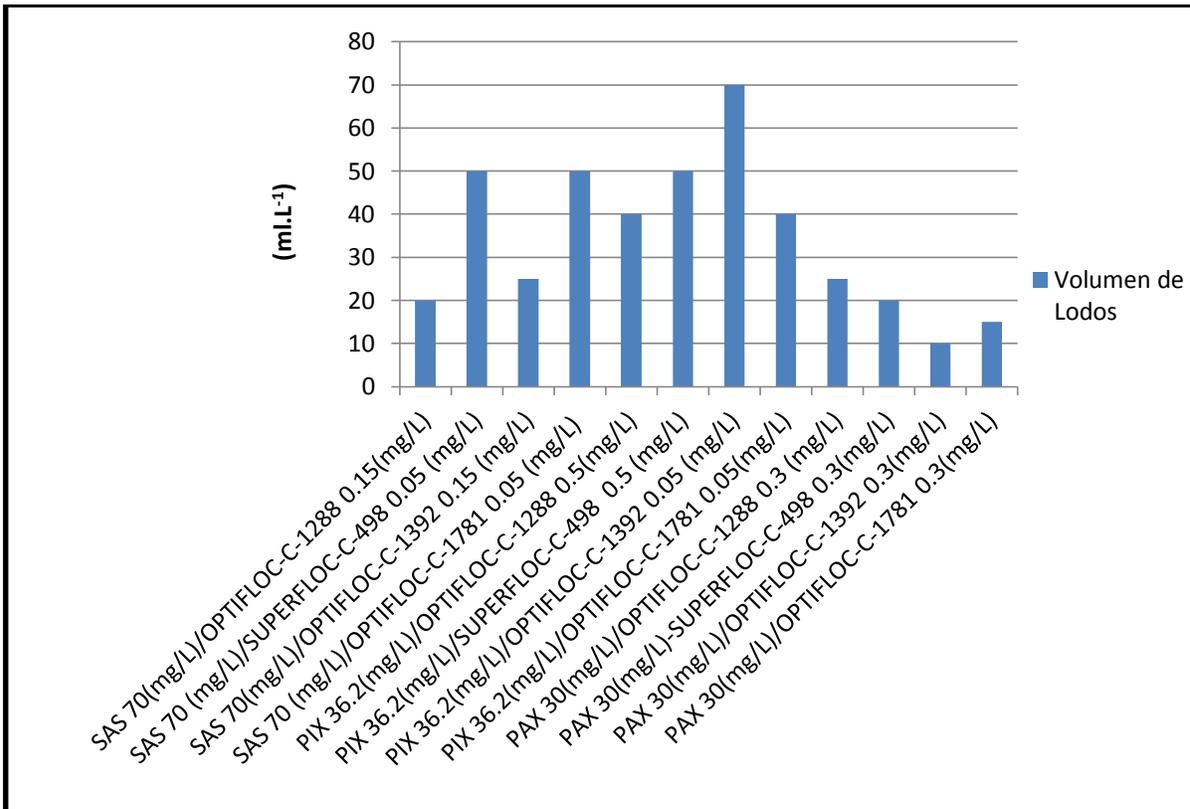


Gráfico 5. 36 Comparación de los mejores coagulantes y floculantes catiónicos.

En la Tabla 5.24 y en el Gráfico 5.37 se muestran los resultados obtenidos para el rompimiento de la emulsión aplicando combinaciones de Sulfato de Aluminio, Cloruro Férrico y Polialuminatos y polímeros aniónicos. Las dosis de los coagulantes se mantuvo constante y se probaron 5 dosis de los floculantes entre 0.05 y 1 mg.L⁻¹. Se puede observar una buena remoción de GyA las cuales se encontraron entre 75 y 90%. Sin embargo, estas combinaciones no aportaron una buena remoción de DQO obteniéndose remociones máximas de 40%. Por lo tanto, la combinación de un coagulante con un polímero aniónico no fue eficiente para el rompimiento de la emulsión. Los flóculos formados eran relativamente ligeros y estos no tendían a flotar ni a sedimentar. Los mejores resultados de la combinación de coagulantes y polímeros aniónicos fueron con el PIX 111-OPTIFLOC-AE- 1488, SAS-OPTIFLOC-AE-1488 y PAX 260S-FENNLPOL-A-305.

En los Gráficos 5.37 y 5.38 se muestran los resultados de la combinación de coagulantes con polímeros aniónicos.



“REMOCIÓN DE ACEITE EN AGUAS RESIDUALES DE REFINACIÓN DEL PETRÓLEO MEDIANTE ADICIÓN DE REACTIVOS QUÍMICOS Y SEPARACIÓN POR FLOTACIÓN NATURAL O CON AIRE DISUELTO”



Tabla 5. 24 Comparación de los mejores coagulantes y floculantes aniónicos.

Coagulante			Floculante			Remoción (%)				Lodos (mg.L ⁻¹)
Nombre	Dosis (mg.L ⁻¹)	Concentración (mg.L ⁻¹)	Nombre	Dosis (mL.L ⁻¹)	Concentración (mg.L ⁻¹)	DQO	G y A	Turbiedad	SST	
Policloruro de Aluminio (PAX 260S)	3	30	OPTIFLOC A-1638	0.05	0.05	71.7	92.3	93.7	79.4	15
				0.15	0.15	74.9	79.6	93.7	75.6	15
				0.3	0.3	76.1	92.9	93.7	70.5	15
				0.5	0.5	77.1	52.7	94.3	71.7	15
				1	1	67	0	93.1	58.9	15
			FENNOLPOL A-305	0.05	0.05	81.1	84.7	92	80.7	15
				0.15	0.15	82.1	89.7	94.3	79.4	15
				0.3	0.3	76.9	92.6	94.3	79.4	15
				0.5	0.5	82.6	89.4	93.7	83.3	15
				1	1	68.9	89.9	93.7	64.1	15
			OPTIFLOC AE-1488	0.05	0.05	77.9	83.8	92.6	79.4	15
				0.15	0.15	67.7	89.4	90.9	76.9	15
				0.3	0.3	70.4	68.8	92.6	82.1	15
				0.5	0.5	66	87	93.1	76.9	15
				1	1	65.2	78.4	92	51.2	15
			SUPERFLOC A-100	0.05	0.05	77.4	81.6	93.7	78.2	15
				0.15	0.15	86.1	72.5	93.7	80.7	15
				0.3	0.3	73.9	82.1	92.6	87.1	15
				0.5	0.5	68.2	85.5	94.8	78.2	15
				1	1	79.9	78.8	93.1	56.4	15
Cloruro Férrico (PIX 111)	5	36.2	OPTIFLOC A-1638	0.05	0.05	56	39.6	96.1	83.3	12.5
				0.15	0.15	54.9	90.5	96.9	88.8	12.5
				0.3	0.3	51.8	79.1	97.7	85.1	12.5
				0.5	0.5	57.9	89.3	96.9	87	12.5
				1	1	55.1	89.3	96.9	77.7	12.5
			FENNOLPOA-305	0.05	0.05	35.5	96.3	96.1	85.1	12.5
				0.15	0.15	42.3	79.7	96.1	92.6	12.5
				0.3	0.3	64.1	89.4	96.1	88.8	12.5
				0.5	0.5	56.3	87.9	95.3	85.1	12.5
				1	1	50.1	87.1	95.3	74	12.5
			OPTIFLOC AE-1488	0.05	0.05	72.8	91.1	94.6	94.4	7.5
				0.15	0.15	70.8	76.8	92.3	96.3	7.5
				0.3	0.3	68.3	86.1	91.5	96.3	7.5
				0.5	0.5	70.5	86.3	93	87	7.5
				1	1	71.4	93.3	85.3	92.6	7.5
			SUPERFLOC-A-100	0.05	0.05	67.7	86.5	96.1	90.7	7.5
				0.15	0.15	49.8	92.3	96.9	88.8	7.5
				0.3	0.3	67.5	84.9	96.9	87	7.5
				0.5	0.5	65.5	84.3	96.9	94.4	7.5
				1	1	56.3	79.2	96.9	81.4	7.5
Sulfato de Aluminio (SAS)	7	70	OPTIFLOC A-1638	0.05	0.05	53.2	84.8	93	70	50
				0.15	0.15	52.1	89.7	94.6	80	40
				0.3	0.3	51.8	84.9	94.6	82	40
				0.5	0.5	49.3	80.4	90	56	30
				1	1	45.1	83.9	92.3	40	50
			FENNOLPOL A-305	0.05	0.05	27.4	89.4	93	78	30
				0.15	0.15	38.9	89.8	93.8	84	30
				0.3	0.3	77.3	91.3	94.6	80	35
				0.5	0.5	61.9	95.7	94.6	76	35
				1	1	59.3	90.3	94.6	68	35
			OPTIFLOC AE-1488	0.05	0.05	79.2	91.9	91.5	74	5
				0.15	0.15	63.5	79.7	92.3	70.3	5
				0.3	0.3	68.9	85.6	91.5	74	5



“REMOCIÓN DE ACEITE EN AGUAS RESIDUALES DE REFINACIÓN DEL PETRÓLEO MEDIANTE ADICIÓN DE REACTIVOS QUÍMICOS Y SEPARACIÓN POR FLOTACIÓN NATURAL O CON AIRE DISUELTO”



Coagulante			Floculante			Remoción (%)				Lodos (mg.L ⁻¹)
Nombre	Dosis (mg.L ⁻¹)	Concentración (mg.L ⁻¹)	Nombre	Dosis (mL.L ⁻¹)	Concentración (mg.L ⁻¹)	DQO	G y A	Turbiedad	SST	
				0.5	0.5	73.6	87.2	92.3	68.5	5
				1	1	76.1	69.6	91.5	77.7	5
			SUPERFLOC A-100	0.05	0.05	61	84.8	96.1	81.4	5
				0.15	0.15	71.9	95.2	96.9	85.1	5
				0.3	0.3	71.7	87.9	96.9	79.6	5
				0.5	0.5	62.1	81.1	96.9	75.9	5
				1	1	60.2	81.8	96.9	48.1	5

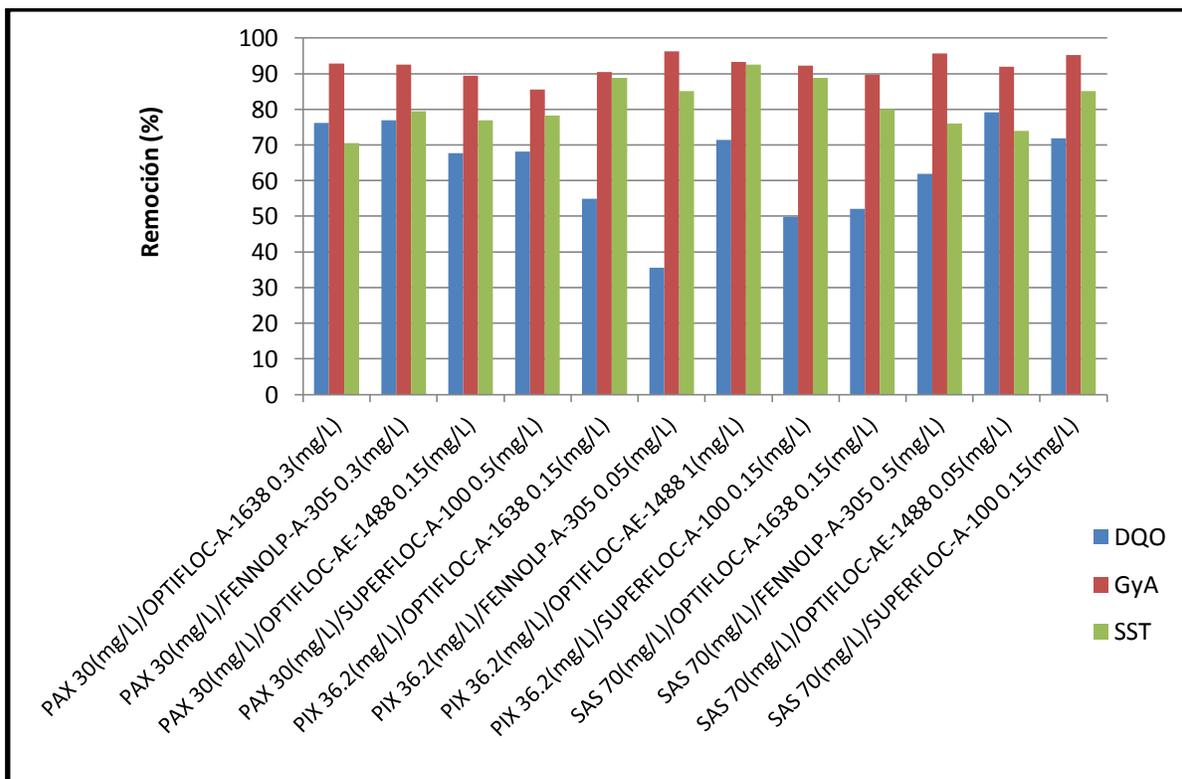


Gráfico 5. 37 Comparación de los mejores coagulantes y floculantes aniónicos.

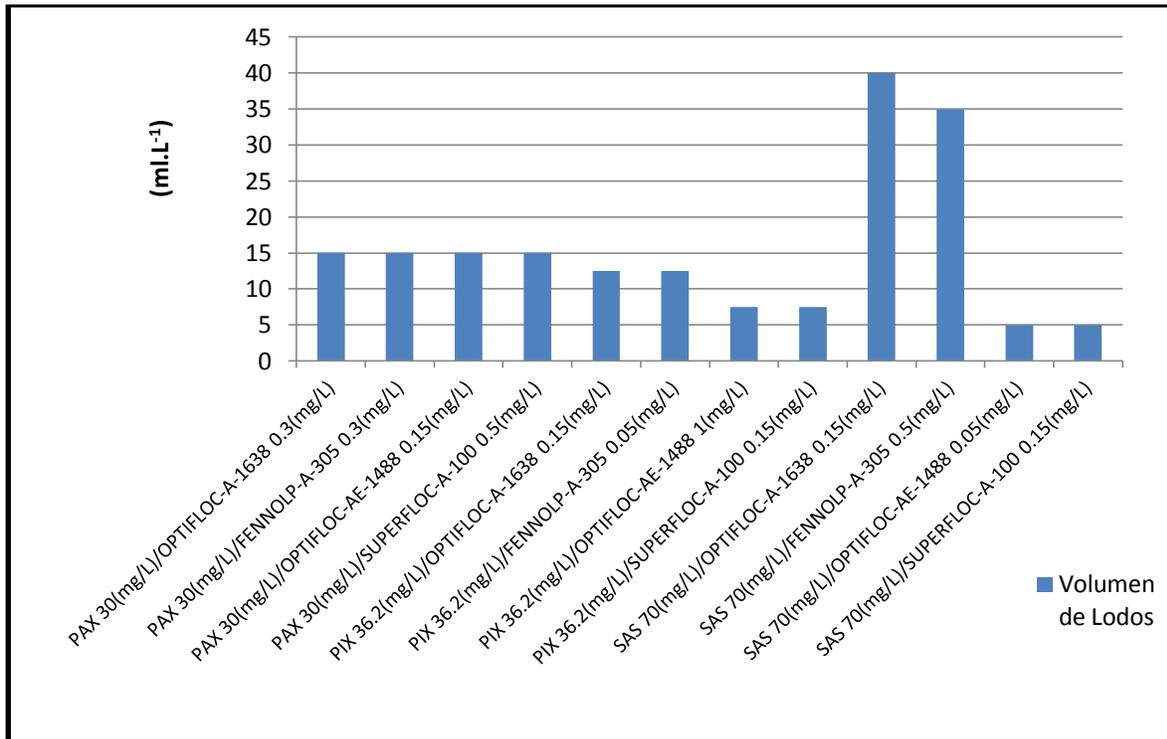


Gráfico 5. 38 Comparación de los mejores coagulantes y floculantes aniónicos.



Figura 5. 7 Pruebas con combinaciones de coagulantes y floculantes aniónicos.

De acuerdo con los resultados obtenidos en las pruebas realizadas para estudiar el rompimiento de la emulsión del agua residual aceitosa del Lote 1, la combinación de coagulantes y polímeros, coagulantes catiónicos y los polímeros catiónicos aplicados de forma individual fueron los que permitieron obtener altas remociones de DQO, GyA, SST, color y turbiedad.

5.1.7 Pruebas de tratabilidad y rompimiento de la emulsión del agua residual aceitosa del Lote 2 (salida separador 5)

De acuerdo con los resultados obtenidos en la prueba con los floculantes orgánicos de forma individual y las combinaciones de los coagulantes y floculantes catiónicos y aniónicos, se



“REMOCIÓN DE ACEITE EN AGUAS RESIDUALES DE REFINACIÓN DEL PETRÓLEO MEDIANTE ADICIÓN DE REACTIVOS QUÍMICOS Y SEPARACIÓN POR FLOTACIÓN NATURAL O CON AIRE DISUELTO”



realizaron pruebas para la tratabilidad y el rompimiento de la emulsión del agua residual aceitosa del Lote 2. En la Tabla 5.25 y en los Gráficos 5.39 y 5.40 se presentan los resultados obtenidos.

Se muestra que las remociones de DQO y GyA bajaron entre un 10 y 30 % con respecto a los resultados obtenidos con el agua residual aceitosa del Lote 1 aplicando los mejores coagulantes, floculantes, combinaciones y dosis. Este comportamiento se debió posiblemente a la naturaleza del agua aceitosa del Lote 2, que presentaba un pH de 9. Se muestra que los mejores resultados con las combinaciones de los coagulantes y floculantes fueron con el Sulfato de Aluminio y el Policloruro de Aluminio. Los más altos porcentajes de remoción de DQO y GyA se obtuvieron con la combinación con SAS-OPTIFLOC-1288, seguido de PAX 260S- FENNOLPOL y por último el SAS-OPTIFLOC-AE-1488.

De los floculantes individuales probados, el LACKFLOC-C-5100 fue el que permitió obtener los mejores resultados, con remociones de DQO y GyA del 76% y 88%, aplicando dosis relativamente bajas de 2.5 mg.L⁻¹.

De acuerdo con los resultados obtenidos con las combinaciones de los coagulantes-floculantes y floculantes de forma individual, el mejor reactivo químico para la desestabilización de la emulsión para el tratamiento del agua residual aceitosa del Lote 2 fue el LACKFLOC-C-5100 el cual generó un floc grande y denso y con poca generación de lodo con un volumen de ≈10 mL.L⁻¹.

En la Figura 5.8 se muestra las diferencias en la aplicación de los reactivos químicos.

Tabla 5. 25 Comparación de los mejores coagulantes y floculantes para el rompimiento de la emulsión del agua residual aceitosa del Lote 2.

Coagulante		Floculante		Remoción (%)			Lodos (mg.L ⁻¹)
Nombre	Dosis (mg Al.L ⁻¹ o mg Fe.L ⁻¹)	Nombre	Dosis (mg.L ⁻¹)	DQO	G y A	Turbiedad	
Cloruro Férrico (PIX 111)	5	SUPERFLOC C-498	0.05	15	56.1	18.1	-
			0.15	23.2	65.3	22	-
			0.3	18.1	63.2	21.3	-
			0.5	19.9	67.3	22.7	-
Sulfato de Aluminio (SAS)	7	OPTIFLOC C-1288	0.05	57	67.4	94	5
			0.15	68.7	72.3	93.7	5
			0.3	55.5	76.3	95.1	7
			0.5	54.7	74.2	93	4
Policloruro de Aluminio (PAX 260S)	3	OPTIFLOC C-1392	10.2	54.7	68.6	96.1	9
			30.6	53	69.9	94.4	8
			61.2	57.4	70.2	94.4	7
			102	53.1	74.3	92.6	7
Cloruro Férrico (PIX 111)	5	OPTIFLOC A-E1488	51	8.6	45.3	3.4	-
			153	15.1	58.9	8.9	-
			306	16.6	66.6	14.8	-
			510	9.4	54.3	31	-
Sulfato de Aluminio (SAS)	7	OPTIFLOC-AE- 1488	51	74.8	66.5	56.2	20
			153	49.9	70.1	47.5	20
			306	77.9	68.2	43.1	20
			510	63.6	70.2	60.3	12
Policloruro de Aluminio	3	FENNOLPOL A-305	0.05	56.1	64.2	81	10
			0.15	57.6	63.3	82.1	7
			0.3	67.5	65.4	83.4	5



“REMOCIÓN DE ACEITE EN AGUAS RESIDUALES DE REFINACIÓN DEL PETRÓLEO MEDIANTE ADICIÓN DE REACTIVOS QUÍMICOS Y SEPARACIÓN POR FLOTACIÓN NATURAL O CON AIRE DISUELTO”



Coagulante		Floculante		Remoción (%)			Lodos (mg.L ⁻¹)
Nombre	Dosis (mg Al.L ⁻¹ o mg Fe.L ⁻¹)	Nombre	Dosis (mg.L ⁻¹)	DQO	G y A	Turbiedad	
(PAX 260 S)			0.5	51.9	67.3	82.7	4
		LARKFLOC C-5100	0.25	2	36.6	33.6	-
			0.5	7	46.2	55.6	-
			1	29.5	70.6	88.8	10
			2.5	76.5	78.6	98.7	10
			5	73.4	68	-12.5	10
			15	42.3	80.6	32.3	10
			30	38.2	84.5	40.5	10
			60	17.8	83.9	36.2	10
		SUPERFLOC C-498	2.5	30.9	60.3	29.3	-
			7.5	40.2	64.7	66	15
			12.5	40.5	68	89.5	15
			25	60.6	63.1	94.4	15

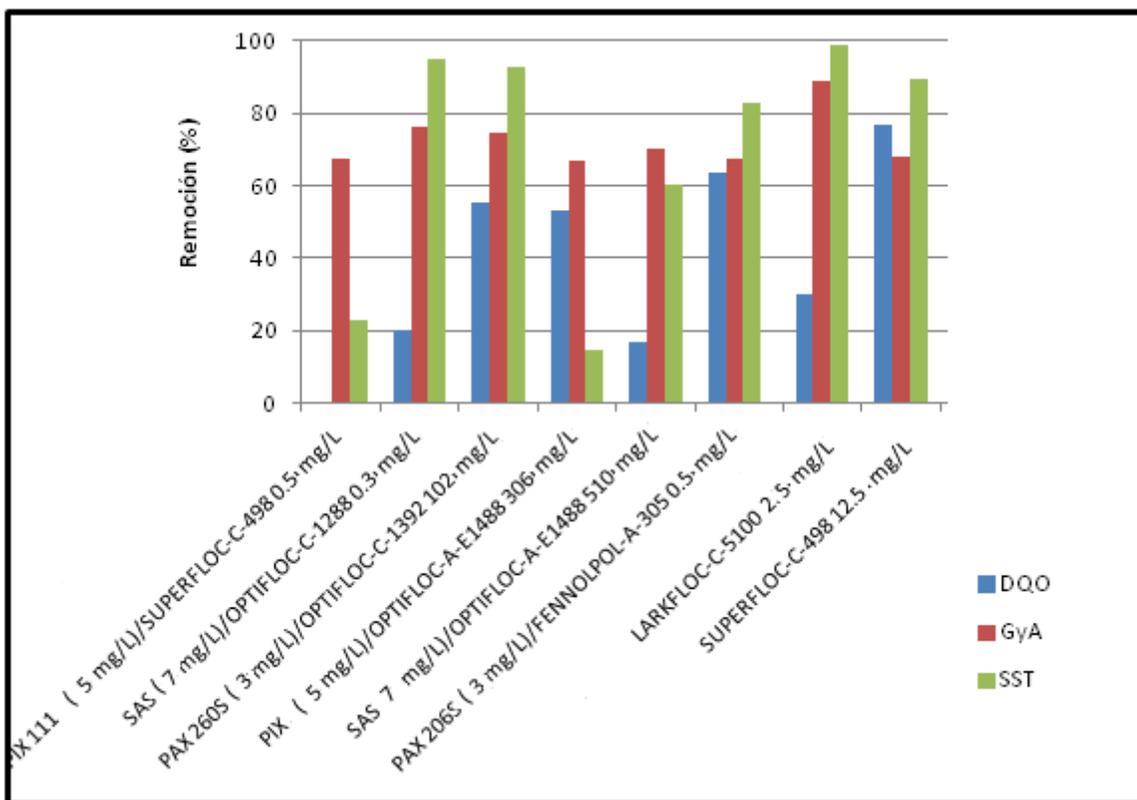


Gráfico 5. 39 Comparación de los mejores coagulantes y floculantes para el rompimiento de la emulsión del agua residual aceitosa del Lote 2.

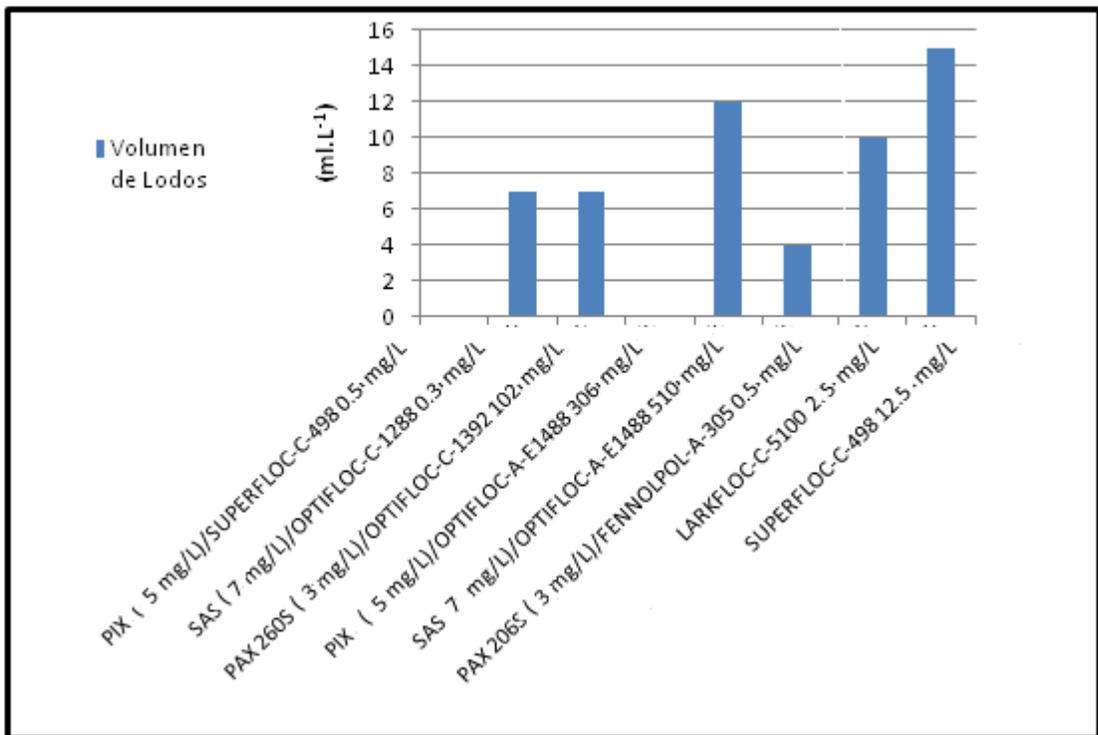


Gráfico 5. 40 Comparación de los mejores coagulantes y floculantes para el rompimiento de la emulsión del agua residual aceitosa del Lote 2.



Figura 5. 8 Rompimiento de la emulsión y formación del floc con la aplicación de floculante LACKFLOC-C-5100 (fotografía izquierda) y otros coagulantes y floculantes (fotografía derecha).



5.2 Pruebas de flotación con aire disuelto

5.2.1 Caracterización del agua aceitosa

En la Tabla 5.26 se muestra la caracterización fisicoquímica del agua aceitosa del efluente de los separadores de GyA de la refinería (Lote 2). Se observó que para este lote se tienen valores de DQO mucho más altos que los determinados durante los muestreos realizados a la salida de los separadores en la Refinería que fueron en promedio de 276 y 333 mg.L⁻¹ en la salida de API-4 y en la de la ampliación de API-4 (Mijaylova Nacheva P., et al., 2011). Además se presentó un pH básico y no ácido como en el Lote 1. Las GyA que representan el contenido de aceite en este caso están en el intervalo 114-200 mg.L⁻¹ que permite la aplicación de FAD para su remoción. Las concentraciones de GyA en los efluentes de la Refinería varían desde 17 mg.L⁻¹ hasta 197 mg.L⁻¹. El alto contenido de DQO indica que en el agua hay una fracción alta de aceite emulsificado y disuelto. Para el rompimiento de la emulsión se podría implementar el tratamiento químico con coagulantes y polímeros antes del FAD.

Tabla 5. 26 Caracterización fisicoquímica del agua aceitosa.

Parámetro	Lote 2
Grasas y Aceites (mg.L ⁻¹)	114-200
DQO (mg.L ⁻¹)	638-864
SST (mg.L ⁻¹)	100-116
Color (Pt-Co)	1800-2680
Turbiedad (UNT)	227-268
pH	9.2
Conductividad eléctrica (mS.cm ⁻¹)	1.7
SDT (mg.L ⁻¹)	844-884

5.2.2 FAD con la adición de la combinación Sulfato de Aluminio (SAS) y el polímero catiónico C-1288

En la Tabla 5.27 se muestran los resultados del proceso FAD con previa coagulación-floculación utilizando SAS y C-1288. Se observa que bajo diferentes condiciones de presión, reciclo y TRH se obtuvieron remociones de GyA entre el 35 y 70% siendo las más eficiente a las condiciones de operación a una presión de 21.3 lb.in², con un reciclo del 30% y TRH de 30 min. Sin embargo, a pesar de una buena remoción de GyA, la remoción de DQO fue baja en todas las condiciones de operación probadas. Este problema fue debido al floc formado en el proceso de coagulación-floculación, ya que a pesar de presentar un buen tamaño y densidad, su adherencia es un poco débil. Debido a esto, los flóculos al estar en contacto con las microburbujas formadas por la despresurización del saturador, se rompen generando esparcimiento de sólidos en todo el tanque de flotación dando como resultado bajas remociones de los tres parámetros evaluados en el efluente tratado.

Tabla 5. 27 Tratamiento del agua residual aceitosa con FAD con previa coagulación-floculación mediante la combinación de SAS y C-1288.

Presión saturador (lb/in ²)	R	TRH en la celda se flotación (min)	G y A influente (mg.L ⁻¹)	G y A Efluente (mg.L ⁻¹)	Remoción G y A (%)	DQO influente (mg.L ⁻¹)	DQO Efluente (mg.L ⁻¹)	Remoción DQO (%)
28.4	1	20	193	115	40.4	540	480	11.1
21.3	0.30	30	213	64.2	69.8	416	368	11.5
35.5	0.10	30	189	76.4	59.5	315	314	0.3
21.3	0.20	25	189	91.8	51.4	403	460	-14.1



Presión saturador (lb/in ²)	R	TRH en la celda se flotación (min)	G y A influente (mg.L ⁻¹)	G y A Efluente (mg.L ⁻¹)	Remoción G y A (%)	DQO influente (mg.L ⁻¹)	DQO Efluente (mg.L ⁻¹)	Remoción DQO (%)
40	0.50	30	136	87.3	35.8	569	470	17.4
28.4	0.30	35	126	68.8	45.4	569	540	5.1

5.2.3 FAD con la adición del polímero catiónico LACKFLOC C-5100

Por la problemática observada con la aplicación de SAS y C-1288 se decidió trabajar con el polímero catiónico LACKFLOC C-5100 con una dosis constante de 2.5 mg.L⁻¹. Este polímero fue el que generó uno de los mejores resultados en las pruebas de selección de los mejores reactivos químicos para el agua residual del Lote 2 junto con el SAS y C-1288.

En el Gráfico 5.41, se muestran los resultados de la operación del FAD con previa desestabilización de la emulsión mediante C-5100 con presiones entre 14.2 y 40 lb/in² y reciclos entre 10% (0.1) y 50% (0.5) con un TRH de 15 min. Se observa que bajo diferentes condiciones de operación se obtuvieron remociones por arriba del 90% para la turbiedad y color, con valores en los efluentes por debajo de 10 UNT y de 300 unidades Pt-Co respectivamente. Para una presión de 21.3 lb/in² con un porcentaje de recirculación del 50%, se alcanzó la máxima remoción de GyA la cual fue del 79% con una remoción de DQO del 38%. La concentración en el efluente de GyA fue de 35 mg.L⁻¹ y de 522 mg.L⁻¹ de DQO. Resultados similares fueron obtenidos trabajando con una presión de 35.5 lb/in² y un reciclo del 30%. Para las otras condiciones de presión y reciclos, las remociones de GyA y de DQO se encontraron por arriba del 60% y del 30% respectivamente. Bajo las condiciones de 36.5 lb/in² y reciclo de 30% se observó la formación de una capa de aceite sobre la superficie del agua la cual oscilo entre 1 y 2 mm. Para una presión de 21.3 lb/in² y un porcentaje de recirculación del 50% los lodos generados fueron de 13.3 mg.L⁻¹.

Como ya se mencionó anteriormente la Refinería cuenta con una PTAR la cual ha establecido LMP para algunos parámetros en el influente a la PTAR. Actualmente el LMP para GyA es de 48 mg.L⁻¹ pero se ha visto la necesidad de reducirlo a 30-40 mg.L⁻¹, por lo cual se considerará este intervalo para la evaluación de los resultados obtenidos en las pruebas de tratabilidad. Para la DQO la PTAR establece un LMP de 400 mg.L⁻¹, pero se requiere reducir el valor a 200-300 mg.L⁻¹. No se establece LMP para los SST pero se controla la Turbiedad para la cual se pide cumplir actualmente con un LMP de Turbiedad de 70 UNT pero en el futuro se considera una reducción del límite a 30-40 UNT. Para el Color no se ha fijado un LMP. Se controlan adicionalmente fenoles, SDT, Dureza, Si, Alcalinidad, pH y Temperatura. Con base en lo anterior, se pueden establecer criterios de evaluación de los resultados en las pruebas de desestabilización-FAD referentes a las remociones requeridas para los parámetros GyA, DQO y Turbiedad.

La remoción de GyA requerida para cumplir el actual LMP de 48 mg.L⁻¹ es de 58-76% y para cumplir un LMP de 40 mg.L⁻¹ es de 65-80%. Si el LMP se reduce a 30 mg.L⁻¹ se necesitaría de una remoción de 73-85%.

La remoción de DQO requerida para cumplir el LMP actual debe ser de 400 mg.L⁻¹, siendo la DQO actual del agua aceitosa de 638-864 mg.L⁻¹, es decir 37-54% de remoción. Si el LMP se reduce a 300 mg.L⁻¹ será de 53-63% y si se reduce a 200 mg.L⁻¹ la remoción requerida será de 69-75%. Ya que el agua efluente de los separadores de la Refinería tiene valores de DQO de 300 mg.L⁻¹ en promedio, menores de las que se determinaron en el Lote 2, una remoción de 35% es suficiente



para obtener menos de 200 mg.L⁻¹ de DQO en el efluente y así cumplir con el límite futuro más estricto.

La remoción de la Turbiedad requerida para cumplir el LMP actual de 70 UNT es de 69-74%. Si el LMP se reduce a 40 UNT se requeriría de una remoción de Turbiedad de 82-85% y si se reduce a 30 UNT se requeriría de una remoción de 87-89%.

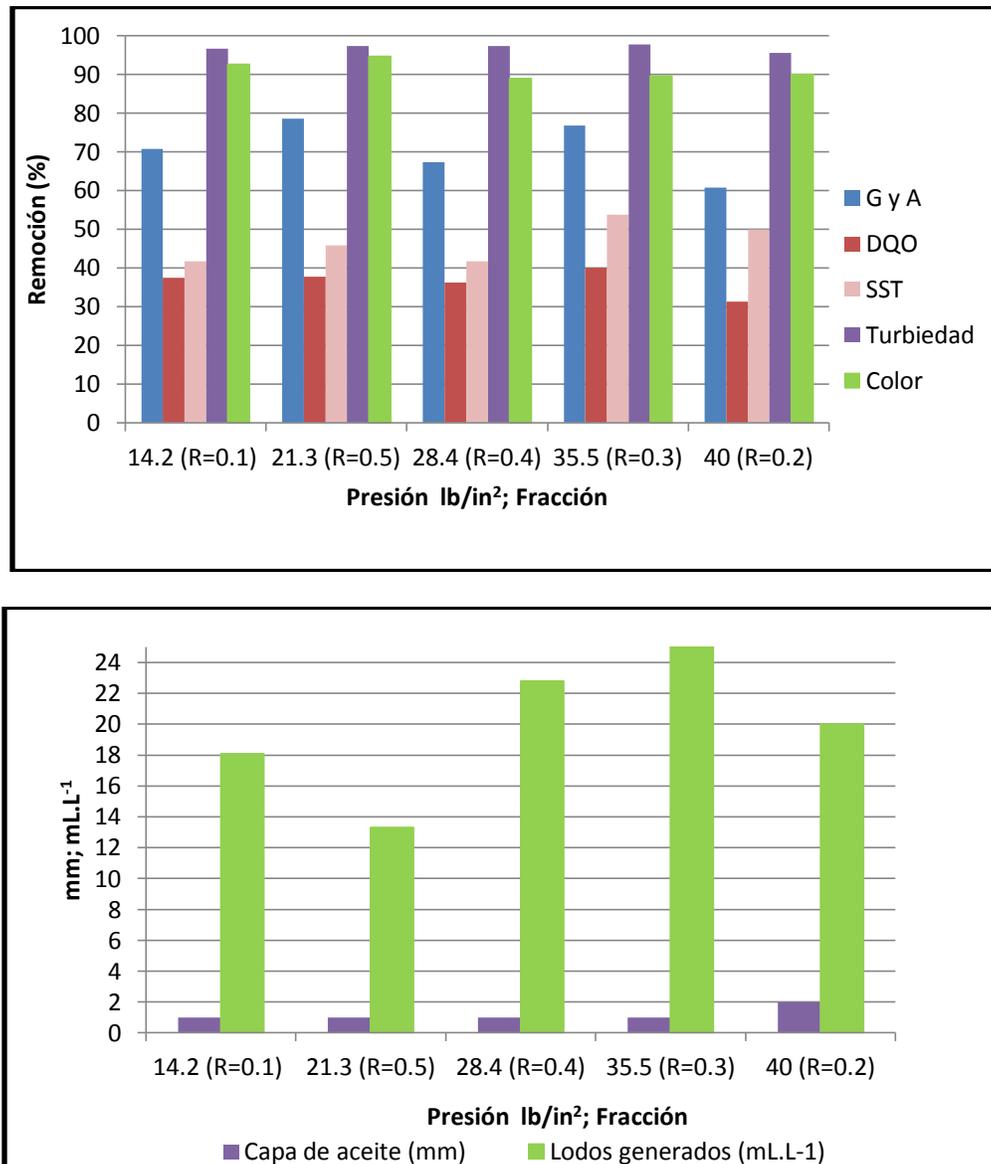


Gráfico 5. 41 Tratamiento del agua residual aceitosa mediante FAD con previa coagulación-floculación mediante C-5100 bajo diferentes condiciones de operación con TRH de 15 min.

En el Gráfico 5.42, se muestran los resultados de la operación del FAD con previa desestabilización de la emulsión mediante C-5100 con diferentes presiones y reciclos con un TRH de 20 min. Se observa que, como en las pruebas anteriores, se obtuvieron remociones de turbiedad y color por arriba del 90% con turbiedades en los efluentes menores de 20 UNT y un color por debajo

de 244 unidades Pt-Co. La mejor condición para la remoción de GyA y de DQO fue para una presión de 14.2 lb/in² y un porcentaje de recirculación del 20% (las cuales son bajas), alcanzándose una remoción y concentración en el efluente de GyA del 75% y 38 mg.L⁻¹ respectivamente. Para la DQO, se obtuvo una remoción del 38% con una concentración en el efluente tratado de 515 mg.L⁻¹. Bajo estas condiciones, se pueden bajar los requerimientos de electricidad para la generación de presión y la recirculación del efluente disminuyéndose de esta manera, los costos de operación del proceso FAD. Para las otras condiciones de presión y reciclos, las remociones de GyA y de DQO se encontraron por arriba del 60% y del 28% respectivamente. Se observó la formación de una capa de aceite sobre la superficie del agua entre 1 y 2 mm con las diferentes condiciones de operación probadas. Los lodos generados fueron entre 16 y 24 mg.L⁻¹ siendo la más baja para una presión de 14.2 lb/in² y un porcentaje de recirculación del 20%.

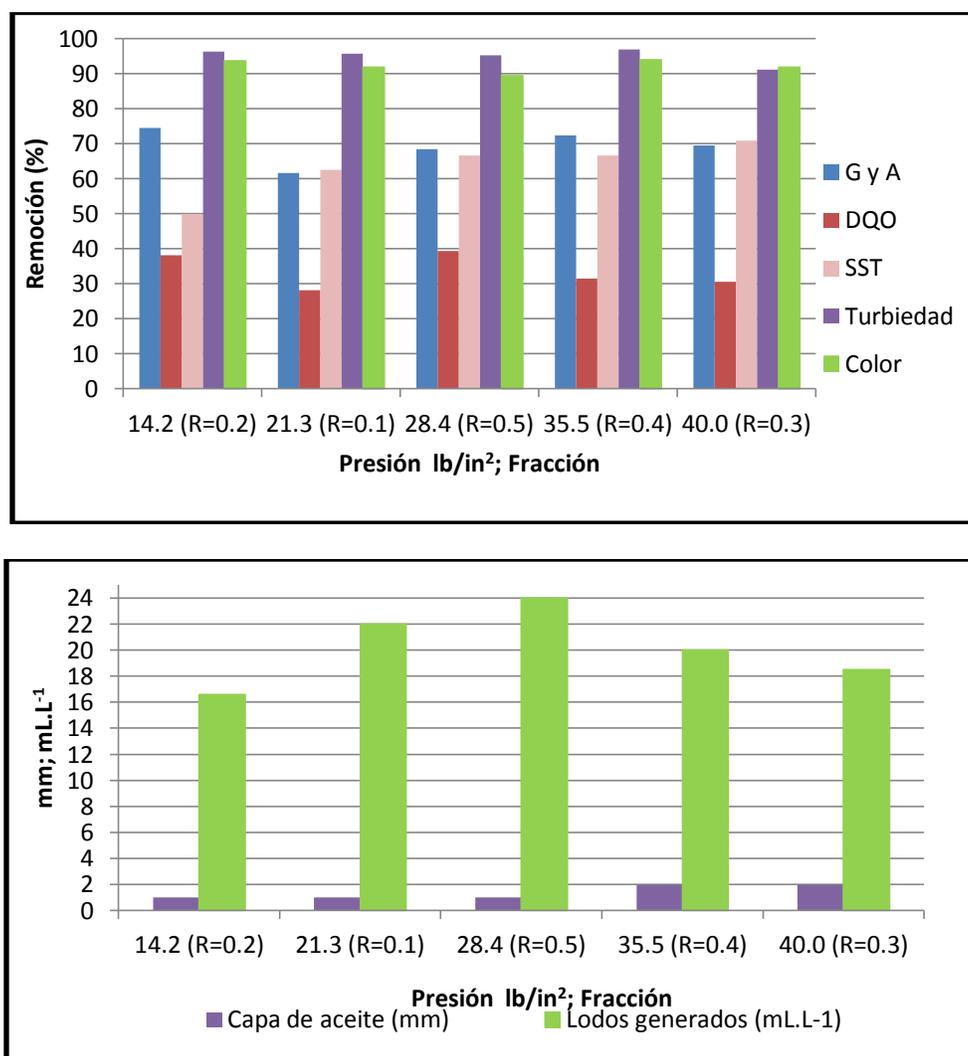


Gráfico 5.42 Tratamiento del agua residual aceitosa mediante FAD con previa coagulación-floculación mediante C-5100 bajo diferentes condiciones de operación con TRH de 20 min.

Así mismo, en el Gráfico 5.43, se muestran los resultados de la operación del FAD con previa desestabilización de la emulsión mediante C-5100 con diferentes presiones y reciclos con un TRH de 25 min. Las remociones de turbiedad y color fueron por arriba del 88% con turbiedades en



“REMOCIÓN DE ACEITE EN AGUAS RESIDUALES DE REFINACIÓN DEL PETRÓLEO MEDIANTE ADICIÓN DE REACTIVOS QUÍMICOS Y SEPARACIÓN POR FLOTACIÓN NATURAL O CON AIRE DISUELTO”



los efluentes menores a 8 UNT y un color por debajo de 321 unidades Pt-Co. La mejor condición para la remoción de GyA fue para un presión de 14.2 lb/in² y un porcentaje de recirculación del 30%, alcanzándose una remoción y concentración en el efluente de GyA del 75% y 37 mg.L⁻¹ respectivamente. Para la DQO, la mejor condición de operación fue para una presión de 40 lb/in² y un porcentaje de recirculación del 40%, obteniéndose remociones del 40% con una concentración en el efluente 500 mg.L⁻¹. Para las otras condiciones de presión y reciclos, las remociones de GyA y de DQO se encontraron por arriba entre un 50 y 73% y entre 31 y 37% respectivamente. De acuerdo con los resultados obtenidos, las mejores condiciones para un TRH de 25 min fue para una presión de 40 lb/in² y un reciclo del 40%. Sin embargo, para una presión de 14.2 y 21.3 lb/in² con reciclos del 30% y 20% respectivamente, los resultados obtenidos de GyA y de DQO fueron similares comparados con la presión de 40 lb/in².

Para todas las condiciones de operación probadas, se observó la formación de una capa de aceite sobre la superficie del agua las cuales oscilaron entre 1 y 2 mm. Los lodos generados bajo estas condiciones fueron entre 13 y 27 mg.L⁻¹.

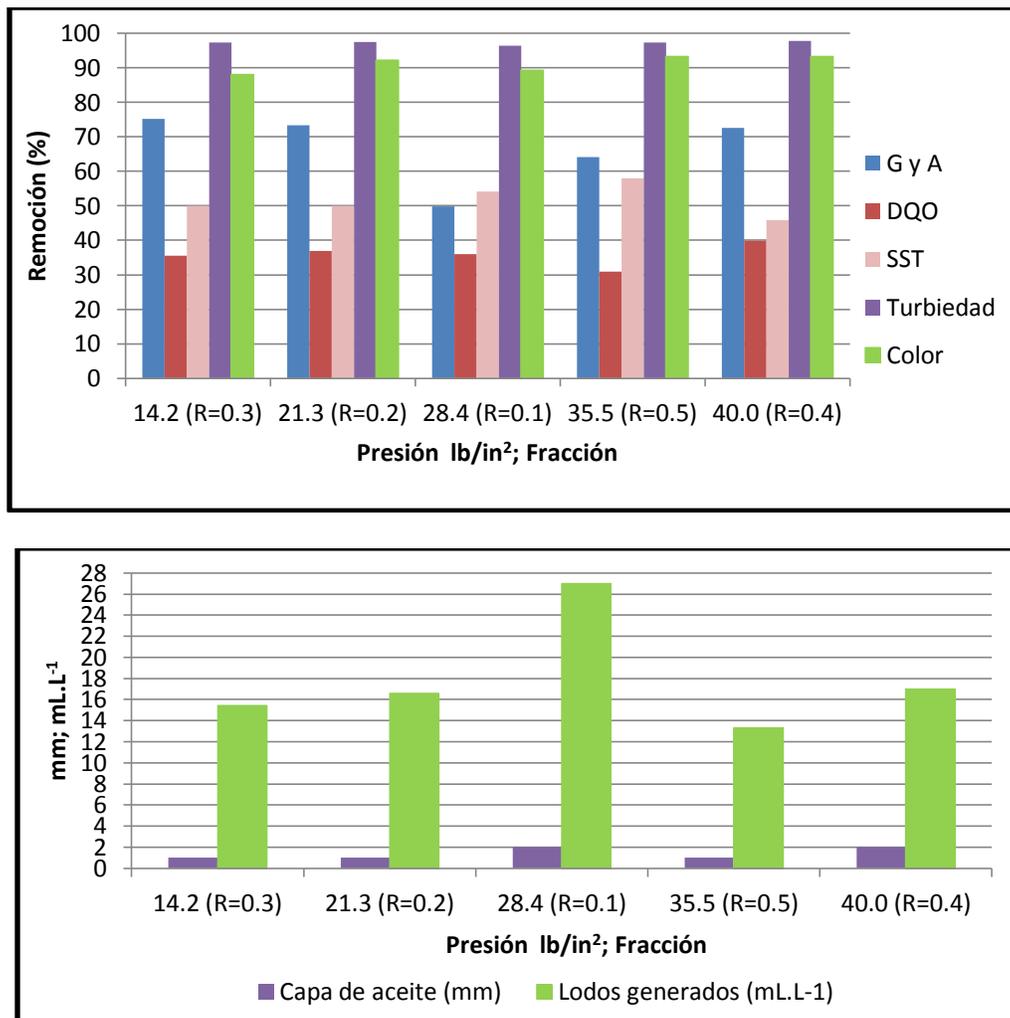


Gráfico 5. 43 Tratamiento del agua residual aceitosa mediante FAD con previa coagulación-floculación mediante C-5100 bajo diferentes condiciones de operación con TRH de 25 min.



En el Gráfico 5.44, se muestra los resultados de la operación del FAD con previa desestabilización de la emulsión con diferentes presiones y reciclos con un TRH de 30 min. La máxima remoción de GyA obtenida fue para un presión de 28.4 lb/in² con un porcentaje de recirculación del 20%, alcanzándose una remoción y concentración en el efluente de GyA del 74% y 29 mg.L⁻¹ respectivamente, obteniéndose una remoción de DQO de 35.5% con una concentración en el efluente de 490 mg.L⁻¹. Para la DQO, la mejor condición de operación fue para una presión de 35.5 lb/in² con un porcentaje de recirculación del 10%, generándose remociones del 41% con una concentración en el efluente 441 mg.L⁻¹. Las remociones de las GyA bajo estas condiciones fueron 69.6% con concentraciones de 57 mg.L⁻¹ al final del tratamiento.

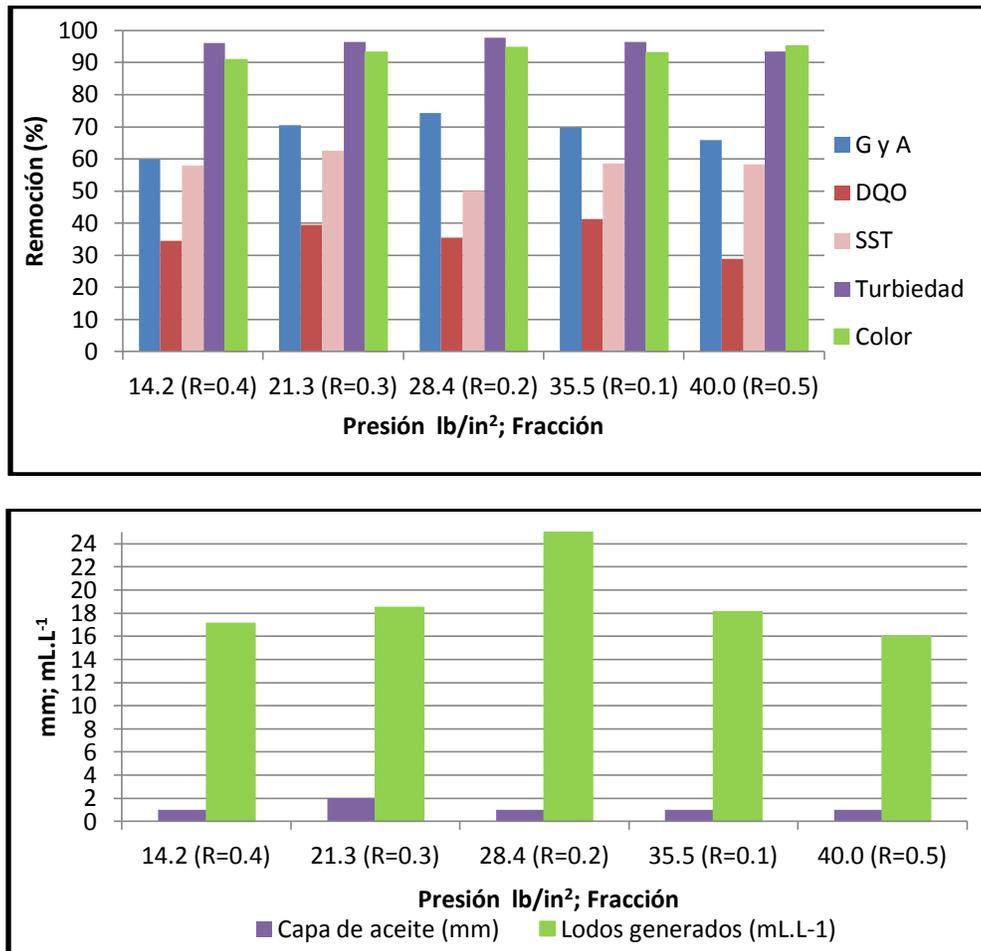


Gráfico 5. 44 Tratamiento del agua residual aceitosa mediante FAD con previa coagulación-floculación mediante C-5100 bajo diferentes condiciones de operación con TRH de 30 min.

Para las otras condiciones de presión y reciclos, las remociones de GyA y de DQO se encontraron por arriba del 60% y de 29% respectivamente. Las remociones de turbiedad y color fueron por arriba del 93% con valores en los efluentes menores a 15 UNT y un color por debajo de 229 unidades Pt-Co.

Para todas las condiciones de operación probadas, se observó la formación de una capa de aceite sobre la superficie del agua, la cual se fue entre 1 y 2 mm. Los lodos generados fueron entre 16 y 25 mg.L⁻¹.



En el Gráfico 5.45, se muestran los resultados de la operación del FAD con previa desestabilización de la emulsión, con presiones entre 14.2 y 40 lb/in² y reciclos entre 10% y 50% con un TRH de 35 min. Se observa que bajo diferentes condiciones de operación, se obtuvieron remociones de turbiedad y color por arriba del 90% con valores en los efluentes por debajo de 15 UNT y de 260 unidades Pt-Co respectivamente. Para una presión de 35.5 lb/in² con un porcentaje de recirculación del 20%, se alcanzó la máxima remoción de GyA y de DQO las cuales fueron del 71% y 35% respectivamente, con una concentración en el efluente de GyA de 43.7 mg.L⁻¹ y de DQO de 539 mg.L⁻¹. Para las otras condiciones de presión y reciclos operando con un TRH de 35 min, las remociones de GyA y de DQO fueron más bajas respecto a las pruebas anteriores obteniéndose remociones por debajo del 70% para las GyA y por debajo del 23.6% para la DQO. Este comportamiento indica que el proceso FAD trabajando con TRH de 35 min no es eficiente para la remoción de GyA y de DQO.

Como en las pruebas anteriores se observó la formación de una capa de aceite sobre la superficie del agua la cual fue de 1 mm. Los lodos generados en el proceso fueron entre 16 de 22 mL.L⁻¹.

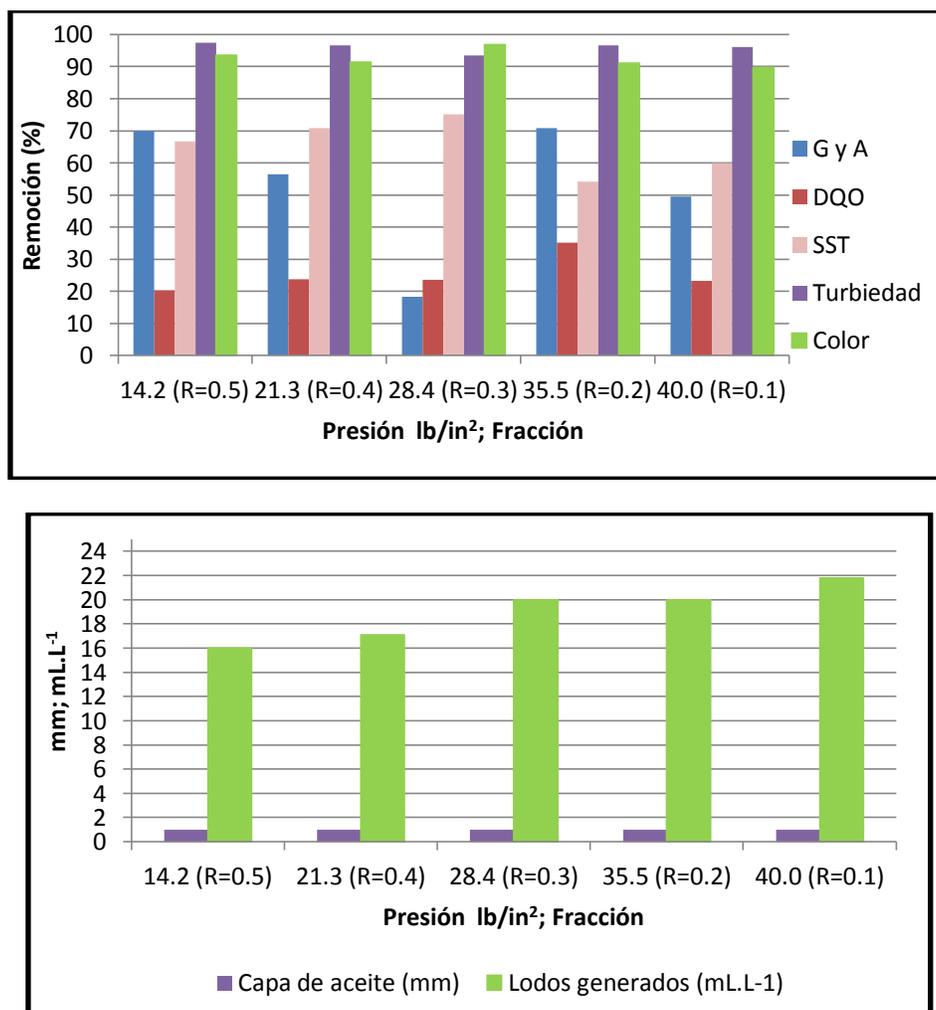


Gráfico 5. 45 Tratamiento del agua residual aceitosa mediante FAD con previa coagulación-floculación mediante C-5100 bajo diferentes condiciones de operación con TRH de 35 min.

Los resultados de los experimentos de coagulación-FAD indicaron que un factor importante es la selección del polímero, el cual debe generar un floc grande con alta densidad y resistente para que no se rompa al estar en contacto con la microburbujas generadas en el tanque de saturación. De acuerdo con las pruebas realizadas probando diferentes condiciones de operación (presión, recirculación y TRH), las mejores remociones del aceite se obtienen a presiones bajas en el tanque de saturación entre 14.2 y 28.4 lb/in² con una recirculación menor al 30% y con TRH menores a 25 min.

En la Figura 5.9 se muestra los resultados del proceso coagulación-FAD para el tratamiento del agua residual aceitosa del efluente final de los separadores (Lote 2).



Figura 5. 9 Agua residual aceitosa sin tratamiento (fotografía izquierda) y agua residual aceitosa después del proceso de coagulación-FAD (fotografía derecha).

5.3 Análisis estadístico Floculación-FAD

Una vez obtenidos los datos de las pruebas realizadas para Floculación-FAD se hizo el estudio estadístico de los diversos factores que influyeron en las mejores condiciones y a partir de ahí obtener la ecuación de optimización del proceso.

A continuación se presentan los resultados para cada una de las variables de respuesta junto con su respectiva remoción:

5.3.1 Análisis de la variable GyA y su remoción

En el Gráfico 5.46 se presenta el comportamiento de la variable de respuesta GyA dentro de la región experimental, observándose que para obtener una menor concentración de GyA (mg.L⁻¹) se deben considerar presiones bajas o altas y tiempos bajos; analizando estas dos situaciones las mejores condiciones para el proceso con el parámetro de GyA es tener presiones bajas y tiempos de retención bajos. En la Tabla 5.28 se muestran el análisis estadístico de los factores que influyen sobre el proceso. Analizando los valores de p, se observa que el valor más bajo corresponde factor Tiempo de Residencia Hidráulico. El valor del nivel de significancia del experimento es de ($\alpha=0.05$) y el valor de p es de 0.1402, El efecto del resto de los parámetros es menor ya que p es mayor que α . El TRH no se puede considerar como estadísticamente significativo para la concentración de GyA en el agua tratada. Así mismo existe un alto porcentaje de variabilidad en la variable respuesta ya que se, tiene un valor del coeficiente de correlación (R^2) de 0.9022 y un coeficiente de correlación ajustado ($R^2_{ajustada}$) con un valor de 0.8714, por otra parte existe la



presencia de errores aleatorios debido la discrepancia entre los valores medios por lo que $MS_{modelo} > MS_{Residual}$.

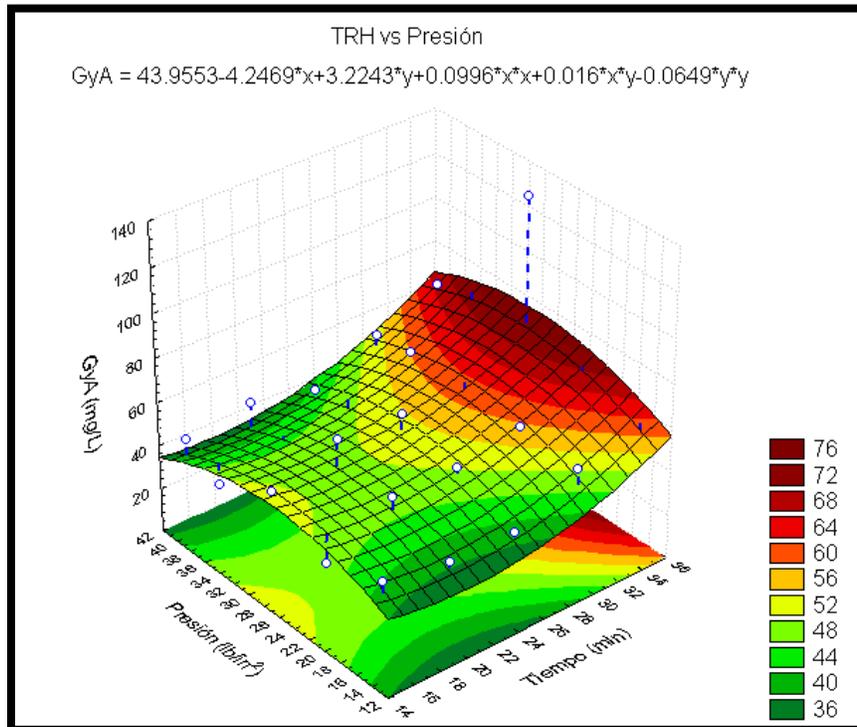


Gráfico 5. 46 Análisis de la variable GyA ($mg.L^{-1}$) vs los factores THR y Presión.

Tabla 5. 28 Regresión Superficial Mixta para el parámetro GyA ($mg.L^{-1}$).

Efecto	Pruebas univariantes de Significancia para G y A Parameterization Sigma-limitada Descomposición de la Hipótesis Efectiva				
	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
Presión (lb/in2)	19.6004	1	19.6004	0.0535	0.8195
Recirculación	3.9088	1	3.9088	0.0107	0.9188
TRH (min)	868.1838	1	868.1838	2.3700	0.1402
Presión (lb/in2)*Recirculación	51.3666	1	51.3666	0.1402	0.7122
Presión (lb/in2)*TRH (min)	137.1901	1	137.1901	0.3745	0.5478
Recirculación*TRH (min)	84.9806	1	84.9806	0.2320	0.6356
Error	6960.2011	19	366.3269		

Variable Dependiente	Prueba de SS Modelo Entero vs SS Residual										
	Multiple R	Multiple R ²	Ajustada R ²	Modelo SS	Modelo df	Modelo MS	Residual SS	Residual df	Residual MS	F	p
GyA (mg/L)	0.9499	0.9022	0.8714	64231.448	6	10705.241	6960.2011	19	366.3264	29.2232	0.0000

En la Gráfico 5.47 se ilustra el comportamiento de la variable respuesta % de Remoción de GyA, observándose que para obtener una mayor remoción de GyA se deben considerar presiones bajas o altas y tiempos bajos o medios, por lo que analizándose las mejores condiciones para el proceso con el parámetro % remoción de GyA se pueden considerar tiempos bajos y presiones bajas obteniendo de esta manera una remoción del 79%. En la Tabla 5.29 se muestra el análisis estadístico de los factores que tienen influencia sobre el proceso. Como se puede observar en los



valores de p el factor tiempo tiene el efecto principal en el experimento, ya que su valor de 0.0038 es menor al valor de significancia del experimento ($\alpha=0.05$). En segundo lugar por su significancia está el efecto combinado de TRH y la Presión, con un valor de 0.0109 y en tercer lugar, con un valor 0.0221 está el efecto combinado del THR y la Recirculación. Por lo anterior el factor TRH es primordial para definir las mejores condiciones del proceso; así mismo es importante debido a que el tamaño del equipo depende de TRH y puede generar un incremento en el costo del proceso. También se puede observar que hay un alto porcentaje de variabilidad en la variable respuesta ya que se tiene un valor en coeficiente de determinación (R^2) de 0.9703 y un coeficiente de determinación ajustado ($R^2_{ajustada}$) con un valor de 0.9609, por otra parte existe la presencia de errores aleatorios debido la discrepancia entre los valores medios por lo que $MS_{modelo} > MS_{Residual}$.

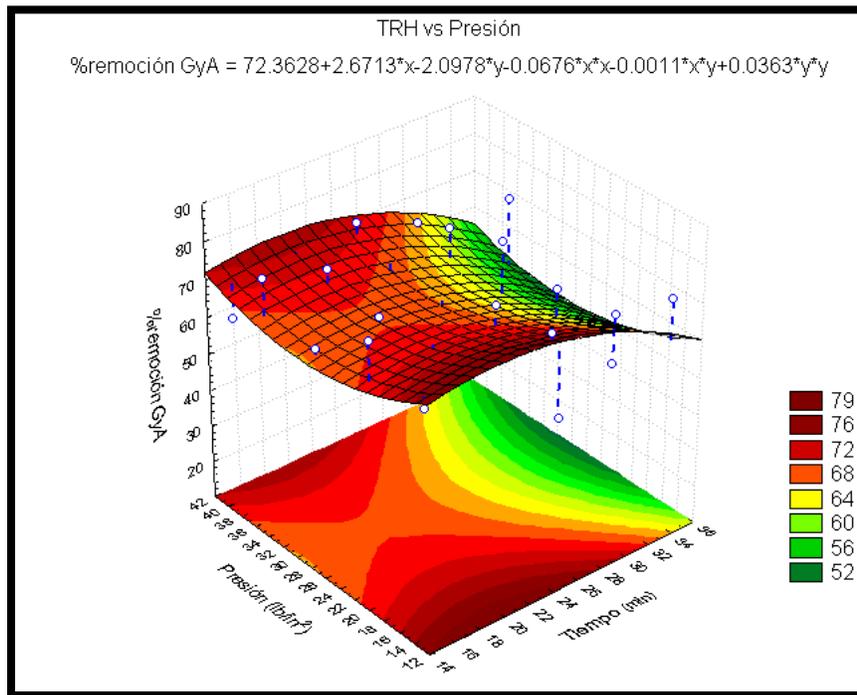


Gráfico 5. 47 Análisis de la variable % de Remoción de GyA ($mg.L^{-1}$) vs los factores THR y Presión.

Tabla 5. 29 Regresión Superficial Mixta con el parámetro % de Remoción de GyA.

Efecto	Pruebas univariantes de Significancia para % remo				
	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
Presión (lb/in2)	284.1124	1	284.1124	1.6289	0.2172
Recirculación	235.0255	1	235.0255	1.3474	0.2601
TRH (min)	1898.4561	1	1898.4561	10.8842	0.0038
Presión (lb/in2)*Recirculación	151.6113	1	151.6113	0.8692	0.3629
Presión (lb/in2)*TRH (min)	1389.5531	1	1389.5531	7.9666	0.0109
Recirculación*TRH (min)	1084.1271	1	1084.1271	6.2155	0.0221
Error	3314.0391	19	174.4231		

Variable Dependiente	Prueba de SS Modelo Entero vs SS Residual										
	Múltiple R	Múltiple R ²	Ajustada R ²	Modelo SS	Modelo df	Modelo MS	Residual SS	Residual df	Residual MS	F	p
%remoción GyA	0.9850	0.9703	0.9609	108163.090	6	18027.181	3314.039	19	174.4231	103.353	0.0000



5.3.2 Análisis de la variable DQO y su remoción

En los Gráficos 5.48 y 5.49 se presenta el comportamiento de la variable respuesta DQO dentro de la región experimental, observándose que para obtener una menor concentración de DQO (mg.L^{-1}) se deben considerar presiones altas o medias, tiempos medios y recirculaciones altas o medias, por lo que las mejores condiciones para el proceso con el parámetro DQO se deben considerar presiones medias, tiempos medios y recirculaciones medias. En la Tabla 5.30 se muestran el análisis estadístico de los factores que tiene más afectación en el proceso. Analizando los valores de p: el tiempo es uno de los factores principales que intervienen en el experimento debido a su valor de 0.0003 el cual está por debajo del nivel de significancia ($\alpha=0.05$). Es estadísticamente importante y el efecto del factor presión, teniendo un valor de 0.0341, definiendo de esta manera los factores primordiales que se deben ajustar para tener las mejores condiciones en el experimento. También son estadísticamente significativos los efectos combinados de PyTRH, así como RyTRH. Por otra parte se puede ver que el porcentaje de variabilidad es alto en la variable respuesta ya que se tiene un valor en coeficiente de correlación (R^2) de 0.9882 y un coeficiente de correlación ajustado (R^2_{ajustada}) con un valor de 0.9845, por otra parte existe la presencia de errores aleatorios debido la discrepancia entre los valores medios por lo que $MS_{\text{modelo}} > MS_{\text{Residual}}$.

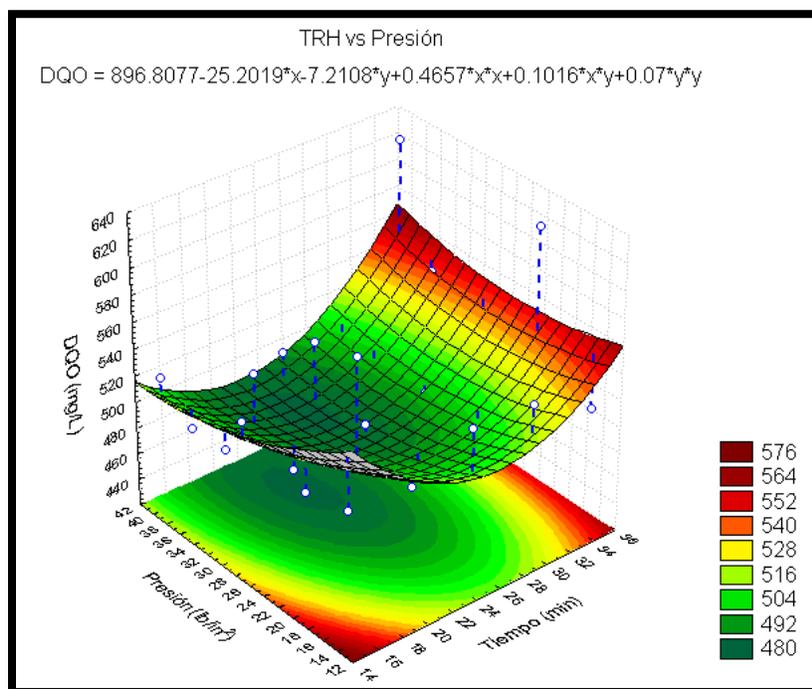


Gráfico 5. 48 Análisis de la variable DQO (mg.L^{-1}) vs los factores TRH y Presión.

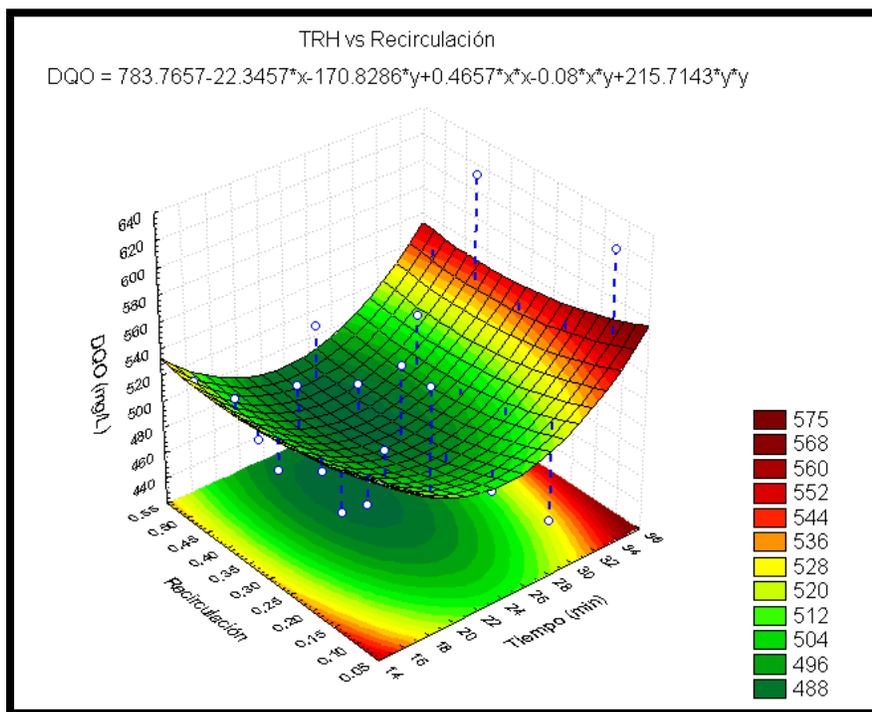


Gráfico 5. 49 Análisis de la variable DQO (mg.L⁻¹) vs los factores TRH y Recirculación.

Tabla 5. 30 Regresión Superficial Mixta con el parámetro DQO (mg.L⁻¹).

Efecto	Pruebas univariantes de Significancia para DQO (mg.L ⁻¹) Parameterization Sigma-limitada Descomposición de la Hipótesis Efectiva				
	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
Presión (lb/in2)	21287.549	1	21287.549	5.2163	0.0341
Recirculación	9994.3001	1	9994.3001	2.4490	0.1341
TRH (min)	78527.926	1	78527.926	19.2424	0.0003
Presión (lb/in2)*Recirculación	458.8548	1	458.8548	0.1124	0.7411
Presión (lb/in2)*TRH (min)	41616.356	1	41616.356	10.1976	0.0048
Recirculación*TRH (min)	27108.141	1	27108.141	6.6425	0.0185
Error	77538.867	19	4080.9930		

Variable Dependiente	Prueba de SS Modelo Entero vs SS Residual										
	Multiple R	Multiple R ²	Ajustada R ²	Modelo SS	Modelo df	Modelo MS	Residual SS	Residual df	Residual MS	F	p
DQO (mg/L)	0.9941	0.9882	0.9845	6514667	6	1085776	77538.867	19	4080.9930	266.057	0.00

En el Gráfico 5.50 se ilustra el comportamiento de la variable respuesta % de Remoción de DQO, observándose que para obtener una mayor remoción de DQO se deben considerar presiones bajas o medias y recirculaciones bajas, por lo que las mejores condiciones para el proceso con el parámetro de %Remoción de DQO se pueden considerar presiones medias y recirculaciones bajas obteniendo de esta manera una remoción del 35%. En la Tabla 5.31 se muestra el análisis estadístico de los factores que tienen más afectación en el proceso. Analizando los valores de p: el tiempo es el que tiene el efecto principal debido a su valor 0.00002, el cual es un valor muy bajo en



comparación con el valor de significancia del experimento ($\alpha=0.05$). Son estadísticamente significativos y los efectos combinados como TRH y Presión con un valor de 0.0001; TRH y Recirculación con un valor de 0.0018 y PyR. Como ya se mencionó el factor tiempo es primordial para definir las mejores condiciones del proceso. También se puede ver que se tiene un alto porcentaje de variabilidad en la variable respuesta ya que se tiene un valor en coeficiente de correlación (R^2) de 0.9777 y un coeficiente de correlación ajustado ($R^2_{ajustada}$) con un valor de 0.9706, por otra parte existe la presencia de errores aleatorios debido la discrepancia entre los valores medios por lo que $MS_{modelo} > MS_{Residual}$.

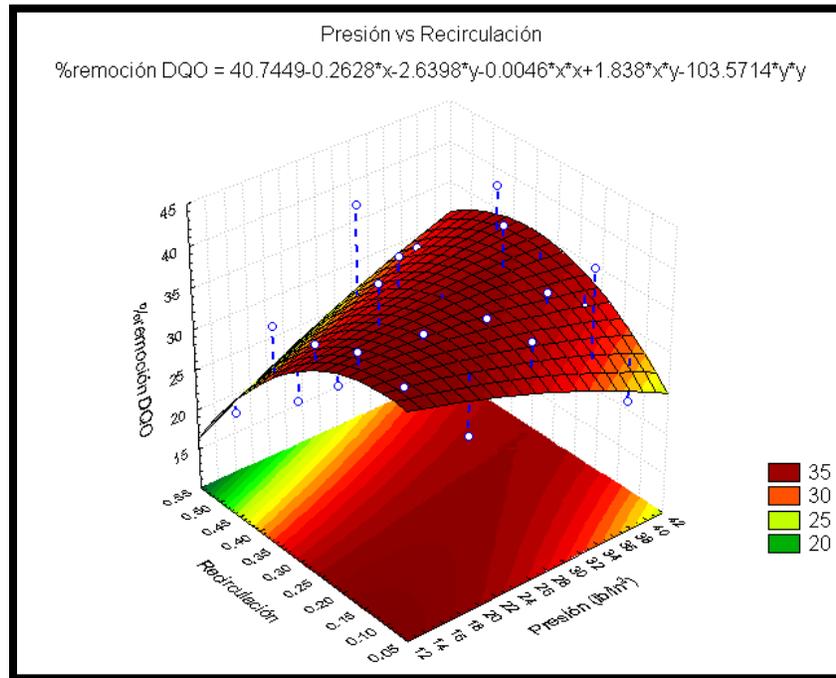


Gráfico 5. 50 Análisis del parámetro % Remoción de DQO vs los factores Presión y Recirculación.

Tabla 5. 31 Regresión Superficial Mixta con el parámetro % de Remoción de DQO.

Efecto	Pruebas univariantes de Significancia para % rem Parameterization Sigma-limitada Descomposición de la Hipótesis Efectiva				
	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
Presión (lb/in2)	27.7246	1	27.7246	0.8521	0.3675
Recirculación	45.1786	1	45.1786	1.3885	0.2532
TRH (min)	1225.772	1	1225.772	37.6735	0.0000
Presión (lb/in2)*Recirculación	368.9752	1	368.9752	11.3403	0.0032
Presión (lb/in2)*TRH (min)	833.1458	1	833.1458	25.6063	0.0001
Recirculación*TRH (min)	427.8167	1	427.8167	13.1487	0.0018
Error	618.1984	19	32.5368		

Variable Dependiente	Prueba de SS Modelo Entero vs SS Residual										
	Multiple R	Multiple R ²	Ajustada R ²	Modelo SS	Modelo df	Residual MS	Residual SS	Residual df	Residual MS	F	p
%remoción DQO	0.9888	0.9777	0.9706	27062.6211	6	4510.4368	618.1984	19	32.5368	138.625	0.0000



5.3.3 Análisis de la variable Turbiedad y su remoción

En Gráfico 5.51 se presenta el comportamiento de la variable respuesta Turbiedad dentro de la región experimental, observándose que para obtener una menor concentración de Turbiedad (UNT) se deben considerar presiones medias y tiempos medios, de esta manera el proceso no contará con afectaciones económicas o energéticas. En la Tabla 5.32, se muestra el análisis estadístico de los factores que tiene más afectación en el proceso. Analizando los valores de p el tiempo es el que tiene el efecto principal, con un valor de 0.1823, debido a que el valor es cercano al valor de significancia del experimento ($\alpha=0.05$), por lo que es importante para la elección en las condiciones del proceso. En segundo lugar esta P, son estadísticamente significativos los efectos combinados de PyR, TRHyP, TRHyR, Por otra parte existe un alto porcentaje de variabilidad en la variable respuesta ya que se tiene un valor en coeficiente de correlación (R^2) de 0.8838 y un coeficiente de correlación ajustado ($R^2_{ajustada}$) con un valor de 0.8471, por otra parte existe la presencia de errores aleatorios debido la discrepancia entre los valores medios por lo que $MS_{modelo} > MS_{Residual}$.

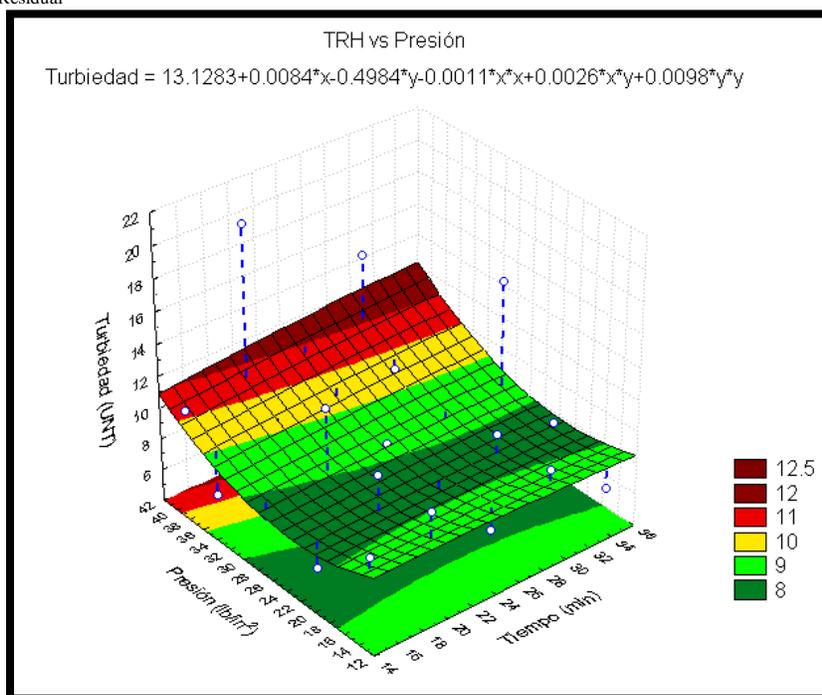


Gráfico 5. 51 Análisis de la variable Turbiedad (UNT) vs los factores THR y Presión.

Tabla 5. 32 Regresión Superficial Mixta con el parámetro Turbiedad (UNT).

Efecto	Pruebas univariantes de Significancia para Turbiedad Parameterization Sigma-limitada Descomposición de la Hipótesis Efectiva				
	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
Presión (lb/in2)	13.8092	1	13.8092	0.9834	0.3338
Recirculación	7.3920	1	7.3920	0.5264	0.4770
TRH (min)	26.9157	1	26.9157	1.9167	0.1823
Presión (lb/in2)*Recirculación	8.0817	1	8.0817	0.5755	0.4574
Presión (lb/in2)*TRH (min)	26.4122	1	26.4122	1.8809	0.1862
Recirculación*TRH (min)	0.44363	1	0.44363	0.0316	0.8608
Error	266.8055	19	14.0424		



“REMOCIÓN DE ACEITE EN AGUAS RESIDUALES DE REFINACIÓN DEL PETRÓLEO MEDIANTE ADICIÓN DE REACTIVOS QUÍMICOS Y SEPARACIÓN POR FLOTACIÓN NATURAL O CON AIRE DISUELTO”



Variable Dependiente	Prueba de SS Modelo Entero vs SS Residual										
	Múltiple R	Múltiple R ²	Ajustada R ²	Modelo SS	Modelo df	Modelo MS	Residual SS	Residual df	Residual MS	F	p
Turbiedad (NTU)	0.9401	0.8838	0.8471	2029.194	6	338.199	266.805	19	14.0424	24.0841	0.0000

En el Gráfico 5.52 se ilustra el comportamiento de la variable respuesta % de Remoción de Turbiedad, observándose que para obtener una mayor % de remoción de Turbiedad se deben considerar tiempos de residencia hidráulicos bajos y recirculaciones bajas, obteniendo de esta manera una remoción del 96%. En la Tabla 5.33 se muestra el análisis estadístico de los factores que tiene más afectación en el proceso. Analizando los valores de p el tiempo tiene el efecto principal con un valor de 0.00001, así mismo es estadísticamente significativo el efecto de la presión con un valor de 0.0002, debido a que los valores son menores al valor de significancia del experimento ($\alpha=0.05$); debido a lo anterior estos dos efectos son primordiales para determinar las mejores condiciones en el proceso. Son importantes los efectos combinados de: PyR; TRHyP; TRHyR. Por otra parte se puede ver que hay un alto porcentaje de variabilidad en la variable respuesta ya que se tiene un valor en coeficiente de correlación (R^2) de 0.9973 y un coeficiente de correlación ajustado ($R^2_{ajustada}$) con un valor de 0.9964, por otra parte existe la presencia de errores aleatorios debido la discrepancia entre los valores medios por lo que $MS_{modelo} \gg \gg \gg MS_{Residual}$.

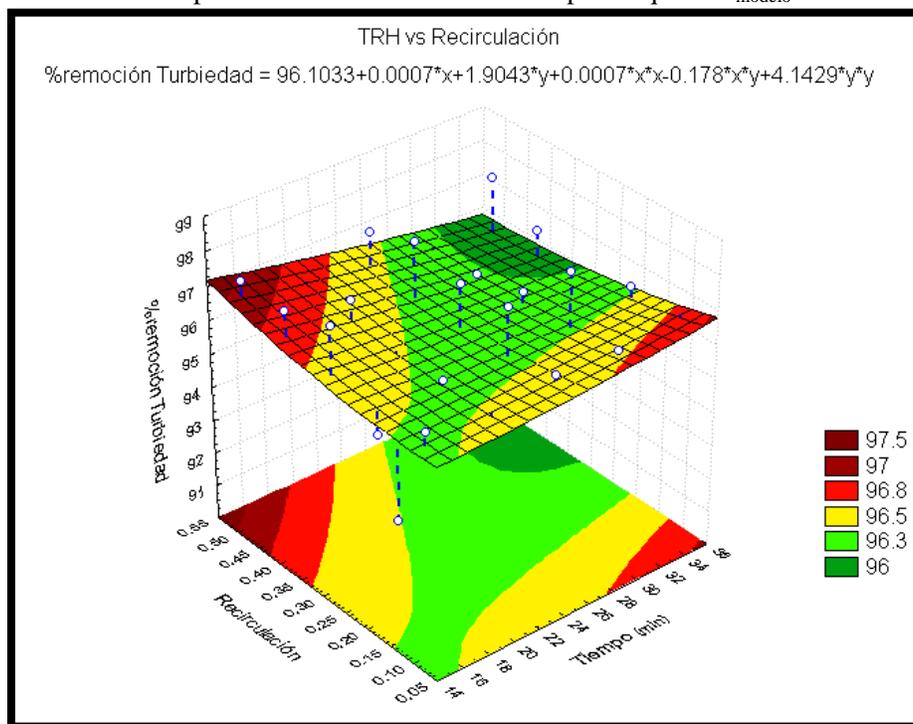


Gráfico 5. 52 Análisis del parámetro % de Remoción de Turbiedad vs los factores THR y Recirculación.



Tabla 5.33 Regresión Superficial Mixta para el parámetro % de Remoción de Turbiedad.

Efecto	Pruebas univariantes de Significancia para % rem Parameterization Sigma-limitada Descomposición de la Hipótesis Efectiva				
	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
Presión (lb/in2)	667.8563	1	667.8563	20.2317	0.0002
Recirculación	137.8023	1	137.8023	4.1745	0.0552
TRH (min)	3530.5254	1	3530.5254	106.9520	0.0000
Presión (lb/in2)*Recirculación	189.8113	1	189.8113	5.7501	0.0269
Presión (lb/in2)*TRH (min)	2158.9810	1	2158.9810	65.4031	0.0000
Recirculación*TRH (min)	1145.3034	1	1145.3034	34.6953	0.0000
Error	627.1970	19	33.0104		

Variable Dependiente	Prueba de SS Modelo Entero vs SS Residual										
	Múltiple R	Múltiple R ²	Ajustada R ²	Modelo SS	Modelo df	Modelo MS	Residual SS	Residual df	Residual MS	F	p
%remoción Turbiedad	0.9986	0.9973	0.9964	231159.433	6	38526.572	627.1970	19	33.0104	1167.105	0.0000

5.3.4 Análisis de la variable Color y su remoción

En Gráfico 5.53 se presenta el comportamiento de la variable respuesta Color dentro de la región experimental, observando que para obtener una menor concentración de Color (nm) se deben considerar presiones bajas y tiempos de retención hidráulicos bajos y de esta manera no tener afectaciones en el costo del proceso. En la Tabla 5.34, la cual nos muestra el análisis estadístico de los factores que tienen más afectación en el proceso. Analizando los valores de p, el tiempo es el que tiene el mayor efecto, con un valor de 0.1471, el cual es cercano al valor de significancia del experimento ($\alpha=0.05$). Así mismo se puede ver que hay un alto porcentaje de variabilidad en la variable respuesta ya que se tiene un valor en coeficiente de correlación (R^2) de 0.9028 y un coeficiente de correlación ajustado ($R^2_{ajustada}$) con un valor de 0.8721, por otra parte existe la presencia de errores aleatorios debido a la discrepancia entre los valores medios por lo que $MS_{modelo} > MS_{Residual}$.

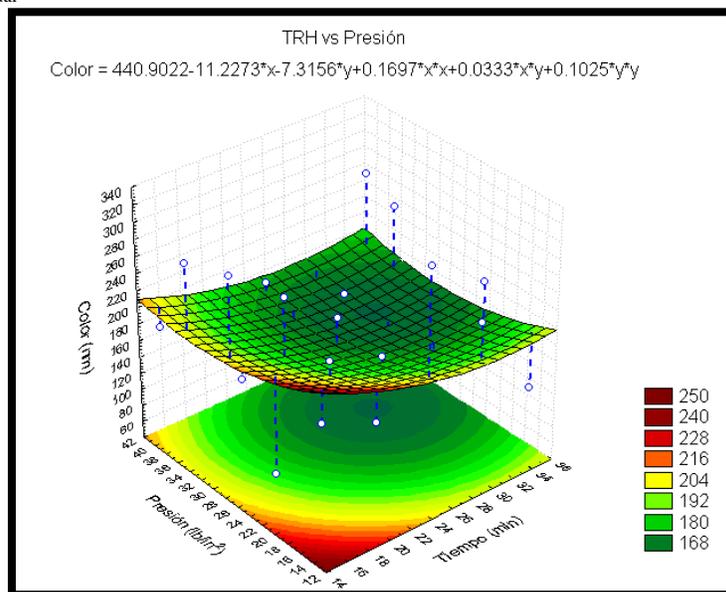


Gráfico 5.53 Análisis de la variable Color (nm) vs los factores TRH y Presión.



Tabla 5. 34 Regresión Superficial Mixta con el parámetro Color (nm).

Efecto	Pruebas univariantes de Significancia para Color (nm) Parameterization Sigma-limitada Descomposición de la Hipótesis Efectiva				
	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
Presión (lb/in2)	5338.3303	1	5338.3303	1.1057	0.3062
Recirculación	6801.6075	1	6801.6075	1.4088	0.2499
TRH (min)	11032.537	1	11032.537	2.2852	0.1471
Presión (lb/in2)*Recirculación	359.2389	1	359.2389	0.074409	0.7880
Presión (lb/in2)*TRH (min)	6982.6053	1	6982.6053	1.4463	0.2439
Recirculación*TRH (min)	10239.906	1	10239.906	2.1210	0.1616
Error	91729.819	19	4827.8852		

Variable Dependiente	Prueba de SS Modelo Entero vs SS Residual										
	Múltiple R	Múltiple R ²	Ajustada R ²	Modelo SS	Modelo df	Modelo MS	Residual SS	Residual df	Residual MS	F	p
Color (nm)	0.9502	0.9028	0.8721	852239.180	6	142039.86	91729.819	19	4827.885	29.4207	0.0000

En los Gráficos 5.54 y 5.55 se ilustra el comportamiento de la variable respuesta % de Remoción de Color, observando que para obtener un mayor % de Remoción para Color (nm) se deben considerar presiones medias y tiempos de residencias hidráulicos medios, así como también recirculaciones bajas para tener las mejores condiciones en el proceso y de esta manera obtener una remoción del 92%. En la Tabla 5.35 se muestra el análisis estadístico de los factores que tiene más afectación en el proceso. Analizando los valores de p: el tiempo es el que tiene el efecto principal, con un valor de 0.00005, otro factor de importancia es la presión, con un valor 0.0018, debido a que estos valores son menores al valor de significancia del experimento ($\alpha=0.05$), son estadísticamente significativos y los efectos combinados de RyP; TRHyP; TRHyR. El porcentaje de variabilidad en la variable respuesta es un poco alto ya que se tiene un valor en coeficiente de correlación (R^2) de 0.9865 y un coeficiente de correlación ajustado ($R^2_{ajustada}$) con un valor de 0.9954, por otra parte existe la presencia de errores aleatorios debido la discrepancia entre los valores medios por lo que $MS_{modelo} > MS_{Residual}$.

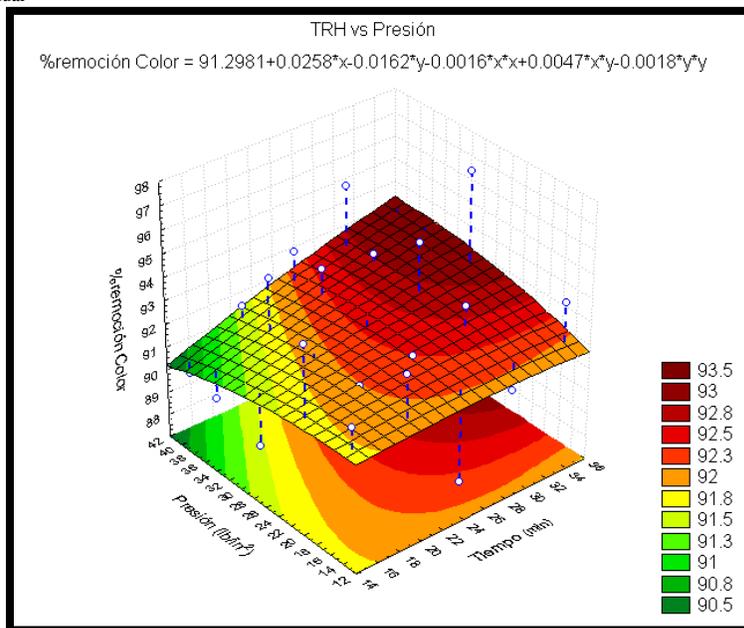


Gráfico 5. 54 Análisis del parámetro % de Remoción de Color vs los factores TRH y Presión.

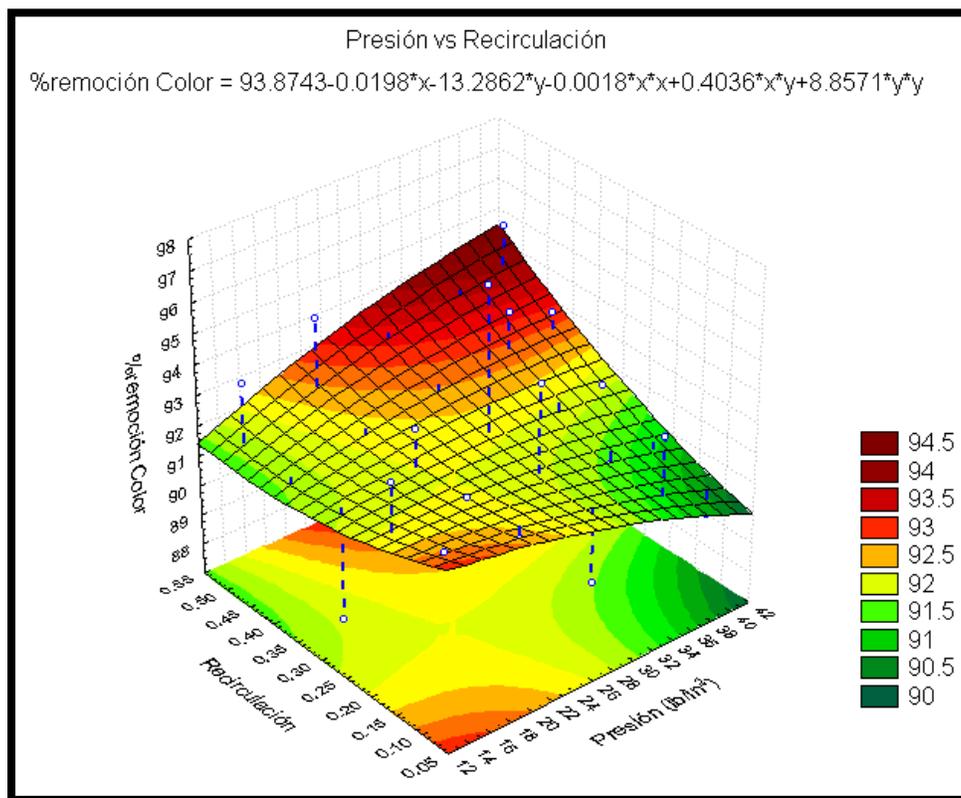


Gráfico 5. 55 Análisis del parámetro % de Remoción de Color vs los factores TRH y Recirculación.

Tabla 5. 35 Regresión Superficial Mixta con el parámetro % de Remoción de Color.

Efecto	Pruebas univariantes de Significancia para % rem				
	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
Presión (lb/in2)	511.6029	1	511.6029	13.1384	0.0018
Recirculación	58.8686	1	58.8686	1.5118	0.2339
TRH (min)	3374.095	1	3374.095	86.6496	0.0000
Presión (lb/in2)*Recirculación	268.8092	1	268.8092	6.9032	0.0166
Presión (lb/in2)*TRH (min)	1995.363	1	1995.363	51.2426	0.0000
Recirculación*TRH (min)	982.8583	1	982.8583	25.2406	0.0001
Error	739.8511	19	38.9395		

Variable Dependiente	Prueba de SS Modelo Entero vs SS Residual										
	Multiple R	Multiple R ²	Ajustada R ²	Modelo SS	Modelo df	Modelo MS	Residual SS	Residual df	MS Residual	F	p
%remoción Color	0.9983	0.9965	0.9954	211402.678	6	35233.779	739.8511	19	38.9395	904.833	0.0000

5.4 Análisis de costos de coagulantes y floculantes

En la Tabla 5.36 se presentan los costos de coagulantes y floculantes por metro cúbico de agua tratada, utilizando las dosis con mejores resultados en las pruebas de coagulación individual y floculación individual. Se observan costos bajos para los coagulantes pero como los coagulantes no



pueden ser empleados individualmente debido a que solo son utilizados solo para la desestabilización de la emulsión. En cuanto a los floculantes catiónicos y aniónicos se obtuvieron también costos bajos para todos excepto los últimos dos que fueron empleados como ayudantes de la coagulación. Los coagulantes catiónicos LARKFLOC-C-5100 y SUPERFLOC-C-495 se usaron de forma individual, para LARKFLOC-C-5100 se obtuvo un costo menor. Para la pruebas de coagulación-floculación fue el floculante que presentó las mejores remociones de GyA para valores de pH básicos por lo que es un desestabilizante de la emulsión rentable para ser empleado en sistemas a escala industrial.

Tabla 5. 36 Costos de reactivos químicos por m³ de agua tratada.

Reactivo químico Utilizado	Nuevo Nombre	Costo por kilogramo	Dosis (g/L)	\$ (m.n /m ³)
SAS (Sulfato de Aluminio)	KEMIRA ALC 2-5	3.2 m.n/kg	0.015	0.0480
PIX 111 (Cloruro férrico)	KEMIRA PIX-111	0.35 usd/kg	0.009	0.0424
PIX 145 (Sulfato férrico)	KEMIRA PIX-106	0.33 usd/kg	0.009	0.0400
PAX 260S	KEMIRA PAX-XL60S	0.85 usd/kg	0.015	0.1716
OPTIFLOC-C-1288	OPTIFLOC-C-1288	6.2 usd/kg	0.00025	0.0209
SUPERFLOC C-498	SUPERFLOC C-498	6.1 usd/kg	0.00125	0.1026
OPTICLOC-C-1781	OPTICLOC-C-1781	4.50usd/kg	0.001255	0.0760
OPTIFLOC-A-1638	OPTIFLOC-A-1638	4.00 usd/kg	0.00175	0.0942
OPTIFLOC-AE-1488	OPTIFLOC-AE-1488	3.50 usd/Kg	0.000255	0.0120
SUPERFLOC-A-100	SUPERFLOC A-100	3.8 usd/kg	0.00175	0.0895
LARKFLOC 5100-C	LARKFLOC 5100-C	28 m.n/kg	0.585	0.0025

En la Tabla 5.37 se muestran los costos de las mejores combinaciones que se presentaron en las pruebas de desestabilización de la emulsión (floculación-coagulación), en la cual observamos que el floculante LARKFLOC-5100 tiene un costo bajo en comparación con las demás combinaciones, lo que representa un beneficio debido a que en operación normal de un sistema de coagulación-floculación a escala industrial es un floculante catiónico rentable y económico, puede emplearse de manera individual sin ayuda de un coagulante mineral, y en el caso de tren de tratamiento convencional de una planta de tratamiento de efluentes de una refinería el sistema de coagulación-floculación se toma como un equipo crítico debido al suministro del coagulante y floculante, este sería distribuido por un solo proveedor y tendría una mayor eficiencia en operación de nuestro tren dentro de una refinería.



Tabla 5. 37 Costos de Tratamiento Coagulación/Floculación en cuanto a reactivos.

Combinación Coagulante/Floculante Lote 1		\$
SAS (Sulfato de Aluminio)	OPTIFLOC-C-1288	0.0689
SAS (Sulfato de Aluminio)	SUPERFLOC C-498	0.1506
SAS (Sulfato de Aluminio)	OPTICLOC-C-1781	0.1240
PIX 111 (Cloruro férrico)	OPTIFLOC-C-1288	0.0632
PIX 111 (Cloruro férrico)	SUPERFLOC C-498	0.1450
PIX 111 (Cloruro férrico)	OPTICLOC-C-1781	0.1184
PAX 260S	OPTIFLOC-C-1288	0.1924
PAX 260S	SUPERFLOC C-498	0.2742
PAX 260S	OPTICLOC-C-1781	0.2475
SAS (Sulfato de Aluminio)	OPTIFLOC-A-1638	0.1422
SAS (Sulfato de Aluminio)	OPTIFLOC-AE-1488	0.0600
SAS (Sulfato de Aluminio)	SUPERFLOC A-100	0.1375
PIX 111 (Cloruro férrico)	OPTIFLOC-A-1638	0.1366
PIX 111 (Cloruro férrico)	OPTIFLOC-AE-1488	0.0544
PIX 111 (Cloruro férrico)	SUPERFLOC A-100	0.1319
PAX 260S	OPTIFLOC-A-1638	0.2657
PAX 260S	OPTIFLOC-AE-1488	0.1836
PAX 260S	SUPERFLOC A-100	0.2610
Lote 2		\$
PIX 111 (Cloruro férrico)	SUPERFLOC C-498	0.1450
SAS (Sulfato de Aluminio)	OPTIFLOC-C-1288	0.0689
PIX 111 (Cloruro férrico)	OPTIFLOC-AE-1488	0.0544
SAS (Sulfato de Aluminio)	OPTIFLOC-AE-1488	0.0600
LARKFLOC		0.0025
SUPERFLOC C-498		0.0125



6. CONCLUSIONES

El tratamiento de las aguas residuales de refinación del petróleo mediante un proceso de desestabilización de la emulsión seguido por flotación con aire disuelto (FAD) permite remover por arriba del 79% de las GyA. Con este tratamiento se obtienen altas remociones de SST, así como remociones de DQO hasta 41%.

Las pruebas de desestabilización de la emulsión con los diferentes reactivos químicos indicaron que:

- Los mejores coagulantes evaluados de forma individual fueron el sulfato de aluminio (SAS) y el poli-aluminato PAX. El coagulante PAX fue efectivo no solo para la remoción del aceite, sino que también para la remoción de DQO, SST, Color y Turbiedad.
- Los mejores polímeros catiónicos evaluados de forma individual fueron el SUPERFLOC-C-498 y el LARKFLOC-C-5100.
- Las mejores combinaciones de coagulante-floculante fueron de sulfato de aluminio o cloruro férrico con la adición de un polímero (OPTIFLOC-C-1288 o SUPERFLOC-C-498), sin embargo, el volumen de lodos formados fue en un 30% mayor comparado con el obtenido con la aplicación de uno de los polímeros anteriormente mencionados en forma individual.

Un factor importante en la comparación de los reactivos químicos es el costo del tratamiento. Con el uso de OPTIFLOC-C-1288 o SUPERFLOC-C-498 en combinación con los reactivos inorgánicos (sulfato de aluminio o cloruro de férrico), el costo del tratamiento atribuido a reactivos químicos es 50-60% mayor con respecto al obtenido aplicando solo el polímero catiónico LARKFLOC-C-5100 que fue de 0.0025 pesos por metro cúbico de agua tratada.

El polímero catiónico LARCKFLOC-C-5100 tuvo el mejor desempeño en las pruebas de desestabilización de la emulsión seguida por flotación con aire disuelto. Además de una buena desestabilización de la emulsión, se observó formación de flóculos estables, de buen tamaño y resistentes a la turbulencia formada por las burbujas de aire formadas al inyectar el agua saturada de aire al tanque de flotación.

El análisis de los resultados de las pruebas de flotación con aire disuelto indicó que el tiempo de residencia hidráulica (TRH) tiene un efecto significativo sobre la remoción de GyA, seguido por la recirculación. Es menor el efecto de la presión de saturación. Remociones de GyA de 79% se obtuvieron con TRH de 15-20 min, recirculación de 50% y una presión relativamente baja, de 21.3lb/in². El aumento del TRH a más de 25 min no aumenta la remoción de GyA. Los parámetros recirculación y TRH tienen efecto importante y sobre la remoción de la DQO. Las mayores remociones de DQO se obtuvieron con recirculación de 20-40% y TRH de 20-30 min. Considerando el efecto de las variables sobre todos los parámetros de respuesta (GyA, DQO, SST, turbiedad y color) y con el criterio de obtener altas remociones para todos los parámetros, se sugieren las siguientes condiciones de operación del proceso FAD: TRH de 20 min, recirculación de 20% y una presión de 21.3 lb/pulg² (1.5 atm).



Implementando la desestabilización de la emulsión seguida por FAD para el tratamiento de las aguas aceitosas de la refinería y aplicando las condiciones de operación anteriormente mencionadas, se cumple con los requerimientos que establece la PTAR de la refinería para recibir el efluente del tratamiento primario y someterlo a tratamiento biológico y avanzado para su posterior reutilización. Los límites máximos permisibles de PTAR son: para GyA de 48 mg/L, para DQO de 400 mg/L y para turbiedad de 70 UNT.

7. RECOMENDACIONES

Cabe señalar que los resultados obtenidos en este trabajo son a nivel experimental en laboratorio donde las condiciones ambientales como presión y temperatura fueron diferentes a las condiciones ambientales del sitio donde se encuentra la refinería. Así mismo las características del agua residual usada para la experimentación tuvo variaciones debido al tiempo y forma de transporte y almacenamiento. Por lo que es recomendable llevar a cabo un trabajo experimental a nivel planta piloto en el sitio de la refinería, con el objetivo de reducir interferencias, variaciones horarias y diarias que se presentan debido a los procesos de refinación, así como también las condiciones ambientales como presión, temperatura que se ven reflejadas en la composición del agua residual.



8. BIBLIOGRAFÍA

- Al-Shamrani A.A., James A. y Xiao H. (2002), “Destabilisation of oil-water emulsions and separation by dissolved air flotation”, *Water Research*, vol. 36, num.15, 1503-1512.
- Alther, G. R. (2001), “How to remove emulsified oil from wastewater with organo clays”, *Water Engineering and Management*, vol.148,num.7,27-29.
- Amato T., Edzwald J.K., Tobiason J.E., Dahlquist J. y Hedberg T. (2001), “An integrated approach to dissolved air flotation”, *Water Science and Technology*, vol.43, num.8, 19-26.
- Arnold, S. R. et al. (1995), “Recent applications of dissolved air flotation pilot studies and full scale design”, *Water Science and Technology*, vol.3, num.3-4,327-340.
- Arora, H. et al. (1995), “Evaluation of dissolved air flotation process for water clarification and sludge thickening”, *Water Science and Technology*, vol.31,num 3-4, 137-147.
- ATAS. (1986), Principios para el diseño y la operación de plantas de tratamiento de aguas de refinerías de petróleo”, Asociación Técnica Alemana de Saneamiento, ATV (Abwasser Technische Vereinigung),54.
- AWWA. (1992), Operational control of coagulation and filtration processes, EUA, Manual of water supply practices, 72-88.
- Baron, C. (2000), "B.O.O. Case: water management project for the use of reclaimed wastewater and desalted seawater for the Antonio Dovali Jaime refinery, Salina Cruz, Oaxaca, México". *Water Science and Technology*, vol.42, núm 5-6, 29-36.
- Bauer, M.J. et al. (1998), “Enhanced rapid gravity filtration and dissolved air flotation for pre-treatment of river Thames reservoir water”, *Water Science and Technology*, vol.37,num.2,35-42.
- Bunker, D.Q. Jr. et al. (1995), “Pretreatment considerations for dissolved air flotation: water type, coagulants and flocculation”, *Water Science and Technology*, vol.31, num3-4, 63-71.
- Cochran, W.G. y Cox, G.M. (1978), Diseño experimentales, México, Editorial Trillas, 661.
- Demirci S., Erdogan B., y Özçimder R. (1998), “Wastewater treatment at the petroleum refinery, Kirikkate, Turkey using some coagulants and turkish clays as coagulant aids”, *Water Research*, vol.32, num.11, 3495-3499.
- Di Bernardo, L. (1993), Métodos y técnicas de tratamiento de agua. Rio de Janeiro: Volumen 1.
- Eckenfelder, W. W. (1989), Industrial Water Pollution Control, E.U.A, Editorial McGraw- Hill, 71-129.
- Edzwald, J. (1995), “Principles and applications of dissolved air flotation”, *Water Science and Technology*, vol. 31,num. 3-4,1-23.



Ferguson, C. et al. (1995), “Comparison of dissolved air flotation and direct filtration”, *Water Science and Technology*, vol. 31,num.3-4,113-124.

Féris L.A, Gallina C.W., Rodrigues R.T., Y Rubio J. (2001), “Optimizing dissolved air flotation desing nd saturation”, *Water Science and Technology*, vol.43, num.8,145-157.

Fukushi, K. et al. (, 1995), “A kinetic model for dissolved air in water and wastewater treatmente”, *Water Science and Tecnology*, vol. 31,num.3-4,37-47.

Galil,N.M. y Wolf, D. (2001), “Removal of hydrocarbons from petrochemical waster by dissolved air flotation”, *WaterScience &Technology*, vol.43,num.8, 107-113.

Green, R. H. (Reimpresión 2001), Manual del Ingeniero Qímico, Madrid, España: McGraw-Hill/Interamericana de España, Tomo 4, 578-687.

Haarhoff, J. y Van Vuuren, L. R. J. (1995), “Design parameters for disolved air flotation in South Africa”, *Water Science and Technology*, vol.31,num3-4, 203-212.

Hammer, M.J. y Hammer, M.J. Jr. (2001), *Water and wastewater technology*, New Jersey, Editorial Prentice Hall, 4ta. Ed.

Han, M. et al. (2001), “Collision efficiency factor of bubble and particle (α_{bp}) in DAF: theory and experimental verification”, *Water Science and Technology*, vol.43, num.8, 139-144.

IMP. (2010), Instituto Mexicano del Petróleo. México, Distrito Federal: Proyecto , 450-497.

Jiménez, C. (2001), *La contaminación ambiental en México: causas, efectos y tecnología apropiada*. México, Edit. Limusa, Colegio de Ingenieros Ambientales de México, A.C., Instituto de Ingeniería de la UNAM y FEMISCA, 926 pp.

Jokela, P. y Keskitalo, P. (1999), “Plywood mil wáter system closure by dissolved air flotation treatment”, *Water Science and Technology*, vol.40, num 11-12, 33-41.

Kemmer, F. N. y McCallion, J. (1993), "Manual del agua, su naturaleza, tratamiento y aplicaciones", Trad. Espinosa, M. E. Y Medina, F. M., Nalco Chemical Company, vol 1 y 2.

Kent, J. A. (1984), "Manual de Riegel de química Industrial". México: Edit. CECSA, 948.

Khorassani, H. E. et al. (2000), “Minimisation strategy of petrochemical wastewater organic load”, *Water Science and Technology*, vol.42, num 5-6, 15-22.

Kiuru H.J. (2001), “Development of dissolved air flotation technology from the first generation to the newest (third) one (DAF in turbulent flow conditions)”, *Water Science and Technology*, vol.43, num.8,1-7.

Klute, R. et al. (1995), “Optimization of coagulation processes prior to DAF”, *Water Science and Technology*, vol.31, num3-4, 59-62.



Krofta, M. et al. (1995), “An attempt to understand dissolved air flotation using multivariate data analysis”, *Water Science and Technology*, vol.31,num.3-4,191-201.

Lamas, R. R. (1999), Ventajas competitivas: Tecnológicas, operativas y financieras de los sistemas primarios de tratamiento de efluentes por flotación (FAD), con respecto a los de sedimentación”, *Diplomado en ingeniería de procesos para tratamientos de aguas*, Universidad Autónoma de Guadalajara.

Laredo, C. G. (2002), “Estudio de la composición química de aceite ciclico ligero proveniente de crudos Mexicanos”, *Journal of the Mexican Chemical Society*, vol.33, 4-6.

Luthy, G. et al. (1978), “Removal of emulsified oil with organic coagulants and dissolved air flotation”, *Journal Water Pollution, Control Federation*, vol.5, num.1-4, 331-347.

Mendenhall, W. (1987), *Introducción a la probabilidad y a la estadística*, Trad. Segami, C., México, Grupo Editorial Iberoamérica, 626.

Metcalf & Eddy, Inc. (2003), “Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización”, Trad. Trillo, J de D., México, Edit.McGraw-Hill, vol.1,1485.

Mijaylova, Nacheva P. et al. (2001), *Tratamiento primario de las aguas residuales de la refinería Madero*, México, Proyecto IMTA-PEMEX.

Mijaylova Nacheva P, Ramírez Camperos E, Sandoval Yoal L, Cuevas Aragón D, Sánchez Castañeda L, Estrada Arriaga E, Gutiérrez Macias T, Miranda Mandujano E. (2011), *Elaboración de las bases de diseño para la remodelación del tratamiento primario de las aguas residuales aceitosas en la Refinería “Gral. Lázaro Cárdenas” de Minatitlán, Veracruz. Informe de proyecto TC1037.3, IMTA.*

Montgomery, D.C. (1991), *Diseño y análisis de experimentos*, México, Grupo Editorial Iberoamericana, 590.

Muhammad, H. et al. (1999), “Coagulation of polymeric wastewater discharged by a chemical factory”, *Wat. Res.*,vol.33,num.2,521-529.

Nickols, D. et al. (1995), “The first DAF water treatment plan in the United State”, *Water Research*, vol.31, num.3-4, 239-246.

Odegaar, H. (1995), “Optimization of flocculation/ flotation in chemical wasterwater treatment”, *Water Science and Technology*, vol.31, num.3-4,73-82.

Offringa, G. (1995), “Dissolved air flotation in Southern Africa”, *Water Science and Technology*,vol.31,num.3-4, 159-172.

Ostle. B. (1979), *Estadística aplicada*, México, Editorial Limusa, Sexta reimpresión, 629.

PEMEX. (2008), *Manifestación del Impacto Ambiental. Minatitlán, Veracruz: Proyecto Reconfiguración de la Refinería de Minatitlán*,745-823.



Perry, R. H. (2001), Manual del Ingeniero Químico, Madrid: McGraw-Hill/ Interamericana de España, Tomo 4, 578-687.

Pomb F., Magrini A. y Szklo A. (1998), Technology roadmap for wastewater reuse in petroleum refineries in Brazil, Brazil: Edit. Environmental Management in practice, Energy Planning Program Brazil, Federal University of Rio de Janeiro, 425-448.

Rodríguez, E. A. (2007), Diseño de procesos en Ingeniería Química, Instituto Mexicano del Petróleo & Instituto Politécnico Nacional, México, Distrito Federal, 256-275.

Sartori, L. y. (1997), Disminución de la dosis de coagulante primario a través de la aplicación de polímeros sintéticos en la flotación de aguas para abastecimiento. Editorial ABES, 365.

Sawyer, C. N., McCarty, P. L. y Parkin, G.F. (1994), Chemistry for environmental engineering, Singapore, Editorial Mc Graw Hill, Ediciones Internacionales, 4ta. Ed.

Schofield T. (2001), “Dissolved air flotation in drinking water production”, Water Science and Technology, vol.43, num.8,9-18.

STATISTICA 8.0 StaSoft, 2001.

Standard Methods (1992), For examination of water and wastewater, EUA, 18va. Ed.

Tapia, A. y Cazarez, R.E. (2000), “Comparación de los métodos cinéticos para la flotación con aire disuelto”, *Ingeniería y Ciencias Ambientales*, num.46, Año 12, 11-20.

Valdés, E. P. (2009), La Refinación en Petroleos Mexicanos, Comité Nacional de Estudios de la Energía A.C., México, Distrito Federal, 897-912.

Vallance, B. C. et al. (1995), “Consideration of DAF retrofit to a large conventional water treatment plant”, Waste Science and Technology, vol.31, num.3-4, 93-101.

Zajic, J.E. (1972), Water pollution disposal and reuse: in two volumes, Canadá, Ed. University of Western Ontario, vol.2, cap.27, 507-523.



ANEXO A.- Hojas Técnicas de Coagulantes y Flocculantes.

1. IDENTIFICACIÓN DEL FABRICANTE Y DE LA SUSTANCIA QUÍMICA

- Nombre de la compañía: **Kemira de México, S.A. de C.V.**
Carr. Xoxtla-Tlaltenango s/n
San Miguel Analco Nativitas, Tlaxcala
Tel. 01 (222) 281 5336
Fax. 01 (222) 281 5366
e-mail: mexico@kemira.com
- Teléfono de emergencia (SETIQ): 01 (800) 0021 400
- Nombre del Producto: **Kemira ALC2-5**
Sinónimos: Coagulante primario
Nombre químico: Sulfato de aluminio sólido,
Familia química: Sales inorgánicas de aluminio
Formula química: $Al_2(SO_4)_3 \cdot 14H_2O$

2. COMPOSICIÓN, INFORMACIÓN SOBRE INGREDIENTES

Componentes	No. CAS	Contenido (%)	Símbolo	Frases - R
• Sulfato de aluminio	10043-01-3	90 - 100	Xi	41
• Agua	7732-18-5	0 - 10	NA	NA

3. IDENTIFICACIÓN DE RIESGOS O EFECTOS A LA SALUD

- Ingestión accidental: Puede causar dolor abdominal, náuseas y vómito. Las soluciones concentradas (sobre 20% de concentración) pueden causar quemaduras en la boca, sangrado en el estómago, incoordinación, espasmos musculares y daño en los riñones.
- Inhalación: El polvo de sulfato de aluminio forma ácido sulfúrico cuando entra en contacto con el agua o tejidos; puede causar sequedad en la garganta. Las concentraciones altas pueden causar congestión y constricción de las vías respiratorias.
- Piel (contacto y absorción): Puede causar irritación de severa a moderada. Las soluciones concentradas son corrosivas y pueden dar como resultado severas quemaduras y cicatrices permanentes.
- Ojos: El polvo puede causar irritación de moderada a severa. Las soluciones concentradas son corrosivas

4. EMERGENCIA Y PRIMEROS AUXILIOS

- Contacto con los ojos: Lave inmediatamente con agua tibia, durante por lo menos 20 - 30 minutos, manteniendo separados los párpados, debe usar una solución salina sin interrumpir el ciclo de lavado. Tenga cuidado de no enjuagar con agua contaminada los ojos. Si la irritación persiste repita los lavados, transporte a la víctima rápidamente a un centro de atención médica.
- Contacto con la piel: Lave la zona de contacto con agua tibia por lo menos durante 20 - 30 minutos sin interrumpir, si la irritación persiste repita el lavado y acuda a un médico.
- Ingestión: No administre nada por vía oral a una víctima que este inconsciente o convulsionando. Enjuague la boca con agua. No induzca el vómito, de tomar agua, llame al médico.
- Inhalación: Mueva a la persona afectada al aire fresco. Tome un descanso.

5. RIESGOS DE FUEGO Y EXPLOSIÓN

- Materiales o medios de extinción: No es flamable por si solo, use el material adecuado para las condiciones locales.
- Peligros específicos: El calentamiento arriba de la temperatura de descomposición libera gases tóxicos como óxidos de sulfuros (SO_x).

- Equipo de protección para bomberos: Exponerse a los productos de la descomposición puede ser peligroso para la salud. Usar aparato respiratorio autónomo y traje de protección contra salpicaduras.

6. FUGA, DERRAME O LIBERACIONES ACCIDENTALES

- Precauciones personales: Evite la formación de polvo, use ropa de protección adecuada de acuerdo a la sección 8. Asegúrese de tener la ventilación adecuada, en caso de ventilación insuficiente proporcione el equipo de respiración adecuado.
- Precauciones ambientales: No permita que el producto entre al drenaje, no permita que el producto dañe el medio ambiente.
- Métodos de limpieza:
 - Sobre tierra: Cubra el derrame con un material absorbente e inerte, barra y recoja en un contenedor dispuesto como basura, lave el área con agua. Diluya los residuos con agua y neutralice con cal.
 - Sobre agua: Informe a la policía, servicios de emergencia y/o bomberos.

7. MANEJO Y ALMACENAJE

- Advertencia de manejo: Evite la formación de polvo durante el manejo, asegúrese de tener la ventilación adecuada, en caso de ventilación insuficiente proporcione el equipo de respiración adecuado. Use el equipo de protección personal de acuerdo a la sección 8. El lugar y los métodos de trabajo deben ser organizados de tal forma que el contacto directo con el producto sea prevenido o minimizado. Asegúrese de que lava ojos y regaderas de seguridad estén cerca de las estaciones de trabajo, el producto es higroscópico existe peligro de resbalamiento.
- Condiciones de almacenamiento: Evite la humedad, almacene en lugares secos y frescos. Se recomienda almacenar en su empaque original. Los materiales de empaque recomendables son plástico (polietileno PE, polipropileno PP, policloruro de vinilo PVC), fibra de vidrio reforzada con poliéster, concreto cubierto con una capa epoxi, titanio, acero cubierto con caucho o a prueba de ácidos.
- Medidas de protección técnica: Maneje el producto de acuerdo a las buenas prácticas de seguridad e higiene industrial.
- Productos incompatibles: Alcalis, evite el contacto con acero puro o superficies galvanizadas.

8. CONTROLES DE EXPOSICIÓN

- Límites de exposición ocupacional
 - TLV-TWA (EU): 2 mg Al/m³
 - PEL -TWA: 2 mg Al/kg
 - MAK (DE): 6 mg/m³
- Medidas para reducir la exposición: Asegúrese de tener la ventilación adecuada, evite el contacto con la piel, ojos y ropa. Debe diseñar el área de trabajo y los procedimientos para prevenir el contacto directo con el producto e inhibir el polvo y/o salpicaduras.
- Equipo de protección personal
 - Medidas higiénicas: Lávese las manos de inmediato después de haber manejado el producto. Cerciórese de que el lava ojos y las regaderas de seguridad estén cerca del lugar de trabajo. Maneje de acuerdo con las buenas prácticas de higiene y seguridad industrial.
 - Ojos: Careta o gafas de seguridad, equipo lava ojos.
 - Piel y cuerpo: Traje protector, proteger contara salpicaduras: usar delantal y botas.
 - Manos: Guantes impermeables de PVC y neopreno. No están disponibles pruebas de permeabilidad para este producto, los guantes deben ser remplazados de inmediato si existe alguna indicación de degradación o ruptura química.
 - Respiratoria: Mascarilla con filtro P2, en caso de ventilación insuficiente, use el equipo de respiración adecuado.

9. PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS

Estado físico:	Sólido blanco lustroso
Olor:	No significativo
pH:	> 2.8 (sol. acuosa 1 g/mL)
Temperatura de ebullición:	No aplica
Temperatura de fusión:	86 °C con descomposición (hidrato); 770 °C con descomposición (anhidro)
Temperatura de inflamación:	No aplica
Temperatura de autoignición:	No aplica
Temperatura de descomposición:	770 °C
Densidad relativa:	910 kg/m ³
Densidad de vapor:	No aplica
Velocidad de evaporación:	No aplica
Solubilidad en agua:	28 g/100 mL a 25 °C (anhidro); 87 g/100 mL a 0 °C (hidrato)
Presión de vapor:	No aplica
Volatilidad:	No aplica
Flamabilidad (sólido, gas):	No aplica
Coefficiente de partición (n-octanol/agua):	No aplica, compuesto inorgánico.

10. ESTABILIDAD Y REACTIVIDAD

- Estabilidad: Estable a condiciones normales por 2 años.
- Condiciones a evitar: La corrosión puede aparecer en contacto con la humedad, la humedad o el contacto con agua puede causar la formación de piedras o terrones. Incompatible con álcalis.
- Materiales a evitar: Evite el contacto con aluminio, estaño, zinc, hierro, aleaciones que contengan estos metales y superficies galvanizadas.
- Producto peligroso de descomposición: La descomposición térmica produce dióxido de azufre, trióxido de azufre.

11. INFORMACIÓN TOXICOLÓGICA

- Toxicidad aguda
 - Oral DL₅₀, rata: > 5,000 mg/kg
 - Dermal DL₅₀, conejo: > 5,000 mg/kg
 - Intraperitoneal DL₅₀, ratón: 270 mg/kg
 - Inhalación CL₅₀, rata: 2 - 4 mg Al/kg
- Irritación primaria: El polvo y/o salpicaduras irrita las membranas mucosas, ojos y aparato respiratorio.
- Sensibilidad: De acuerdo a experiencias la sensibilización no es esperada.
- Periodo prolongado de toxicidad: No disponible
- Pruebas en humanos: Tos y dificultades para respirar. El contacto prolongado o repetido con la piel puede causar irritación. El contacto con los ojos causa irritación y lagrimeo. Riesgo de daños serios en los ojos. La ingestión puede provocar náuseas, vómito, irritación de la boca y dolor de estómago.

12. INFORMACIÓN ECOLÓGICA

- Persistencia y degradabilidad: Los métodos para determinar la degradabilidad biológica no aplican para sustancias inorgánicas. Degradabilidad química: cuando la reacciona con agua forma precipitados de hidróxido de aluminio.
- Bioacumulación: Coeficiente de partición n-octanol/agua: no aplica, compuesto inorgánico. No se espera que el sulfato de aluminio sea bioacumulado.
- Movilidad: Soluble en agua: 940 kg/m³ (25 °C)
- Efectos ecotóxicos: La exposición aguda al sulfato de aluminio puede producir irritación en piel y ojos. La inhalación de polvo sulfato de aluminio puede causar irritación al aparato respiratorio.
 - Dania Reiro, CL₅₀, 96 hr: 1000 mg/L
 - Gambusia affinis, CL₅₀, 48 hr: 69 mg/L
 - Daphnia magna, CE₅₀, 48 hr: > 160 mg/L

- | | |
|---|--|
| Algea CI_{50} , 72 hr: | No aplica debido al fósforo en el crecimiento del alga, se precipita por las sales de aluminio y porque los iones de aluminio son enmascarados por los agentes complejos en el crecimiento del alga (opinión de expertos). |
| Protozoa (microregma), CE_{50} , 48 hr: | 12 mg/L |
| • Toxicidad para otros organismos: | No disponible |
| • Otros efectos adversos: | Pueden reducir el pH del agua y ser dañinos a organismos acuáticos. |

Dentro del rango del pH 5.0 – 5.5, los iones de aluminio pueden ser dañinos a la especie de salmón. Las sales de aluminio no se deben liberar a ríos y lagos de manera incontrolada, las variaciones de pH de alrededor de 5.0 – 5.5 deben evitarse. En los valores de pH las sales de aluminio neutras no son dañinas a los peces.

Esta sustancia no se clasifica como peligrosa para el medio ambiente.

13. CONSIDERACIONES SOBRE LA DISPOSICIÓN

- Residuos del producto: Diluir con agua y neutralizar con cal polvo de cal. Clasificar como desecho peligroso. Disponer de acuerdo con las normas y/o reglamentos locales y nacionales.
- Embalajes contaminados: Disponer como basura especial de acuerdo con las normas y/o reglamentos locales y nacionales.

14. INFORMACIÓN SOBRE EL TRANSPORTE

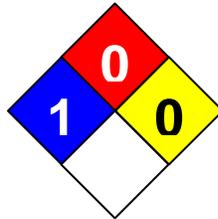
Información sobre embarque internacionales

- Transporte terrestre
 - Clase de peligro: No aplica
 - Grupo de empaque: No aplica
 - Etiqueta ADR-RID/SCT: No esta clasificado como producto peligroso de acuerdo a las normas de transportación.
 - Rotulo de transporte exigido: Ninguno exigido
- Transporte marítimo
 - Clase de peligro: No aplica
 - Grupo de empaque: No aplica
 - Etiqueta IMO-IMDG: No esta clasificado como producto peligroso de acuerdo a las normas de transportación.
 - Rotulo de transporte exigido: Ninguno exigido
- Transporte aéreo
 - Clase de peligro: No aplica
 - Grupo de empaque: No aplica
 - Etiqueta ICAO/IATA: No esta clasificado como producto peligroso de acuerdo a las normas de transportación.
 - Rotulo de transporte exigido: Ninguno exigido

15. INFORMACION SOBRE LA REGLAMENTACIÓN

- Etiquetado de acuerdo a las directrices de la UE
 - Símbolo de peligro: **Xi** (irritante)
 - Contiene: Sulfato de aluminio
 - Frases - R: **R 41** Riesgo de serio daño a los ojos.
 - Frases - S: **S 22** No se respire el polvo
S 26 En contacto con los ojos, enjuague inmediatamente con suficiente agua, es aconsejable buscar a un médico.
S 37/39 Usar los guantes que sean convenientes de caucho o plástico y protección para ojos y cara.
- No. de CAS: 010043-01-3
- No. ONU: No regulado
- No. IENECS: 233-135-0

- Código NFPA:



1	SALUD
0	INFLAMABILIDAD
0	REACTIVIDAD
	RIESGO ESPECÍFICO
F	EQUIPO DE SEGURIDAD

16. OTRA INFORMACION

- Otras regulaciones: El producto se clasifica y etiqueta de acuerdo las directivas de la comunidad europea o las leyes nacionales respectivas.
- Uso recomendado: Tratamiento químico del agua
- Bibliografía consultada: Normas, bases de datos, literatura y pruebas propias.
- Cumplimiento de normatividad: Esta hoja de seguridad cumple con las normas Oficiales Mexicanas sobre Seguridad e Higiene. NOM-018-STPS-2000, NOM-114-STPS-1994.

La información en esta hoja de seguridad es proporcionada de buena fe y con el conocimiento nuestro en la fecha de su aplicación. La información anteriormente dada es emitida como guía para el manejo seguro en el uso, proceso, almacenamiento, transportación, disposición y descarga; no será considerada una garantía o especificación de calidad, puesto que las condiciones de funcionamiento están más allá de nuestro control. La información solo concierne al material específico indicado y no es válida para este material usado en combinación con cualquier otro material o en cualquier proceso no especificado en el texto. Kemira de México, S.A. de C.V. no se responsabiliza por pérdidas o daños que sean resultado del uso inapropiado de esta información.

Kemira ALC 2-5 es un sulfato de aluminio libre de hierro en presentación polvo granulado de fácil disolución basado en aluminio trivalente, es un coagulante eficiente para el tratamiento de agua potable y residual; tanto municipal como industrial.

Kemira ALC 2-5 es un coagulante de aluminio con muy bajo contenido de hierro usado también en el proceso de encolado en la industria de papel.

Especificación del Producto

Análisis Típico

Apariencia	Polvo granular blanco
Aluminio	8.9% min.
Alumina (Al ₂ O ₃)	16.9% min.
Insolubles	0.5% máx.
Alumina libre	0.5% máx.
Hierro (Fe ₂ O ₃)	≤ 100 mg/kg
Granulometría:	
Malla No. 4	Pasa 100%
Malla No. 10	Pasa 90% min.

Características del Producto

Análisis Típico

Sulfatos	45.52% min.
pH al 1%	2.80 min.

Elementos Traza/Sustancias Tóxicas

Análisis Típico

Arsénico (As)	< 1.0 mg/kg ALC 2-5
Cromo ⁺⁶ (Cr ⁺⁶)	< 1.0 mg/kg ALC 2-5
Plomo (Pb)	< 1.0 mg/kg ALC 2-5

Nota: 1 mg/kg = 1 ppm



La información en esta publicación es proporcionada como una guía y se cree que es exacta y confiable a partir de la impresión. Los valores mostrados no serán considerados como una garantía y ellos están sujetos a cambios sin previo aviso. Para información adicional concerniente a nuestros productos o acerca de las especificaciones actuales, por favor contacte a nuestro Servicio Técnico

Almacenaje

Puede ser almacenado a temperatura ambiente en su empaque original, no debe ser almacenado en forma diluida.

Dilución y Dosificación

Puede dosificarse en forma seca o como solución. Se recomienda el uso de bombas de diafragma de material no corrosivo para la dosificación. Una manera fácil de decidir la concentración correcta es con el uso de un hidrómetro.

Manejo Seguro

Kemira ALC 2-5 irrita los ojos y el sistema respiratorio. Si se maneja en polvo, use la protección conveniente. *Nota:* La información dada se considera general, para mejor información consulte la Hoja de Datos de Seguridad del producto. En caso de emergencia en el transporte contactar al **SETIQ** las 24 hr al tel. 01-800-0021-400.

Entrega

En supersacos de 1,000 kg; además de sacos laminados de 50 y 25 kg.

Calidad

Kemira ALC 2-5 para uso en Agua Potable esta certificado bajo el Estándar **NSF/ANSI 60** (en base a la evaluación de datos sobre efectos en la salud, el nivel máximo permisible de aluminio en el agua potable no debe exceder 2.0 mg/L). Además está certificado ante **CERTIMEX** de acuerdo a la norma **NMX-AA-122-SCFI-2006** Potabilización del agua para uso y consumo humano. Kemira ALC 2-5 cumple con la Norma Europea **EN 878** para productos químicos utilizados en el tratamiento del agua potable.

Producción y Ventas

Kemira ALC 2-5 es producido en varios países en plantas de Kemira. Ventas en México y Centro América a través de Kemira de México, S.A. de C.V.



LARKEM QUIMICA, S. DE RL

Calidad, Tecnología e Innovación en Productos Químicos

LARKFLOC 5100C *Floculante*

INFORMACION TECNICA

DESCRIPCION GENERAL

LARKFLOC 5100-C es un producto floculante líquido de carga catiónica muy efectivo como rompedor de emulsiones aceite - agua, recomendado también para el tratamiento de agua que contenga residuos de pintura de aceite. **LARKFLOC 5100-C** ha sido desarrollado para el tratamiento de aguas residuales y es muy efectivo en la remoción de colorantes y excelente como rompedor de emulsiones.

LARKFLOC 5100-C se aplica directamente o diluido con agua limpia en proporción 5:1 . Se recomienda agregar en puntos de alta turbulencia para rápido mezclado.

DOSIFICACIÓN (Producto concentrado)

- **aguas residuales** 100 -1000 ppm (mg/Lt)
- **aguas aceitosas** 800 - 3000 ppm
- **Procesos pintura** 200 - 1000 ppm (aplicado en el agua recirculante)

VENTAJAS:

- Es de fácil aplicación, con Ahorro en costos por bajo nivel de dosificación
- Se obtiene buena formación de floc en tamaño y densidad
- Produce poco lodo con alta densidad, los que facilita su disposición
- Evita que la pintura contenida en aguas residuales provoque taponamientos.
- En procesos de clarificación se obtiene efluente de calidad con reducción de turbidez y sólidos en suspensión

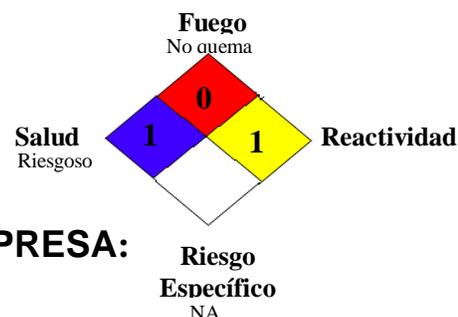
CARACTERISTICAS TIPICAS:

Apariencia/color	Líquido viscoso cristalino
Olor	Característico
Densidad a 25°C	1.15- 1.20 g/ml
pH	3.5 – 4.0
Solubilidad en Agua	Completa en agua limpia

LARKEM QUIMICA, S. DE RL

Calidad, Tecnología e Innovación en Productos Químicos

Grado de Riesgo



HOJA TECNICA Y DE SEGURIDAD

SECCION I. IDENTIFICACION DEL PRODUCTO Y LA EMPRESA:

Empresa: Larkem Química S. de R.L.

Dirección: De la Cima 3221, Col. Cumbres, Monterrey, N.L.

Teléfono y Fax : (81) 84 00 80 66 y 83 00 49 05, Fax en EUA (801) 457-6600

E- mail : misaeldr@prodigy.net.mx

Nombre del Producto: LARKFLOC 5100-C

Código LARKEM : : PA135

Elaboró : Gerencia Técnica

Fecha de elaboración 03/ Enero/2005

Fecha de Ultima Revisión 12/Marzo/2010

SECCION II. COMPONENTES /INFORMACION DE IDENTIDAD

Componentes:

Mezcla de polimeros floculantes cationicos

SECCION III. CARACTERISTICAS FISICOQUIMICAS:

Apariencia/color	Líquido viscoso cristalino
Olor	Característico
Densidad a 25°C	1.15- 1.20 g/ml
pH	3.5 – 4.0
Solubilidad en Agua	Completa en agua limpia

LARKEM QUIMICA, S. DE RL

Calidad, Tecnología e Innovación en Productos Químicos

SECCION IV :DATOS DE RIESGO DE EXPLOSION E INCENDIO Y MEDIDAS DE EXTINCIÓN

Temperatura de Inflamación	No Flamable.
Medios de Extinción:	CO ₂ , Espuma, Polvo Químico Seco.
Procedimiento especial de Extinción:	Usar respiradores autónomos
Del Fuego	La descomposición térmica produce gases irritantes. Enfriar con agua envases de producto

SECCION V :DATOS DE REACTIVIDAD

Estabilidad :	Estable (X) Inestable ()
Incompatibilidad :	Agentes alcalinos
Riesgos de descomposición del producto	Ninguno
Riesgos de Polimerización:	Ocurre () No Ocurre (X)
Condiciones a evitar	No mezclar con alcalinos

SECCION VI :DATOS DE RIESGOS A LA SALUD

Rutas de Entrada:	Ojos: Primaria Piel: Primaria Ingestión: No esperada
Riesgos a la salud:	
Agudo:	Posible irritación en la piel a contacto Irritación ligera de mucosa nasal.
Signos y Síntomas de Sobre-Exposición	Puede causar irritación en la mucosa nasal ocular, piel Irritación ligera en piel y del tracto digestivo

LARKEM QUIMICA, S. DE RL

Calidad, Tecnología e Innovación en Productos Químicos

Procedimientos de Primeros Auxilios Y Emergencias

Ojos :	Lave con agua 15 minutos, si el ardor Persiste. Consulte a su médico
Piel:	Lave con jabón y agua: si la irritación persiste Obtenga atención médica. Si tiene contacto con la ropa, lave antes de usar
Inhalación:	Remueva a la persona a aire fresco:
Ingestión	No induzca el vomito. Obtenga atención médica. inmediata.

SECCION VII :PROCEDIMIENTOS EN CASO DE FUGA O DERRAME ACCIDENTAL

Evítese el ingreso directo en alcantarillas. Recójase el líquido derramado para confinación, puede absorberse con materiales inertes y colocar en tambores cerrados marcados como material residual a disposición.

SECCION VIII :PRECAUCIONES PARA MANEJO Y ALMACENAMIENTO

Precauciones a tomar en el manejo y almacenamiento del producto:

- Guardar en contenedores cerrados y correctamente identificados
- Almacenar en un lugar fresco, seco y bajo techo.

Otras Precauciones:

- Lave la ropa contaminada a mano, antes de reutilizarse
- No reuse el tambor o contenedor para otros fines.

LARKEM QUIMICA, S. DE RL

Calidad, Tecnología e Innovación en Productos Químicos

SECCION IX : MEDIDAS DE CONTROL A LA EXPOSICION Y PROTECCION PERSONAL

Protección de los ojos: Use lentes de seguridad

- Otro equipo Estación lavaojos, Regadera de emergencia.

Guantes de protección: Use guantes de hule, Neopreno

Protección respiratoria: Mascarilla

Ventilación: Local

Natural: Usualmente suficiente Especial : No Aplica

SECCION X : INFORMACION TOXICOLOGICA

Referencia en la Sección VI.

SECCION XI : INFORMACION ECOLOGICA

Evítese los derrames, referencia en la Sección VII

SECCION XII : METODO DE DISPOSICION DE RESIDUOS

El material residual debe de ser marcado como residuo peligroso y confinado de acuerdo a la reglamentación vigente en el lugar de uso, para este tipo de productos peligrosos.

Kemira OPTIFLOC C-1288 es una poliacrilamida catiónica de alto peso molecular en presentación sólida. Es un floculante eficiente en los procesos de separación líquido-sólido para una amplia gama de industrias, usado generalmente como ayuda de coagulación o agente acondicionante de lodos.

OPTIFLOC C-1288 es fácilmente soluble en agua y efectivo a bajas dosis además funciona en un amplio rango de pH logrando una eficiente remoción de sólidos.

Características Del Producto

	Análisis Típico
Apariencia	Polvo granular blanco
Grado de carga	Alta
Peso molecular rel.	Muy alto
Densidad a granel	750 ± 50 kg/m ³
pH (0.5%, 25 °C)	3.0 - 5.0
Viscosidad (Brookfield a 25 °C):	
0.10%	200 cP
0.25%	400 cP
0.50%	900 cP
1.00%	2200 cP

Características Del Producto

	Análisis Típico
Insolubles peso/peso	2.0 % máx.
Acrilamida residual	999 ppm máx.
Viscosidad estándar	3.8 - 4.5 cP
Sólidos totales	87.0 % min.



Almacenaje

El producto sólido puede ser almacenado en su empaque original hasta 12 meses en una atmósfera seca y a una temperatura menor a los 40 °C. Las soluciones preparadas no son más corrosivas que el agua y los materiales recomendados para el almacenamiento y preparación de soluciones incluyen acero inoxidable, fibra de vidrio, plástico o tanques con recubrimientos epóxicos o de vidrio.

Dilución y Dosificación

La solución madre puede ser preparada con una concentración de hasta 0.5 % en peso usando una unidad de dilución automatizada o por lotes. La solución se debe dejar añejar de 30 a 60 minutos para lograr la máxima eficacia. El agua de dilución secundaria debe añadirse a la solución madre justo antes del punto de dosificación, en una proporción al menos de 10:1. Se deben evitar bombas centrífugas en la transferencia de polímeros.

Manejo Seguro

El producto puede irritar los ojos y la piel. Al manipularlo, se recomienda utilizar guantes de caucho, lentes de seguridad y ropa adecuada. No muestra toxicidad aguda en administración oral en animales de laboratorio, aunque muestra capacidad para irritar los ojos. Consulte con los datos completos de seguridad, higiene y medio ambiente en la hoja de seguridad. En caso de emergencia en transporte contactar al **SETIQ** las 24 hr al tel. 01-800-0021-400.

Entrega

Bolsas de polietileno de 25 kilogramos.

Producción y Ventas

Los polímeros Kemira OPTIFLOC son producidos en Estados Unidos, Finlandia, Tailandia y China. Ventas en México y Centro América a través de Kemira de México, S.A. de C.V.

La información en esta publicación es proporcionada como una guía y se cree que es exacta y confiable a partir de la impresión. Los valores mostrados no serán considerados como una garantía y ellos están sujetos a cambios sin previo aviso. Para información adicional concerniente a nuestros productos o acerca de las especificaciones actuales, por favor contacte a nuestro Servicio Técnico

03/10

1. IDENTIFICACIÓN DEL FABRICANTE Y DE LA SUSTANCIA QUÍMICA

- Nombre de la compañía: **Kemira de México, S.A. de C.V.**
Carr. Xoxtla-Tlaltenango s/n
San Miguel Analco Nativitas, Tlaxcala
Tel. 01 (222) 281 5336
Fax. 01 (222) 281 5366
e-mail: mexico@kemira.com
- Teléfono de emergencia (SETIQ): 01 (800) 0021 400
- Nombre del Producto: **Kemira PAX-XL60S**
Agente coagulante

2. COMPOSICIÓN, INFORMACIÓN SOBRE INGREDIENTES

- Nombre químico: Polihidroxocloruro silicato de aluminio
 - Familia química: Sal polimerizada de clorhidratos y silicatos de aluminio
 - Fórmula general: $Al_n(OH)_mCl_{3n-m}$
- | Componentes | No. CAS | Contenido (%) | Símbolo | Frases - R |
|---------------------------|-----------|---------------|---------|------------|
| • Policloruro de aluminio | 1327-41-9 | ~ 96 | Xi | 36/37/38 |
| • Agua | 7732-18-5 | ~ 4 | NA | NA |

3. IDENTIFICACIÓN DE RIESGOS O EFECTOS A LA SALUD

- Ingestión accidental: Causa indisposición y vómito.
- Inhalación: Ligeros daños al sistema respiratorio.
- Piel (contacto y absorción): Puede producir irritación y enrojecimiento.
- Ojos: Causa irritación.

4. EMERGENCIA Y PRIMEROS AUXILIOS

- Contacto con los ojos: Limpie inmediatamente con abundante agua.
- Contacto con la piel: Lavar con abundante agua.
- Ingestión: Si es posible tomar leche o agua y consulte a un médico.
- Inhalación: Tomara aire fresco, descanso y conseguir ayuda médica.

5. RIESGOS DE FUEGO Y EXPLOSIÓN

- Materiales o medios de extinción: Use el material adecuado para los medios locales.
- Peligros específicos: Ninguno.
- Equipo de protección para bomberos: Use equipo de seguridad adecuado para situaciones con fuego.

6. FUGA, DERRAME O LIBERACIONES ACCIDENTALES

- Precauciones personales: Use la ropa de protección adecuada.
- Precauciones ambientales: No permita que el producto sea descargado al drenaje.
- Métodos de limpieza: Sobre tierra: Limpie con suficiente agua, si es posible neutralice con cal.
Sobre agua: Informe a la policía y/o bomberos.

7. MANEJO Y ALMACENAJE

- Advertencia de manejo: El producto es ligeramente higroscópico.
- Condiciones de almacenamiento: Almacene en lugares secos y frescos, se recomienda almacenar en su empaque original. Estabilidad de almacenamiento aproximadamente 2 años.
- Medidas de protección técnica: Maneje de acuerdo con las buenas prácticas de seguridad e higiene industrial.
- Productos incompatibles: Cloritos, hipocloritos, sulfitos.

13. CONSIDERACIONES SOBRE LA DISPOSICIÓN

- Residuos del producto: Destruir de acuerdo con las normas o reglamentos locales y nacionales.
- Empaques contaminados: Destruir de acuerdo con las normas o reglamentos locales y nacionales.

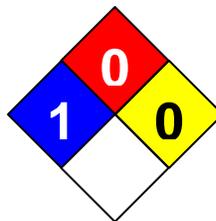
14. INFORMACIÓN SOBRE EL TRANSPORTE

Información sobre embarque internacionales

- Transporte terrestre
 - Clase de peligro: No aplica
 - Grupo de empaque: No aplica
 - Etiqueta ADR-RID/SCT: No esta clasificado como producto peligroso.
 - Rotulo de transporte exigido: Ninguno exigido
- Transporte marítimo
 - Clase de peligro: No aplica
 - Grupo de empaque: No aplica
 - Etiqueta IMO-IMDG: No esta clasificado como producto peligroso.
 - Rotulo de transporte exigido: Ninguno exigido
- Transporte aéreo
 - Clase de peligro: No aplica
 - Grupo de empaque: No aplica
 - Etiqueta ICAO/IATA: No esta clasificado como producto peligroso.
 - Rotulo de transporte exigido: Ninguno exigido

15. INFORMACION SOBRE LA REGLAMENTACIÓN

- Etiquetado de acuerdo a las directrices de la UE
 - Símbolo de peligro: **Xi** (irritante)
 - Contiene: Policloruro de aluminio
 - Frases - R: **R 36/37/38** Irritación de ojos, piel y sistema respiratorio.
 - Frases - S: **S 22** No respire polvo.
S 26 En contacto con los ojos enjuague inmediatamente con suficiente agua, es aconsejable buscare un médico
S 28 Después del contacto con la piel, lavar inmediatamente con suficiente agua.
S 36/37/39 Usar ropa de protección adecuada, además de guantes y careta.
- No. ONU: No aplica
- No. IENECS: 215-477-2
- No. de CAS: 1327-41-9
- Código NFPA:



1	SALUD
0	INFLAMABILIDAD
0	REACTIVIDAD
	RIESGO ESPECÍFICO
F	EQUIPO DE SEGURIDAD

16. OTRA INFORMACION

- Uso recomendado: Tratamiento químico del agua.

Esta hoja de seguridad cumple con las normas Oficiales Mexicanas sobre Seguridad e Higiene. NOM-018-STPS-2000, NOM-114-STPS-1994.

Kemira PAX-XL60S es un polihidroxiclورو silicato de aluminio en presentación sólida. Es un coagulante eficiente para el tratamiento de agua potable y residual; tanto municipal como industrial. PAX-XL60S se disuelve fácilmente en agua.

Kemira PAX-XL60S es un coagulante de aluminio prepolimerizado usado en dosis bajas, lo que reduce el volumen de lodos generados y la necesidad de ajustar el pH. Kemira PAX-XL60S también mejora la filtración del agua sedimentada; ofreciendo mayor tiempo entre retrolavados y una alta remoción de turbiedad, con menor consumo de alcalinidad.

Especificación Del Producto

	Análisis Típico
Apariencia	Polvo granulado amarillo pálido
Al ₂ O ₃	≥ 28.0%
Basicidad	45.0 – 85.0%
Insolubles	≤ 0.5%
pH (1% w/w)	3.5 – 5.0

Elementos Traza/Sustancias Tóxicas

	Análisis Típico
Arsénico (As)	≤ 0.0005% PAX-XL60S
Manganeso (Mn)	≤ 0.045% PAX-XL60S
Cromo (Cr)	≤ 0.0015% PAX-XL60S
Mercurio (Hg)	≤ 0.00002% PAX-XL60S
Plomo (Pb)	≤ 0.003% PAX-XL60S
Cadmio (Cd)	≤ 0.0006% PAX-XL60S

Almacenaje

Kemira PAX-XL60S es higroscópico, por lo tanto se recomienda almacenarlo en un lugar seco y fresco, mantenerlo en su empaque original hasta su uso.

Dilución y Dosificación

Kemira PAX-XL60S se disuelve fácilmente; tanto en lotes como en forma continua. Durante la dilución se requiere una buena agitación para evitar grumos. Para más detalles dirigirse a la hoja técnica "Como disolver PAX sólido de Kemira".

Inmediatamente después de la dilución se observa una turbiedad ligera.

Manejo Seguro

Usar ropa apropiada de protección, mascarilla de respiración, guantes y protección de ojos/rostro. En caso de emergencia en el transporte contactar al SETIQ las 24 hr al tel. 01-800-0021-400.

Entrega

Sacos laminados con membrete de 25 kg.

Calidad

Kemira PAX-XL60S para uso en Agua Potable esta certificado bajo el Estándar **NSF/ANSI 60** (el nivel máximo permisible de aluminio en el agua potable no debe exceder 2.0 mg/L). El producto sólido o cualquier solución del mismo cumple con la norma europea EN 883:1997 para productos químicos utilizados en el tratamiento del agua destinada al consumo humano, además cumple **ANSI/AWWA B408-03**: Liquid Polyaluminum Chloride de American Water Works Association; y la norma **NMX-AA-130-SCFI-2006** Potabilización del agua para uso y consumo humano "Policloruro de aluminio –Especificaciones y métodos de prueba".

Produccion y Ventas

Kemira PAX sólido es producido en Suecia y en China. Ventas en México y Centro América a través de Kemira de México, S.A. de C.V.



La información en esta publicación es proporcionada como una guía y se cree que es exacta y confiable a partir de la impresión. Los valores mostrados no serán considerados como una garantía y ellos están sujetos a cambios sin previo aviso. Para información adicional concerniente a nuestros productos o acerca de las especificaciones actuales, por favor contacte a nuestro Servicio Técnico

04/10

Superfloc[®] Serie C-490 PAMs catiónicas secas

La serie **Kemira SUPERFLOC C-490** son floculantes catiónicos altamente efectivos. Acondicionan con eficacia los sólidos para las operaciones de deshidratación y ayuda en los procesos de clarificación de agua en una amplia variedad de industrias. Estos floculantes muestran un excepcional desempeño en las separaciones sólido-líquido en un amplio rango de condiciones.

Aplicaciones

Estos productos pueden ser benéficos en cualquier proceso de separación sólido-líquido. Son especialmente recomendados para:

- Deshidratación en filtros banda, centrifugas y filtros prensa.
- Flotación por medio de aire disuelto.
- Filtración.
- Espesado.
- Clarificación del agua.

Beneficios

- El producto seco minimiza las necesidades de espacio de almacenamiento.
- Uso económico, eficaz a bajas dosis.
- Remoción de sólidos altamente eficaz.
- Eficaces en la remoción de sólidos.
- Efectivo en un amplio rango de pH, no modifica el pH del sistema.
- Mejora la producción de sólidos en la torta.

Seguridad e Higiene

Para una información completa en Seguridad, Salud y Medio Ambiente refiérase a la Hoja de Datos de Seguridad de Kemira antes del manejo de estos materiales.

Para información sobre el listado del Control del Inventario Químico, consulte la Hoja de Datos de Seguridad del producto.

Manipulación y Almacenamiento

Las soluciones no son más corrosivas que el agua y los materiales recomendados para la construcción de recipientes incluyen acero inoxidable, fibra de vidrio, plástico y recubrimientos epóxicos o de vidrio. No utilice hierro, cobre ni aluminio.

La vida útil de estos productos es de 24 meses cuando se almacenan en empaques sin abrir en atmósfera seca y a temperatura no superior a los 40 °C.

Los derrames de polímero son muy resbalosos, se deben absorber en un material inerte y recoger previamente antes de lavar a fondo con agua.

Dosificación del Producto

Las soluciones madre se pueden preparar a concentración de hasta un 0.5% a través de una unidad de preparación automatizada o por lotes. Las soluciones se deben dejar añejar de 30 a 60 minutos para lograr la máxima eficacia. Se debe utilizar agua de alta calidad. El agua de la dilución secundaria debe añadirse a la solución madre justo antes de preparar, en una proporción al menos 10:1. Se deben evitar bombas centrifugas en la transferencia de polímeros.

Distribución

Los productos de la serie **SUPERFLOC C-490** se distribuyen en sacos de 25 y 750 kg resistentes a la humedad.

PROPIEDADES TÍPICAS

Productos SUPERFLOC	<u>C-491</u>	<u>C-492</u>	<u>C-493</u>	<u>C-494</u>	<u>C-496</u>	<u>C-498</u>
Carácter químico	Poliacrilamida Catiónico					
Apariencia	Polvo granular blanco					
Carga relativa	Muy Baja	Muy Baja	Baja	Mediana	Alta	Muy Alta
Peso molecular	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto
Densidad a granel (kg/L)	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
pH solución al 0.5% (25 °C)	3.0 - 5.0	3.0 - 5.0	3.0 - 5.0	3.0 - 5.0	3.0 - 5.0	3.0 - 5.0
Viscosidad a 25 °C (cp / mPa.s)						
0.10%	60	80	100	130	150	170
0.25%	150	200	240	300	350	380
0.50%	350	450	500	600	700	800
1.00%	800	1000	1100	1400	1700	2000

*Nota: Estos productos están disponibles. Solicite a nuestro representante de Kemira información sobre otros productos que tal vez no se hayan mostrado aquí.

Normatividad

Estos productos pueden cumplir ciertos requisitos de Normatividad. Por favor contacte a su representante de ventas de Kemira para más detalles o consulte la hoja de información regulatoria apropiada.

La información y las declaraciones realizadas en este documento se consideran confiables, pero no se pueden entender como permiso, garantía, recomendación o representación mediante la cual asumamos ninguna responsabilidad legal. Nada de lo afirmado en este documento se puede considerar como permiso, inducción o recomendación para utilizar una invención patentada sin licencia. Los usuarios deben realizar una verificación y prueba suficiente para determinar el correcto uso y dosificación de nuestros productos para un propósito específico. Kemira se reserva el derecho de cambiar cualquier especificación sin previo aviso.

El símbolo ® indica una Marca registrada en los Estados Unidos y la ™ o * indica una marca comercial en los Estados Unidos. La marca también puede ser registrada, sujeta a una aplicación para su registro o una marca registrada en otros países.



ANEXO B.- Cotización de Coagulantes y Floculantes.

En la Tabla siguiente se observan los diferentes costos para cada uno de los coagulantes y floculantes utilizados para el desarrollo del trabajo de tesis.

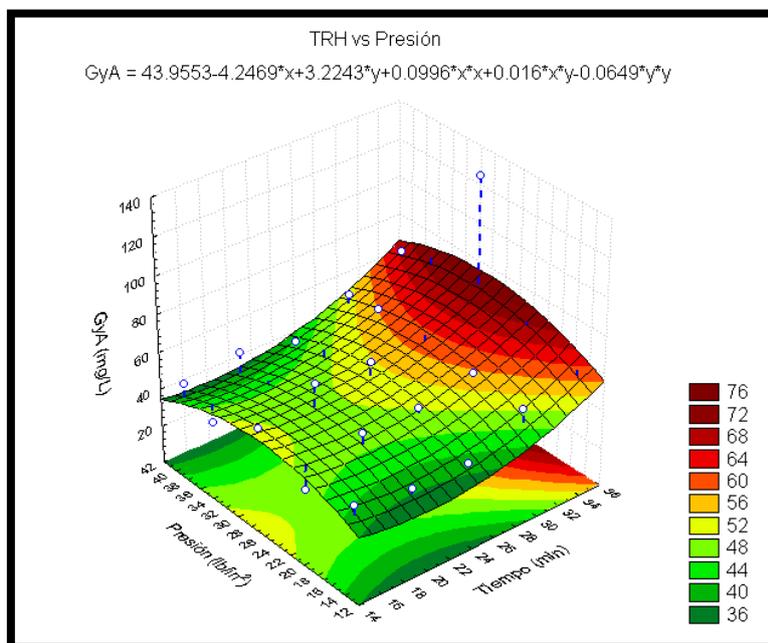
Reactivo Químico	Nuevo Nombre	Costo Por Kilogramo
SAS (Sulfato de Aluminio)	KEMIRA ALC 2-5	3.2 m.n/kg
PIX 111 (Cloruro férrico)	KEMIRA PIX-111	0.35 usd/kg
PIX 145 (Sulfato férrico)	KEMIRA PIX-106	0.33 usd/kg
PAX-16S	YA NO LO MANEJAN	
PAX 260S	KEMIRA PAX-XL60S	0.85 usd/kg
OPTIFLOC-C-1288	OPTIFLOC-C-1288	6.2 usd/kg
SUPERFLOC C-498	SUPERFLOC C-498	6.1 usd/kg
OPTICLOC-C-1781	OPTICLOC-C-1781	4.50usd/kg
OPTICLOC-C-1392	OPTICLOC-C-1392	No lo manejamos
OPTIFLOC-A-1638	OPTIFLOC-A-1638	4.00 usd/kg
FENNOLPOL-A-305	YA NO LO MANEJAN	
OPTIFLOC-AE-1488	OPTIFLOC-AE-1488	3.50 usd/Kg
SUPERFLOC-A-100	SUPERFLOC A-100	3.8 usd/kg
LARKFLOC 5100-C	LARKFLOC 5100-C	28.00 m.n/kg

Todos los productos son puestos en nuestra planta Nativitas Tlaxcala, no incluyen IVA.
Compras de contado, Crédito sujeto a aprobación del departamento de Finanzas.

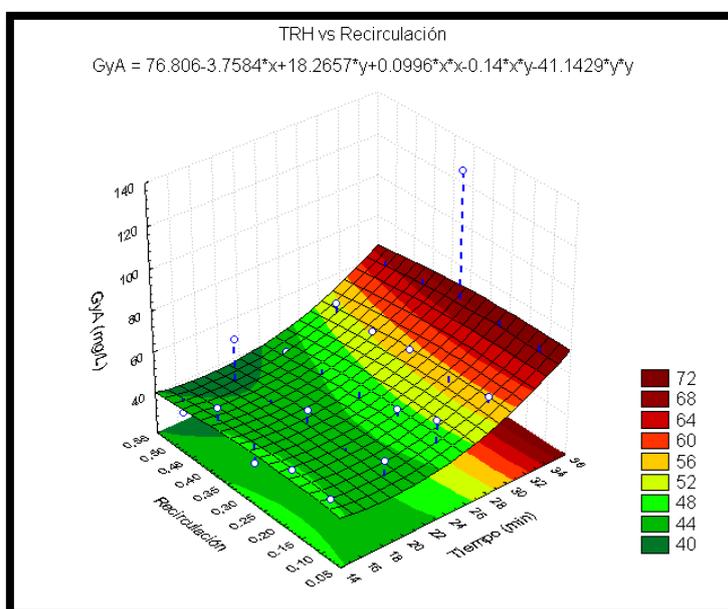


ANEXO C.- Análisis estadístico Floculación- DAF.

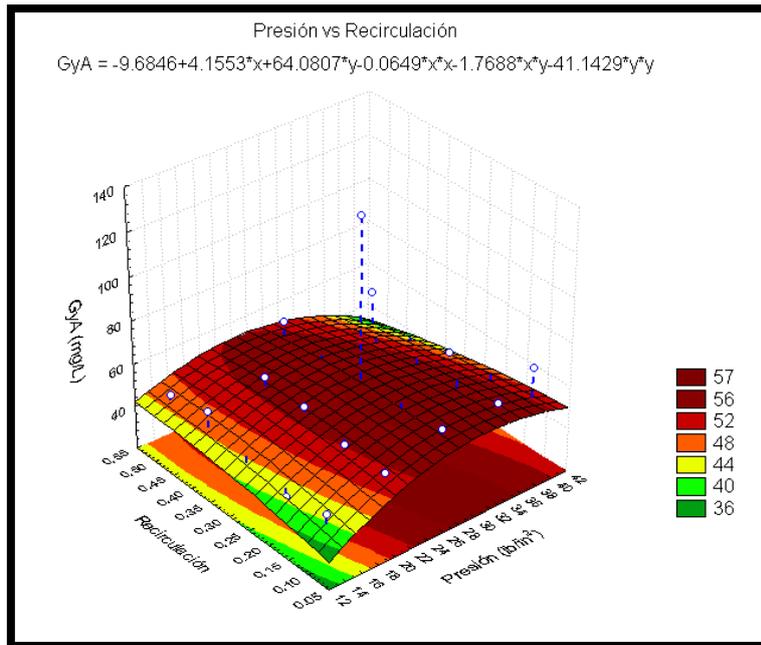
Los Gráficos y las Tablas que se presentan en este Anexo son el estudio completo del Análisis Estadístico Floculación-DAF, para evaluar este comportamiento se utilizó el programa estadístico STATISTICA 8.0, los mejores resultados se presentan en el apartado 5.3 Análisis estadístico Floculación-DAF.



Análisis de la variable GyA (mg/l) vs los factores TRH y Presión.



Análisis de la variable GyA (mg/l) vs los factores TRH y Recirculación.



Análisis de la variable GyA (mg/l) vs los factores Presión y Recirculación.

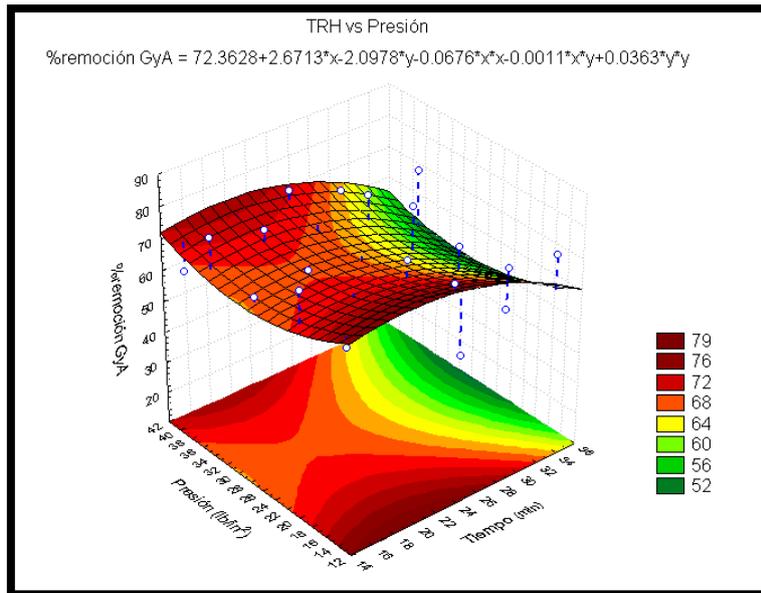
Regresión Superficial Mixta con el parámetro GyA (mg/L).

Efecto	Pruebas univariantes de Significancia para Gy y A Parameterization Sigma-limitada Descomposición de la Hipótesis Efectiva				
	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
Presión (lb/in2)	19.6004	1	19.6004	0.0535	0.8195
Recirculación	3.9088	1	3.9088	0.0107	0.9188
TRH (min)	868.1838	1	868.1838	2.3700	0.1402
Presión (lb/in2)*Recirculación	51.3666	1	51.3666	0.1402	0.7122
Presión (lb/in2)*TRH (min)	137.1901	1	137.1901	0.3745	0.5478
Recirculación*TRH (min)	84.9806	1	84.9806	0.2320	0.6356
Error	6960.2011	19	366.3264		

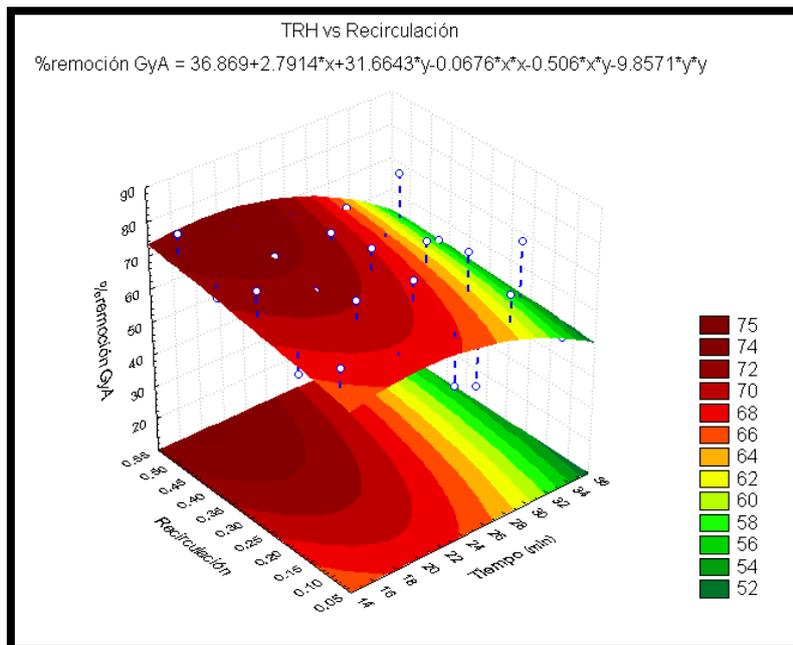
Efecto	Parametros Estimados Parameterization Sigma-limitada									
	GyA (mg/L) Param.	GyA (mg/L) Std.Err	GyA (mg/L) t	GyA (mg/L) p	-95.00% Cnf.Lmt	+95.00% Cnf.Lmt	GyA (mg/L) Beta (β)	GyA (mg/L) St.Err.β	-95.00% Cnf.Lmt	+95.00% Cnf.Lmt
Presión (lb/in2)	0.2670	1.1544	0.2313	0.8195	-2.1	2.7	0.1471	0.6360	-1.2	1.5
Recirculación	-11.3425	109.8043	-0.1033	0.9188	-241.2	218.5	-0.0705	0.6825	-1.5	1.4
TRH (min)	2.6143	1.6982	1.5395	0.1402	-0.9	6.2	1.2728	0.8268	-0.5	3.0
Presión (lb/in2)*Recirculación	1.5248	4.0720	0.3745	0.7122	-7.0	10.0	0.2786	0.7441	-1.3	1.8
Presión (lb/in2)*TRH (min)	-0.0270	0.0441	-0.6120	0.5478	-0.1	0.07	-0.3864	0.6313	-1.7	0.9
Recirculación*TRH (min)	-1.7913	3.7192	-0.4816	0.6356	-9.576	6.0	-0.2893	0.6006	-1.5	1.0

Variable Dependient	Prueba de SS Modelo Entero vs SS Residual										
	Multiple R	Multiple R ²	Ajustada R ²	Modelo SS	Modelo df	Modelo MS	Residual SS	Residual df	Residual MS	F	p
GyA (mg/L)	0.9499	0.9022	0.8714	64231.448	6	10705.241	6960.2011	19	366.3264	29.2232	0.0000

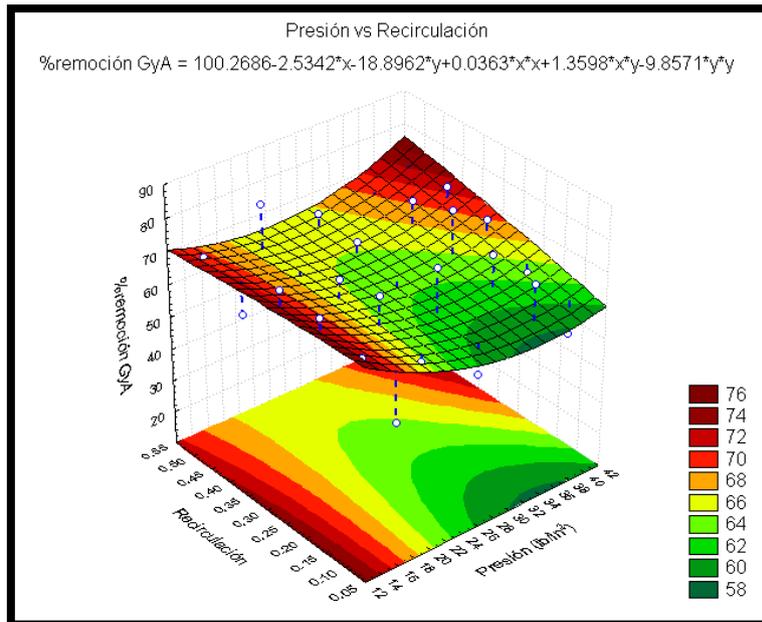
Variable Dependient	Prueba del modelo de mezcla completa, df & SS Ajustado para la media										
	Multiple R	Multiple R ²	Ajustada R ²	Modelo SS	Modelo df	Modelo MS	Residual SS	Residual df	Residual MS	F	p
GyA (mg/L)	0.4514	0.2038	-0.0057	1781.438	5	356.2877	6960.2011	19	366.3264	0.9726	0.4594



Análisis de la variable %remoción GyA vs los factores TRH y Presión.



Análisis de la variable %remoción GyA vs los factores TRH y Recirculación.



Análisis de la variable %remoción GyA vs los factores Presión y Recirculación.

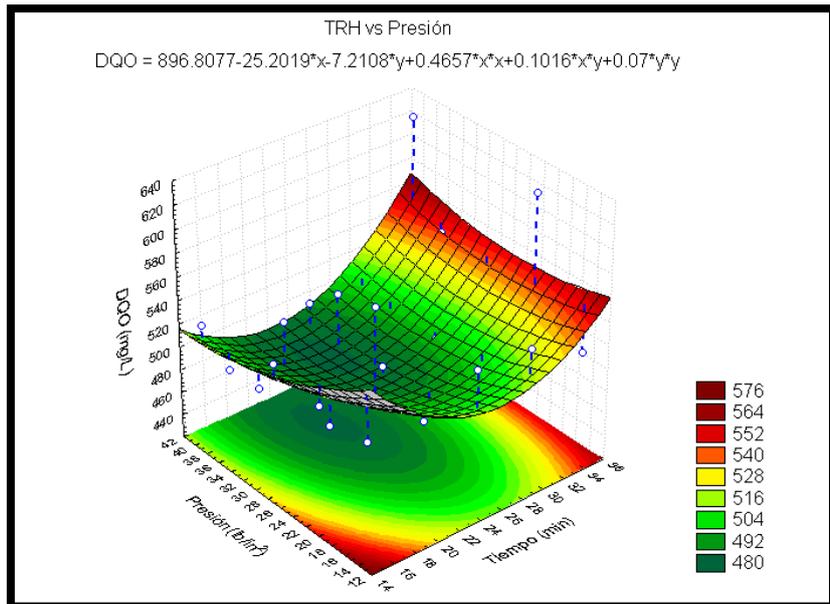
Regresión Superficial Mixta con el parámetro %remoción GyA.

Efecto	Pruebas univariantes de Significancia para % remoción GyA				
	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
Presión (lb/in ²)	284.1124	1	284.1124	1.6289	0.2172
Recirculación	235.0255	1	235.0255	1.3474	0.2601
TRH (min)	1898.4569	1	1898.4569	10.8842	0.0038
Presión (lb/in ²)*Recirculación	151.6113	1	151.6113	0.8692	0.3629
Presión (lb/in ²)*TRH (min)	1389.5531	1	1389.5531	7.9666	0.0109
Recirculación*TRH (min)	1084.1279	1	1084.1279	6.2155	0.0221
Error	3314.0391	19	174.4231		

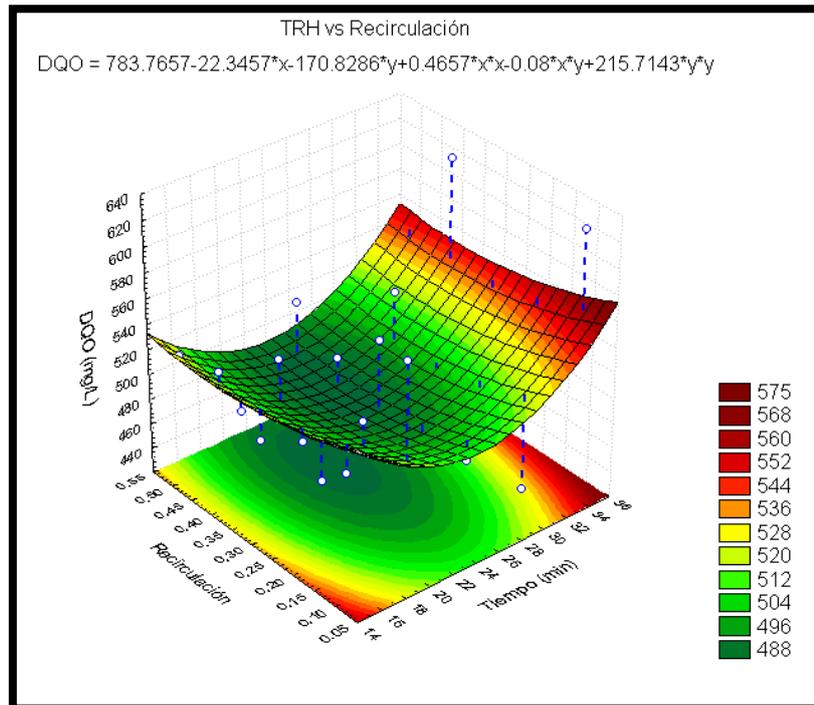
Efecto	Parametros Estimados									
	Parameterization Sigma-limitada									
	%remoción GyA	%remoción GyA	%remoción GyA	%remoción GyA	-95.00%	+95.00%	%remoción GyA	%remoción GyA	-95.00%	+95.00%
	Param.	Std.Err	t	p	Cnf.Lmt	Cnf.Lmt	Beta (β)	St.Err.β	Cnf.Lmt	Cnf.L
Presión (lb/in ²)	1.02	0.7966	1.2763	0.2172	-0.7	2.7	0.4476	0.3507	-0.3	1.2
Recirculación	87.95	75.7683	1.1608	0.2601	-70.6	247	0.4368	0.3763	-0.4	1.2
TRH (min)	3.87	1.1718	3.2991	0.0038	1.4	6.3	1.5041	0.4559	0.5	2.3
Presión (lb/in ²)*Recirculación	2.62	2.8098	0.9323	0.3629	-3.3	8.5	0.3825	0.4103	-0.5	1.2
Presión (lb/in ²)*TRH (min)	-0.0859	0.0304	-2.8225	0.0109	-0.1	-0.0	-0.9826	0.3481	-1.7	-0.1
Recirculación*TRH (min)	-6.40	2.5663	-2.4931	0.0221	-11.8	-1.0	-0.8256	0.3312	-1.5	-0.1

Variable Dependiente	Prueba de SS Modelo Entero vs SS Residual										
	Multiple R	Multiple R ²	Ajustada R ²	Modelo SS	Modelo df	Modelo MS	Residual SS	Residual df	Residual MS	F	p
%remoción GyA	0.9850	0.9703	0.9609	108163.090	6	18027.181	3314.039	19	174.4231	103.353	0.0000

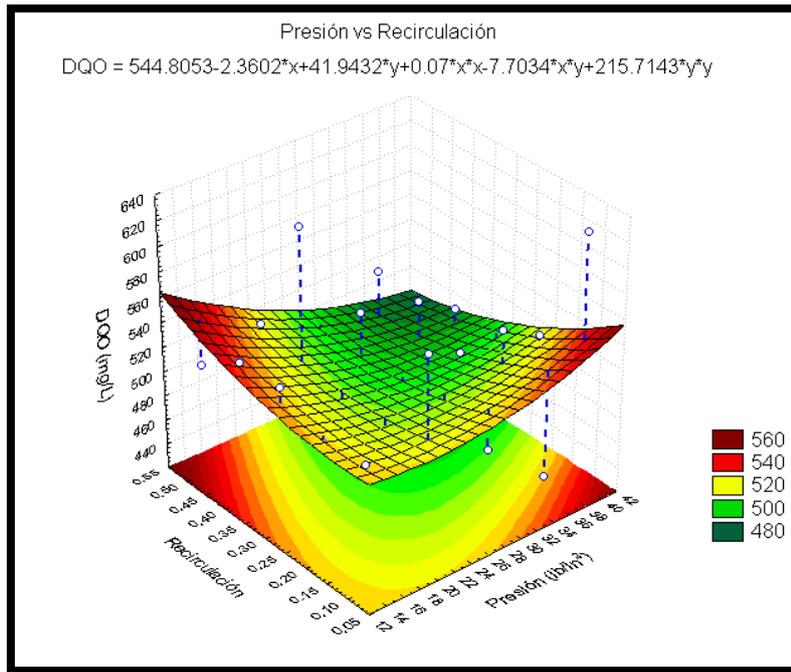
Variable Dependiente	Prueba del modelo de mezcla completa, df & SS Ajustado para la media										
	Multiple R	Multiple R ²	Ajustada R ²	Modelo SS	Modelo df	Modelo MS	Residual SS	Residual df	Residual MS	F	p
%remoción GyA	0.3405	0.1160	-0.1167	434.722	5	86.9445	3314.039	19	174.4231	0.4985	0.7735



Análisis de la variable DQO (mg/l) vs los factores TRH y Presión.



Análisis de la variable DQO (mg/l) vs los factores TRH y Recirculación.



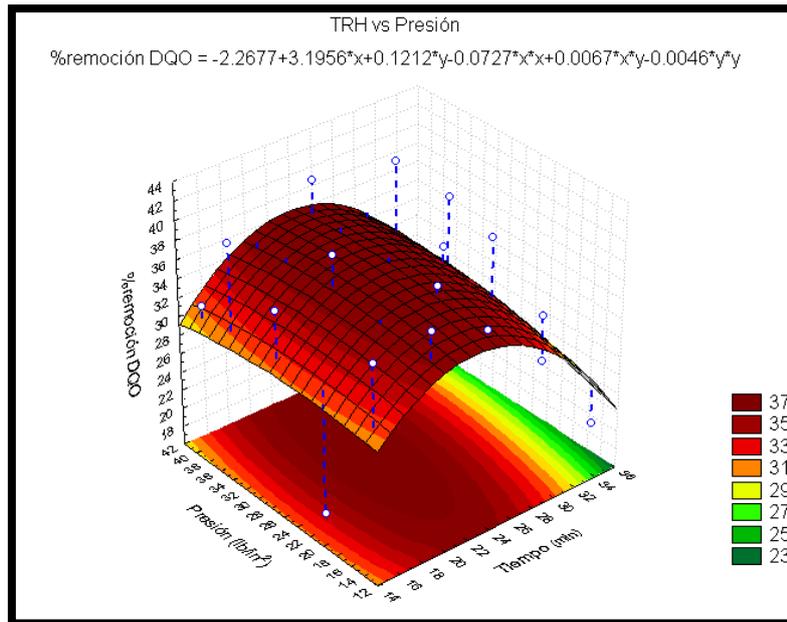
Análisis de la variable DQO (mg/l) vs los factores Presión y Recirculación.

Regresión Superficial Mixta con el parámetro DQO (mg/L).

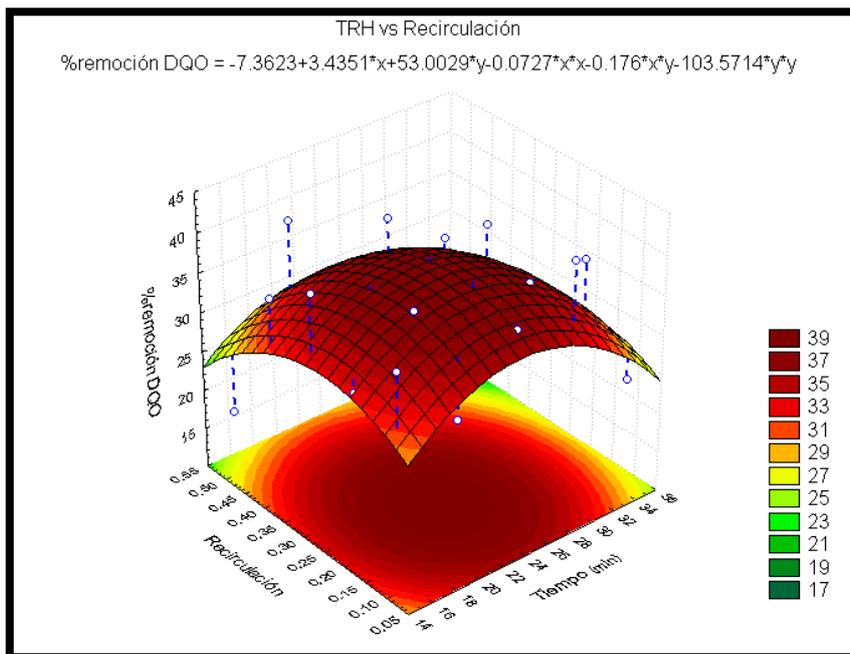
Efecto	Pruebas univariantes de Significancia para DQO (mg/L) Parameterization Sigma-limitada Descomposición de la Hipótesis Efectiva				
	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
Presión (lb/in2)	21287.549	1	21287.549	5.2163	0.0341
Recirculación	9994.3001	1	9994.3001	2.4490	0.1341
TRH (min)	78527.926	1	78527.926	19.2424	0.0003
Presión (lb/in2)*Recirculación	458.8548	1	458.8548	0.1124	0.7411
Presión (lb/in2)*TRH (min)	41616.356	1	41616.356	10.1976	0.0048
Recirculación*TRH (min)	27108.141	1	27108.141	6.6425	0.0185
Error	77538.867	19	4080.9930		

Efecto	Parametros Estimados Parameterization Sigma-limitada										
	DQO (mg/L) Param.	DQO (mg/L) Std.Err	DQO (mg/L) t	DQO (mg/L) p	-95.00% Cnf.Lmt	+95.00% Cnf.Lmt	DQO (mg/L) Beta (β)	DQO (mg/L) St.Err.β	-95.00% Cnf.Lmt	+95.00% Cnf.Lmt	
Presión (lb/in2)	8.8003	3.8532	2.2839	0.0341	0.7	17	0.5039	0.2206	0.0	1.0	
Recirculación	573.5371	366.4951	1.5649	0.1341	-193.5	1340.6	0.3704	0.2367	-0.1	0.9	
TRH (min)	24.8638	5.6681	4.3866	0.0003	13	36.7	1.2580	0.2868	0.7	1.9	
Presión (lb/in2)*Recirculación	4.5574	13.5913	0.3353	0.7411	-23.9	33.0	0.0865	0.2581	-0.5	0.6	
Presión (lb/in2)*TRH (min)	-0.4701	0.1472	-3.1934	0.0048	-1	-0.2	-0.6993	0.2190	-1.2	-0.2	
Recirculación*TRH (min)	-31.9936	12.4135	-2.5773	0.0185	-58.0	-6.0	-0.5369	0.2083	-1.0	-0.1	

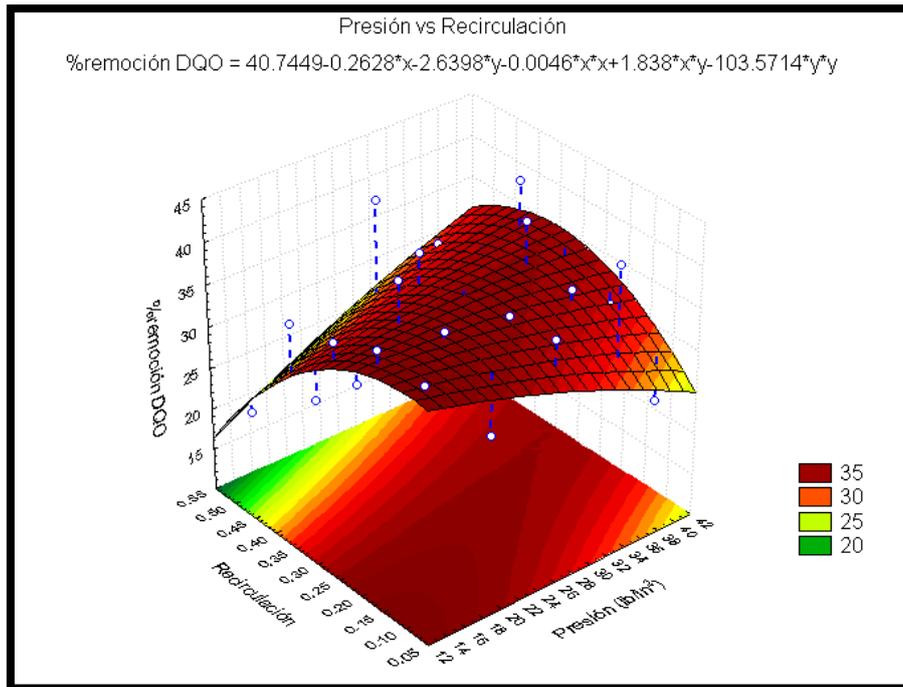
Variable Dependiente	Prueba de SS Modelo Entero vs SS Residual										
	Multiple R	Multiple R ²	Ajustada R ²	Modelo SS	Modelo df	Modelo MS	Residual SS	Residual df	Residual MS	F	p
DQO (mg/L)	0.9941	0.9882	0.9845	6514667	6	1085778	77538.867	19	4080.9930	266.057	0.00



Análisis de la variable %remoción DQO vs los factores TRH y Presión.



Análisis de la variable %remoción DQO vs los factores TRH y Recirculación.



Análisis de la variable %remoción DQO vs los factores Presión y Recirculación.

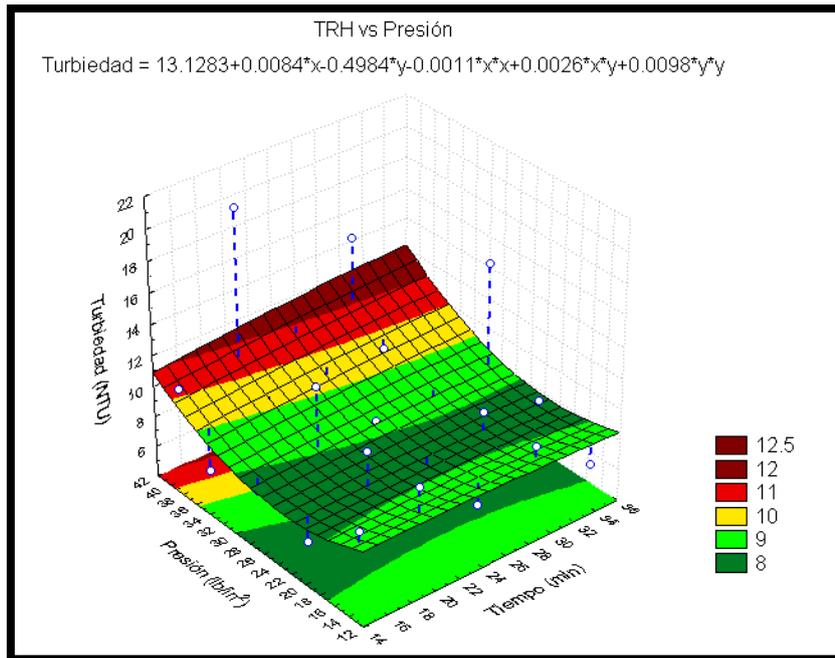
Regresión Superficial Mixta con el parámetro %remoción DQO.

Efecto	Pruebas univariantes de Significancia para % rem Parameterization Sigma-limitada Descomposición de la Hipótesis Efectiva				
	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
Presión (lb/in2)	27.7246	1	27.7246	0.8521	0.3675
Recirculación	45.1786	1	45.1786	1.3885	0.2532
TRH (min)	1225.772	1	1225.772	37.6735	0.0000
Presión (lb/in2)*Recirculación	368.9752	1	368.9752	11.3403	0.0032
Presión (lb/in2)*TRH (min)	833.1458	1	833.1458	25.6063	0.0001
Recirculación*TRH (min)	427.8167	1	427.8167	13.1487	0.0018
Error	618.1984	19	32.5368		

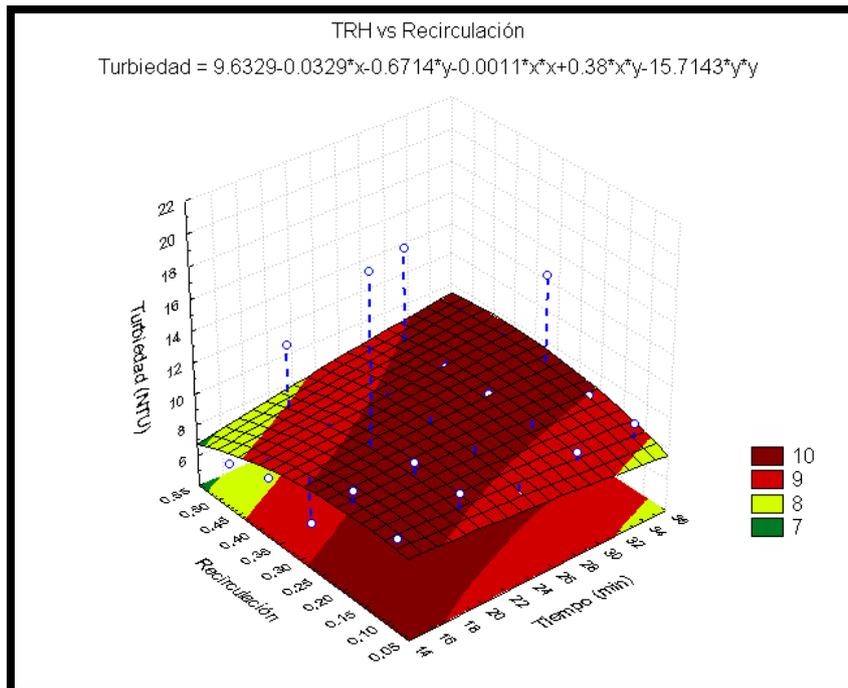
Efecto	Parametros Estimados Parameterization Sigma-limitada								
	%remoción DQO Param.	%remoción DQO Std.Err	%remoción DQO t	%remoción DQO p	-95.00% Cnf.Lmt	+95.00% Cnf.Lmt	%remoción DQO Beta (β)	%remoción DQO St.Err.β	-95.00% Cnf.Lmt
Presión (lb/in2)	0.3176	0.3440	0.9231	0.3675	-0.4	1.0	0.2806	0.3040	-0.4
Recirculación	-38.56	32.7245	-1.1784	0.2532	-107.1	29.9	-0.3844	0.3262	-1.07
TRH (min)	3.11	0.5061	6.1379	0.0000	2.0	4.2	2.4255	0.3952	1.6
Presión (lb/in2)*Recirculación	4.09	1.2136	3.3675	0.0032	1.5	6.6	1.1976	0.3556	0.5
Presión (lb/in2)*TRH (min)	-0.0665	0.0131	-5.0603	0.0001	-0.1	-0.0	-1.5269	0.3017	-2.2
Recirculación*TRH (min)	-4.02	1.1084	-3.6261	0.0018	-6.3	-1.7	-1.0408	0.2870	-1.6

Variable Dependiente	Prueba del modelo de mezcla completa, df & SS Ajustado para la media										
	Multiple R	Multiple R²	Ajustada R²	Modelo SS	Modelo df	Modelo MS	Residual SS	Residual df	Residual MS	F	p
%remoción DQO	0.6398	0.4093	0.2539	428.3816	5	85.6763	618.1984	19	32.5368	2.6332	0.0569

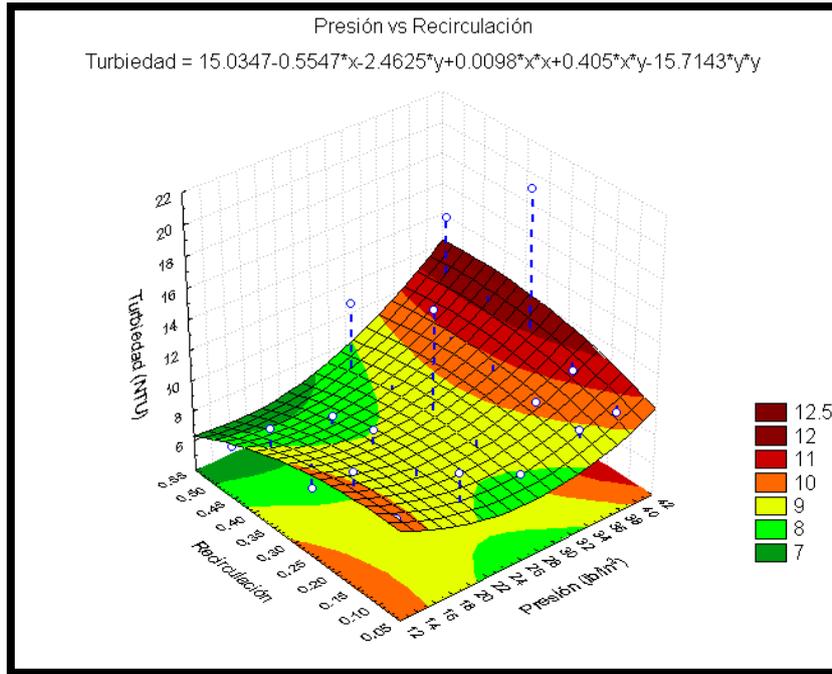
Variable Dependiente	Prueba de SS Modelo Entero vs SS Residual										
	Multiple R	Multiple R²	Ajustada R²	Modelo SS	Modelo df	Modelo MS	Residual SS	Residual df	Residual MS	F	p
%remoción DQO	0.9888	0.9777	0.9706	27062.6211	6	4510.4368	618.1984	19	32.5368	138.6255	0.0000



Análisis de la variable Turbiedad (NTU) vs los factores TRH y Presión.



Análisis de la variable Turbiedad (NTU) vs los factores TRH y Recirculación.



Análisis de la variable Turbiedad (NTU) vs los factores Presión y Recirculación.

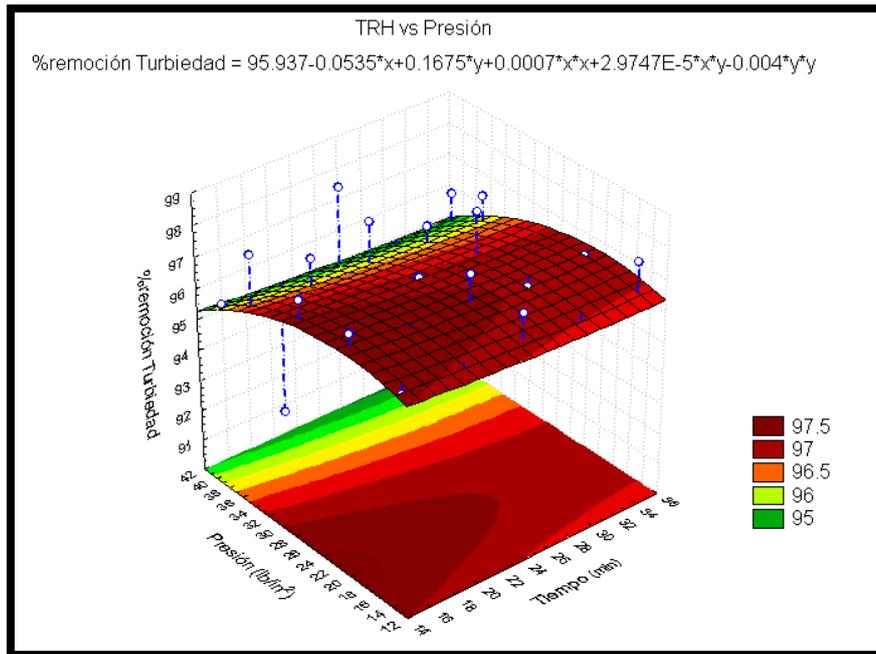
Regresión Superficial Mixta con el parámetro Turbiedad (NTU).

Efecto	Pruebas univariantes de Significancia para Turbiedad				
	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
Presión (lb/in2)	13.8092	1	13.8092	0.9834	0.3338
Recirculación	7.3920	1	7.3920	0.5264	0.4770
TRH (min)	26.9157	1	26.9157	1.9167	0.1823
Presión (lb/in2)*Recirculación	8.0817	1	8.0817	0.5755	0.4574
Presión (lb/in2)*TRH (min)	26.4122	1	26.4122	1.8809	0.1862
Recirculación*TRH (min)	0.44363	1	0.44363	0.0316	0.8608
Error	266.8055	19	14.0424		

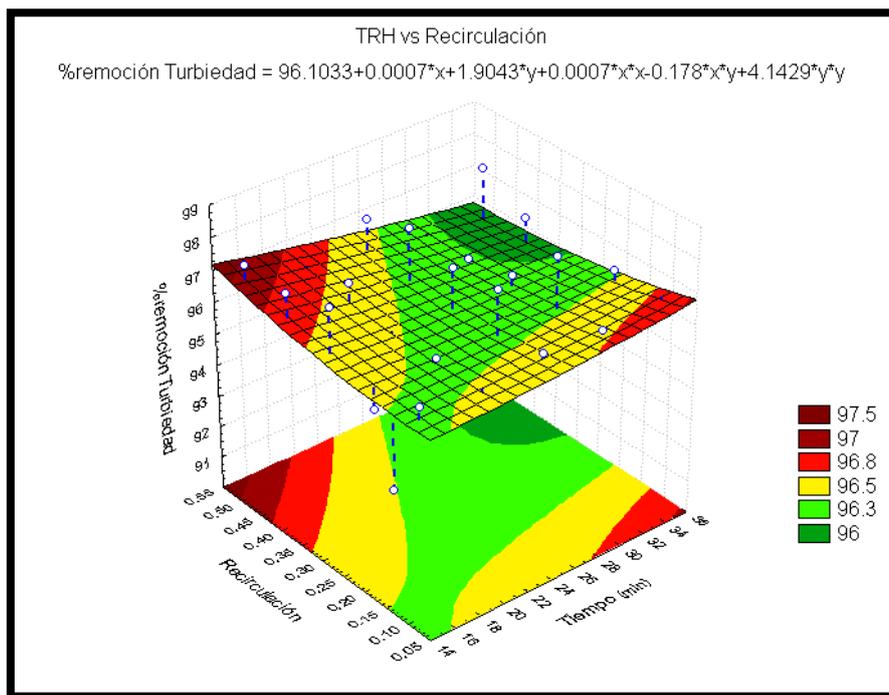
Efecto	Parametros Estimados								
	Param.	Std.Err	t	p	-95.00% Cnf.Lmt	+95.00% Cnf.Lmt	Beta (β)	St.Err.β	-95.00% Cnf.Lmt
Presión (lb/in2)	0.2241	0.2260	0.9917	0.3338	-0.2	0.7	0.6876	0.6934	-0.8
Recirculación	-15.60	21.4984	-0.7255	0.4770	-60.6	29.4	-0.5398	0.7440	-2.1
TRH (min)	0.4603	0.3325	1.3845	0.1823	-0.2	1.2	1.2479	0.9014	-0.6
Presión (lb/in2)*Recirculación	0.6048	0.7973	0.7586	0.4574	-1.1	2.3	0.6154	0.8112	-1.1
Presión (lb/in2)*TRH (min)	-0.0118	0.0086	-1.3715	0.1862	-0.0	0.0	-0.9440	0.6883	-2.4
Recirculación*TRH (min)	-0.1294	0.7282	-0.1777	0.8608	-1.7	1.4	-0.1164	0.6547	-1.5

Variable Dependiente	Prueba del modelo de mezcla completa, df & SS Ajustado para la media										
	Multiple R	Multiple R ²	Ajustada R ²	Modelo SS	Modelo df	Modelo MS	Residual SS	Residual df	Residual MS	F	p
Turbiedad (NTU)	0.2769	0.0767	-0.1663	22.1545	5	4.4309	266.8055	19	14.0424	0.3155	0.8975

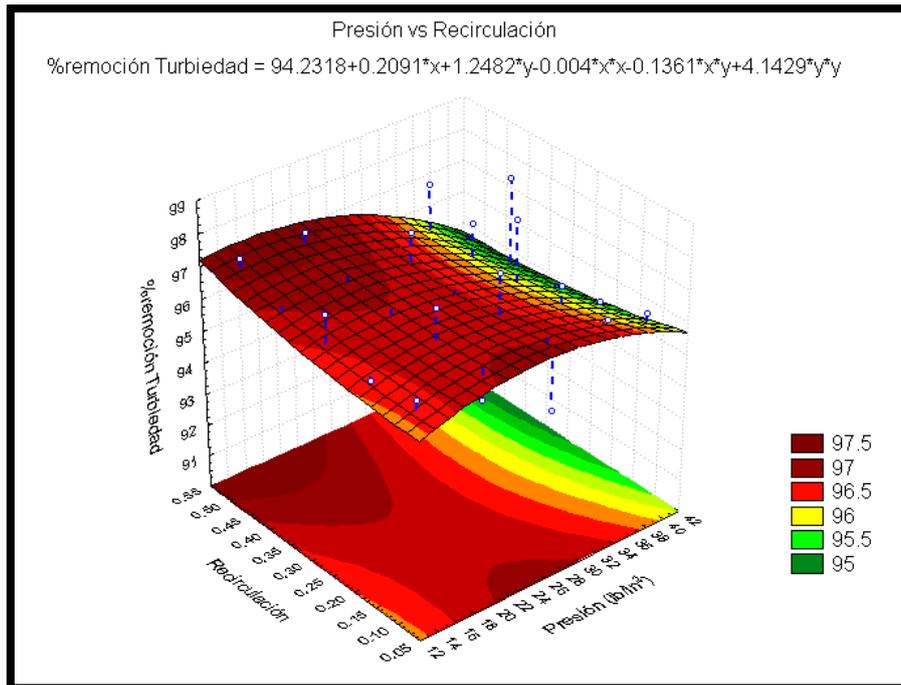
Variable Dependiente	Prueba de SS Modelo Entero vs SS Residual										
	Multiple R	Multiple R ²	Ajustada R ²	Modelo SS	Modelo df	Modelo MS	Residual SS	Residual df	Residual MS	F	p
Turbiedad (NTU)	0.9401	0.8838	0.8471	2029.194	6	338.199	266.8055	19	14.0424	24.0841	0.0000



Análisis de la variable %remoción Turbiedad vs los factores TRH y Presión.



Análisis de la variable %remoción Turbiedad vs los factores TRH y Recirculación.



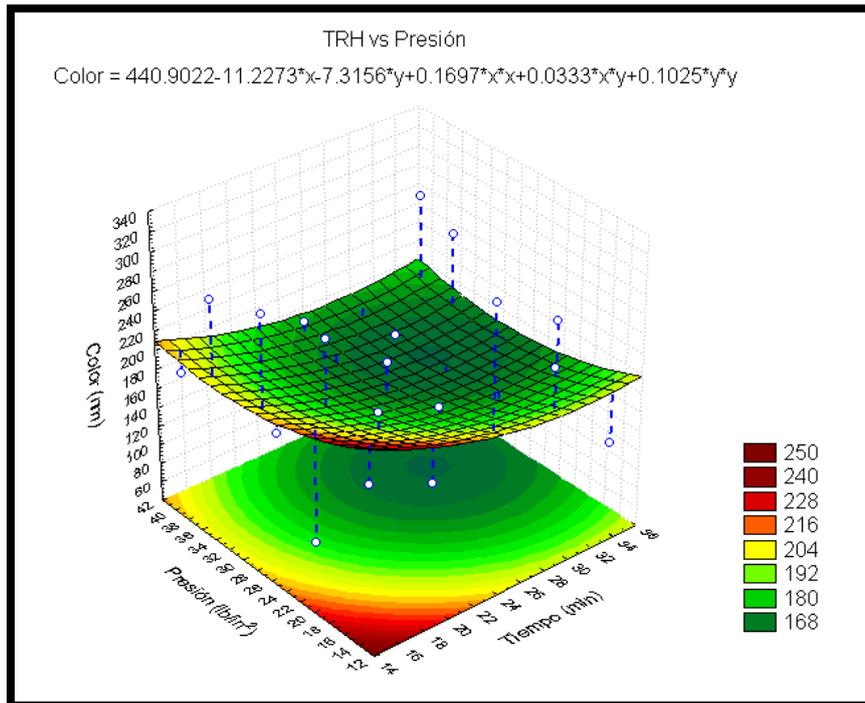
Análisis de la variable %remoción Turbiedad vs los factores Presión y Recirculación.

Regresión Superficial Mixta con el parámetro %remoción Turbiedad.

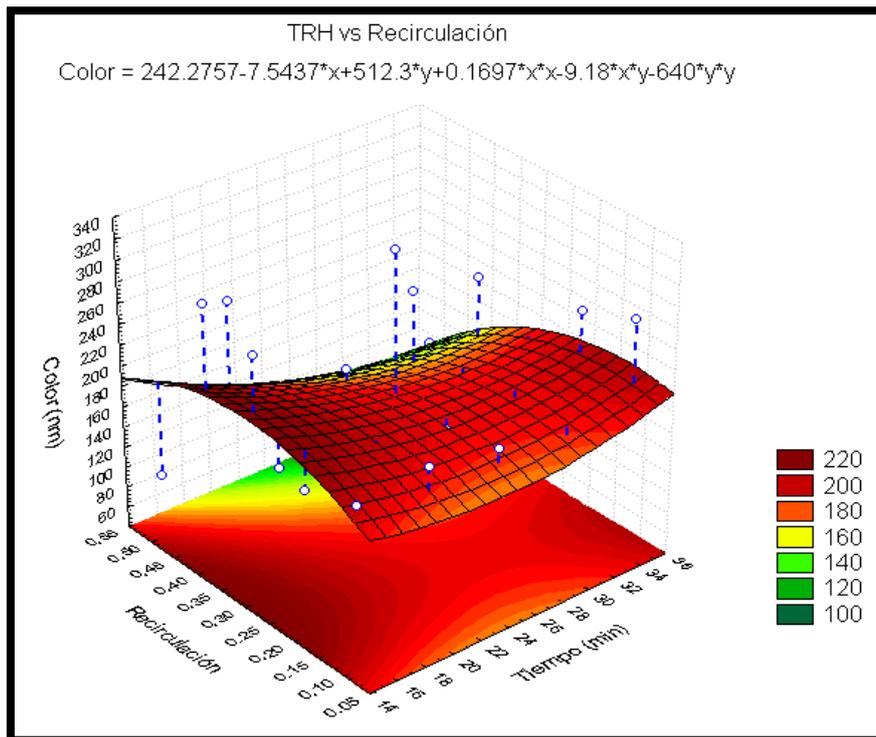
Efecto	Pruebas univariantes de Significancia para % rem				
	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
Presión (lb/in2)	667.8563	1	667.8563	20.2317	0.0002
Recirculación	137.8023	1	137.8023	4.1745	0.0552
TRH (min)	3530.5254	1	3530.5254	106.9520	0.0000
Presión (lb/in2)*Recirculación	189.8113	1	189.8113	5.7501	0.0269
Presión (lb/in2)*TRH (min)	2158.9811	1	2158.9811	65.4031	0.0000
Recirculación*TRH (min)	1145.3034	1	1145.3034	34.6953	0.0000
Error	627.1970	19	33.0104		

Efecto	Parametros Estimados									
	Parameterization Sigma-limitada									
	%remoción Turbiedad Param.	%remoción Turbiedad Std.Err	%remoción Turbiedad t	%remoción Turbiedad p	-95.00% Cnf.Lmt	+95.00% Cnf.Lmt	%remoción Turbiedad Beta (β)	%remoción Turbiedad St.Err.β	-95.00% Cnf.Lmt	+95.00% Cnf.Lmt
Presión (lb/in2)	1.5587	0.3465	4.4980	0.0002	0.8	2.3	0.4760	0.1058	0.3	0.7
Recirculación	67.3463	32.9618	2.0432	0.0552	-1.6	136.3	0.2320	0.1135	-0.0	0.5
TRH (min)	5.2720	0.5098	10.3418	0.0000	4.2	6.3	1.4225	0.1375	1.1	1.7
Presión (lb/in2)*Recirculación	2.9312	1.2224	2.3979	0.0269	0.4	5.5	0.2968	0.1238	0.0	0.6
Presión (lb/in2)*TRH (min)	-0.1071	0.0132	-8.0872	0.0000	-0.1	-0.1	-0.8494	0.1050	-1.1	-0.6
Recirculación*TRH (min)	-6.5762	1.1164	-5.8903	0.0000	-8.9	-4.2	-0.5885	0.0999	-0.8	-0.4

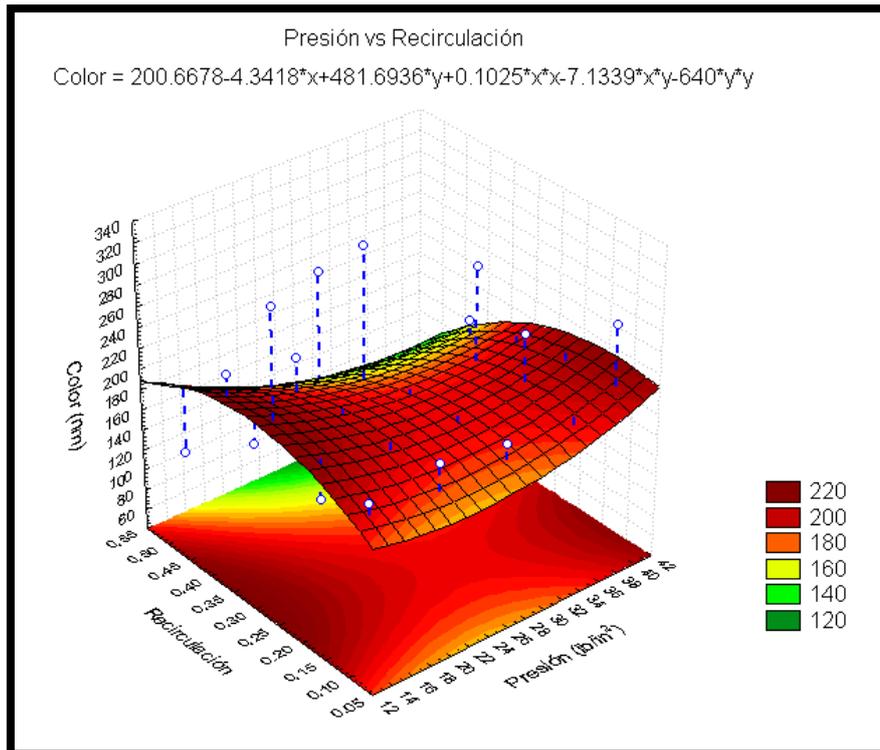
Variable Dependiente	Prueba de SS Modelo Entero vs SS Residual										
	Multiple R	Multiple R²	Ajustada R²	Modelo SS	Modelo df	Modelo MS	Residual SS	Residual df	Residual MS	F	p
%remoción Turbiedad	0.9986	0.9973	0.9964	231159.433	6	38526.572	627.1970	19	33.0104	1167.105	0.0000



Análisis de la variable Color (nm) vs los factores TRH y Presión.



Análisis de la variable Color (nm) vs los factores TRH y Recirculación.



Análisis de la variable Color (nm) vs los factores Presión y Recirculación.

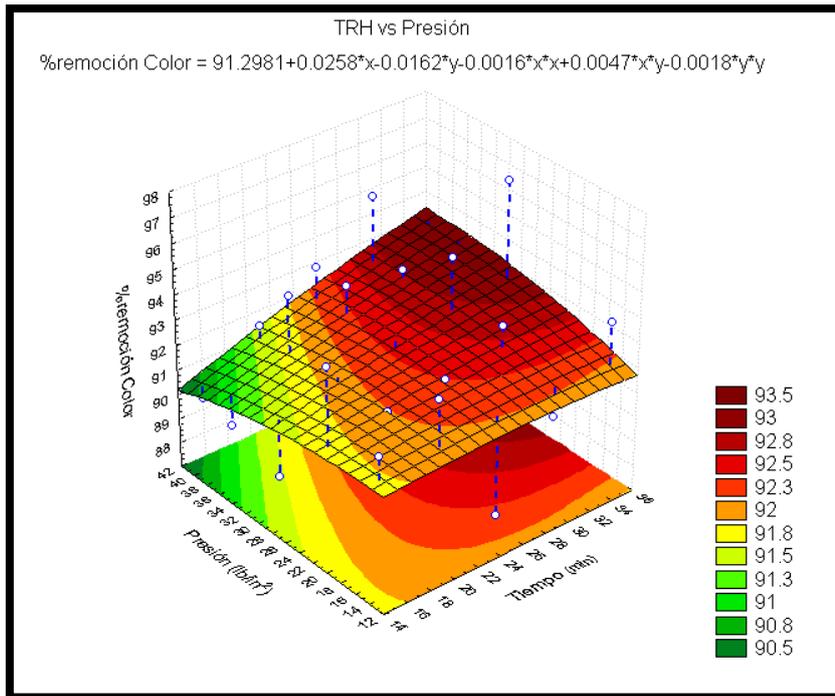
Regresión Superficial Mixta con el parámetro Color (nm).

Efecto	Pruebas univariantes de Significancia para Color (nm) Parameterization Sigma-limitada Descomposición de la Hipótesis Efectiva				
	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
Presión (lb/in2)	5338.3303	1	5338.3303	1.1057	0.3062
Recirculación	6801.6075	1	6801.6075	1.4088	0.2499
TRH (min)	11032.537	1	11032.537	2.2852	0.1471
Presión (lb/in2)*Recirculación	359.2389	1	359.2389	0.074409	0.7880
Presión (lb/in2)*TRH (min)	6982.6053	1	6982.6053	1.4463	0.2439
Recirculación*TRH (min)	10239.906	1	10239.906	2.1210	0.1616
Error	91729.819	19	4827.8852		

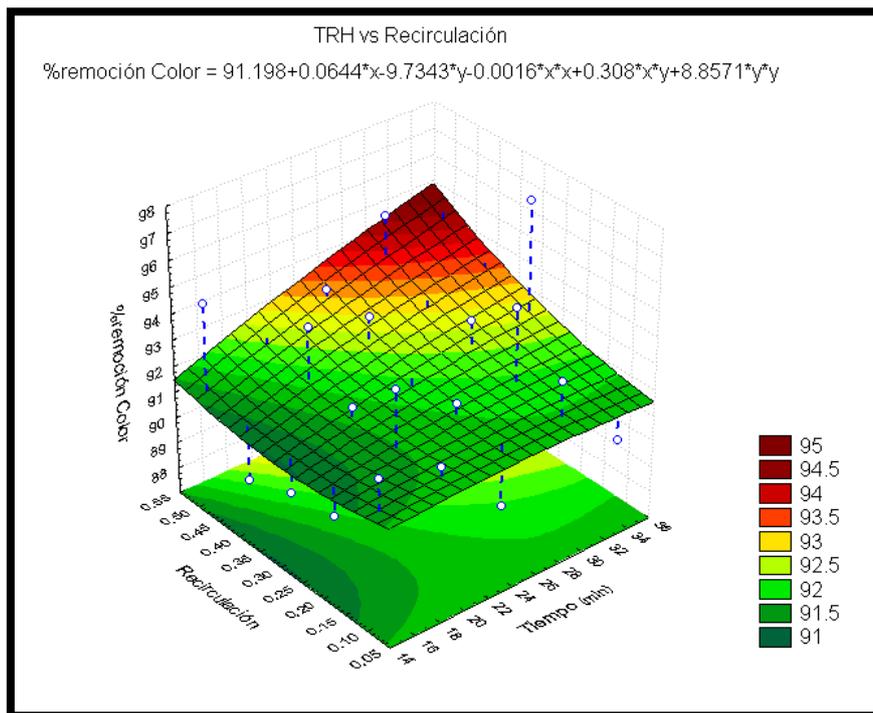
Efecto	Parametros Estimados Parameterization Sigma-limitada									
	Color (nm)		Color (nm)		-95.00%		+95.00%		Color (nm)	
	Param.	Std.Err	t	p	Cnf.Lmt	Cnf.Lmt	Beta (β)	St.Err.β	-95.00%	+95.00%
Presión (lb/in2)	4.4069	4.1909	1.0515	0.3062	-4.4	13.2	0.6668	0.6341	-0.7	2.0
Recirculación	473.14	398.62	1.1869	0.2499	-361.2	1307.5	0.8076	0.6804	-0.6	2.2
TRH (min)	9.3195	6.1650	1.5117	0.1471	-3.6	22.2	1.2461	0.8243	-0.5	3.0
Presión (lb/in2)*Recirculación	-4.0325	14.7828	-0.2728	0.7880	-35.0	26.9	-0.2024	0.7418	-1.8	1.4
Presión (lb/in2)*TRH (min)	-0.1926	0.1601	-1.2026	0.2439	-0.5	0.1	-0.7570	0.6294	-2.1	0.6
Recirculación*TRH (min)	-19.6635	13.5018	-1.4564	0.1616	-47.9	8.6	-0.8720	0.5987	-2.1	0.4

Variable Dependiente	Prueba de SS Modelo Entero vs SS Residual										
	Multiple R	Multiple R ²	Ajustada R ²	Modelo SS	Modelo df	Modelo MS	Residual SS	Residual df	Residual MS	F	p
Color (nm)	0.9502	0.9028	0.8721	852239.180	6	142039.86	91729.819	19	4827.8852	29.4207	0.0000

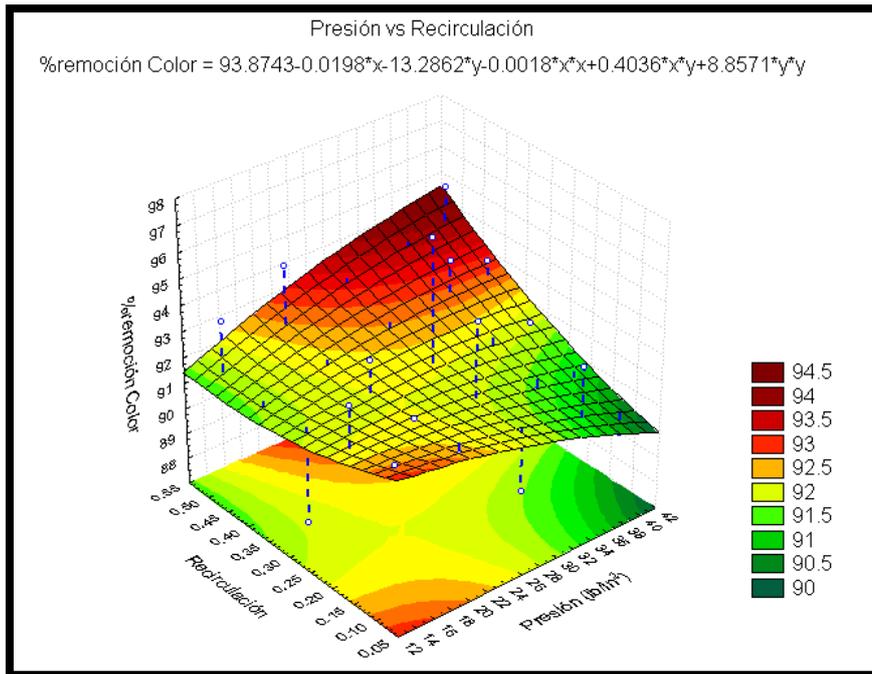
Variable Dependiente	Prueba del modelo de mezcla completa, df & SS Ajustado para la media										
	Multiple R	Multiple R ²	Ajustada R ²	Modelo SS	Modelo df	Modelo MS	Residual SS	Residual df	Residual MS	F	p
Color (nm)	0.4044	0.1636	-0.0565	17939.620	5	3587.924	91729.819	19	4827.8852	0.7432	0.6008



Análisis de la variable %remoción Color vs los factores TRH y Presión.



Análisis de la variable %remoción Color vs los factores TRH y Recirculación.



Análisis de la variable %remoción Color vs los factores Presión y Recirculación.

Regresión Superficial Mixta con el parámetro %remoción Color.

Efecto	Pruebas univariantes de Significancia para % remoción Color				
	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
Presión (lb/in2)	511.6029	1	511.6029	13.1384	0.0018
Recirculación	58.8686	1	58.8686	1.5118	0.2339
TRH (min)	3374.095	1	3374.095	86.6496	0.0000
Presión (lb/in2)*Recirculación	268.8092	1	268.8092	6.9032	0.0166
Presión (lb/in2)*TRH (min)	1995.363	1	1995.363	51.2426	0.0000
Recirculación*TRH (min)	982.8583	1	982.8583	25.2406	0.0001
Error	739.8511	19	38.9395		

Efecto	Parametros Estimados								
	%remoción Color Param.	%remoción Color Std.Err	%remoción Color t	%remoción Color p	-95.00% Cnf.Lmt	+95.00% Cnf.Lmt	%remoción Color Beta (β)	%remoción Color St.Err.β	-95.00% Cnf.Lmt
Presión (lb/in2)	1.36	0.3764	3.6247	0.0018	0.6	2.2	0.4354	0.1201	0.2
Recirculación	44.02	35.7998	1.2296	0.2339	-30.9	118.9	0.1585	0.1289	-0.1
TRH (min)	5.15	0.5537	9.3086	0.0000	4.0	6.3	1.4536	0.1562	1.1
Presión (lb/in2)*Recirculación	3.49	1.3276	2.6274	0.0166	0.7	6.3	0.3692	0.1405	0.1
Presión (lb/in2)*TRH (min)	-0.1029	0.0144	-7.1584	0.0000	-0.1	-0.1	-0.8536	0.1192	-1.1
Recirculación*TRH (min)	-6.09	1.2126	-5.0240	0.0001	-8.6	-3.6	-0.5699	0.1134	-0.8

Variable Dependiente	Prueba de SS Modelo Entero vs SS Residual										
	Multiple R	Multiple R²	Ajustada R²	Modelo SS	Modelo df	Modelo MS	Residual SS	Residual df	MS Residual	F	p
%remoción Color	0.9983	0.9965	0.9954	211402.678	6	35233.779	739.8511	19	38.9395	904.8332	0.0000



ANEXO D.- Correlación entre mgAire/ mgGyA y la concentración de GyA en el efluente.

Con base en los resultados obtenidos en los experimentos, se obtuvo también la correlación entre mg de aire/mg de G y A (A/G y A) y la concentración de G y A en el efluente, correlación necesaria para la realización del diseño del sistema FAD (Figura 1). Con una relación A/G y A entre 0.004 y 0.1 se pueden obtener valores de G y A en el efluente del sistema entre 29 y 65 mg.L⁻¹ partiendo de una concentración inicial de G y A entre 114 y 186 mg.L⁻¹.

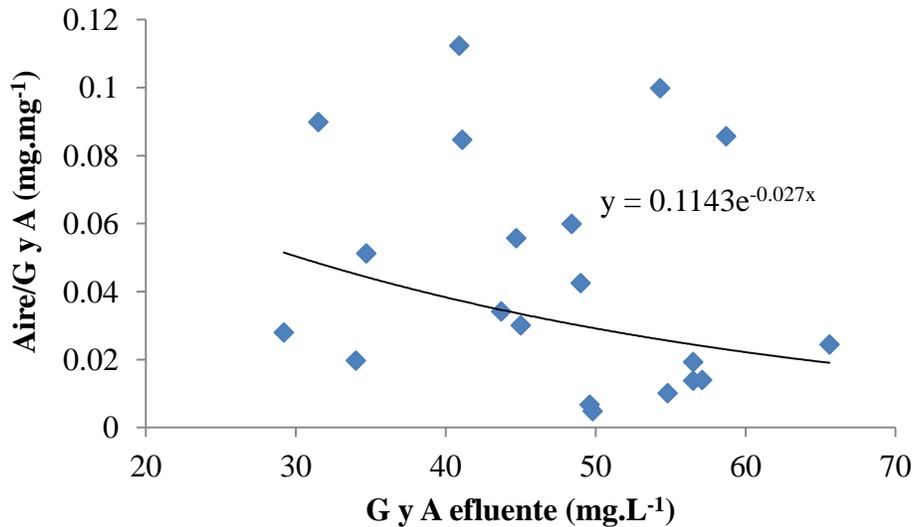


Figura 1. Correlación Aire/G y A y la concentración de G y A obtenida en el efluente

La obtención de la relación Aire/Sólidos o G y A se realizó mediante las siguientes formulas.

Para los sistemas que no presentan recirculación, las formulas son las siguientes:

$$\frac{\text{Aire}}{\text{Sólidos}} = \frac{s_{atm}}{SST_i \text{ o } GyA} \left(\frac{f P}{P_{atm}} - 1 \right)$$

$$\text{Aire} = s Q$$

$$\text{Sólidos} = SST_i Q$$

$$s = s_{atm} \left(\frac{P}{P_{atm}} - 1 \right)$$

$$s = s_{atm} \left(\frac{f P}{P_{atm}} - 1 \right)$$

$$\frac{A}{\text{Sólidos}} = \frac{\text{Cantidad de aire liberado por despresirización}}{\text{Cantidad de sólidos o } GyA \text{ en el inf luenta}} \text{ en } \frac{mg}{mg}$$

Donde:

s - aire liberado a presión atmosférica por unidad de volumen a una saturación del 100%, mg.L^{-1} .

s_{atm} - concentración de saturación del aire a la presión atmosférica o solubilidad del aire, mg.L^{-1} .

s_s - concentración de saturación del aire a presión absoluta en el tanque de saturación, mg.L^{-1} .

P - presión absoluta en el tanque de saturación;

P_{atm} - presión atmosférica.

f - fracción de saturación en el tanque de retención o fracción de aire disuelto a la presión P , generalmente 0.8-0.9.

SST_i - sólidos suspendidos totales en el unfluente, mg.L^{-1} .

G y A - grasas y aceites en el influente, mg.L^{-1} .

La cantidad de aire liberado (A) de un caudal Q será:

$$A = s Q \quad \text{en } \text{mg.d}^{-1}$$

Donde:

s - aire liberado a presión atmosférica por unidad de volumen a una saturación del 100%, mg.L^{-1} .

Q - caudal del agua, L.d^{-1} .

En los sistemas con recirculación, como fue en este trabajo, las formulas que se utilizaron fueron las siguientes:

$$\frac{\text{Aire}}{\text{Sólidos}} = \frac{s_{atm} R}{SST_i Q} \left(\frac{f P}{P_{atm}} - 1 \right)$$

$$R = \frac{\text{Aire}}{\text{Sólidos}} \frac{Q SST_i}{s_{atm} (fP - 1)}$$

$$\text{Aire} = s R \quad \text{Sólidos} = SST_i Q$$

Donde

R - reciclo; L.d^{-1} .

Para la obtención de s_{atm} se trazó una curva con las solubilidades del aire en el agua a diferentes temperaturas como se muestra en la Figura 2. La curva se ajustó a una regresión

exponencial obteniéndose la siguiente ecuación $y = 28.63e^{-0.02x}$, en donde x es la temperatura en la cual se esta realizando la experimentación. De acuerdo a la ecuación, la solubilidad del aire en el agua a una presión de 1 atm a 20 °C es de 18.97 $\text{cm}^3.\text{L}^{-1}$. Para obtener la solubilidad del aire en $\text{mg}.\text{L}^{-1}$ se utiliza la densidad del aire la cual es de 1.2 $\text{mg}.\text{cm}^3$ a una presión de 1 atm a una temperatura de 20°C. Realizando el cálculo correspondiente, la solubilidad del aire en el agua a una presión de 1 atm a 20°C es de 22.76 $\text{mg}.\text{L}^{-1}$.

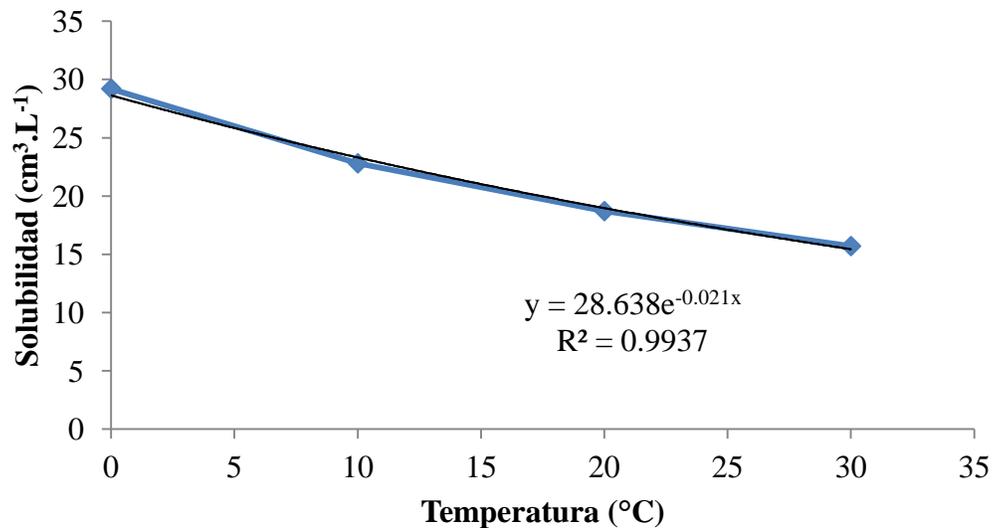


Figura 2. Curva para la obtención de la solubilidad del aire en el agua



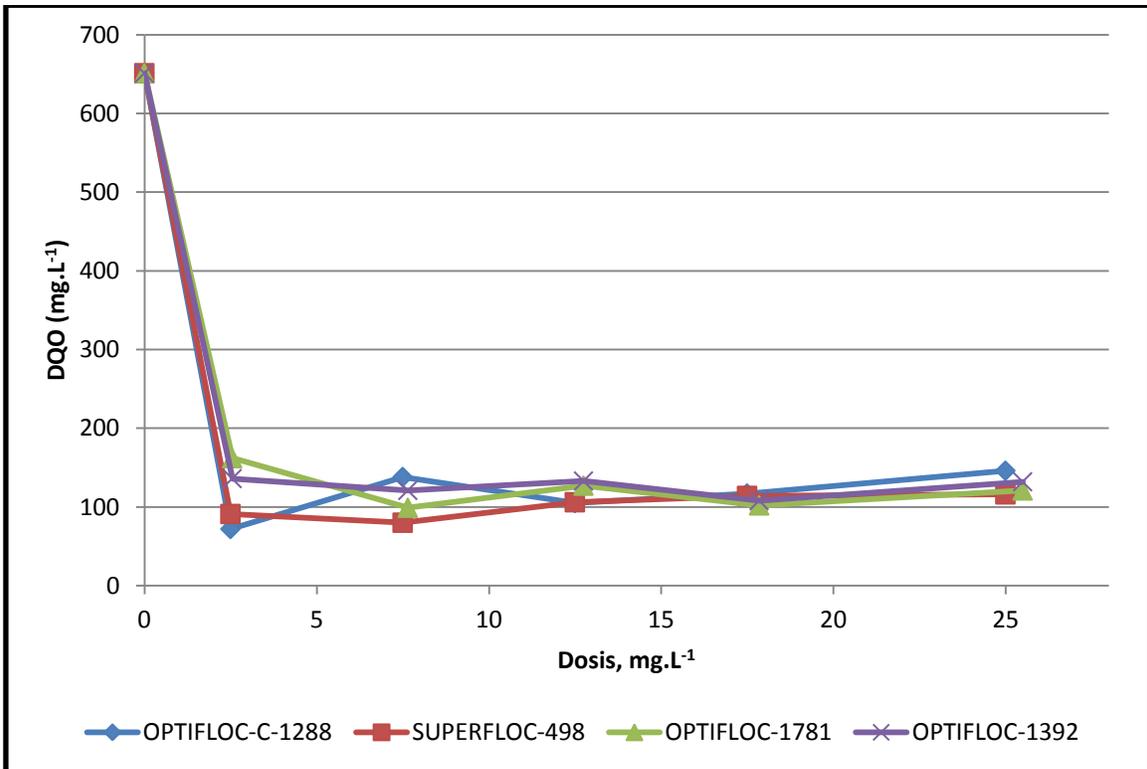
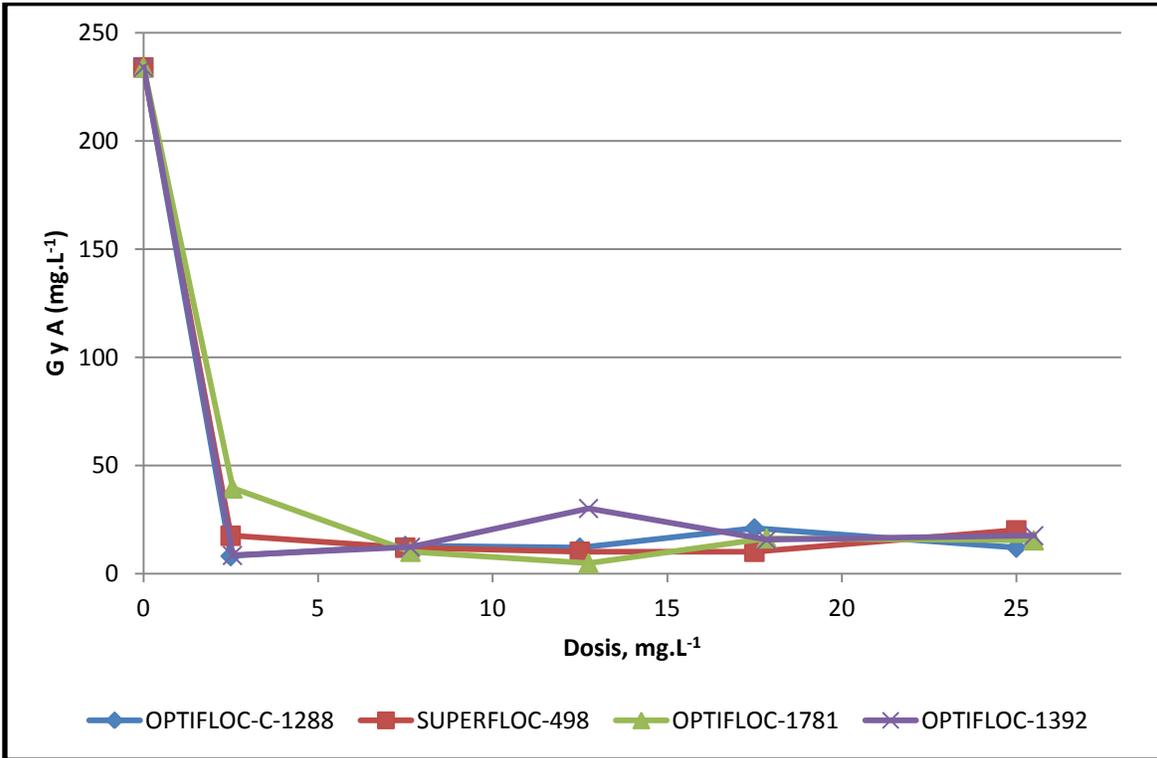
ANEXO E.- Tabla de Resultados de % de Remoción de los Parámetros de Respuesta para cada pH.

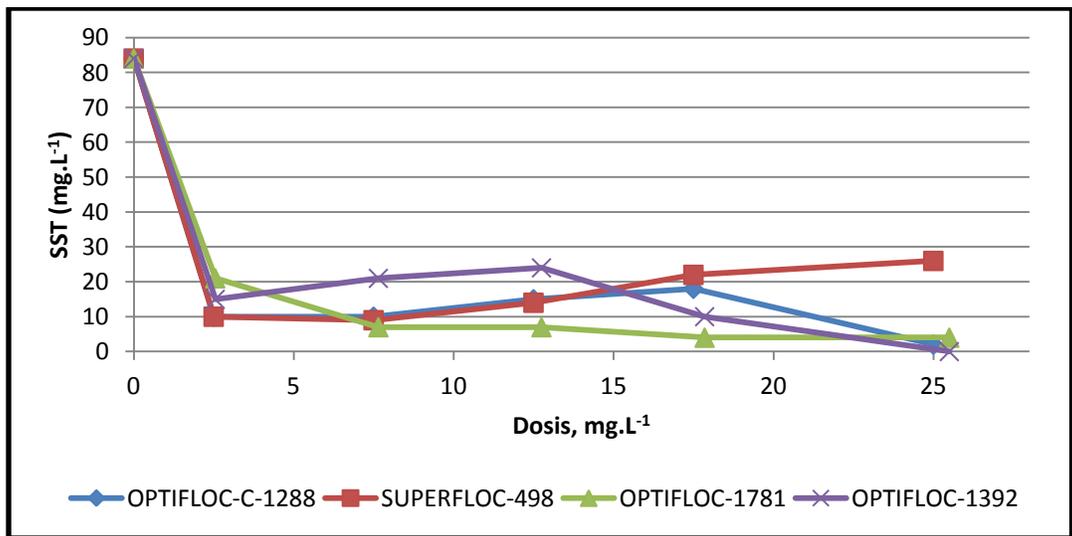
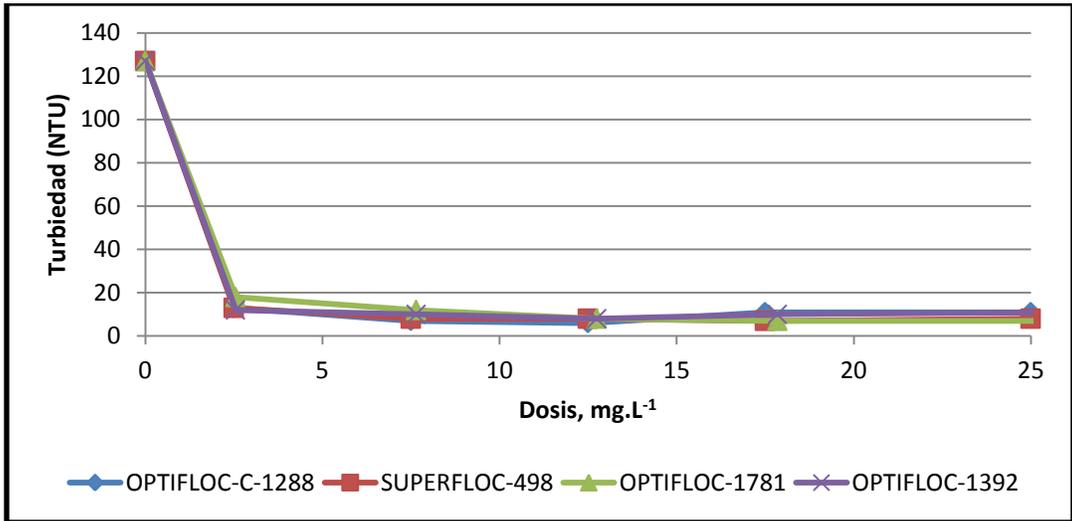
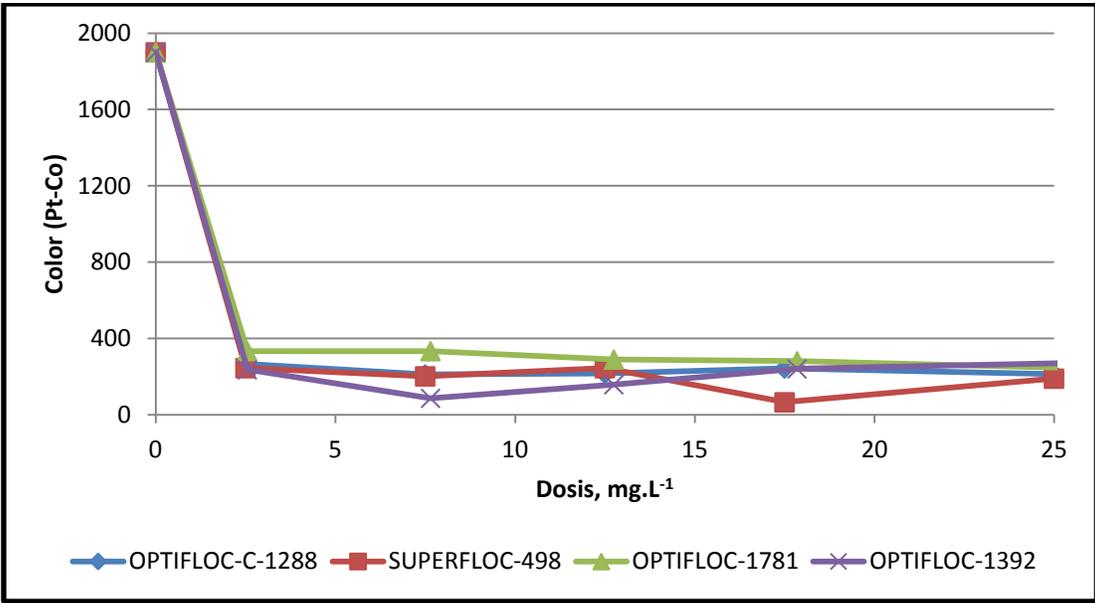
Tabla F. 1 Resultados de % de remoción de los parámetros de respuesta para cada pH.

% REMOCIÓN												
pH	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Color	32.49	52.10	61.62	18.21	60.22	70.31	55.18	64.15	58.82	45.94	90.70	98.88
Turbiedad	0.00	48.55	40.58	50.72	31.88	45.65	48.55	49.28	53.62	48.55	89.86	98.55
DQO	14.91	7.74	11.70	18.30	5.28	23.96	25.85	29.81	23.40	22.64	66.60	57.55
SST	43.60	38.46	43.60	38.46	48.72	43.60	48.72	43.60	53.85	58.98	74.37	84.62
SSV	9.92	0.92	27.95	9.92	18.92	9.92	27.95	9.92	36.95	45.95	72.97	82.00
G y A	25.71	0.34	22.31	11.44	25.93	16.42	20.3	23.78	20.27	3.62	92.87	84.03



ANEXO F.- Resultados de los Análisis realizados y variaciones de los diferentes Parámetros dependiendo la Dosis.







ANEXO G.- Resultados de las pruebas con combinaciones de Coagulantes y Floculantes catiónicos para los diferentes Parámetros de Respuesta.

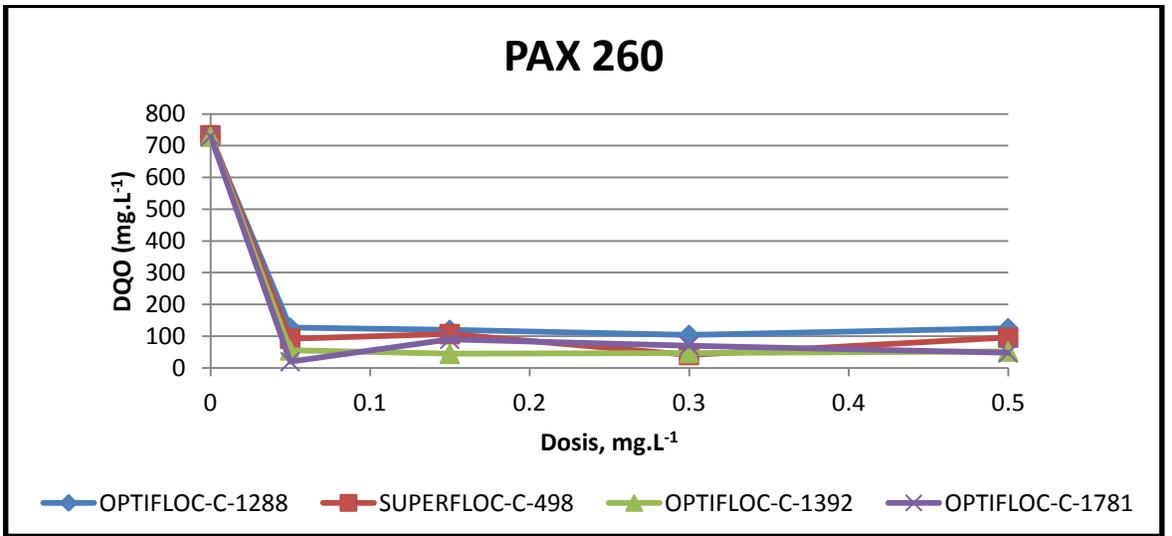
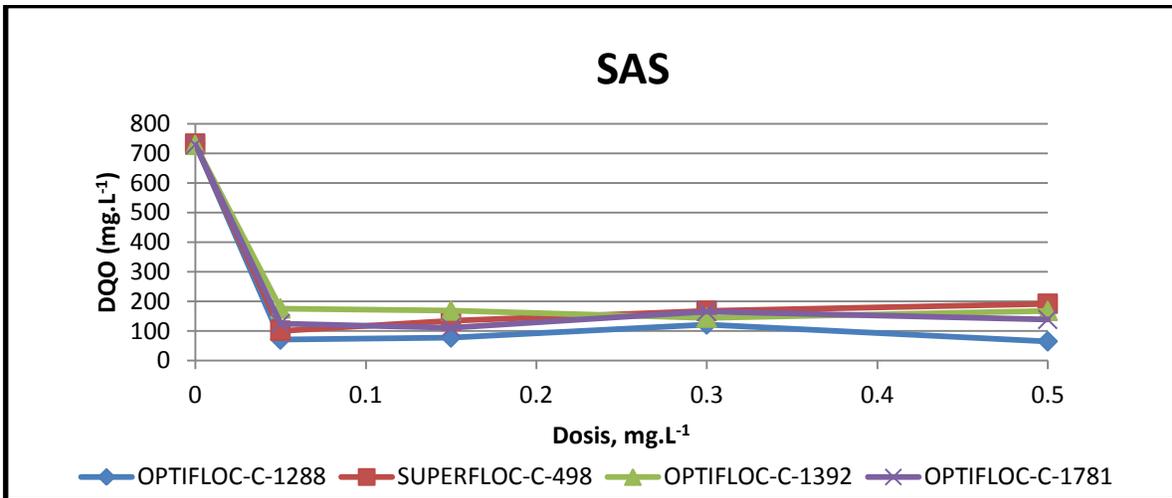
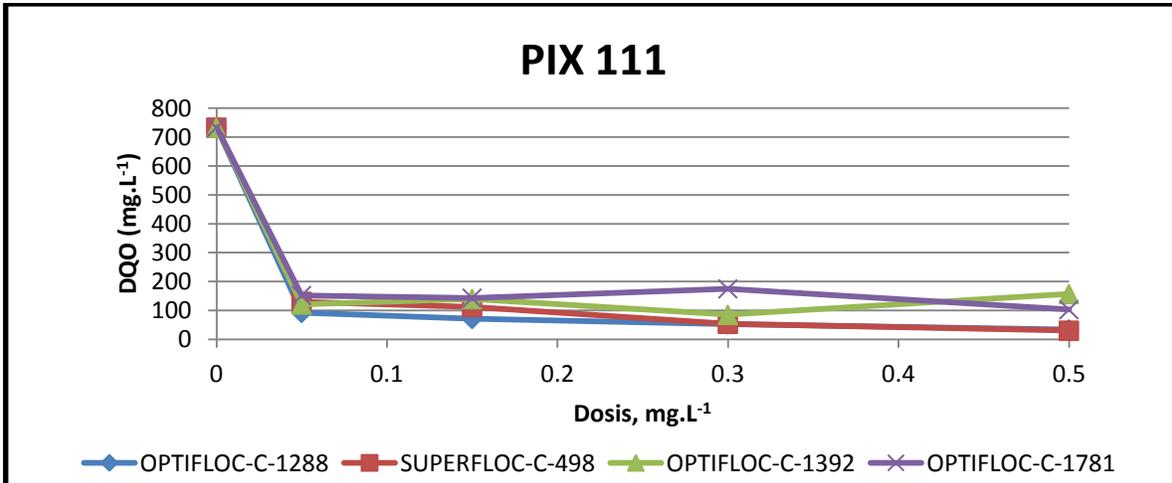


Gráfico H.1 Resultados de las pruebas con combinaciones de coagulantes y floculantes catiónicos para la remoción de DQO.

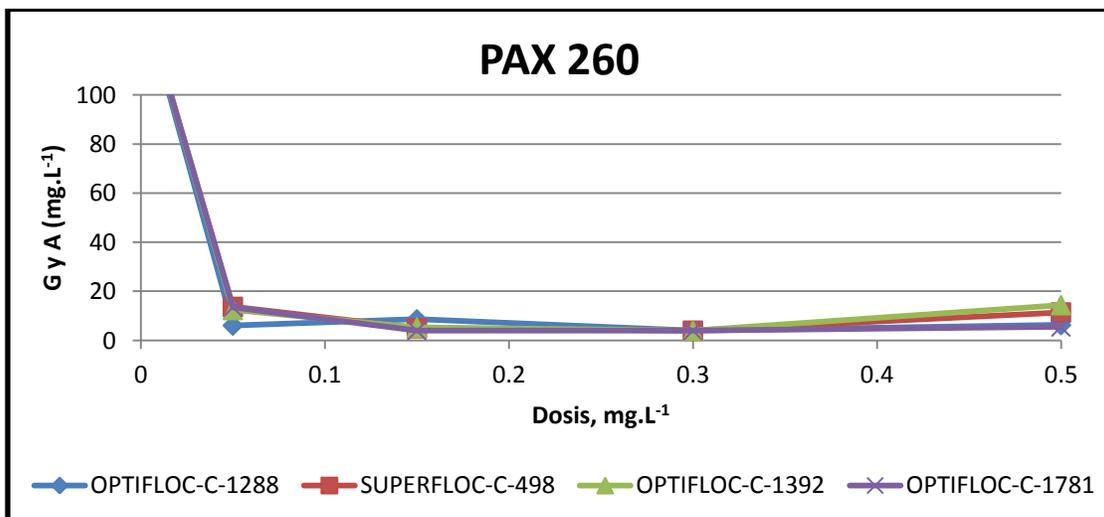
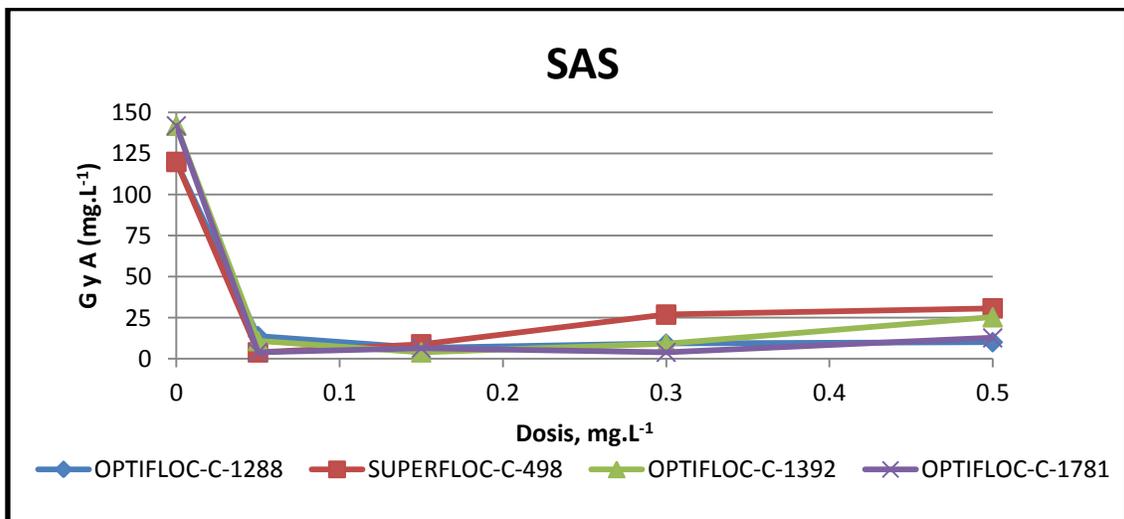
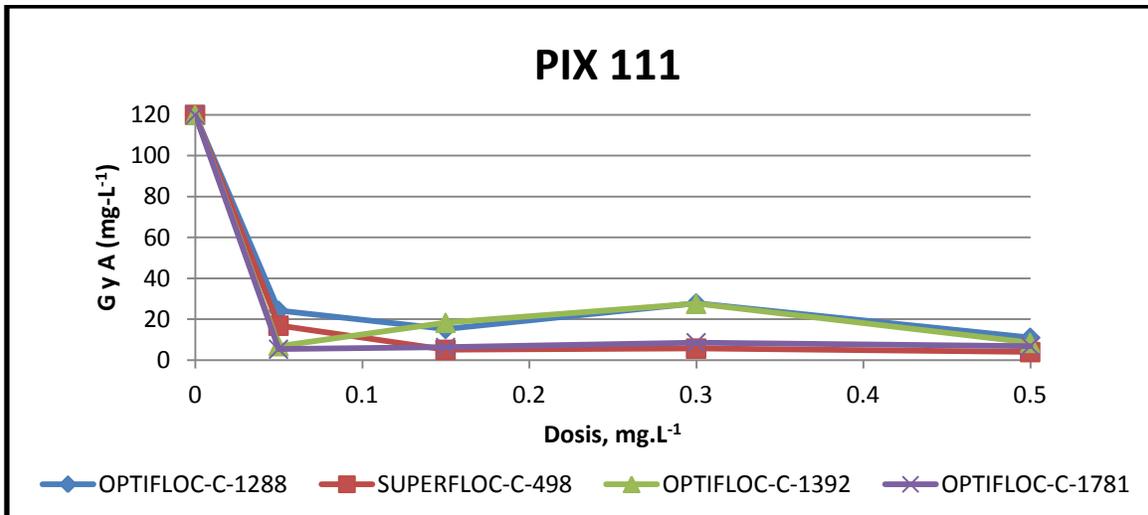


Gráfico H.2 Resultados de las pruebas con combinaciones de coagulantes y floculantes catiónicos para la remoción de GyA.

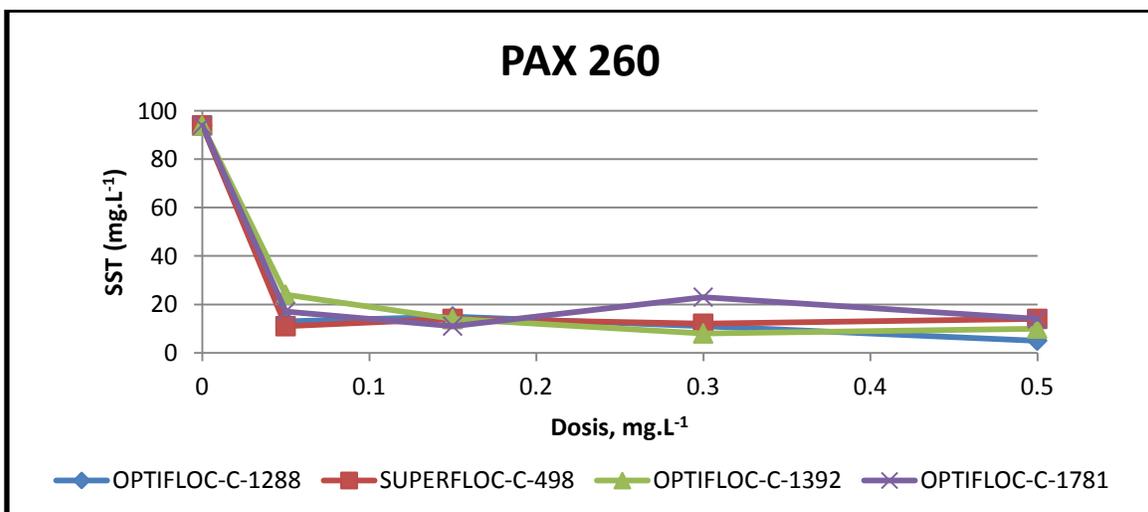
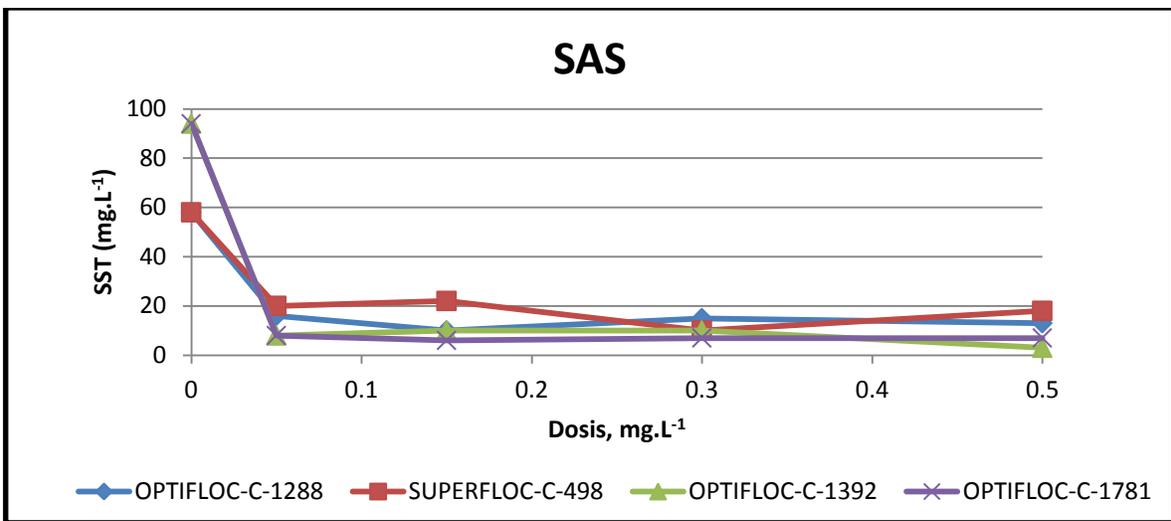
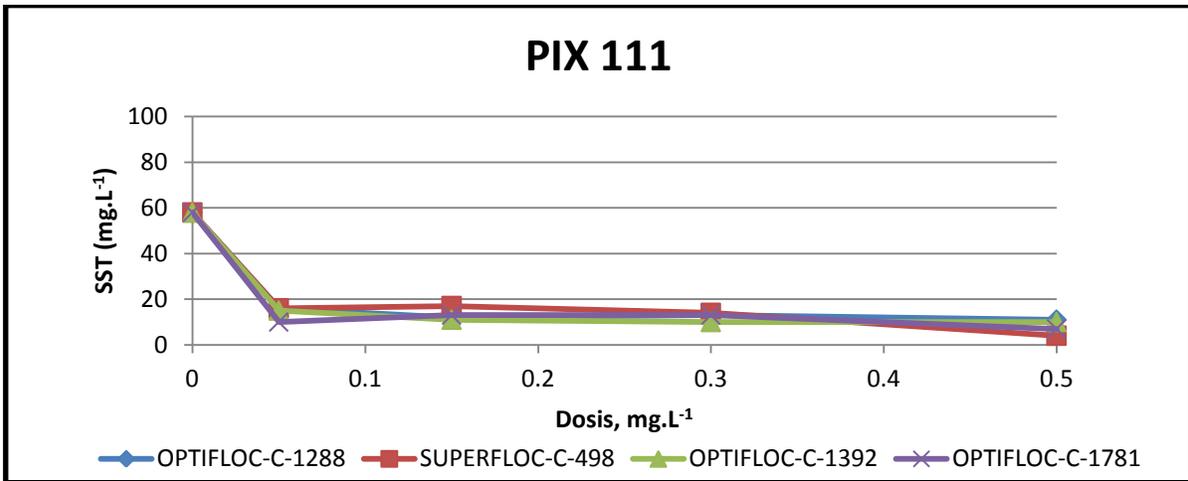


Gráfico H.3 Resultados de las pruebas con combinaciones de coagulantes y floculantes catiónicos para la remoción de SST.

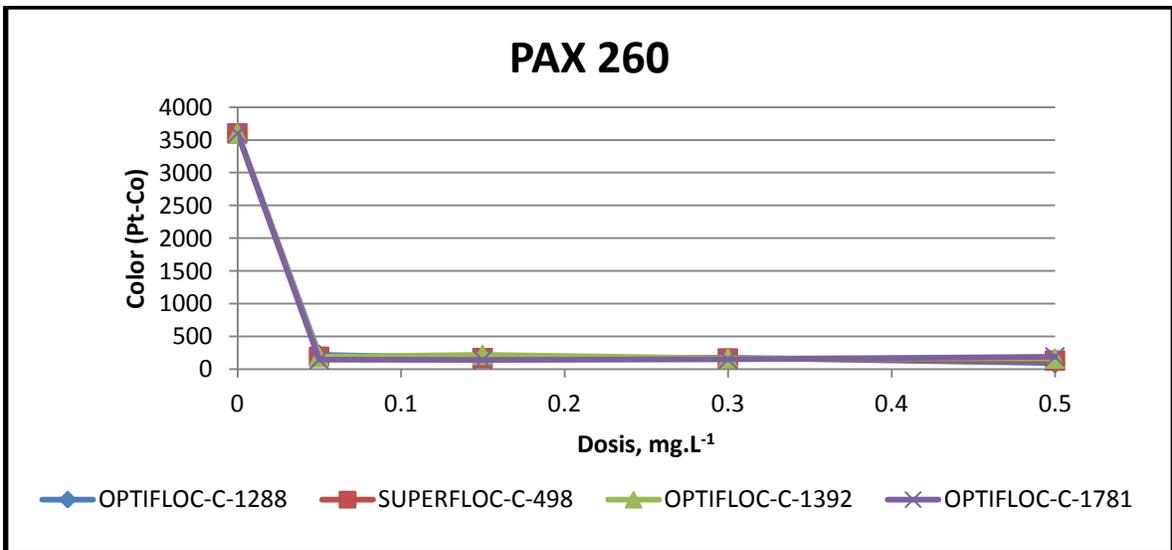
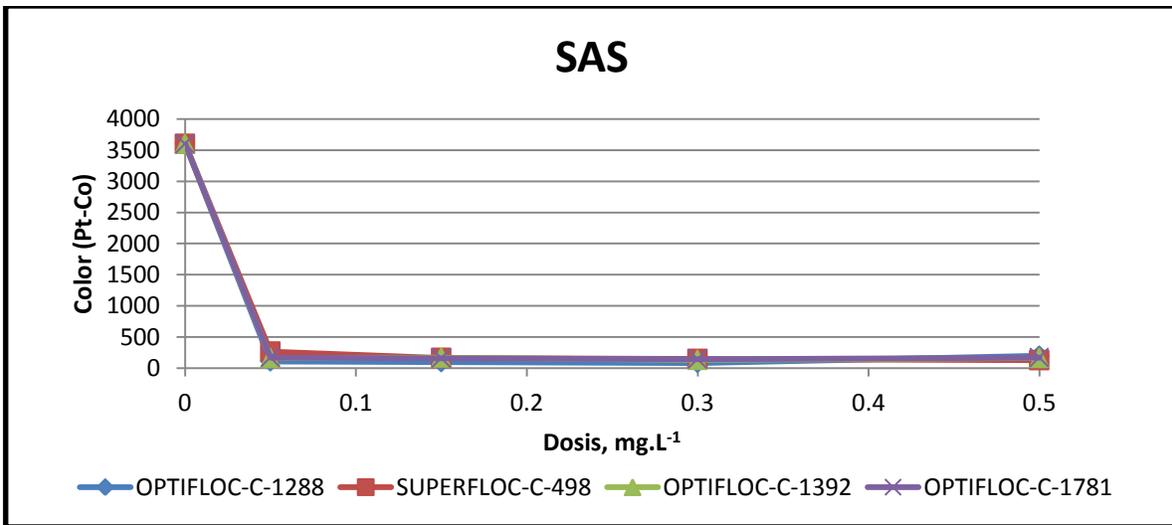
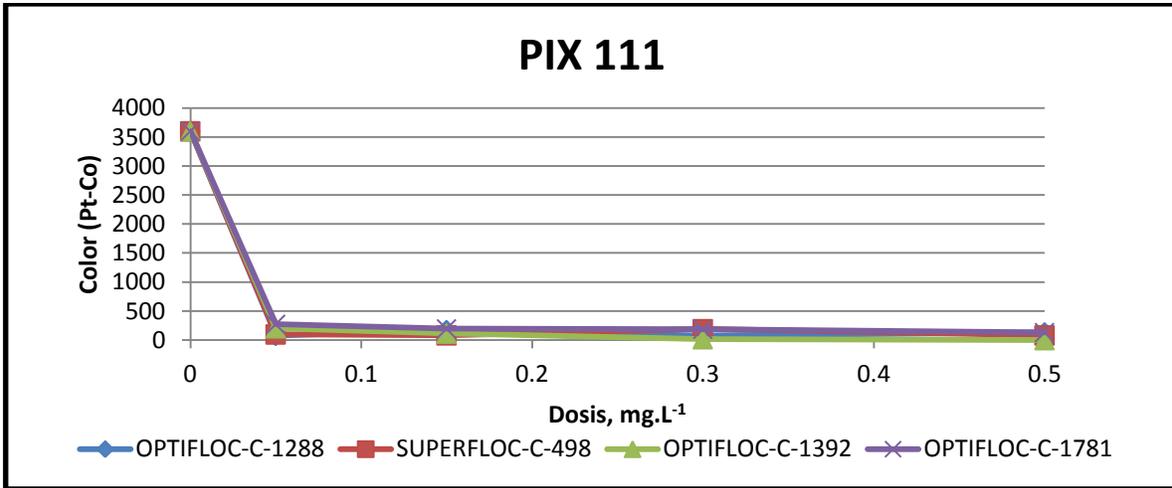


Gráfico H.4 Resultados de las pruebas con combinaciones de coagulantes y floculantes catiónicos para la remoción de color.

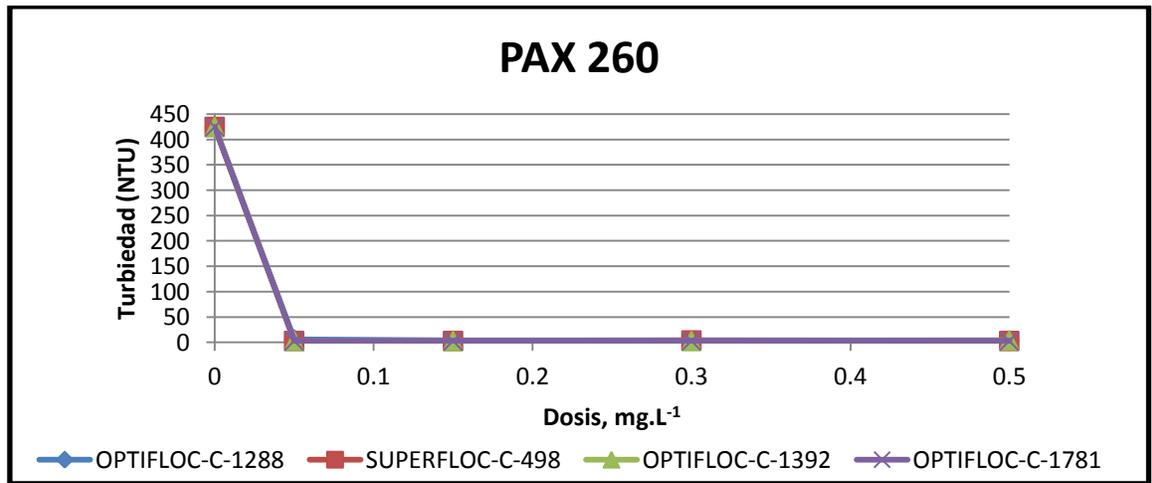
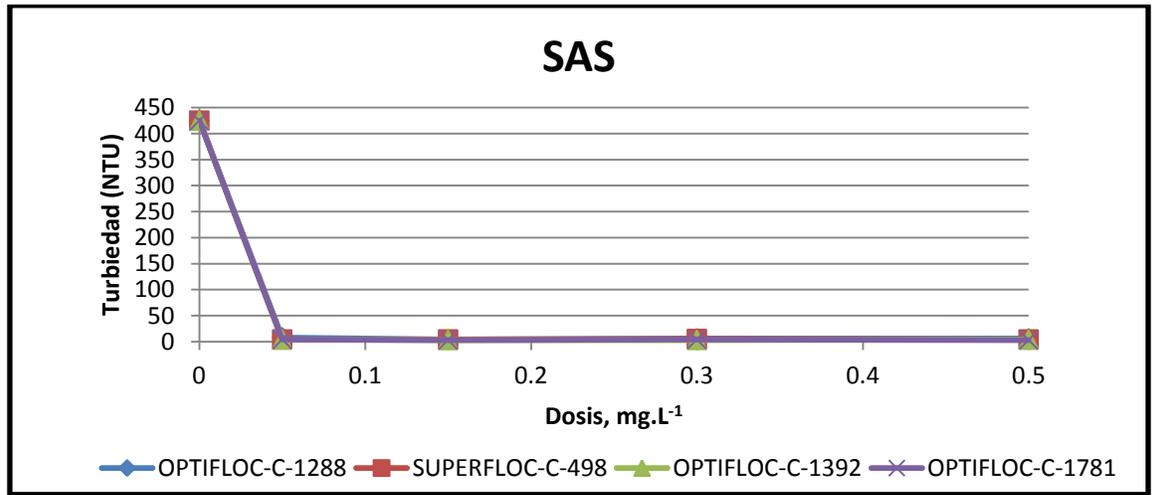
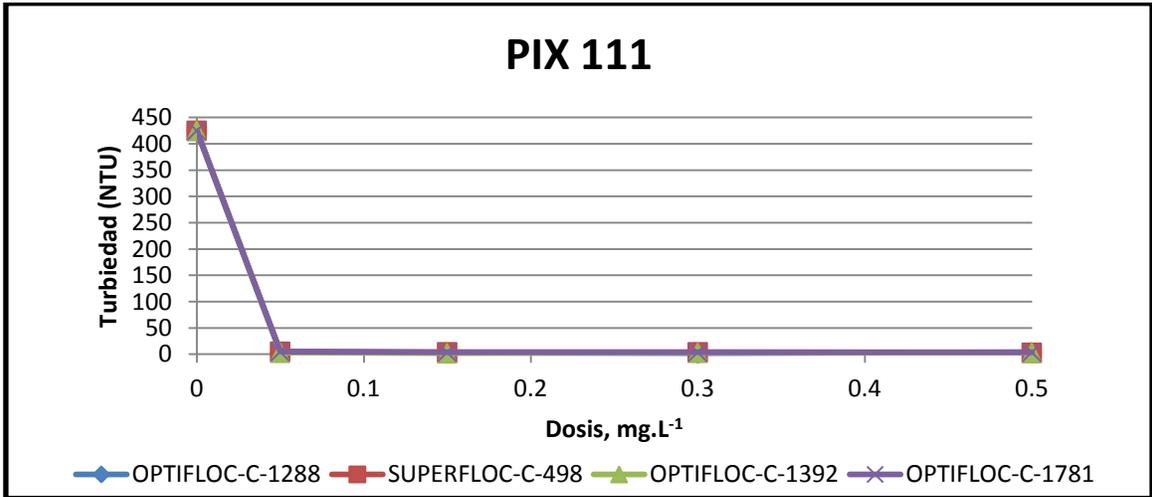


Gráfico H.5 Resultados de las pruebas con combinaciones de coagulantes y floculantes catiónicos para la remoción de turbiedad.