



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA

EFICIENTIZACION DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES PROVENIENTES DE LA INDUSTRIA DE ACEITES COMESTIBLES Y JABONES.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

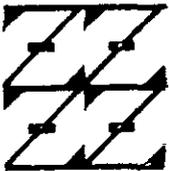
B I O L O G O

P R E S E N T A N

APARICIO OCHOA / OMAR GONZALO

MEJIA GUTIERREZ MARIBEL

UNAM FES ZARAGOZA



LO HUMANO ES DE NUESTRA REFLEXION

DIRECTOR DE TESIS: M. EN C. MIGUEL CASTILLO GONZALEZ.

MEXICO, D. F.

1998.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

265041



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**

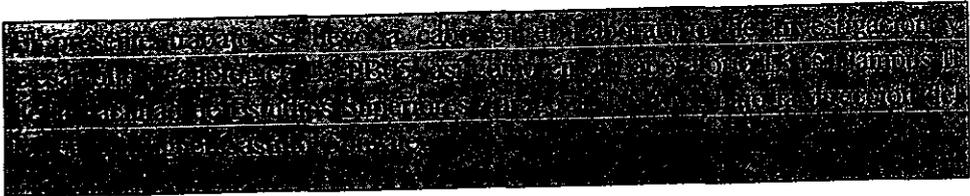


**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



## **AGRADECIMIENTOS**

Al M. en C. José Luis Miguel Castillo González, por todo el apoyo prestado tanto económico como moral. Personas como tu pocas ya que ¿quién te abre las puertas de su hogar sin pedirte algo a cambio?, nunca dejes de ser tu mismo. Esperamos sigas teniendo muchos logros.

A la M. en C. Lourdes Castillo Granada y a la Biól. Maricela Arteaga Mejía por el tiempo cedido para la revisión de este trabajo, así como por los comentarios aportados para el mejoramiento del mismo.

A la Biól. Aída Zapata Cruz y al Biól. Raúl Arcos Ramos por la revisión del escrito así como los comentarios realizado para el mejoramiento del mismo.

A todos los profesores de Biología de la FES Zaragoza por todos los conocimientos transmitidos.

A la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza de la cual nos llevamos grandes recuerdos y experiencias, pero sobre todo un gran sentido de responsabilidad y compromiso con la comunidad.

**DEDICATORIAS**

A mi papá:

**Rolando Aparicio.**

Jefe es tanto lo que le quiero decir que se me cruzan las ideas. Creo que ya hace mucho tiempo que no le digo algo que siento por usted: lo quiero mucho. Aún me siento ese chiquillo que cuando lo veía llegar del trabajo corría a abrazarlo y que siempre que pensaba en el momento en que ya no estuviera lloraba inconsolable. Este pensamiento aún me embarga y quisiera que ese momento nunca llegara. Espero que este trabajo le guste y le provoque satisfacción porque aquí se condensa el esfuerzo realizado por todos mis hermanos quienes no tuvieron oportunidad de concluir sus estudios. De parte de tus hijos.

**Te Queremos**

A mi mamá:

**Ofelia Ochoa.**

Le agradezco por todas las penas, angustias y sinsabores que le hice pasar, ya que siempre se preocupa porque su familia se encuentre bien, porque a pesar de los años sigue siendo incansable y junto con mi papá nos dieron la oportunidad de crecer; porque siempre se privó de algún gusto para ofrecernoslo; porque sus necesidades se satisfacen cuando lo hacen las nuestras. Porque no hay nadie como tu.

**Te Quiero Mucho**

A mis hermanos:

**Juan, Concha, Rolando, Pedro, Lalo, Adriana,**

**René, Jesús, Alán, Anabel, y Bruno.**

Porque juntos formamos algo que mucha gente envidiaría: una gran familia. Porque gracias al intercambio de ideas y a la personalidad tan diferente de cada uno logramos formarnos un carácter muy especial. Por todos los momentos felices y de tristeza. Por todo lo que me permite decir que son mis hermanos. Este trabajo también es un logro suyo.

**Con Mucho Afecto**

A:

### † Adriana.

Por todo lo que compartiste conmigo, tus andanzas, tristezas, alegrías y preocupaciones. Por tus enseñanzas, tu tiempo, locuras y clases de rock and roll. Porque me hiciste y me haces mucha falta, ¿Porqué te fuiste?

**Te extraño**

A mi esposa:

### Hazel.

Desde que te conocí **Has** sido parte importante en mi vida porque me diste todo lo que *necesitaba*, *Amor, comprensión, confianza*; con todo eso lograste rescatarme del momento de **Zozobra** en que me encontraba; eres alguien que cambio para siempre mi vida y estoy muy agradecido; **Espero** que nuestro sentir perdure por siempre; cómo agradecerte el haberme apoyado tanto para **Lograr** terminar esta investigación; sólo puedo ofrecerte mi esfuerzo, cariño y comprensión.

**Te Amo**

A:

### Esau y Ailed.

A él porque lo siento como a mi propio hijo, porque me permite sentirme niño otra vez y porque llena de alegría nuestro hogar. *Porque es el recuerdo más grande que tengo de mi cuñado Marcelo al cual llegué a estimar bastante (todos te extrañamos).*

A mi hija porque es el resultado del gran amor y comprensión que comparto con mi esposa; porque por cada día que estoy con ella me siento un año más feliz y porque es el motivo de que aún tenga anhelos.

**Los Quiero Mucho**

A mis sobrinos:

Con la esperanza de que el ver culminado este trabajo le sirva de aliciente y los impulse a seguir estudiando y superándose para lograr sus metas.

**Con Mucho Cariño**

A:

**Héctor y Roberto.**

Dos de las escasas personas que comprendieron mi sentir. Gracias por brindarme su amistad.

A mis amigos, a la banda y a todos aquellos (que son muchos) que me apoyaron de una u otra manera. Sería necesario otro libro para poder decir a cada uno todo lo que siento por ellos. Valga en esta ocasión para todos un gran:

**GRACIAS**

**GONZALO**

**DEDICATORIAS**

A mi madre:

*Alejandra Gutiérrez*

porque no solo sufres con mi dolor, sino porque sabes crecer con mis éxitos, por todo tu sacrificio, comprensión y cariño; porque no importa el tiempo perdido si tú estas ahí para despejar mi camino impulsando mis sueños y gozando mis logros; porque pides mi felicidad como algo que también es esencial para ti.

*Te amo*

A mi padre:

*Máximo Mejía*

Por impulsarme a superarme y seguir tu ejemplo; por el apoyo moral y económico brindado; porque quise tener un instante de tu tiempo y al abrazarlo se me escapo en un suspiro; por todo tu amor y confianza.

*Te amo Papá*

A mis hermanas

*Ely y Erika*

Porque me enseñaron que no hay un modo fácil y un modo difícil de hacer las cosas, todo lo que se tiene que hacer es hacerlas, por todo su amor y confianza

*Las amo*

A:

*Mis abuelo, Tíos, Primos y Sobrinos*

Por su apoyo incondicional, cariño y confianza

*Los amo a todos*

A:

*Alejandro Tacháustegui*

Porque todo lo que escriba es nada comparado con lo que significas para mí: Gracias por compartir siete años de la historia de este libro y un sentimiento único que durará por siempre.

*T.Q.A.S.*

A:

*Gonzalo Aparicio*

Por tu gran apoyo y comprensión, ya que sin ti este trabajo no se hubiera completado: por tu amistad.

*Gracias*

A:

*Mis amigos*

Por brindarme su amistad y momentos inolvidables en mi paso por esta Facultad y por completar el espacio que queda en la hoja

*No los olvidaré*

**MARIBEL**

## ÍNDICE

### RESUMEN

#### Capítulo 1

<b>INTRODUCCIÓN</b>	1
1.1. Contaminación del agua	3
1.2. Fuentes de contaminación del agua	4
1.3. Efectos de la contaminación del agua	6
1.4. Clasificación del agua residual	10
1.5. Legislación ambiental en materia de agua	12
1.5.1. <i>Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA)</i>	13
1.5.2. <i>Ley de Aguas Nacionales (LAN)</i>	14
1.5.3. <i>Reglamento de la Ley de Aguas Nacionales</i>	15
1.5.4. <i>Normalización</i>	15

#### Capítulo 2

<b>CONTAMINACIÓN DEL AGUA POR FUENTES INDUSTRIALES</b>	17
2.1. Industria Alimentaria	17
2.2. Proceso de producción de las grasas y aceites	18
2.3. Principales contaminantes generados e indicadores de contaminación	23

#### Capítulo 3

<b>TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES</b>	29
3.1. Importancia del tratamiento de aguas residuales	29
3.2. Generalidades del tratamiento de aguas residuales	30
3.2.1. <i>Tratamientos primarios</i>	32
3.2.1.1. Flotación	33
3.2.2. <i>Tratamientos secundarios</i>	36
3.2.3. <i>Tratamientos terciarios</i>	36
3.2.3.1. Coagulación	37
3.2.3.2. Factores a controlar en la prueba de jarras	41

#### Capítulo 4

<b>JUSTIFICACIÓN</b>	44
----------------------	----

#### Capítulo 5

<b>HIPÓTESIS</b>	46
------------------	----

#### Capítulo 6

<b>OBJETIVOS</b>	47
------------------	----

<b>Capítulo 7 .</b>	
<b>METODOLOGÍA</b>	<b>48</b>
7.1. Fase de gabinete	48
7.2. Fase de campo	48
7.3. Fase de laboratorio	50
<b>Capítulo 8</b>	
<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS</b>	<b>55</b>
8.1. Etapas del proceso productivo donde se generan residuos	55
8.2. Caracterización física y química del efluente	56
8.3. Discusión del proceso de flotación	60
8.4. Discusión de la prueba de jarras	63
8.5. Discusión del proceso de coagulación	77
<b>Capítulo 9</b>	
<b>CONCLUSIONES</b>	<b>80</b>
<b>Capítulo 10</b>	
<b>RECOMENDACIONES</b>	<b>82</b>
<b>Capítulo 11</b>	
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>84</b>
<b>ANEXOS</b>	

## RESUMEN

---

En el sector alimenticio se consumen grandes cantidades de agua durante sus procesos, generando un gran volumen de aguas residuales, con residuos químicos que requieren su caracterización, así como efectuar tratamientos más complejos de los que se aplican de manera tradicional. Aunado a los problemas anteriores se presenta la escasez y contaminación de recursos hídricos, por lo que es prioritaria la necesidad de diseñar estrategias que permitan reusarla ya sea en el mismo proceso productivo, o en algunas otras actividades para disminuir su demanda y el volumen de las descargas generadas, llegando incluso a su venta de acuerdo a su calidad.

En la presente investigación se realizaron pruebas a nivel laboratorio para el tratamiento del efluente procedente de la elaboración de aceites comestibles, mediante los procesos de flotación y coagulación. En cada tratamiento se realizaron pruebas de tratabilidad para determinar las condiciones óptimas, encontrando que para la flotación se requiere una cantidad de 5000 cm<sup>3</sup> de aire inyectado durante 20 minutos a 23 °C, logrando la formación de burbujas de 1.5 mm de diámetro. Con este proceso se logró la remoción de 6 608.2 mg/L de DBO; 17 747.2 mg/L de DQO; 5 176.2 mg/L de grasas y aceites; 2 130 mg/L de sólidos suspendidos; lo anterior representa una eficiencia de 42%, 53%, 72.9% y 46% respectivamente para los parámetros analizados. En el caso de la coagulación se removieron 6,600.1 mg/l de DBO; 9,167.1 mg/L de DQO; 1,535.8 mg/L de grasas y aceites; 2,264 mg/L de sólidos suspendidos, incrementándose con esto la eficiencia del tratamiento en 43.4%, 28.04%, 23.53% y 48.91% respectivamente.

Para la coagulación se utilizó Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> y FeCl<sub>3</sub> a concentraciones de 2.5, 3.5, 4.0 y 5.5 ppm, variando tanto la temperatura (22, 35 y 40 °C), como el pH (5.4, 6.0, 7.0, 7.5, 8.0, 9.0 y 9.5), resultando las mejores condiciones para el primer reactivo: pH = 8, 40 °C y 3.5 ppm; mientras que para el segundo fueron: pH = 9, 40 °C y 3.5 ppm, siendo este último el de mejor poder coagulante.

Por último se concluye que el tren de tratamiento existente es ineficiente ya que el análisis físico y químico del agua al inicio y al final de este demuestra que no se está llevando a cabo una remoción de los compuestos contaminantes. Por otro lado, los resultados de las pruebas realizadas con la flotación y coagulación dan paso al establecimiento de un tren de tratamiento que incluya estos dos procesos con el cual se logra un efluente de mayor calidad susceptible de ser reusado.

## Capítulo 1.

### INTRODUCCIÓN.

En muchas partes del mundo la incorporación de contaminantes derivados de las actividades humanas dentro de los diferentes recursos acuáticos ha ocasionado una seria degradación de la calidad del agua, por lo que para alcanzar su manejo adecuado se requiere el establecimiento de sistemas de control, con el fin de lograr un nivel que reúna las características deseables para lograr su aprovechamiento en diferentes usos.

Los recursos hídricos continentales de México están constituidos por ríos, lagos, lagunas, aguas subterráneas así como agua de lluvia. La extracción total del agua del país es actualmente de 174 mil millones de m<sup>3</sup> al año, equivalentes al 43% del agua renovable, en tanto que el consumo total representa el 15% de la misma.

La extracción y utilización del agua en nuestro país ha sido creciente y como consecuencia, se presenta un mayor volumen de descarga de aguas residuales provenientes tanto de las actividades cotidianas de la población, como la requerida por la industria para sus procesos productivos. Este comportamiento no parece modificarse en los próximos años, según se observa durante el periodo 1980-2000 (cuadro 1.1).

**Cuadro 1.1 Extracción y descarga de aguas residuales por población e industrias, 1980-2000.**

Extracción (m <sup>3</sup> /seg)	1980	1990	2000
Población	126.6	146.4	157.8
Industria	84.4	97.6	105.2
Total	211	244	263

Descarga (m <sup>3</sup> /seg)	1980	1990	2000
Población	94.9	109.8	118.4
Industria	71.7	82.9	89.4
Total	166.6	192.7	207.8

FUENTE: INEGI, 1994.

Por lo que respecta a la extracción en áreas rurales así como la descarga de las mismas, se observa una tendencia al alza mucho mayor que el agua utilizada en áreas urbanas, ya que de acuerdo con las proyecciones disponibles, el agua destinada a las actividades agrícolas en el año 2000 será 100% mayor a la utilizada en 1980 (cuadro 1.2) (INEGI, 1994).

**Cuadro 1.2 Extracción de agua y generación de aguas residuales por actividades agrícolas, 1980-2000.**

Año	Extracción (millones de m <sup>3</sup> )	Descarga (millones de m <sup>3</sup> )
1980	44,760	8,056.8
1990	69,542	8,345
2000	92,380	11,085

FUENTE: INEGI, 1994.

Los términos reciclaje y reuso del agua no deben confundirse, mientras que por el primero se entiende la captura y recuperación de la que se encuentra degradada para volver a usarla en el mismo proceso que la generó, mientras que por reuso se entiende la práctica de recuperarla para emplearla luego de aplicarle un tratamiento adecuado (National Research Council, 1995). El agua residual ha sido reusada para diferentes propósitos, los cuales incluyen la creación o mejoramiento de instalaciones recreativas, provisión a las industrias, recarga de acuíferos, jardines, riego de caminos, servicios de limpieza y reuso, en casos especiales, para el abastecimiento directo de agua potable. El reuso del agua proporciona una alternativa prometedora a su colección y conducción desde fuentes cada vez menos numerosas y más alejadas del punto de uso y a la recuperación de la utilizable proveniente de los océanos (A.S.T.M., 1994).

Aunque el manejo de aguas residuales se remonta a tiempos antiguos, su tratamiento es relativamente reciente, ya que se inició a finales del siglo XIX y principios del actual (Metcalf y Eddy, 1991).

Conocido el origen de un agua y sus características físicas, químicas y bacteriológicas, así como su posible contaminación y estableciendo una comparación con las que se requieren para otros usos, puede juzgarse sobre la necesidad y probabilidad de su tratamiento, el cual puede efectuarse de forma más o menos completa de acuerdo a los defectos que deban corregirse. Pueden ser necesarios varios procesos, y en este caso deberá estudiarse una combinación de estos de la forma más razonable, tanto desde el punto de vista de la eliminación de contaminantes, como de las condiciones locales de la instalación (Degremont, 1979).

Los contaminantes del agua residual son eliminados por medios físicos, químicos y biológicos. Los medios de tratamiento en que se aplican predominantemente fuerzas físicas se llaman operaciones unitarias, las que incluyen el cribado, floculación, sedimentación, flotación, filtración, entre otros. Los medios de tratamiento en los que la eliminación de los contaminantes se consigue mediante la adición de productos químicos o por actividad biológica se conocen como procesos unitarios, como serían la precipitación, coagulación, intercambio iónico, lagunas de estabilización, biodiscos, entre otros (Metcalf y Eddy, 1991).

## 1.1. CONTAMINACIÓN DEL AGUA

Un recurso hídrico se considera “contaminado” cuando la composición o su estado natural son directa o indirectamente modificadas por las actividades del hombre, así como por sucesos naturales en una medida tal que disminuye la facilidad de utilización para todos o algunos fines a los que podrían servir inicialmente.

El crecimiento progresivo de los núcleos poblacionales, el aumento de la densidad, sus actividades artesanales, ganaderas, el cultivo intensivo de la tierra para satisfacer las exigencias de una población y el desarrollo industrial son las causas principales de la aportación de residuos que contaminan las aguas subterráneas, ríos, lagos, y mares, destruyendo o modificando la fauna y flora y rompiendo el equilibrio del ecosistema, así como la armonía entre el hombre y su medio (Hernández, 1992).

## 1.2. FUENTES DE CONTAMINACIÓN DEL AGUA.

### 1.2.1.- Fuentes Domésticas.

El agua residual doméstica es la que procede de cocinas, baños, lavabos, sanitarios y lavado de ropa. A los materiales minerales y orgánicos contenidos originalmente en el agua suministrada a la comunidad, se agrega un cúmulo de materia fecal, papel, jabón, sólidos, restos de alimentos y otras sustancias. Ciertos residuos permanecen en suspensión, algunos entran en solución y otros se encuentran o llegan a estar tan finamente divididos que adquieren las propiedades de las partículas coloidales (cuadro 1.3) (Ramalho, 1993).

Gran parte de la materia residual es orgánica y útil para los organismos saprófitos, es decir, organismos de la descomposición. Se infiere que los efluentes domésticos son inestables, por lo que debe suponerse que se encuentran presentes organismos entéricos que los hacen peligrosos (Fair, 1996).

Cuadro 1.3. Composición típica de un agua residual doméstica.

Constituyente	Débil	Media	Fuerte
	(Todos en mg/L, excepto sólidos sedimentables)		
Alcalinidad	50	100	200
DBO5	100	200	300
DQO	250	500	1000
Cloro	30	50	100
Sólidos suspendidos	100	200	350
Sólidos sedimentables (mL/L)	5	10	20
Sólidos disueltos totales	200	500	1000
Nitrógeno Total	20	40	80
Carbono Orgánico Total	75	150	300
Fósforo Total	5	10	20

FUENTE: Davis and Cornwell, 1991.

### 1.2.2.- Fuentes Industriales.

La industria utiliza grandes volúmenes de agua en sus procesos de manufactura y en las operaciones complementarias (cuadro 1.4). De hecho la producción de alimentos, metales y productos químicos requieren una cantidad de agua que excede en mucho el volumen combinado de otras materias primas (Fair, 1996).

**Cuadro 1.4. Extracción, consumo y descarga anual de agua a nivel nacional.**

USO	VOLUMEN (Km <sup>3</sup> )		
	Extracción	Consumo	Descarga
Agrícola	55.5	46.6	8.9
Industrial	9.3	3.7	5.6
Urbano	7.4	3.5	3.9
Hidroeléctrico	128.8	-	-
<b>Total</b>	<b>185.0</b>	<b>53.0</b>	<b>19.2</b>

FUENTE: SEDESOL/INE, 1994.

Del total de agua que se emplea en las plantas industriales, una pequeña parte se convierte en constituyente del producto manufacturado, del resto, sólo se consume una pequeña fracción o se pierde por evaporación. La fracción mayor no se emplea para fines de consumo, se convierte en agua residual que ha tenido usos tales como enfriamiento, transporte o limpieza y puede contener muchos contaminantes (Fair, 1996). Sin embargo, existen casos tal como el de la elaboración de bebidas en el cual el agua es el principal constituyente.

El sector industrial genera, a nivel nacional, 82 m<sup>3</sup>/s de aguas residuales de muy variados tipos y características, las cuales resultan en su mayoría altamente contaminantes para los cuerpos de agua, por descargarse sin tratamiento alguno. Las principales ramas industriales responsables de esta problemática son la azucarera, química, celulosa y papel, petróleo, bebidas, textiles, siderúrgica y alimentos. La industria azucarera es la principal generadora con un 39% del total producido por el sector industrial, en segundo lugar esta la industria

química con un 21%, y los restantes 6 giros un 22%. El resto de las industrias aportan en conjunto el 18% (cuadro 1.5) (INEGI, 1994).

**Cuadro 1.5. Industrias responsables de los volúmenes de descarga de agua residual.**

Industria	Extracción (%)	Consumo (%)	Descarga (%)
Azucarera	35.20	22.3	38.8
Química	21.70	24.4	21
Papel y Celulosa	8.20	16.1	6
Petróleo	7.20	3.7	8.2
Bebidas	3.30	6.4	2.4
Textil	2.60	2.4	2.7
Siderúrgica	2.50	5.5	1.7
Eléctrica	1.50	4.7	0.7
Alimentos	0.20	0.3	0.2

FUENTE: INEGI, 1994.

La mayor parte se vierte finalmente a las corrientes naturales en forma de agua de desecho, de esta forma, la industria se une a las granjas, minas, municipalidades y contribuye a contaminar ríos, cultivos y lagos. En la industria, las aguas de enfriamiento constituyen los volúmenes mayores y se encuentran contaminadas principalmente por el calor. Las de limpieza y enjuagues contienen sólidos y líquidos de proceso que se utilizaron durante su implementación; aún cuando generalmente se diluyen, también pueden acarrear una diversidad de problemas (ASTM, 1994).

### 1.3. EFECTOS DE LA CONTAMINACIÓN DEL AGUA.

La preocupación por la contaminación del agua puede sintetizarse en algunos efectos producidos en el entorno ya que de acuerdo a la acumulación de contaminantes en un cuerpo de agua, su concentración puede llegar a ser tan alta que llegará un momento en que sus características ecológicas o estéticas se verán afectadas en forma significativa; algunos ejemplos son los mencionados por Hernández (1992):

- ⊗ Destrucción de los limitados recursos de agua.
- ⊗ Disminución de la calidad del agua para abastecimiento de la población, o usos para el riego y la industria.
- ⊗ Disminución del poder autodepurador de los cauces receptores con destrucción de su fauna y flora, imposibilitando o dificultando su utilización.

El poder autodepurador de un cuerpo de agua está determinado por la actividad microbiológica que allí se presenta, por lo que si se descargan residuos tóxicos la población microbiana puede ser destruida, con lo cual se rompería el proceso natural de purificación. Los organismos pueden sobrevivir en presencia de sustancias tóxicas presentes en bajas concentraciones a pesar de que su crecimiento puede ser inhibido. Un ejemplo es el fenol, el cual es tóxico para muchos organismos y aunque ciertas bacterias del género *Pseudomonas* pueden utilizarlo como nutrimento, su actividad se verá inhibida a concentraciones altas (Winkler, 1996).

Cualquier material o condición que interfiera con la disolución y transferencia de oxígeno en un cuerpo de agua contribuirá a la contaminación, por ejemplo los sólidos suspendidos impiden que la luz llegue hasta los organismos fotosintéticos, con lo que se reduce la producción de oxígeno; por otro lado aumentan la viscosidad del agua y perjudican el flujo de la corriente reduciendo así la transferencia de oxígeno. Cuando este tipo de contaminante está constituido principalmente por materia orgánica se descomponen lentamente creando con esto una demanda de oxígeno retardada. Otro de los efectos de los sólidos es una apariencia estética desagradable de los cuerpos de agua (Tebutt, 1990).

La contaminación puede ser resultado de la elevación de la temperatura en el agua presentándose con este fenómeno dos efectos principales. En primer lugar, el oxígeno resulta menos soluble en el agua al aumentar la temperatura el otro es que afecta la actividad metabólica de los organismos viéndose incrementada con una elevación de la temperatura, con lo que se obtiene una reducción en la disponibilidad del oxígeno disuelto y un aumento en la tasa a la que se consume. Como un efecto adicional se tiene que los organismos

adaptados a condiciones más cálidas proliferan preferentemente a la mezcla normal (Winkler, 1996).

La disposición incontrolada y persistente de contaminantes ha deteriorado la calidad del agua en varios acuíferos en particular la contaminación biológica de las fuentes subterráneas de las que se abastece el medio rural. A consecuencia del desarrollo industrial, cada vez es más frecuente la detección de algunos metales pesados y compuestos orgánicos en las fuentes de aguas subterráneas que sustentan el abastecimiento de agua potable a importantes centros de población (CE, CNA, IMTA, 1994).

En nuestro país se utiliza el Índice de Calidad del Agua para determinar el grado de contaminación de los cuerpos acuáticos, siendo la CNA la encargada de proporcionar dicha información (cuadro 1.6). Este organismo realizó estudios en 1,185 sitios de muestreo con lo cual estimó que el 6.7% de los mantos subterráneos, cuencas hidrológicas, mantos acuíferos, puertos industriales y centros turísticos, están "excesiva o fuertemente contaminadas"<sup>1</sup>. Aunque esta medida de calidad no se elevó considerablemente, logrando mantenerse en la categoría de contaminada, en algunas regiones se puede observar un deterioro marcado y de conservarse esta tendencia al inicio del próximo siglo más de la mitad de las regiones hidrológicas estarán en ese caso y algunas de ellas, como la de Tula requerirán largo tiempo e inmensos recursos para recuperarse de los estragos causados por los decenios de uso inadecuado del recurso y prácticas contaminantes (INEGI, 1994).

**Cuadro 1.6. Índice de Calidad del Agua.**

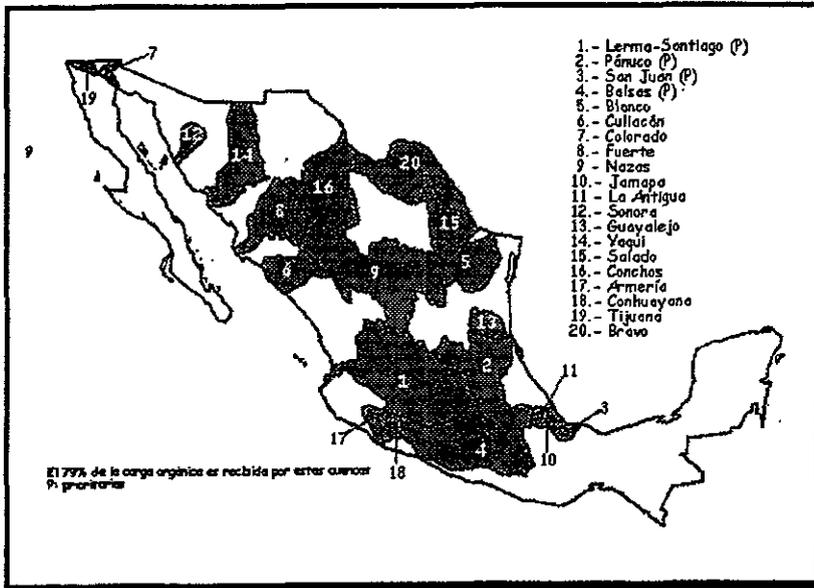
Rango	Calificación	Clave
90-100	Excelente	E: No requiere purificación
80-90	Aceptable	A: Requiere purificación menor antes de su consumo
70-80	Levemente contaminada	LC: Sin purificación su consumo es peligroso
50-70	Contaminada	C: Requiere necesariamente de purificación
40-50	Fuertemente contaminada	FC: Riesgoso consumirla
0-40	Excesivamente contaminada	EC: Inaceptable para consumo humano

FUENTE: INEGI, 1994.

<sup>1</sup> Los parámetros utilizados por la CNA para determinar la calidad del agua se presentan en el Anexo 1

INEGI, (1994) considera que las áreas con mayor cantidad de mantos freáticos contaminados son la Comarca Lagunera, el Valle de México y la Península de Yucatán. Las que presentan intrusión salina son los acuíferos de los valles de Santo Domingo y de Guaymas; la Costa de Hermosillo; Vizcaino y La Paz. En cuanto a la degradación del recurso por infiltración de aguas superficiales contaminadas, se cuentan los acuíferos del Valle de México, de Tula y de Mérida, mientras que entre las corrientes más contaminadas del país se encuentran las cuencas de los ríos Lerma, Chapala, Santiago, San Juan, Balsas, Blanco, Pánuco, Nazas y Bravo, por lo que se ha considerado de primer orden darles atención y saneamiento (ver figura 1).

**Fig. 1. Cuencas hidrológicas más contaminadas de la República Mexicana.**



FUENTE: INEGI, 1994.

La descarga de aguas residuales al suelo y de sustancias utilizadas en los procesos industriales, la disposición de residuos en tiraderos o rellenos sanitarios y las fugas en las

redes de alcantarillado, son algunos de los principales focos de contaminación de los recursos hídricos.

Los acuíferos que enfrentan problemas de calidad del agua derivados por la actividad agrícola debido a los lixiviados que se generan de la aplicación de agroquímicos y pesticidas son el Valle del Yaqui, Son. y el Valle de Mexicali, B.C. Por disposición de aguas residuales, la porción del sur del Valle de Aguascalientes, Ags., Valle del Mezquital, Hgo., los Valles de León, Celaya y Salamanca, Gto., y el Valle de San Luis Potosí, S.L.P. Por actividad industrial destacan los acuíferos del Valle de León, Gto., Valle de Querétaro, Qro., Cuautitlán y Valle de Toluca, México y Valle de San Luis Potosí, S.L.P. (CE. CNA, IMTA, 1994).

#### **1.4. CLASIFICACIÓN DEL AGUA RESIDUAL.**

Se le llama aguas residuales a aquellas que presentan composición variada provenientes de las descargas de usos municipales, industriales, comerciales, agrícolas, pecuarios, domésticos y en general de cualquier otro uso, así como la mezcla de ellas (LAN, 1992). Debido a que existe una gran cantidad y variedad de contaminantes que son descargados en el agua utilizada por los diferentes sectores sociales, se les ha agrupado en diferentes clases (Davis and Cornwell, 1991) con la finalidad de identificarlos con mayor facilidad y tener un conocimiento aproximado de su composición.

El agua residual se clasifica de acuerdo al sector o fuente generadora, más que al tipo de contaminantes que lleva, las definiciones de cada tipo son las siguientes:

*Aguas residuales de actividades agroindustriales:* Proviene de las actividades de la elaboración de alimentos, crianza y reproducción ganadera, porcícola, avícola y establos. Cuando se analiza la contaminación producida por las industrias agroalimentarias, el principal problema reside en los efluentes líquidos vertidos. La razón de ello es que el agua

se emplea tanto como materia prima, como vehículo térmico, y en procesos de lavado, pelado y escaldado, entre otros.

Estos efluentes llevan una carga contaminante que está compuesta por diversos tipos de sustancias. Entre los efectos físicos se puede destacar el aporte de calor de determinados vertidos, los olores y sabores que suelen ser consecuencia de la presencia de gases en dilución y de sales inorgánicas y la turbidez ocasionada por la presencia de materia sólida en suspensión. Entre los contaminantes químicos inorgánicos podemos destacar la presencia de carbonatos y bicarbonatos e hidróxilos que influyen sobre la acidez y la alcalinidad. Entre los contaminantes químicos orgánicos destacan los aceites y grasas (Seoanez, 1995).

*Aguas residuales de servicios:* Las que provienen de la reparación y mantenimiento automotriz, gasolineras, tintorerías, lavanderías, baños públicos, hospitales, hoteles, restaurantes, revelado de fotografía, cuya composición es muy variada (op. cit.).

*Aguas Residuales Industriales:* Proviene de los procesos de extracción, beneficio, transformación o generación de bienes de consumo o de actividades complementarias; varían en su composición de acuerdo con las operaciones de la industria. Algunas son aguas de enjuague relativamente limpias; otras se encuentran relativamente cargadas de materia orgánica mineral, o con sustancias corrosivas, venenosas, inflamables o explosivas, los residuos calientes fracturan los conductos de barro y mampostería; los productos químicos venenosos destruyen el tratamiento biológico, elimina la vida acuática útil y vuelven peligrosos los abastecimientos de agua (Fair, 1996).

*Aguas residuales domésticas:* Consisten en las aguas de desecho de los hogares, escuelas, oficinas y tiendas (Davis and Cornwell, 1991). Gran parte de la materia residual es orgánica y útil para los microorganismos saprófitos, es decir, organismos de la descomposición, de donde se infiere que es inestable, biológicamente degradable o putrescible y capaz de originar olores desagradables (Fair, 1996).

## **1.5. LEGISLACIÓN AMBIENTAL EN MATERIA DE AGUA.**

El deterioro ambiental urbano se relaciona con fallas institucionales en el sentido de carecer de reglas o mecanismos jurídicos, económicos y sociales que regulen de manera efectiva y eficiente el acceso y uso de los recursos comunes, elementos y sistemas ambientales por parte de la sociedad en su conjunto o de ciertos grupos específicos (PEF, 1996).

Para enfrentar los problemas que ha generado el aprovechamiento del agua, la administración pública ha prestado especial atención a la actualización del marco jurídico y político en materia de agua, a fin de promover los cambios indispensables para lograr un manejo del recurso hídrico acorde al proceso de modernización (SEDESOL-INE, 1994).

Dentro del marco de los cambios políticos, sociales y económicos que ocurren en el país, se analizan las características de la oferta y la demanda del agua, para determinar y proponer las políticas de su aprovechamiento, que facilitarán a la población el acceder a un mejor nivel de vida en lo individual y comunitario, y que de acuerdo a la disponibilidad del agua, su uso y conservación contribuirán al desarrollo regional e integral del país. Por lo tanto es conveniente aplicar normas con criterios de gradualidad y certidumbre de manera que los agentes normados se sujeten a metas específicas, induciendo la adecuación de procesos sin tener que recurrir a controles costosos, que desvían las prioridades de inversión hacia el acatamiento de los límites impuestos, en lugar de mejoras permanentes. Como lo menciona el Programa Nacional de Medio Ambiente 1995-2000, la normatividad debe ser pieza básica de una política de regulación ambiental que deba orientarse a:

- Reducir costos de transacción (negociación, información, monitoreo, control y verificación) para ampliar las posibilidades de gestión ambiental.
- Aplicarse gradualmente cuando así sea conveniente.
- Adoptar un enfoque multimedios para evitar la transferencia de un medio a otro.
- Combinar enfoques preventivos de reducción de contaminantes y residuos en la fuente y de control al final de los procesos.

- Ofrecer certidumbre, favorecer decisiones a largo plazo, esclarecer el horizonte de planeación de las empresas y minimizar la discrecionalidad.
- Constituirse en instrumento de fomento al desarrollo e innovación tecnológica para el desarrollo de actividades productivas limpias y sustentables.

Todas las acciones para los efectos mencionados se representan en un principio por la Constitución en sus artículos 27 y 28, por las distintas leyes emanadas y otras disposiciones de observancia general relativas a la administración del recurso hídrico, como son la LGEEPA y la LAN con su Reglamento. A continuación se mencionan sus principales señalamientos (PEF, 1996).

#### *1.5.1 Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA).*

La LGEEPA promulgada en 1988 y reformada en 1996, es reglamentaria de las disposiciones de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos que se refieren a la preservación, restauración, así como a la protección del ambiente, en el territorio nacional y zonas de su jurisdicción, y establece las bases para garantizar el derecho de toda persona de vivir en un ambiente adecuado para su desarrollo, salud y bienestar, definir los principios de la política ambiental y los instrumentos para su aplicación, así como para la prevención y control de la contaminación, el establecimiento de medidas de control y seguridad para garantizar el cumplimiento y la aplicación de esta Ley y de las disposiciones que de ella se deriven, además de la imposición de sanciones administrativas y penales que correspondan.

La LGEEPA considera que la prevención y control de la contaminación del agua es fundamental para evitar que se reduzca su disponibilidad, así como para proteger los ecosistemas del país, por lo tanto, su aprovechamiento en cualquier actividad productiva, que sea susceptible de provocar su contaminación, tendrá la responsabilidad del tratamiento, para reintegrarla en condiciones adecuadas para su utilización en otras actividades y mantener el equilibrio de los ecosistemas. Las aguas residuales urbanas deben recibir tratamiento previo a su descarga en cualquier cuerpo de agua incluyendo el subsuelo.

Establece también que los criterios utilizados para la prevención y control de la contaminación serán considerados las medidas para el uso, tratamiento y disposición de aguas residuales, para evitar riesgos y daños a la salud pública; la formulación de normas oficiales mexicanas que deberán satisfacer el tratamiento del agua para el uso y consumo humano, así como para la infiltración y descarga de aguas residuales en cuerpos receptores considerados como aguas nacionales. Estas y otras normas que se requieran, serán expedidas por la SEMARNAP, conforme a lo dispuesto en esta Ley, la de Aguas Nacionales, su Reglamento y las demás disposiciones aplicables (LGEEPA, 1996).

### *1.5.2 Ley de Aguas Nacionales (LAN).*

La Ley de Aguas Nacionales fue puesta en vigor el 2 de diciembre de 1992 y reglamenta los párrafos quinto y sexto del artículo 27 Constitucional, cuyo objetivo es regular la explotación, distribución y control, uso o aprovechamiento y conservación de la cantidad y calidad de las aguas propiedad de la nación, para lograr su desarrollo integral sustentable.

En el Art. 86 párrafo III se establece que la Comisión Nacional del Agua (CNA) órgano administrativo desconcentrado de la SEMARNAP, establecerá y vigilará el cumplimiento de las condiciones particulares de descarga que deben satisfacer las aguas residuales que se generen en bienes o zonas de jurisdicción federal; de aguas residuales vertidas directamente en aguas y bienes nacionales, o en cualquier terreno cuando dichas descargas puedan contaminar el subsuelo o los acuíferos; y en los demás casos previstos en la LGEEPA (CNA, 1992).

La LAN en su art. 92, párrafo II menciona que la CNA podrá ordenar la suspensión de las actividades que den origen a las descargas de aguas residuales, cuando la calidad de las descargas no se sujete a las Normas Oficiales Mexicanas correspondientes, a las condiciones particulares de descarga o a lo dispuesto en esta Ley y su Reglamento.

### *1.5.3.- Reglamento de la Ley de Aguas Nacionales.*

El Reglamento publicado el 12 de enero de 1994, es un conjunto de normas jurídicas que expide el Poder Ejecutivo en uso de la facultad que le confiere la fracción 1, del artículo 89, de nuestra Constitución y que tiene por objeto facilitar la exacta observancia de las leyes expedidas por el Poder Legislativo, como la LAN. En su Art. 134 determina que las personas físicas o morales que exploten, usen o aprovechen aguas en cualquier uso o actividad, están obligadas, bajo su responsabilidad y en los términos de ley, a realizar las medidas necesarias para prevenir su contaminación y en su caso para reintegrarlas en condiciones adecuadas, a fin de permitir su utilización posterior en otras actividades o usos y mantener el equilibrio de los ecosistemas.

Asimismo se menciona en el Art. 137 que es responsabilidad de los usuarios del agua, cumplir con todas las normas oficiales mexicanas y en su caso con las demás condiciones particulares de descarga, para la prevención y control de la contaminación extendida o dispersa que resulte del manejo y aplicación de sustancias que puedan contaminar la calidad de las aguas nacionales y los cuerpos receptores (CNA, 1992).

### *1.5.4.- Normalización*

La expedición de normas es uno de los pilares de la política ambiental y se constituye como un esfuerzo regulatorio para adecuar las conductas de agentes económicos a los objetivos sociales de calidad ambiental. En julio de 1992 se expidió la Ley Federal sobre Metrología y Normalización (LFMN), la cual establece los procedimientos para la elaboración, expedición, cumplimiento y vigilancia de las Normas Oficiales Mexicanas (NOM's), y las sanciones por su incumplimiento, ya que estas son de carácter obligatorio. Las NOM's son un instrumento muy poderoso, no solo por el hecho de controlar los procesos productivos, sino por su capacidad de inducir cambios de conducta e internalizar costos ambientales, lo que las convierte en un elemento que promueve la presencia de variados cambios tecnológicos y genera un mercado ambiental importante.

El 18 de octubre de 1993 en el Diario Oficial de la Federación fueron publicadas 33 NOM's que establecen los Límites Máximos Permisibles de contaminantes en las descargas a cuerpos receptores de aguas residuales provenientes de diversas fuentes. Para 1994 se incrementan a 44 permaneciendo vigentes hasta 1996 y el 6 de enero de 1997 se abrogan 43 de ellas, siendo sustituidas por la NOM-001-ECOL-1996 (DOF, 1996a) la cual considera el tipo de cuerpo receptor y el uso posterior del agua. Es importante mencionar que esta norma establece plazos en los cuales se deberá de presentar los programas de acciones, fecha de cumplimiento y la periodicidad de los análisis de laboratorio y reporte, de acuerdo al número de habitantes para el caso de descargas municipales y la concentración de Sólidos Suspendidos Totales y DBO<sub>5</sub> para aguas residuales no municipales.

Este hecho resulta trascendental ya que las 44 normas que aplicaban aún en 1996 no atendían a las características y usos de los cuerpos de agua, dando mayor importancia a los aspectos tecnológicos de cada actividad. Esto hacía que las características del cuerpo receptor no fueran un factor determinante en cuanto a localización de las industrias, imponiendo así límites indiscriminados y en muchos de los casos incongruentes, independientemente del tamaño de la carga contaminante generada y la subsecuente alteración en mayor o menor grado de los sistemas biofísicos. Por esto se ideó un sistema de normalización de la calidad del agua que, en lugar de fomentar la proliferación de normas por industria, establezca límites máximos permisibles dependiendo del uso y de la capacidad de absorción y dilución de los cuerpos receptores. Atendiendo a estas prioridades las NOM's vigentes en la actualidad son las siguientes:

- ☉ NOM-001-ECOL-1996, que establece los Límites Máximos Permisibles de contaminantes en la descargas de agua residual en aguas y bienes nacionales.
- ☉ NOM-031-ECOL/93, que establece los Límites Máximos Permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales provenientes de la industria, actividades agroindustriales, de servicio y el tratamiento de aguas residuales a los sistemas de drenaje y alcantarillado urbano municipal.

## Capítulo 2.

# 2. CONTAMINACIÓN DEL AGUA POR ACTIVIDADES INDUSTRIALES.

---

El volumen de aguas residuales provenientes del sector industrial es altamente variable tanto en cantidad como en calidad y dependiendo principalmente del producto elaborado sólo una pequeña cantidad de agua es consumida en el proceso industrial, por lo que con frecuencia grandes volúmenes de la misma son desalojados como desechos los que pueden incluir metales tóxicos, sustancias químicas, contaminantes biológicos y materiales radiactivos (Viessman and Hammer, 1993).

### 2.1. INDUSTRIA ALIMENTARIA.

Este tipo de actividad, que opera con materia prima destinada básicamente a la alimentación humana, se caracteriza por el consumo generalizado, de fuertes volúmenes de agua y por la elevada carga contaminante básicamente orgánica, en ocasiones mineral de sus aguas residuales; carecen normalmente de productos tóxicos, por lo que su manejo presenta amplias facilidades ante los procesos unitarios de tratamiento físicos-químicos y biológicos, dentro de los cuales la tecnología ha avanzado considerablemente en los últimos años

Otra característica de las aguas residuales de estas industrias es la irregularidad tanto en su composición como en la concentración de contaminantes, la cual se puede presentar estacionalmente (conservas y aceites, etc.) e incluso a lo largo de las diferentes horas del día. Casi siempre, estas aguas residuales tienen una D.B.O. elevada y la fracción correspondiente a los sólidos en suspensión es muy importante (Cuadro 2.1) además, se presenta en forma coloidal otra fracción no despreciable y difícil de evaluar.

**Cuadro 2.1 Composición típica del agua residual de industrias alimentarias.**

<b>ACTIVIDAD</b>	<b>CONTAMINANTES</b>
Conservas y Embutidos	Partículas sólidas, materia orgánica y grasas.
Lácteas	Partículas coloidales y materia orgánica muy fermentable.
Aceites	Alta D.B.O., partículas coloidales y grasas.

FUENTE: Seoanez, 1995.

En la actualidad el nivel de reciclado de las aguas residuales de estas industrias puede ser muy elevado, llegándose en algún caso a alcanzar órdenes del 95%. Sin embargo, un papel importante en el tratamiento del agua residual es el económico, donde la mayoría de estas industrias carecen de una rentabilidad para instalar plantas depuradoras convencionales, por lo que se hace necesario el soporte de la investigación y aportación de tecnologías de bajo costo (Seoanez, 1995).

Los aceites, materia flotante, sólidos gruesos, materia fina en suspensión, sabor, olor y color se encuentran en numerosas aguas residuales industriales; las industrias alimentarias emiten en particular contaminantes orgánicos que se miden generalmente por la D.B.O. y la D.Q.O. (Fair, 1996).

## **2.2. PROCESO DE PRODUCCIÓN DE LAS GRASAS Y ACEITES**

### *2.2.1. Composición*

Las grasas se refieren a una gran variedad de sustancias químicas que tienen la propiedad de ser solubles en diferentes disolventes orgánicos, mientras que sólo algunas son solubles en agua. Debido a su limitada solubilidad, la degradación por microorganismos ocurre en una proporción muy baja (Hammer, 1996). El grupo conocido como grasas y aceites está formado por glicéridos, es decir ésteres de glicerol y ácidos grasos. En las grasas y aceites,

los tres hidróxilos de la molécula de glicerol participan en uniones éster (fig. 2), de allí su nombre de triglicéridos, o glicéridos neutros (Charley, 1997):

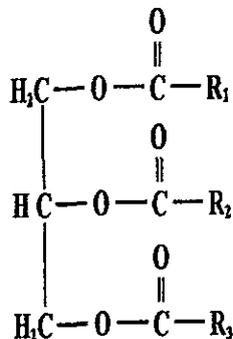


Fig. 2. Molécula de un Triglicérido

Es una convención aceptada el designar con el nombre de grasas solamente a aquellos glicéridos que solidifican a temperatura ambiente, mientras los que permanecen líquidos en estas condiciones se denominan aceites.

En los aceites y grasas naturales existe una gran cantidad de sustancias liposolubles que acompañan a los triglicéridos, este grupo comprende pigmentos (clorofilas, carotenoides), productos de oxidación (aldehídos y cetonas), ácidos grasos libres, esteroides, etc. En los aceites comestibles, la mayor parte de estos componentes se eliminan durante el proceso de refinado (Braverman, 1980).

### 2.2.2. *Proceso de Producción de Aceites.*

Los aceites crudos, por ejemplo de cacahuete, soya, girasol, maíz, semilla de algodón, etc. se llevan a la refinería en camiones cisterna (pipas), se bombean a los tanques de almacenamiento de los cuales se tomarán para realizarles los procesos subsecuentes, los cuales son: desgomado, refinación, blanqueo, deodorización, hidrogenación y enfriamiento o winterización (ver fig. 3) (Bartholomai, 1991).

A continuación se describen cada una de estas etapas.

#### 2.2.2.1. Desgomado.

Los aceites vegetales obtenidos por medio de prensado o extracción con solventes siempre contienen sustancias similares a la grasa, como fosfolípidos o complejos de grasa y proteína, las cuales son gomosas (Potter, 1973). Se añaden pequeñas cantidades de ácido fosfórico a un mezclador, donde se mezcla junto con el aceite a fin de acondicionar los fosfátidos para la etapa de neutralización. Al agregar el ácido diluido, los fosfátidos (gomas) absorben agua y se expanden formando una fase separable. Estos fosfátidos deben ser extraídos dado que su presencia origina muchos inconvenientes en el almacenamiento, refinación y conservación; se ha observado que los fosfátidos se encuentran en disolución coloidal solamente cuando los aceites están en estado anhidro. Estudios recientes han demostrado que el desgomado de los aceites se realiza muy bien en equipos de funcionamiento continuo, inmediatamente antes de la neutralización, usando como medio floculante agua hirviendo, soluciones de ácido fosfórico, oxálico, cítrico, etc., en bajos porcentajes (Bernardini, 1981).

#### 2.2.2.2. Refinado.

De los tanques de almacenamiento el aceite se transfiere a otro utilizado para el consumo diario el cual alimenta la sección neutralizadora, donde los ácidos grasos se neutralizan por agregado y mezcla de sosa cáustica diluida bajo condiciones controladas. Los ácidos grasos ya neutralizados dan origen a la base para hacer jabón y se separan en una centrífuga continua, posteriormente es lavado con agua caliente para quitar el jabón remanente (Bartholomai, 1991). El uso de la solución de álcali logra eliminar otras impurezas; estas incluyen ácidos grasos que se combinan con el álcali para formar jabones a los cuales se les puede eliminar mediante la filtración o centrifugación (Potter, 1973).

### 2.2.2.3. Blanqueado

Aún después del desgomado y la refinación, el aceite de semillas contiene varios pigmentos vegetales como clorofilas y carotenos que son eliminados pasando el aceite caliente sobre carbón o cualquier tipo de arcillas y tierras absorbentes, tal como la tierra de diátomeas (tierra de Fuller). El producto blanqueado de color suave se filtra y se conduce a un tanque amortiguador que abastece a la sección de desodorización (Potter, 1973; Bartholomai, 1991; Braverman, 1980).

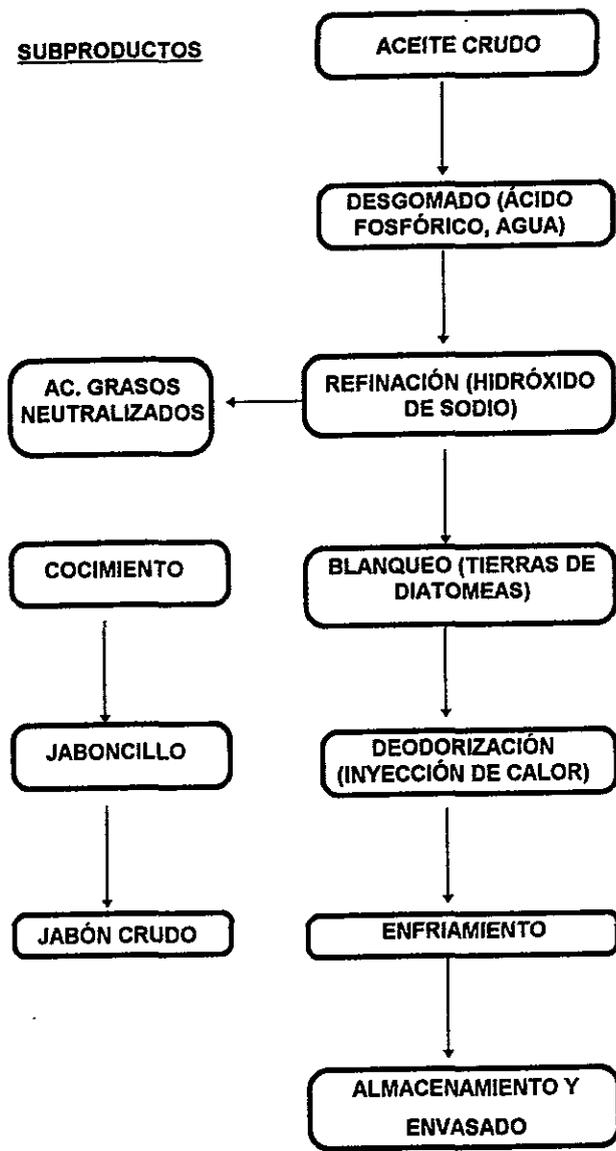
### 2.2.2.4. Desodorización

Los olores desagradables que presentan las grasas y los aceites se eliminan por medio de calor y vacío (Potter, 1973). La desodorización se lleva a cabo en un desodorizador operando a una presión absoluta de 2-6 mm Hg y a una temperatura de 220-275 °C, en el cual se hace pasar vapor, como un proceso depurador, a través del aceite, mediante un proceso semicontinuo. El aceite desodorizado se enfría parcialmente y se le hace un filtrado y refinado, luego del cual se enfría adicionalmente (Bartholomai, 1991).

### 2.2.2.5. Winterización.

El proceso de winterización tiene por objeto separar aquellos glicéridos de más alto punto de fusión que originan enturbiamiento y aumento de viscosidad en los aceites al bajar la temperatura, y consiste en precipitar en forma de cristales, en determinadas condiciones de temperatura-tiempo, los glicéridos saturados causantes del enturbiamiento (Bernardini, 1981). Esto se puede hacer simplemente colocando los barriles de aceite en un cuarto frío a una temperatura más baja que el aceite experimentará más tarde en el refrigerador, o bien pasándolo en una operación continua a través de intercambiadores de calor regulados con mucha precisión (Potter, 1973).

**Fig. 3. Diagrama de Flujo del Proceso de Elaboración de Aceites y Jabones**



## 2.3. PRINCIPALES CONTAMINANTES GENERADOS E INDICADORES DE CONTAMINACIÓN.

Los vertidos generados en la elaboración de aceites y jabones, tienen generalmente valores de pH extremos según su procedencia. Las aguas residuales de lavado de materias grasas son muy ácidos (pH comprendido entre 3 y 5), mientras que los correspondientes a la saponificación de ácidos grasos en las jabonerías son muy alcalinos (pH entre 9 y 13) (Degremont, 1979). A continuación se describen los principales contaminantes e indicadores de contaminación presentes en el agua residual generada en la elaboración de aceites comestibles, lo que se resume en el cuadro 2.2.

### 2.3.1. Grasas y Aceites.

Existen dos tipos generales de material flotable: material en partículas que incluye núcleos de grasa y componentes líquidos que pueden dispersarse como una película fina. Este material en las aguas residuales es muy importante porque se acumula en la superficie, puede contener bacterias patógenas y concentrar cifras elevadas de metales e hidrocarburos clorados (APHA, 1992).

Las grasas y los aceites son sustancias que pueden formar películas protectoras entre la interfase agua-aire, las que reducen la cantidad de transferencia de oxígeno y amplifican los efectos de sustancias que lo consumen (Tebutt, 1990).

Las grasas y aceites han creado muchos problemas en la técnica de depuración de aguas residuales, especialmente como menciona Hernández (1992) en los elementos y procesos siguientes:

- En rejillas finas causan obstrucciones que aumentan los gastos de conservación;
- En los decantadores forman una capa superficial que dificulta la sedimentación al atraer hacia la superficie pequeñas partículas de materia orgánica;
- Perturban el proceso de digestión de lodos.

### 2.3.2. Sólidos

El análisis de sólidos es importante en el control de procesos de tratamientos biológicos y físicos de aguas residuales, y para evaluar el cumplimiento de las limitaciones que regulan su vertido.

Los sólidos pueden afectar negativamente la calidad del agua o su suministro de diferentes maneras; las aguas con abundantes sólidos disueltos son de inferior palatabilidad y pueden inducir una reacción fisiológica desfavorable en el consumidor, mientras que las aguas altamente mineralizadas tampoco son adecuadas para muchas aplicaciones industriales o incluso resultan estéticamente insatisfactorias para bañarse (APHA, 1992).

Los sólidos disueltos totales (SDT) se deben a materiales solubles, mientras que los sólidos en suspensión (SS) son partículas discretas que se pueden medir al filtrar una muestra a través de un papel fino, los sólidos sedimentables son aquellos removidos en un procedimiento estándar de sedimentación (Tebutt, 1990).

Son de especial interés los sólidos sedimentables por ser los principales contribuyentes al proceso de envejecimiento de un cuerpo de agua. Los sólidos al sedimentarse forman una capa sobre el lecho de la corriente de agua, en la que es muy difícil la penetración de oxígeno disuelto, con lo que se crea en el fondo una capa anaerobia (Ramalho, 1993).

Los sólidos en suspensión evitan que la luz llegue hasta los organismos fotosintéticos, originando una reducción en la producción de oxígeno, liberan gran cantidad de nitrógeno y fósforo presentes en las proteínas, estos elementos crean condiciones favorables para el desarrollo de algas promoviendo el proceso de eutroficación de los cuerpos acuáticos (op. cit.).

**Cuadro 2.2. Concentración Típica de Contaminantes en el agua residual derivada de la elaboración de aceites comestibles.**

PARÁMETRO	CONCENTRACIÓN
D.B.O.	25,000 mg/L
D.Q.O.	53,630 mg/L
SÓLIDOS TOTALES	43,365 mg/L
SÓLIDOS SUSPENDIDOS	19,012 mg/L
GRASAS Y ACEITES	8,370 mg/L
pH	3.8-4.5

Tomado de Nemerow, 1991

### 2.3.3. Temperatura

Las temperaturas elevadas, resultado de las descargas de agua caliente, tienen un impacto ecológico significativo (APHA, 1992). La temperatura es importante por su efecto en otras propiedades, por ejemplo: aceleración de reacciones químicas, reducción de la solubilidad de los gases, cambios en el color del agua, intensificación de olores y sabores, elevada conductividad eléctrica, entre otros (Tebutt, 1990; Seoanez, 1995).

Otros parámetros que están en función de la temperatura son la densidad, tensión superficial y viscosidad del agua, cada una de ellas al aumentar la temperatura tiende a disminuir (Seoanez, 1995). La temperatura es importante no sólo por participar en la actividad metabólica y la conducta de los organismos, sino porque puede alterar el estado fisico-químico de los contaminantes; las investigaciones tienden a demostrar que la toxicidad de muchos compuestos aumenta con la temperatura, debido al incremento de la biodisponibilidad de los contaminantes (Mason, 1984).

#### 2.3.4. D.Q.O.

La Demanda Química de Oxígeno (D.Q.O.) es una estimación de las materias oxidables presentes en el agua, cualquiera que sea su origen, orgánico o mineral (Seoanez, 1995). La D.Q.O. de un agua residual siempre será mayor que la D.B.O., por que más compuestos pueden ser oxidados químicamente que aquellos que lo son biológicamente, y por que la D.B.O., no es igual a la D.B.O. final, debido a que en la primera se debe a la degradación de compuestos formados por carbono, mientras que la segunda se presenta la degradación de compuestos nitrogenados. La D.Q.O. puede ser utilizada como auxiliar en la operación y control de las plantas de tratamiento de aguas residuales (Davis and Cornwell, 1991).

Una limitación importante de la prueba de D.B.O. es el largo periodo que transcurre entre el momento en que se tomo la muestra y se obtiene el resultado lo cual ha llevado a realizar pruebas químicas (D.Q.O.) para evaluar la demanda de oxígeno de un residuo. La oxidación de los contaminantes en la muestra se efectúa en dichas pruebas usando un agente químico oxidante. Dichas pruebas son mucho más rápidas y reproducibles y han tomado gran importancia porque sirven para evaluar la resistencia de los residuos industriales no biológicos (Tebbutt, 1990). En estas técnicas la oxidación de la mayoría de los compuestos orgánicos es del 95 al 100% (APHA, 1992). Casi todas las sustancias orgánicas se oxidan virtualmente en su totalidad, con la excepción de ciertos compuestos aromáticos, como la piridina, benceno y tolueno (Winkler, 1996).

#### 2.3.5. D.B.O.

La prueba de D.B.O. representa la cantidad de oxígeno disuelto que se ha gastado en la descomposición biológica de una muestra de agua, y es una simulación en laboratorio del proceso microbiano de autodepuración. La prueba tiene su aplicación más extendida en la determinación del gasto de oxígeno en las aguas residuales en las instalaciones de

tratamiento y en la evaluación de concentración de oxígeno disuelto que requiere un contaminante para su degradación (Winkler, 1996).

La introducción de material (ya sea orgánico o inorgánico) demandante de oxígeno dentro de una corriente de agua causa una notable *disminución* del Oxígeno Disuelto. Para determinar la tasa de disminución de oxígeno es necesario saber cuantos residuos han sido descargados y cual es la cantidad que se requerirá para degradarlos. Los materiales orgánicos susceptibles de ser oxidados, son comúnmente medidos por determinación de la cantidad de oxígeno consumido durante su degradación de una forma similar a lo que ocurre en las aguas naturales. Esta prueba está basada en la premisa de que toda la materia orgánica biodegradable contenida en una muestra de agua será oxidada a  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$  por los microorganismos utilizando el oxígeno molecular (Davis and Cornwell, 1991).

Hay que considerar que la oxidación de las materias orgánicas no es el único fenómeno que tiene lugar en la biodegradación; a esta se debe añadir la oxidación de los nitritos y de las sales amoniacales, así como el consumo de oxígeno por el proceso de asimilación y de formación de nuevas células. Por lo tanto, en la medida de este parámetro se producen variaciones según las especies de microorganismos según su concentración y edad, presencia de bacterias nitrificantes y protozoarios consumidores de oxígeno que se alimentan de ellas (Seoanez, 1995).

### 2.3.6 pH

Es una de las pruebas más importante y frecuentemente utilizadas en el análisis químico del agua. Prácticamente se utiliza en todas las fases del tratamiento del agua para suministro y residual, tales como la neutralización ácido-base, suavizador, precipitación, desinfección y control de la corrosión, que dependen del pH, el cual considera la actividad del ión hidrógeno (APHA-AWWA, WPFC, 1992).

El pH controla muchas reacciones químicas y la actividad biológica normalmente se restringe a una escala bastante estrecha entre 6-9, ya que las aguas ácidas o muy alcalinas son indeseables debido a que son corrosivas o presentan dificultades en su tratamiento. El agua residual con concentraciones adversas de iones hidrógeno es difícil de tratar por medios biológicos, a no ser que se realice una neutralización previa.

La escala de pH comprende del 0 (ácido) hasta el 14 (alcalino), con el valor intermedio de 7 que corresponde a la neutralidad. Los extremos de pH son letales o altamente inhibitorios para los organismos y se puede considerar como un envenenamiento por iones hidrógeno o hidroxilo. La neutralización de los residuos antes de la descarga es un requerimiento normal en zonas controladas, es un proceso bastante simple de llevar a cabo y es posible controlarlo en un efluente balanceando corrientes ácidas y alcalinas provenientes de diferentes procesos (Winkler, 1996).

## Capítulo 3.

### ◆ TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

---

#### 3.1. IMPORTANCIA DEL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES.

En la sociedad moderna el manejo adecuado del agua residual es una necesidad, más que una alternativa, puesto que las consecuencias en la salud pública de un mal manejo pueden ser graves (Peavy, 1986). Una correcta administración del agua, incluyendo el tratamiento y reuso, puede que no solo permita ahorros en el costo de la compra de agua de alta calidad sino que también reducirá la dependencia del proceso sobre los suministros externos (Winkler, 1996).

El tratamiento de las aguas residuales en México se inicia en la década de los 70's, cuando la Secretaría de Recursos Hidráulicos y la de Salubridad y Asistencia, emiten la primera reglamentación (Reglamento para la Prevención y Control de la Contaminación del Agua). Los sistemas de tratamiento son por esencia, la herramienta fundamental utilizada dentro de las acciones para controlar su contaminación, ya que a través de ellos se mejora su calidad propiciando la posibilidad de reuso y proteger las condiciones ecológicas de los cuerpos receptores y la salud pública (Monroy, 1993).

En todo el país se encuentran distribuidas 177 plantas de tratamiento en el sector industrial, con una capacidad instalada de 12.2 m<sup>3</sup>/s. Sin embargo, el gasto promedio de reutilización es de 5 m<sup>3</sup>/s, se aprovecha principalmente por parte de la industria de las ciudades de México (2.3 m<sup>3</sup>/s), Monterrey (1.2 m<sup>3</sup>/s) y Guadalajara (1.5 m<sup>3</sup>/s). Existen 721 plantas de tratamiento de aguas municipales e industriales, de las cuales operan 464 (64%) equivalente a un gasto de 21 m<sup>3</sup>/s (INEGI, 1994).

### **3.2. GENERALIDADES DE LOS TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES.**

Los contaminantes del agua residual son eliminados por medios físicos, químicos y biológicos. Los medios de tratamiento en que se aplican predominantemente fuerzas físicas se llaman operaciones unitarias, como son el cribado, floculación, sedimentación, flotación, filtración, entre otros. Los medios de tratamiento en los que la eliminación de los contaminantes se consigue mediante la adición de productos químicos o por actividad biológica se conocen como procesos unitarios, por ejemplo la precipitación, coagulación, intercambio iónico, etc. (Metcalf, 1991).

Una industria tiene diferentes posibilidades para mejorar la calidad de sus aguas residuales, entre las que destacan:

1. Depurarlas en una planta de tratamiento antes de descargarlas a un cuerpo de agua.
2. Descargar el agua cruda a una planta municipal para un tratamiento completo.
3. Darle pretratamiento antes de verterla al sistema de drenaje municipal (Viessman y Hammer, 1993).

El grado de tratamiento requerido para un agua residual depende fundamentalmente de los límites de vertido para el efluente, o en su caso el reuso que se le pretenda dar (Reynolds and Richards, 1996; Ramalho, 1993), en el cuadro 3.1 se presenta una clasificación de los procesos utilizados en el tratamiento de aguas residuales; los de tipo primario se emplean para la eliminación de los sólidos en suspensión y los materiales flotantes, impuesta por los límites, tanto de descarga al medio receptor como para poder llevar los efluentes a uno secundario, bien directamente pasando por una neutralización u homogeneización. En este último se llevan a cabo procesos biológicos convencionales, mientras que en el terciario fundamentalmente se realiza la remoción de contaminantes que no se eliminan con los anteriores (Ramalho, 1993).

Es importante mencionar que en la industria en la que se realizó el estudio actualmente cuenta con un tren de tratamiento de agua, sin embargo dicho sistema resulta ineficiente ya que no se utiliza en condiciones adecuadas. Los procesos con los que cuenta son sedimentación y coagulación los cuales no llevan a cabo correctamente.

### CUADRO 3.1. Tipos de Tratamiento de Aguas Residuales.

---

#### Tratamiento primario

Cribado.  
Dilución<sup>1</sup>  
Sedimentación  
Resuspensión<sup>1</sup>.  
Flotación.  
Separación de aceites.  
Homogeneización.  
Filtración<sup>1</sup>

#### Tratamiento secundario

Neutralización<sup>3</sup>  
Lodos activados.  
Aireación prolongada.  
Estabilización por contacto.  
Lagunas de aireación.  
Filtros biológicos.  
Discos biológicos.  
Tratamientos anaerobios: lagunas anaerobias<sup>2</sup>, procesos de contacto.  
Biotorres<sup>1</sup>

#### Tratamiento terciario o avanzado

Microtamizado.  
Filtración (lecho de arena, antracita, diatómeas.).  
Precipitación y coagulación<sup>3</sup>.  
Adsorción (carbón activado).<sup>2</sup>  
Intercambio iónico.  
Ósmosis inversa.  
Electrodialisis.  
Cloración y ozonización.  
Procesos de reducción de nutrientes<sup>2</sup>.

---

#### FUENTES:

1) Peavy, 1986 ; 2) Davis and Cornwell, 1991; 3) Degremont, 1979; Ramalho, 1993

### **3.2.1 Tratamientos Primarios.**

Los tratamientos primarios de aguas residuales implican la reducción de sólidos en suspensión o su acondicionamiento para su descarga en los receptores o para pasar a un tratamiento secundario a través de una neutralización u homogeneización (Ramalho, 1993), siendo esta la etapa en la que se separan el resto de materiales que se encuentran en suspensión en el vertido. El método a emplear depende de la naturaleza de la materia a retirar, y destacan los sistemas de floculación, sedimentación, flotación o distintos métodos para separación de grasas y aceites presentes (Seoanez, 1995).

#### **3.2.1.1. Cribado**

El cribado, también llamado desbrozo o desbaste, se emplea para la reducción de sólidos en suspensión, para el cual se utilizan rejillas con abertura de diferente tamaño, que depende de las dimensiones de las partículas a retirar; su limpieza se hace manual o mecánicamente. Las materias sólidas recogidas se suelen clasificar en finas y gruesas, y los tamices se clasifican por su abertura en malla ancha (de 0.5 cm o más) o fina, con aberturas inferiores a 0.5 cm (Ramalho, 1993; Metcalf, 1991).

#### **3.2.1.2. Sedimentación.**

Es la separación de las partículas suspendidas más pesadas que el agua, mediante la acción de la gravedad, siendo una de las operaciones unitarias más utilizadas en el tratamiento de aguas residuales. Con esta operación se elimina la arena, materia particulada en el tanque de decantación primario, flóculos químicos cuando se emplea la coagulación química y para la concentración de sólidos en los espesadores de lodos (Hammer, 1996).

Pueden considerarse tres tipos de procesos de sedimentación, dependiendo de la naturaleza de los sólidos presentes en suspensión: a) sedimentación discreta, b) sedimentación con floculación, c) sedimentación por zonas (Cheremisinoff, 1995).

### 3.2.1.3. Floculación.

Mientras que el mezclado rápido es el aspecto más importante que afecta la eficiencia en la coagulación, el factor más importante que afecta la eficiencia en la remoción de partículas es la floculación. Su objetivo es hacer que partículas colisionen, se mantengan unidas y aumenten su tamaño para que posteriormente sean capaces de sedimentar, por lo que, para lograr el propósito mencionado debe ser provisto un mezclado suficiente (Davis and Cornwell, 1991). En algunos casos, el agua contiene un constituyente capaz de flocular por simple agitación o que lo hace mediante la adición de un floculante, otras veces es necesario utilizar un coagulante que de origen a una partícula que pueda flocularse a continuación (Hernández, 1992).

La floculación es estimulada por mezclado lento que une poco a poco los flóculos; un mezclado demasiado intenso los rompe y raramente se vuelven a formar a su tamaño y fuerza óptimos (fig. 5). Esta operación no solo incrementa el tamaño de las partículas del aglomeradas, sino que también afecta su naturaleza física (NALCO, 1989). Pueden ocurrir dificultades en la coagulación debido a la lenta sedimentación de los flóculos formados o debido a que son muy frágiles y fáciles de fragmentar por las fuerzas hidráulicas en los reactores y filtros. Algunos compuestos sirven de auxiliares para la coagulación y benefician también al proceso ya mencionado mejorando la sedimentación y estabilidad de los flóculos. Los polímeros son los materiales más ampliamente usados; son compuestos orgánicos de larga cadena y alto peso molecular comercialmente disponibles (Hammer, 1996).

### 3.2.1.4. Flotación.

La flotación se utiliza para la remoción de sólidos suspendidos, grasas y aceites del agua residual y para la separación y concentración de lodos (Eckenfelder, 1989). La separación se lleva a cabo introduciendo un gas (normalmente aire) en la fase líquida, en forma de burbujas, los sólidos en suspensión o las partículas líquidas (por ejemplo aceite o petróleo) flotan, debido a que estas pequeñas burbujas se asocian a los mismos y los obligan a elevarse

hacia la superficie. Los sólidos en suspensión concentrados pueden separarse por sistemas mecánicos (Ramalho, 1993). Una alta tasa superficie/volumen de interfase líquido-gas es una característica deseable en procesos tales como la flotación de minerales y en biorreactores. Así, las técnicas de dispersión de burbujas gaseosas en medios acuosos han evolucionado paulatinamente hacia la obtención de microburbujas. Las principales ventajas al utilizar burbujas pequeñas en operaciones líquido-gas son:

- a) la obtención de una alta velocidad de transferencia y/o la reacción con disminución considerable del consumo de gas o tiempo de contacto;
- b) una operación libre de turbulencia y
- c) una mejor interacción sólido- burbuja (Cáceres, 1994).

#### *Flotación natural*

Se produce cuando la densidad de las partículas sólidas es menor que la del agua, su utilidad se reduce a procesos de desaceitado y desengrasado, para la flotación se sigue el mismo modelo de la ley de Stokes utilizado en la sedimentación, sólo que en sentido inverso (Hernández, 1992).

#### *Flotación acelerada*

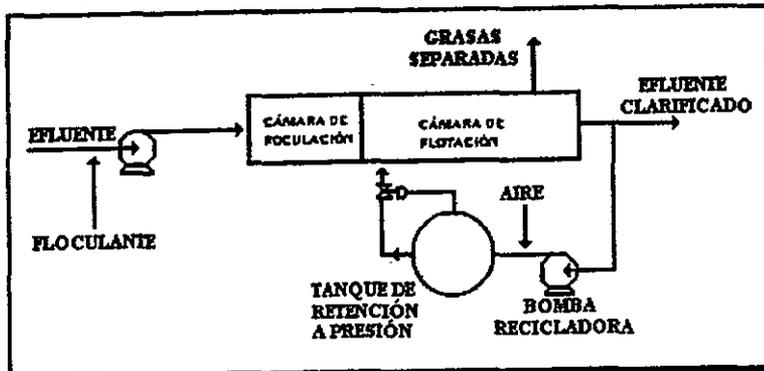
En este sistema se introduce directamente el aire en el líquido en tratamiento para formar burbujas que ascenderán a la superficie, en su recorrido atrapa las partículas de aceite o grasa presentes llevándolas con ellas. El tamaño de las burbujas es de algunos milímetros y su rendimiento hace recomendable este procedimiento para la separación de sólidos de muy baja densidad o para mejorar los procesos de flotación natural en la separación de aceites y grasas (Hernández, 1992).

En general existen dos métodos que son comercialmente usados para formar las pequeñas burbujas de aire. El primer método involucra el airear el agua residual a la presión

atmosférica para lograr saturarla, posteriormente liberar el exceso mediante la aplicación de un vacío de aproximadamente 9 in de Hg, con la subsecuente formación de las burbujas. Otro método se disuelve aire en el agua residual bajo una presión de 2-3 atmósferas y entonces se libera la presión originando con esto las finas burbujas. El segundo método es más común en el tratamiento de aguas contaminadas con aceites y grasas, además de que existen tres variantes para este método las cuales se describen a continuación:

- Operación de flujo completo, en la cual toda el agua residual es presurizada, seguida de la subsecuente despresurización y formación de burbujas a la entrada de la cámara de flotación.
- Operación de flujo parcial, consiste en presurizar y disolver aire sólo en una parte del flujo de agua residual, desviando la otra parte hacia la cámara de flotación en donde es mezclada con la fracción presurizada.
- Operación de reciclo, consiste en presurizar y disolver aire en un curso reciclado de un efluente clarificado. La presión es liberada y las burbujas contenidas en el flujo reciclado se mezclan con el influente de agua residual. La cantidad de agua reciclada es aproximadamente 20-50% del flujo del influente. Este sistema usa la bomba presurizadora más pequeña de las tres variantes y opera a un índice constante (ver figura 4), esto minimiza la formación de emulsiones y en sistemas que incluyen floculación no provoca la desintegración de los floculos, sin embargo este sistema requiere grandes cámaras de flotación (Cheremisínoff, 1995).

**Fig. 4 Sistema de flotación con operación de reciclaje**



Tomado de Cheremisinoff, 1995

### 3.2.2 Tratamientos Secundarios

La expresión de tratamientos secundarios se refiere a todos los procesos biológicos de las aguas residuales tanto aerobios como anaerobios (Ramalho, 1993). En esta etapa lo que se va a eliminar es la materia orgánica biodegradable presente y se emplean tratamientos biológicos en los que la materia orgánica es oxidada por distintos tipos de microorganismos, de manera que se hace disminuir la demanda bioquímica de oxígeno del efluente. La elección de un sistema determinado depende del rendimiento que se desee obtener. Algunos ejemplos son: lagunas de estabilización, de aireación, filtros biológicos o lodos activados, siendo este último el método más eficaz.

### 3.2.3 Tratamientos Terciarios

El objetivo fundamental del tratamiento terciario es la remoción de contaminantes que no se eliminan con los tratamientos anteriores, tenemos: adsorción de carbón activado, intercambio iónico, ósmosis inversa, electrodiálisis, coagulación química, con lo que se logra una reducción de contaminantes hasta 93-98%, de la DBO se logra reducir a 92-98%.

La mayoría de las formas de tratamiento terciario están encaminadas a la remoción de exceso de sólidos suspendidos en el efluente obtenido en instalaciones convencionales bien operadas. El tratamiento terciario debe considerarse como una técnica para mejorar la calidad de un buen efluente y no como un método para tratar de convertir un efluente malo en una descarga de buena calidad. La remoción de sólidos suspendidos de un efluente tiene también una remoción asociada a la DBO debido a que la materia orgánica ejerce una influencia sobre su comportamiento; existen evidencias que muestran que en efluentes normales de agua residual, la remoción de 10 mg/L de SS probablemente remueva también cerca de 3 mg/L de DBO (Kawamura, 1991).

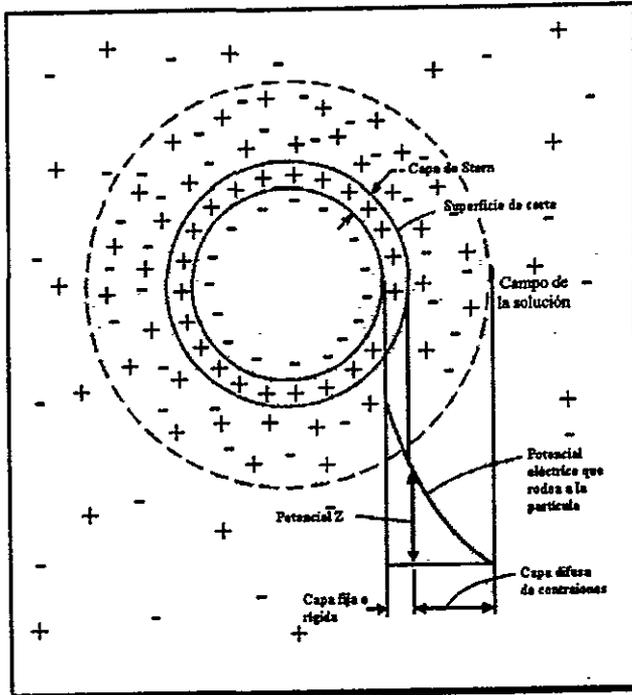
### 3.2.3.1. Coagulación

Se denomina coagulación de una dispersión coloidal a la operación consistente en neutralizar sus cargas eléctricas, con lo que dejan de actuar las fuerzas de repulsión, su potencial Z se anula y los coloides tienden a agregarse por acción de masas. Este proceso se obtiene añadiendo a la dispersión iones de signo contrario al de las partículas; se ha observado que esta actividad crece mucho de acuerdo con la valencia del ion coagulante; un ion trivalente es de 600 a 1,000 veces más efectivo que un ion monovalente (Hernández, 1992).

El concepto de potencial Z se deriva de la teoría de la doble capa difusa aplicada a los coloides hidrofóbicos (fig. 5), donde la cubierta fija (rígida) de iones positivos es atraída por atracción electrostática hacia la partícula cargada negativamente. Esta zona estacionaria de iones positivos llamada *capa de Stern*, está rodeada por una capa difusa y móvil de contraiones. La concentración de estos iones positivos en la zona difusa decrece conforme se va extendiendo dentro del volumen de la solución neutra que lo rodea. El potencial Z es la magnitud de la carga a la superficie de corte. El límite de la superficie entre la capa fija de iones y la solución sirve como un plano de corte cuando la partícula tiene movimiento relativo hacia la solución. La magnitud del potencial Z puede ser estimada por la medición electroforética de la movilidad de las partículas en un campo eléctrico (Viessman and Hammer, 1996; Jorgensen, 1979).

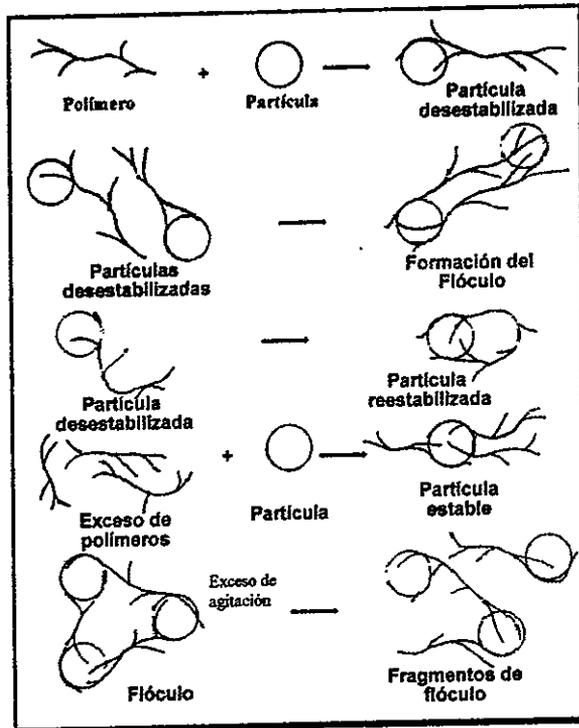
Tres fenómenos se ocurren en la coagulación: el primero es la neutralización de las cargas negativas de las impurezas con el ión coagulante; el segundo es la reacción del coagulante y la formación de flocúlos de óxido hidratado coloidal con carga positiva, los cuales atraen las impurezas coloidales de carga negativa y el tercero es la adsorción superficial de impurezas por los flocúlos (fig. 6).

**Fig. 5. Origen del potencial Z de acuerdo a la teoría de la doble capa difusa**



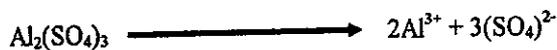
Para efectuar la coagulación química, normalmente se agregan al agua residual productos químicos formadores de coágulos, con el propósito de que engloben o se combinen con los sólidos sedimentables, pero en particular con otros sólidos que no lo son o que sedimentan muy lentamente y con coloides para formar agregados o flocúlos que lo hagan rápidamente. Los coagulantes más comunes son las sales de hierro y aluminio (Fair, 1996), los cuales se describen a continuación.

**Fig. 6. Formación del coagulo y floculo**



**Sulfato de aluminio ( $Al_2(SO_4)_3$ ):** Las reacciones entre el aluminio y los constituyentes normales de las aguas residuales son influenciados por muchos factores. Las reacciones teóricas sirven como guía general, pero básicamente la dosis óptima en cada caso debe ser determinada por una prueba de jarras en el laboratorio.

La reacción de  $Al^{3+}$  con iones  $OH^-$  se presenta por la ionización del agua o por su alcalinidad. La solución del aluminio en el agua produce:



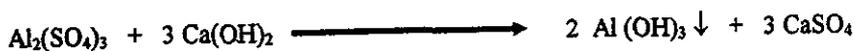
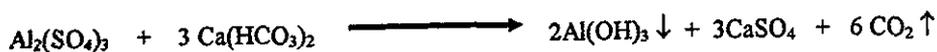
Los iones hidroxilo están disponibles de la ionización del agua:



Los iones de aluminio entonces reaccionan de la siguiente manera:



El consumo de iones hidroxilo da como resultado un descenso en la alcalinidad de la solución. Cuando la alcalinidad del agua residual es inadecuada para las dosis de coagulante, el pH debe ser incrementado por la adición de sales. La reacción del aluminio con las soluciones alcalinas son las siguientes:



En términos de cantidades las reacciones pueden ser expresadas de la siguiente manera:

1 mg/L de Al reacciona con:

0.50 mg/L de  $\text{CaCO}_3$

0.39 mg/L de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$

0.54 mg/L de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$

**Cloruro férrico (FeCl<sub>3</sub>):** El hierro puede ser adquirido como sulfato (Fe<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>·H<sub>2</sub>O) o como cloruros (FeCl<sub>3</sub>·xH<sub>2</sub>O). Las propiedades del hierro con respecto a la formación de complejos grandes, dosis y pH son similares a las del aluminio. Un ejemplo de esta reacción del cloruro férrico en condiciones de alcalinidad es:



sin condiciones de alcalinidad



### 3.2.3.2. Factores a controlar en la prueba de jarras.

El tratamiento de coagulación óptimo de un agua residual tiene por objeto lograr un equilibrio complejo en el que están implicadas muchas variables, tales como pH, turbiedad, composición química del agua, tipo de coagulante y factores físicos como la temperatura y las condiciones de mezcla. Las dosis y condiciones adecuadas para lograr la coagulación hay que determinarlas empíricamente para cada tipo de agua, por lo tanto un conocimiento adecuado de los efectos de las diversas variables sobre la coagulación permitirá una aplicación más correcta de los métodos empíricos (A.W.W.A., 1991).

- pH

En el proceso de coagulación, el pH es la variable independiente más importante de entre las muchas que se consideran (A.W.W.A., 1991). Existe para cada agua un intervalo de pH dentro del cual se registra una buena coagulación-floculación en el tiempo más corto para una dosis de reactivo determinada. El proceso debe efectuarse dentro de este intervalo siempre que sea posible (Hernández, 1992).

Se ha demostrado que el intervalo de pH para la formación óptima de flocúlos se amplía considerablemente por la presencia de ciertos iones comúnmente encontrados en aguas naturales. En general se ha encontrado que los iones de mayor valencia, como los sulfatos, ejercen una influencia mayor que los de valencia menor, como los cloruros (Powell, 1981).

Los coagulantes metálicos son muy sensibles al pH, si este no se encuentra dentro del intervalo adecuado, la clarificación es pobre y puede solubilizarse el hierro o aluminio y generar problemas. El agua no clarificará del todo si el pH no se encuentra dentro del rango óptimo así, cuando las sales son adicionadas y ocurre un descenso de este se promueve el crecimiento de las partículas en el agua (Edwards, 1995). Por ejemplo el  $Al_2(SO_4)_3$  actúa en un rango de 5.5 a 8; con una coagulación adecuada entre 5 a 8 en algunas condiciones y el  $FeCl_3$  actúa entre 4.5 a 11 (Davis and Cornwell, 1991; Hammer, 1996).

- Tipo y dosis de coagulante.

Otro de los factores que influyen en este proceso es la selección del coagulante. Aunque el alumbre es el que más se emplea, también pueden utilizarse sales de hierro, que en algunos casos son más ventajosas que el alumbre. Una ventaja de las sales de hierro con respecto a las de aluminio, es que el margen de pH en el que se obtiene una buena coagulación es más amplio. Por tanto, en el tratamiento de aguas blandas coloreadas, en el que la eliminación del color se obtiene con mayor facilidad a valores ácidos de pH es preferible utilizar las sales de hierro (A.W.W.A., 1991).

Aunque existe cierta relación entre la turbiedad del agua bruta y la dosis del coagulante apropiado, la cantidad exacta sólo puede ser determinada mediante ensayos. A pesar de que existen otras pruebas, tales como el potencial Z para determinar la dosis óptima, los mejores resultados se han obtenido mediante la prueba de jarras (NALCO, 1989).

- **Temperatura.**

La efectividad de la coagulación y la velocidad de formación de flóculo se ven influenciados por la temperatura del agua. Generalmente cuanto más fría esté el agua más largo será el tiempo requerido para producir buenos flóculos con una cantidad determinada de coagulante (Hernández, 1992); por otro lado se sabe que temperaturas bajas aumentan la viscosidad del agua y en consecuencia la velocidad de sedimentación del flóculo disminuye.

Aunque la disminución de la temperatura trae efectos adversos en la coagulación es importante mencionar el hecho de que trae consigo una disminución en el valor óptimo de pH (A.W.W.A., 1991). Conforme disminuye la temperatura del agua, debe aumentarse la dosis de productos químicos usados para coagular, con objeto de asegurar la formación de flóculos adecuados (Powell, 1981).

- **Velocidad de Mezclado**

Uno de los requisitos más importantes para una buena coagulación y asentamiento de sólidos suspendidos, es la mezcla rápida y completa de los productos químicos y el agua, seguida de la floculación lenta. Esto es esencial para dispersar uniformemente el reactivo y fomentar las coaliciones de las partículas coagulantes con las que producen la turbiedad (NALCO, 1989, Powell, 1981, A.W.W.A., 1991).

## Capítulo 4.

### 8 JUSTIFICACIÓN

---

El grado de tratamiento dado a un agua residual estará determinado previamente en función del uso para el cual se requiere. Hasta la fecha el tratamiento de aguas residuales en México, ha sido enfocado de acuerdo a la tecnología utilizada en los países desarrollados, lo que ha dado como resultado que en ocasiones su costo sea elevado y que no estén diseñados para las condiciones presentes en las industrias. Una parte del sector industrial, ha contemplado las inversiones necesarias para tratar sus aguas residuales como incosteables ya que el agua de primer uso, proveniente de las redes municipales de agua potable, es barata comparada con el costo de los tratamientos.

Sin embargo, debido a los problemas de escasez aunado a los patrones de consumo excesivo, desde hace algún tiempo y particularmente en los años recientes, en México se han venido adoptando instrumentos legales e institucionales, así como parámetros mediante los cuales pueda regularse la utilización del agua. De esta manera la Ley Federal de Derechos regula la determinación y el pago respectivo por uso de aguas nacionales así como su utilización como cuerpos receptores de aguas residuales. Esta Ley establece que sólo pagará quien vierta efluentes con contaminantes que superen las concentraciones permitidas en la Norma Oficial Mexicana aplicable. Con el propósito de inducir y estimular el desarrollo de sistemas de tratamiento de aguas residuales, se establece la opción de que los contribuyentes instalen sus propios sistemas exentándoles del pago del derecho si demuestran que tienen en proceso la realización del proyecto constructivo o la ejecución de obras para controlar la calidad de sus descargas (SMISAAC, 1995).

La mayoría de las industrias tienen problemas con las descargas de aguas residuales debido principalmente a que no existe un control en cada una de las etapas de su proceso de producción, además de que aún no se toma en cuenta al cien por ciento la internalización de los costos ambientales, trayendo como consecuencia que las empresas no apliquen ningún tipo de tratamiento a sus aguas residuales antes de ser vertidas ya sea a cuerpo receptor o alcantarillado. El problema principal es que los empresarios no se han dado cuenta de que pueden obtener beneficios directos (económicos, sociales y de mercado) de la práctica de tratar sus aguas, ya que posteriormente las pueden reutilizar o simplemente evitar sanciones por descarga de aguas contaminadas. En el caso particular de la empresa involucrada en el estudio, ya se cuenta con un sistema de tratamiento para sus aguas residuales y poder así reutilizarlas en su proceso, sin embargo, dicho sistema es ineficiente, dificultando con esto su reuso.

Por ello, los estudios sobre el tratamiento de aguas residuales aumentan día con día, como consecuencia de los problemas implícitos en el vertido de residuos industriales a la red de drenaje y cuerpos receptores, de tal forma que será necesario en el futuro de forma rutinaria realizar dichos estudios.

Por tanto es necesario comprender las generalidades y metodologías implícitas en la estimación de la tratabilidad de un agua residual, la realización de estudios en plantas piloto, en laboratorios y la transformación de datos experimentales en parámetros para el diseño de proyectos. De esta manera, se torna cada vez más necesaria la interacción Universidad-Empresa para lograr, en conjunto, el desarrollo de alternativas con las cuales se alcance la resolución de problemas ambientales en tiempos razonables, acorde a su capacidad financiera. Por tal motivo en el presente estudio se desarrollará una alternativa para incrementar la eficiencia del sistema de tratamiento de aguas residuales que opera actualmente en una industria productora de aceite comestible y de jabones de manera que su reutilización redunde en mayores beneficios tanto para la industria, como para el ambiente.

## Capítulo 5.

### *o* HIPÓTESIS

---

La composición del agua residual proveniente de la elaboración de aceites comestibles y jabones, presenta una elevada cantidad de sólidos en suspensión y grasas con lo cual se impide su reuso, por tanto, mediante la aplicación de la flotación inducida seguida de coagulación se reducirá la carga de contaminantes logrando así elevar la calidad del agua para una posible reutilización en el proceso.

## Capítulo 6.

### ↳ OBJETIVOS

---

#### 6.1. OBJETIVO GENERAL

De acuerdo a las características físicas y químicas del agua residual proveniente de la industria productora de aceites y jabones realizar, por medio de pruebas de tratabilidad del agua a nivel laboratorio, las modificaciones necesarias al actual sistema de tratamiento, para mejorar su eficiencia y favorecer el reuso del agua.

#### 6.2. OBJETIVOS PARTICULARES.

- Identificar las etapas del proceso de producción donde se generan compuestos que impiden la reutilización del agua residual.
- Caracterizar física y químicamente el efluente proveniente de una industria productora de aceite comestible y jabones.
- Diseñar las modificaciones necesarias que favorezcan el mejoramiento del sistema de tratamiento y evaluar su eficiencia con lo cual se incremente la calidad del agua residual.
- Realizar ensayos a nivel laboratorio con los procesos de flotación y coagulación, y evaluar su eficiencia en la disminución de la carga contaminante.

## Capítulo 7.

### METODOLOGÍA

---

#### 7.1. FASE DE GABINETE

En esta etapa se llevó a cabo la recopilación de la información necesaria para el desarrollo de la presente investigación. En una segunda fase una vez terminada la parte experimental, se llevó a cabo el análisis de los resultados obtenidos así como la elaboración de conclusiones y recomendaciones a la industria para eficientizar el reuso del agua, además de la redacción del escrito final.

#### 7.2. FASE DE CAMPO

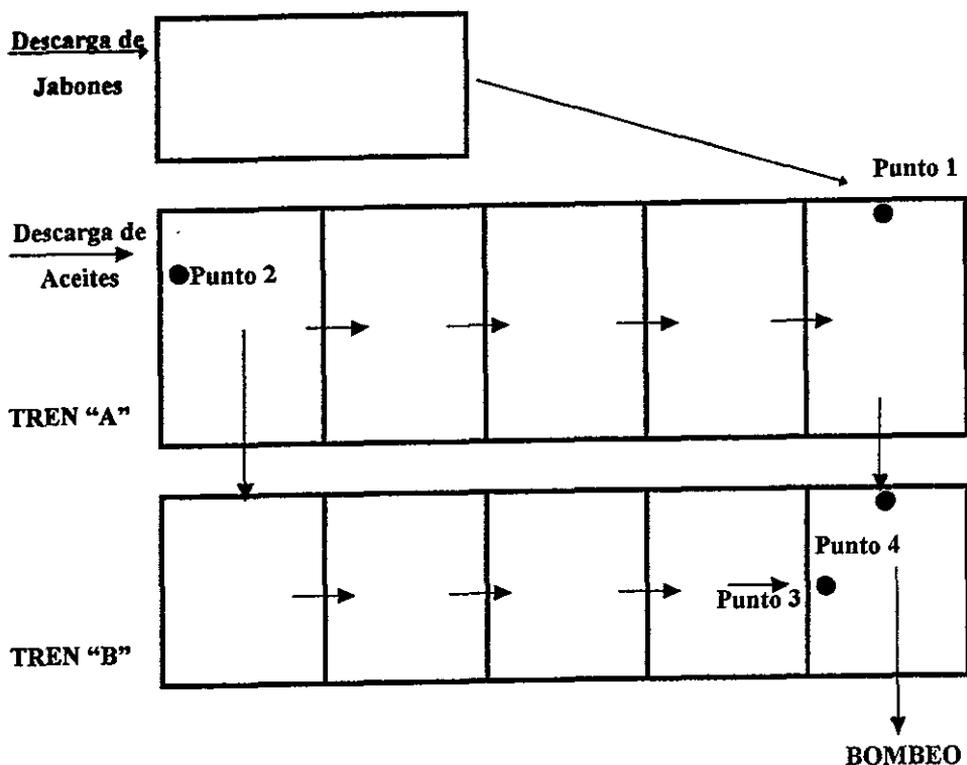
##### *7.2.1 Definición de los puntos de muestreo*

En esta fase se realizó un recorrido por la fábrica para determinar las etapas de elaboración de aceites en las cuales se estaban incorporando al agua de proceso componentes que deterioran su calidad. Posteriormente se determinaron los puntos de muestreo y en este caso el muestreo se llevó a cabo en cuatro diferentes puntos de dicho sistema como se muestra en la fig. 7. El muestreo se realizó de esta forma en particular debido a que no existen descargas hacia drenaje o cuerpo receptor ya que el punto de recepción de las descargas son las instalaciones existentes para el tratamiento del agua residual. Una vez determinados los puntos de muestreo se llevó a cabo la toma y transporte de las muestras lo cual se realizó de acuerdo a lo especificado en la literatura<sup>2</sup>.

---

<sup>2</sup> En el Anexo 2 se presentan las especificaciones para el procedimiento, desde la toma de muestras hasta el análisis en el laboratorio (cadena de custodia).

**Fig. 7 Esquema del sistema de tratamiento existente y puntos de muestreo.**



Punto 1: Corresponde a la descarga proveniente de la elaboración de jabones.

Punto 2: Caracteriza la descarga de la elaboración de aceites.

Punto 3: Consiste en la descarga proveniente del tren de tratamiento del agua generada en la elaboración de aceites.

Punto 4: Se caracteriza por ser una mezcla entre el agua de elaboración aceites después de haber recorrido el tren de tratamiento "A" y la descarga de jabones.

### 7.2.2 Parámetros de Campo.

Existen parámetros que deben ser realizados en el sitio de muestreo, tales como pH, temperatura y conductividad eléctrica, estos se realizaron de acuerdo a las Normas Mexicanas Oficiales establecidas (Cuadro 7.2).

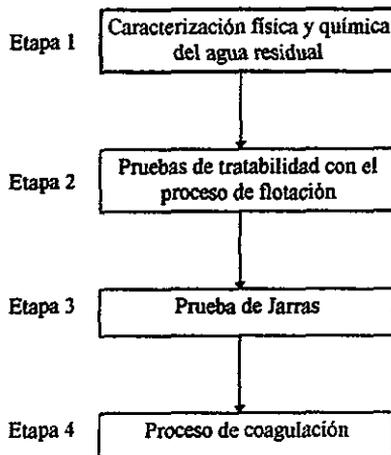
**Cuadro 7.2. Métodos empleados para la determinación de los parámetros de campo.**

PARÁMETRO	NORMA	MÉTODO
Muestreo	NOM-AA-003	
Temperatura	NOM-AA-007	Método Visual con Termómetro
pH	NOM-AA-008	Método Potenciométrico
Conductividad Eléctrica	NOM-AA-093	Método Conductivimétrico

### 7.3. FASE DE LABORATORIO

En la figura 8 se presenta un diagrama de flujo con los eventos realizados en las cuatro etapas de la fase de laboratorio y que se describen a continuación.

**Fig. 8 Diagrama de flujo de la fase de laboratorio.**



### 7.3.1 Etapa 1. Caracterización física y química del agua.

En esta etapa se llevó a cabo la caracterización física y química del agua residual antes de sufrir cualquier tipo de tratamiento, de acuerdo a las Normas Oficiales Mexicanas establecidas (Cuadro 7.3).

**Cuadro 7.3. Métodos empleados para la caracterización física y química del agua**

MÉTODO EMPLEADO	NORMA
Grasas y aceites - Método de extracción Soxhlet	NOM-AA-005
Sólidos Sedimentables - Método del cono Imhoff	NOM-AA-004
Sólidos - Método gravimétrico	NOM-AA-034
DBO - Método de Incubación por Dilución	NOM-AA-028
DQO - Método de Reflujo Abierto del Dicromato	NOM-AA-030

### 7.3.2. Etapa 2. Pruebas de tratabilidad con el proceso de flotación

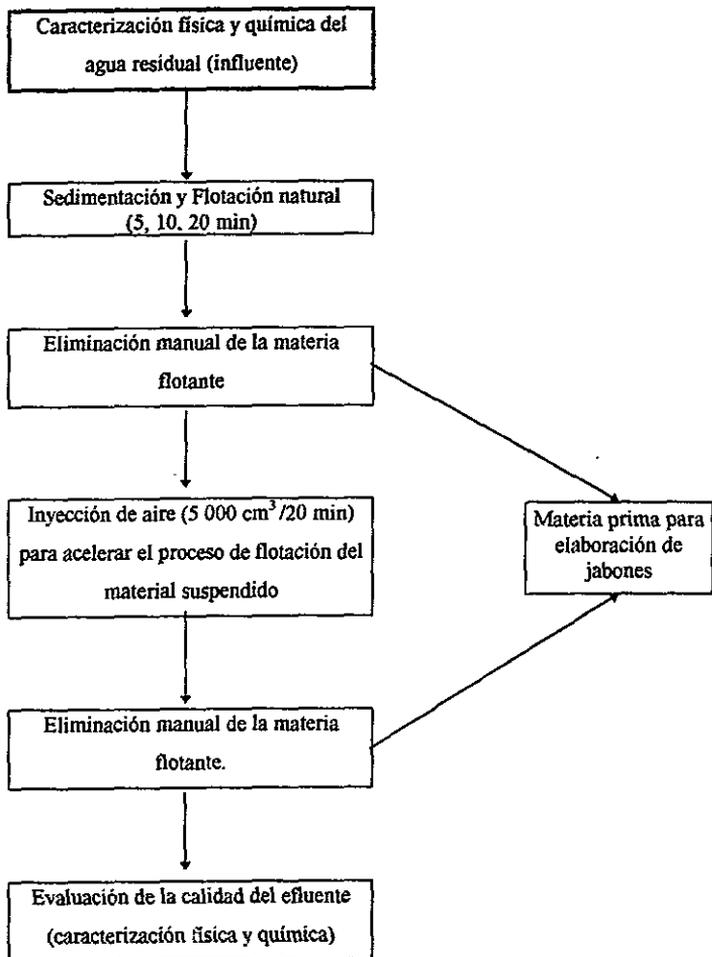
Para llevar a cabo el proceso de flotación se realizaron varios ensayos, en los cuales se establecieron las siguientes variables.

- Volumen de agua residual constante igual a 15 L.
- Tiempo de retención de 5, 10 y 20 min. en condiciones normales.
- Tiempo de retención de 5, 10, 20 y 30 min. con inyección de aire.

Las determinaciones se llevaron a cabo en un sistema diseñado para este fin con capacidad de 20 L. Después de cada tiempo de retención se procedió a retirar por medios manuales el

material flotante, finalmente se realiza una caracterización física y química del agua después del tratamiento (ver fig. 7), la cual se realizó de acuerdo a lo establecido en la etapa 1.

**Fig. 9 Diagrama de flujo del Proceso de Flotación.**



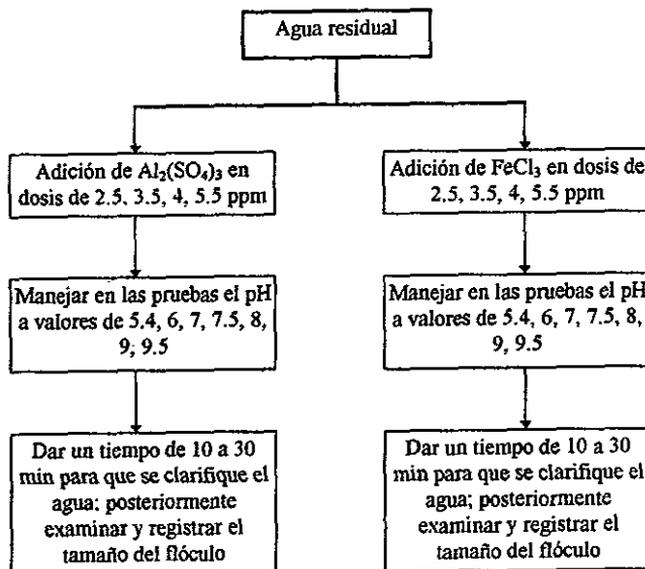
### 7.3.3 Etapa 3. Prueba de Jarras

La prueba de jarras se desarrolló de la siguiente forma:

- Agregar una cantidad de coagulante con un alto grado de mezclado en una muestra de agua turbia, controlando el pH en las pruebas realizadas para obtener el óptimo.
- La floculación debe llevarse a cabo con una velocidad baja de agitación (10 a 15 rpm), se examina la muestra después de un intervalo de tiempo establecido.
- En un intervalo de 10 a 30 min de sedimentación se examina visualmente el sobrenadante y se registra la naturaleza y tamaño del floculo.

Con el agua residual se realizaron pruebas para determinar la cantidad necesaria de coagulante para lo cual se utilizaron las siguientes dosis: 2.5, 3.5, 4, 5.5, ppm de sulfato de aluminio ( $Al_2(SO_4)_3$ ) y las mismas cantidades de cloruro férrico ( $FeCl_3$ ). Se realizaron además todas las pruebas a diferentes valores de pH (5.4, 6, 7, 7.5, 8, 9 y 9.5) para determinar el valor al cual se presenta una mejor coagulación (ver figura 8).

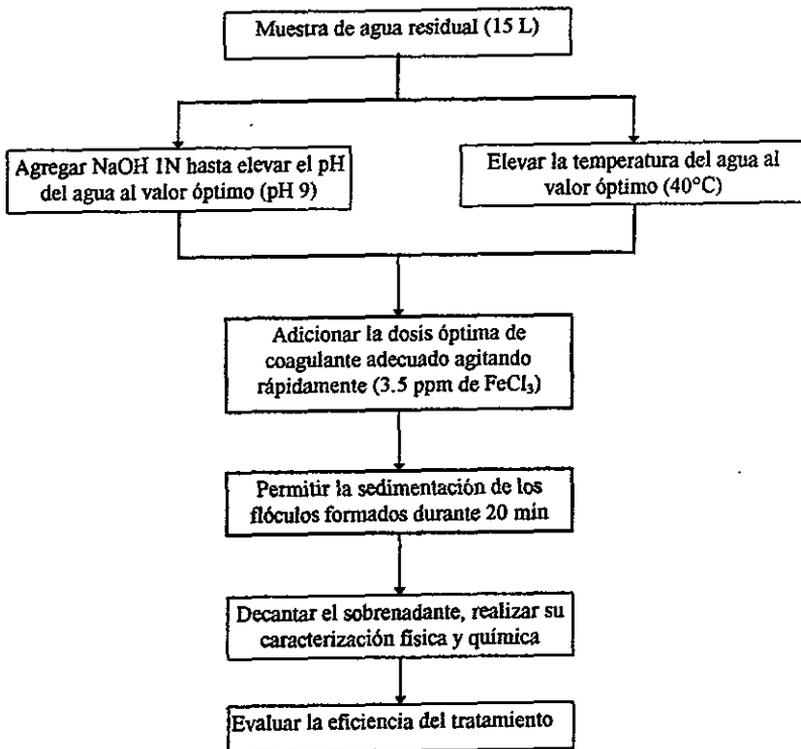
**Fig. 10 Diagrama de flujo de la prueba de jarras**



#### 7.3.4. Etapa 4. Prueba de tratabilidad con el proceso de Coagulación

Una muestra de 15 litros de agua residual contenida en el mismo sistema que se utilizó en la flotación se llevó a las condiciones óptimas de pH, dosis de reactivo y temperatura obtenidas en la prueba de jarras para realizar la coagulación y obtener con esto una buena remoción del material suspendido. Posteriormente se realizó la decantación del sobrenadante para caracterizarlo física y químicamente de acuerdo a lo establecido en la etapa 1, determinando con esto su calidad y la eficiencia del proceso aplicado (Fig. 9).

Fig. 11 Diagrama de flujo del Proceso de Coagulación.



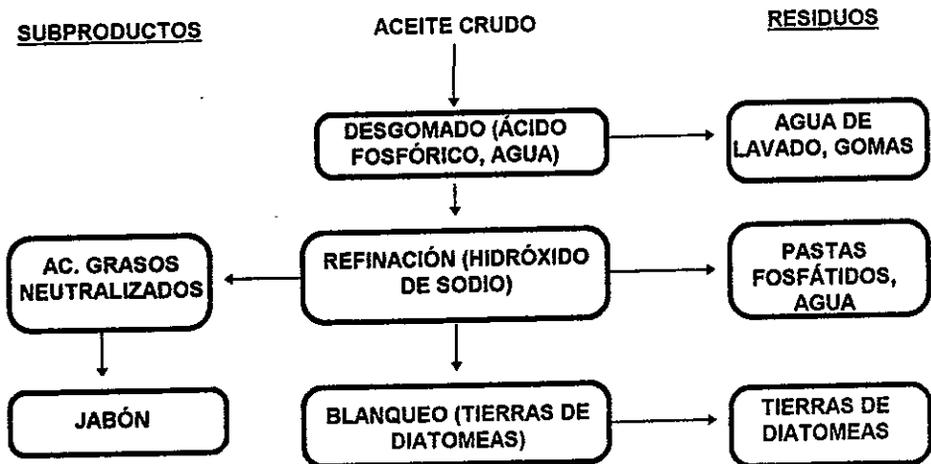
## Capítulo 8.

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

#### 8.1. Etapas del proceso productivo en donde se generan residuos.

La identificación de las etapas se obtuvo de la revisión bibliográfica, así como de la inspección realizada en la planta (fig. 12). Se encontró que los principales residuos generados son el agua de lavado proveniente de la etapa de desgomado, en la cual se mezcla con ácido fosfórico por lo que el efluente resultante tiene características ácidas; otro residuo generado en esta etapa son las gomas que se forman por acción del agua al volver insolubles algunos fosfolípidos y complejos de proteína y grasa presentes. Por otro lado en la etapa de refinación se presentan fosfátidos, así como también el agua de lavado la cual presenta características alcalinas; un último residuo que se genera son las tierras de diatomeas utilizadas en la etapa de blanqueado.

Fig. 12 Etapas donde se generan residuos que impiden el reuso del agua



## 8.2. Discusión de la Caracterización Física y Química del Efluente.

Uno de elementos importantes para el diseño de un sistema de tratamiento, es la caracterización física y química del agua residual, ya que esto aportará los elementos necesarios en la toma de decisiones acerca de las operaciones o procesos unitarios a utilizar; de acuerdo con lo anterior, a continuación se presentan los resultados obtenidos para los distintos puntos analizados en la industria productora de aceites comestibles.

**Cuadro 8.1. Resultados del análisis físico y químico del agua residual correspondiente al primer muestreo.**

PARÁMETRO	DESCARGA 1	DESCARGA 2	DESCARGA 3	DESCARGA 4
pH	9.5	5.8	5.5	6.8
Conductividad eléctrica (mS/cm)	780	370	303	438
Temperatura (°C)	45	40	39	37
D.Q.O. (mg/L)	143,120.7	30,582.4	30,103.4	32,658.8
D.B.O. (mg/L)	8,720	16,420.5	15,879.7	10,658.9
Sólidos Sedimentables (mL/L)	> 100	0.1	< 0.1	> 100
Sólidos Totales (mg/L)	73,030	12,970	11,830	71,303
Sólidos Totales Volátiles (mg/L)	5,330	6,150	5,969	4,930
Sólidos Suspendidos Totales (mg/L)	1,941	4,620	3,938	7,989
Sólidos suspendidos Volátiles (mg/L)	1,200	3,128.5	3,010	1,231
Sólidos Disueltos Totales (mg/L)	71,089	8,350.0	7,892	63,314
Sólidos Disueltos Volátiles (mg/L)	4,130.0	3,021.5	2,959	3,699
Grasas y Aceites (mg/L)	3,103.4	6,987.3	6,341.6	5,764.3

La siguiente discusión se realizó en función a los parámetros que presentan mayor influencia en la eficiencia de operación del sistema de tratamiento, siendo estos:

**pH:** Los valores de pH para los puntos 1 y 2 (cuadro 8.1) se encuentran dentro de rangos que concuerdan con la literatura citada (Degremont, 1979) y característicos para el tipo de descarga de aceites (5.8 ácido) y jabones (9.5 alcalino); sin embargo, estos valores pueden presentar problemas en el momento de proponer un proceso o una operación unitaria en el sistema de tratamiento del agua. En cuanto al valor del punto 4 el pH toma valores que tienden a la neutralidad (6.8) a consecuencia de la mezcla de los dos primeros tipos de agua residual. Por último, el valor de pH ácido encontrado en el punto 3 (5.5), se debe a que es una muestra que representa a la descarga de aceites después de recorrer el tren de tratamiento por lo cual el valor es similar al punto 2 (descarga de grasas y aceites).

**Sólidos:** En cuanto a este parámetro se observa que el valor de los sólidos sedimentables en el punto 1 es muy alto ( $> 100$  mL), esto es debido a que al enfriarse el agua se forman partículas de gran tamaño que ocupan un espacio por arriba de la graduación del cono Imhoff. En el punto 2 (descarga de grasas y aceites) se aprecia una cantidad muy pequeña de estos sólidos ( $< 0.1$  mL), lo cual se puede deber a que la mayoría de estas partículas tienen características que no les permiten sedimentar. El punto 3 representa a la descarga de aceites después de llevar un recorrido por el tren de tratamiento; aquí se tiene un valor menor que  $0.1$  mL/L el cual es más bajo que en el punto 2 ( $0.1$  mL/L), sin embargo esta disminución es mínima ya que se tiene en ambos valores en el rango de  $0.1$  mL/L. Por último, en el punto 4 la cantidad de sólidos ( $> 100$  mL/L) se incrementa con respecto a los otros tres como resultado de la mezcla de las descargas 1 y 2 después de recorrer el tren de tratamiento. Aquí es importante mencionar que en cuanto a la remoción de sólidos sedimentables el tren de tratamiento no está resultando eficiente lo cual se observa por la similitud de los valores entre los puntos que tienen relación (1-4 y 2-3).

Lo anterior indica que los sólidos sedimentables se presentan en forma despreciable en la descarga de aceites, mientras que en la de jabones son los principales; estos últimos no se están removiendo de un punto a otro debido a que la descarga del punto 1 no presenta ningún tratamiento antes de mezclarse con la descarga del punto 2. Por otro lado y teniendo en cuenta que los sólidos suspendidos son de mayor importancia para el sistema de tratamiento, se observa que el valor más bajo de dichos sólidos se presenta en el punto 1 (1,941 mg/L), sin embargo es importante mencionar que esta descarga no pasa por el tren de tratamiento, por lo que la cantidad de sólidos se incrementa en el momento de mezclarse con la descarga 2, la cual presenta un valor elevado (4,620 mg/L). El resultado de la mezcla anterior es el punto 4, que tiene el valor más elevado en este parámetro (7,989 mg/L). Por último, el valor del punto 3 (3,938 mg/L), muestra un incremento en la cantidad de sólidos suspendidos, con lo cual se puede inferir que el tren de tratamiento no está siendo eficiente, impidiéndose de esta manera un reuso adecuado del agua supuestamente tratada.

**Grasas y aceites:** Los datos obtenidos muestran un valor alto de estos compuestos lo que sería normal en el punto 2 (6,987 mg/L) por provenir del proceso de producción, sin embargo en los puntos 3 y 4 aunque existe una disminución (6,341.6 y 5,764.3 mg/L respectivamente), los valores de grasas y aceites siguen siendo muy altos, lo que denota que no hay una remoción eficiente; en el punto 1 también se presenta una cantidad elevada de grasas (3,103.4 mg/L) debido a la permanencia de restos de aceites y grasas que no sufrieron el fenómeno de saponificación durante la elaboración de jabones.

**Demanda Química de Oxígeno (DQO):** Los valores de DQO son altos para todos los sitios, esto es debido a la gran cantidad de sólidos y grasas y aceites presentes, los cuales requieren una gran cantidad de oxígeno para ser degradados a compuestos más simples. Las grasas y aceites adquieren aún mayor relevancia, puesto que además de requerir oxígeno para ser descompuestas, forman una película entre la interfase aire-agua impidiendo su reoxigenación y provocando con ello un déficit de oxígeno para que se lleve a cabo su degradación.

**Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>):** Los valores de la DBO<sub>5</sub> son inferiores a los de la DQO en todos los puntos ya que la primera se refiere sólo a los compuestos que pueden ser degradados por los microorganismos. El valor obtenido para los puntos 2, 3 y 4 (30,582.4, 30,103.4 y 32,658.8 mg/L respectivamente) representa casi la mitad de la DQO, lo que sugiere la existencia de una cantidad importante de compuestos que pueden sufrir una degradación biológica. La relación existente entre ambos parámetros indica que se presentan características de un agua residual doméstica, esto se debe a la composición de la descarga la cual es principalmente de tipo orgánico.

Los datos presentados en el cuadro 8.2 corresponden a un segundo muestreo en el cual solo se tomaron en cuenta los puntos 1 (descarga de jabones) y 2 (descarga de aceites), quedando identificados con la misma ubicación y numeración.

**Cuadro 8.2. Resultados del análisis de las características físicas y químicas del agua residual correspondiente al segundo muestreo.**

PARÁMETRO	DESCARGA 1	DESCARGA 2
pH	9.2	5.8
Temperatura (°C)	47	42
Conductividad Eléctrica (mS/cm)	826	350
D.Q.O. (mg/L)	160,928	33,212.8
D.B.O. <sub>5</sub> (mg/L)	10,081	15,432.6
Sólidos Sedimentables (mL/L)	> 100	< 0.1
Sólidos Totales (mg/L)	73,660	13,120
Sólidos Suspendidos Totales (mg/L)	2,230	4,630
Sólidos Totales Volátiles (mg/L)	5,844	6,794
Sólidos Suspendidos Volátiles (mg/L)	1,420	3,450
Sólidos Disueltos Totales (mg/L)	71,430	8,476
Sólidos Disueltos Volátiles (mg/L)	4,424	3,344
Grasas y Aceites (mg/L)	3,319.2	7,102.6

Es importante mencionar que los sitios 3 (descarga de aceites después de recorrer el tren) y 4 (mezcla de la descarga 1 y 2), fueron eliminados ya que de acuerdo a lo propuesto en esta investigación las descargas deben ser tratadas por separado por presentar características diferentes.

En este sentido, al comparar los resultados de los cuadros 8.2 y 8.1, se observa que son similares, aún cuando en el segundo muestreo se incrementaron los valores en todos los parámetros, esto se debe posiblemente a que no había una circulación del agua por medio del bombeo dirigido hacia los tanque de almacenamiento. De lo anterior se puede inferir que la composición química de las descargas en esta industria no varían mucho, por lo que las características de los dos muestreos son similares y por lo tanto se tiene un comportamiento idéntico al discutido anteriormente.

### 8.3. Discusión de los resultados del Proceso de Flotación.

Con la flotación se llevó a cabo la separación de grasas y aceites, después de aplicar varios ensayos, encontrando para su realización las condiciones más favorables indicadas en el cuadro 8.3. Cabe mencionar que tanto el proceso de flotación, como el de coagulación se realizaron sólo en la descarga 2 (aceites), ya que en la 1 (jabones) no fue posible llevarlos a cabo debido a que a temperatura ambiente la muestra se solidifica y se considera más conveniente recuperar este material por medios manuales para reutilizarlo en la elaboración de jabones.

**Cuadro 8.3. Condiciones óptimas para la flotación en la descarga de Grasas y Aceites.**

Variable	Valor
Aire	5,000 cm <sup>3</sup> /seg
Tiempo de inyección	20 minutos
Temperatura	23 °C
Diámetro de burbuja	1.5 mm

Durante el transcurso del proceso de flotación se separaron las espumas que se formaron, pudiendo ser utilizadas como materia prima para la elaboración de jabones. Posteriormente se llevó a cabo la caracterización física y química del efluente, de lo cual se obtuvieron los resultados que se presentan en el cuadro 8.4, así como su posterior análisis.

**Cuadro 8.4. Resultados de la caracterización física y química del agua después del proceso de flotación.**

<b>Parámetro</b>	<b>Descarga de Aceites.</b>
pH	5.6
Conductividad Eléctrica (mS/cm)	220
Temperatura (°C)	23
D.Q.O. (mg/L)	15,465.6
D.B.O. <sub>5</sub> (mg/L)	8,824.4
Sólidos Sedimentables (mL/L)	Ausentes
Sólidos Totales (mg/L)	7,774
Sólidos Totales Volátiles (mg/L)	4,368
Sólidos Suspendidos Totales (mg/L)	2,500
Sólidos Suspendidos Volátiles (mg/L)	2,000
Sólidos Disueltos Totales (mg/L)	5,274
Sólidos Disueltos Volátiles (mg/L)	2,368
Grasas y aceites (mg/L)	1,926.4
Alcalinidad (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	1,790

**pH:** Después de realizada la flotación se observa que el pH sólo cambia en 0.2 unidades con respecto a las características iniciales, con lo cual se mantiene dentro de las condiciones señaladas para el cuadro 8.1, dado que la variación no provoca cambios drásticos en la calidad del agua. La disminución en el pH puede ser resultado de la remoción de una cierta cantidad de los ácidos grasos presentes. Por otro lado, y teniendo en cuenta que el pH es un factor determinante en el proceso de coagulación, es importante mencionar que esta variable debe ser manejada ya que los valores varían de acuerdo al coagulante a utilizar (rangos de pH entre 4 y 12) y a las características del agua de proceso.

**Temperatura:** La temperatura a la que se realizó el proceso de flotación (23 °C) es muy diferente a la de descarga del agua residual (42 °C), sin embargo, a este valor se obtienen los mejores resultados en el proceso de flotación, ya que se presenta una gran cantidad de espuma formada, la cual puede ser retirada fácilmente de acuerdo a lo mencionado en el método, mientras que a temperaturas superiores a los 28-30 °C el fenómeno mencionado se lleva a cabo en un tiempo mucho mayor y con una escasa formación de espuma.

**DBO<sub>5</sub> y DQO:** Los valores obtenidos tanto para la DBO<sub>5</sub>, como para la DQO, muestran que se ha presentado una remoción de los compuestos que tienen influencia sobre estos indicadores de contaminación. La DQO se redujo en 17,747.2 mg/L, lo que representa un 53% de remoción (cuadro 8.5), este mismo porcentaje se traduce en la eficiencia del tratamiento de Flotación. Por lo que respecta a la DBO<sub>5</sub> se obtuvo una disminución de 6,608.2 mg/L, por lo que la remoción de este parámetro es de 42%, aplicándose el mismo porcentaje para describir su eficiencia.

Estos valores de remoción son inferiores a los reportados en la literatura, debido a que se indican mayores valores para la flotación con aire disuelto, mientras que para la flotación con inyección de aire no se tienen datos, sin embargo, si se menciona que con el primero se obtienen mejores resultados que con el segundo.

**Sólidos:** Aunque no se detectó la presencia de sólidos sedimentables (cuadro 8.4), no se puede mencionar que se obtuvo una remoción del 100% (cuadro 8.5), ya que el valor inicial de dichos sólidos en realidad era despreciable (menos de 0.1 mL/L), de tal manera que este parámetro no puede ser tomado como referencia para determinar la eficiencia del tratamiento. Por lo que respecta a los sólidos suspendidos, permanecen aún 2,500 mg/L (cuadro 8.4) lográndose una remoción de 2,130 mg/L; se puede decir que el tratamiento tuvo una eficiencia del 46%. Es importante mencionar que estos sólidos son los de mayor interés para el proceso de tratamiento que se utilizó posteriormente (coagulación), dado que la cantidad removida de sólidos favorecerá a dicho proceso, ya que se requerirá una cantidad menor de coagulante.

**Grasas y Aceites:** Las grasas y aceites son compuestos de baja densidad que se remueven principalmente por medio de la flotación inducida debido a que son atrapados en las burbujas de aire formadas y llevados hacia la superficie, en donde pueden ser retirados mecánicamente. El valor obtenido para este parámetro (cuadro 8.4), da como resultado una remoción de 5,176.2 mg/L, quedando una cantidad remanente de 1,926.4 mg/L, los cuales

son removidos en el proceso de coagulación. Estos valores representan un 72.9% de eficiencia en la remoción de estos compuestos (cuadro 8.5); por otro lado, el material retirado en el proceso de flotación y en la coagulación puede ser utilizado como materia prima para la elaboración de jabones.

**Cuadro 8.5. Porcentaje de Remoción después de la Flotación.**

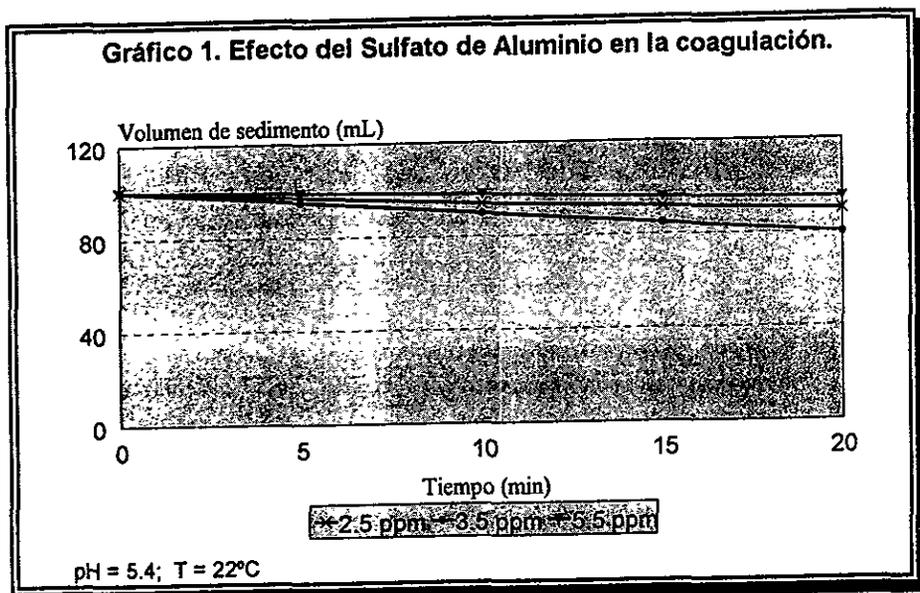
Parámetro	Remoción (%)
DQO (mg/L)	53.0
DBO (mg/L)	42.0
Grasas y Aceites (mg/L)	72.9
Sólidos Sedimentables (mL/L)	100.0
Sólidos Totales (mg/L)	40.8
Sólidos Suspendidos Totales (mg/L)	46.0
Sólidos Suspendidos Volátiles (mg/L)	43.0
Sólidos Disueltos Totales (mg/L)	37.0
Sólidos Disueltos Volátiles (mg/L)	29.0

#### 8.4 Discusión de la Prueba de Jarras.

Se utilizó la prueba de jarras porque es la que se recomienda cuando se presentan cantidades de sólidos suspendidos menores de 5,000 mg/L. En esta etapa se realizaron una serie de pruebas, con las cuales se determinó el coagulante adecuado, dosis, valor de pH y temperatura óptimos para un mejor desempeño del mismo. Es importante mencionar que el poder coagulante se determinó de acuerdo a la cantidad de sedimento formado en las probetas, en donde un menor volumen de sedimento perfectamente compactado corresponde a una mejor coagulación.

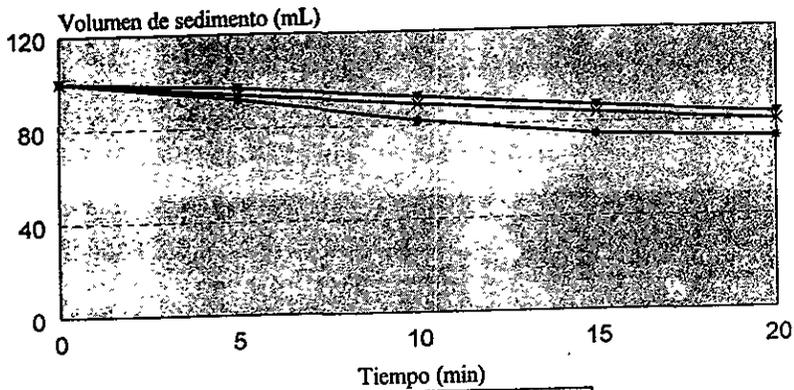
De acuerdo a los resultados representados en el gráfico 1 se observa que a pH 5.4 y 22 °C, la concentración de Sulfato de aluminio que presenta un mejor poder floculante es la de 3.5 ppm ya que se obtiene una menor cantidad de sedimento (79 mL), que el obtenido en las mismas condiciones con 2.5 ppm (90 mL) y 5.5 ppm (96 mL). El menor volumen obtenido indica una buena agregación y estabilidad de los flóculos, que al sedimentar se compactan mejor, por otro lado cabe mencionar que la concentración de 2.5 ppm no fue suficiente para

neutralizar en su totalidad a las partículas y el resultado obtenido a concentración de 5.5 ppm (por arriba de la concentración más baja utilizada), se debe a que el exceso de agente coagulante provoca la reactivación de las partículas coaguladas devolviéndoles su estabilidad e impidiendo con esto la posibilidad de que las partículas floquen.



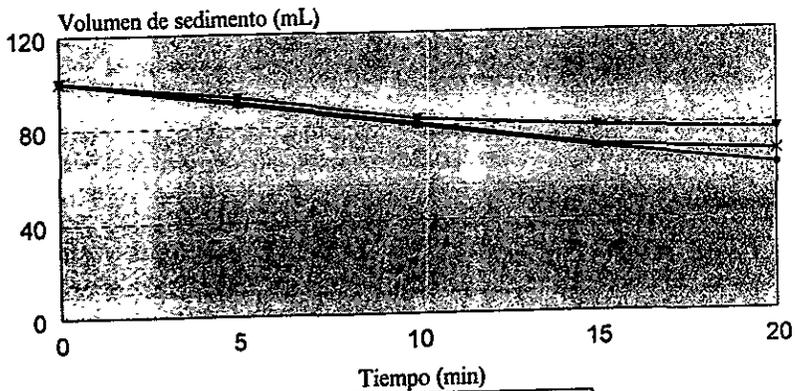
Por otro lado, al utilizar las concentraciones anteriores, pero a pH 6 y 7 (gráficos 2 y 3) se observa una disminución del volumen de sedimento formado, aunque el comportamiento de las distintas concentraciones es similar, ya que de nueva cuenta y en ambos gráficos el mejor resultado (77 mL a pH 6 y 62 mL a pH 7) se obtiene con 3.5 ppm de  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ . Esto indica que conforme se eleva el valor del pH se incrementa también el poder coagulante; aunque no necesariamente un aumento de pH tendrá este efecto ya que si se rebasa el valor óptimo traerá efectos negativos a la coagulación, por lo que los valores de los parámetros que tienen influencia sobre este fenómeno deberán ser determinados para cada tipo de agua.

**Gráfico 2. Efecto del Sulfato de Aluminio en la coagulación.**



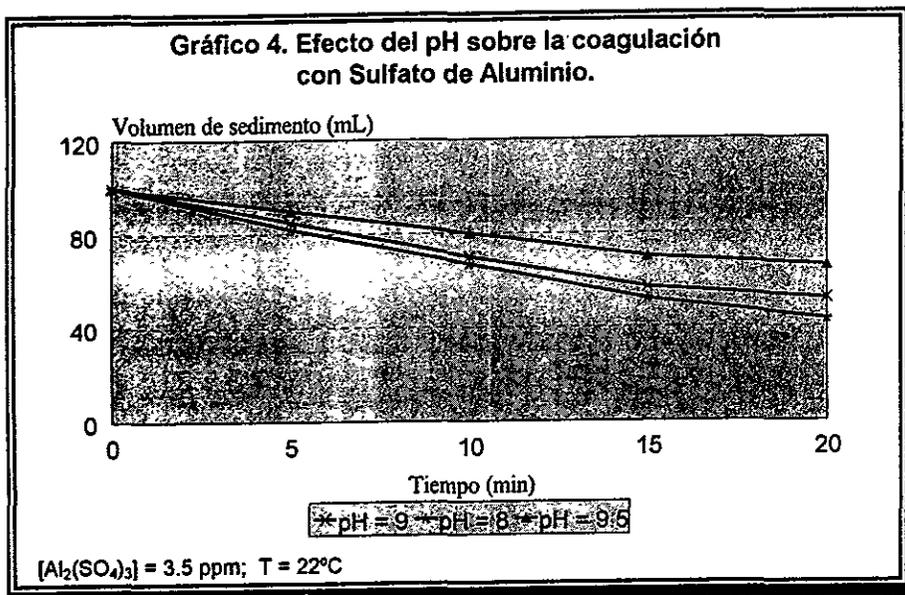
pH = 6; T = 22°C

**Gráfico 3. Efecto del Sulfato de Aluminio en la coagulación.**



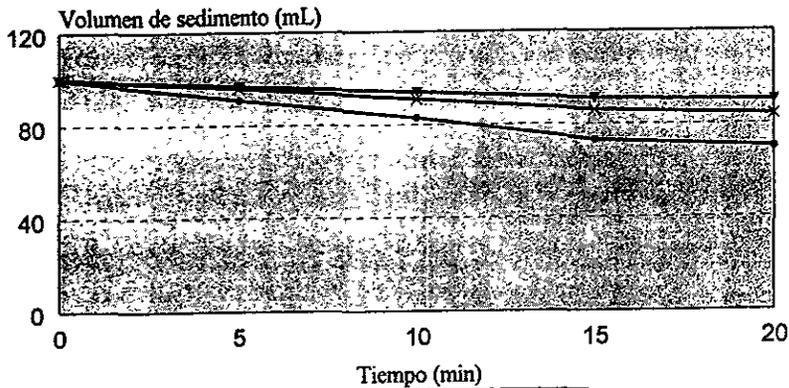
pH = 7; T = 22°C

El gráfico 4 muestra el efecto de la concentración de 3.5 ppm de  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  que tuvo el mejor poder coagulante en las determinaciones anteriores (gráficos 1, 2 y 3). En este ensayo se introducen tres nuevos valores de pH (7.5, 8 y 9) para determinar si existe una mejor coagulación, observando que a pH 8 se presentan los mejores resultados, ya que se obtiene un volumen de sedimento igual a 43 mL, siendo este el valor más bajo de todos los ensayos realizados a de 22 °C; por lo cual se determina que a esta temperatura el  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  presenta su mejor poder coagulante a pH de 8 y 3.5 ppm.



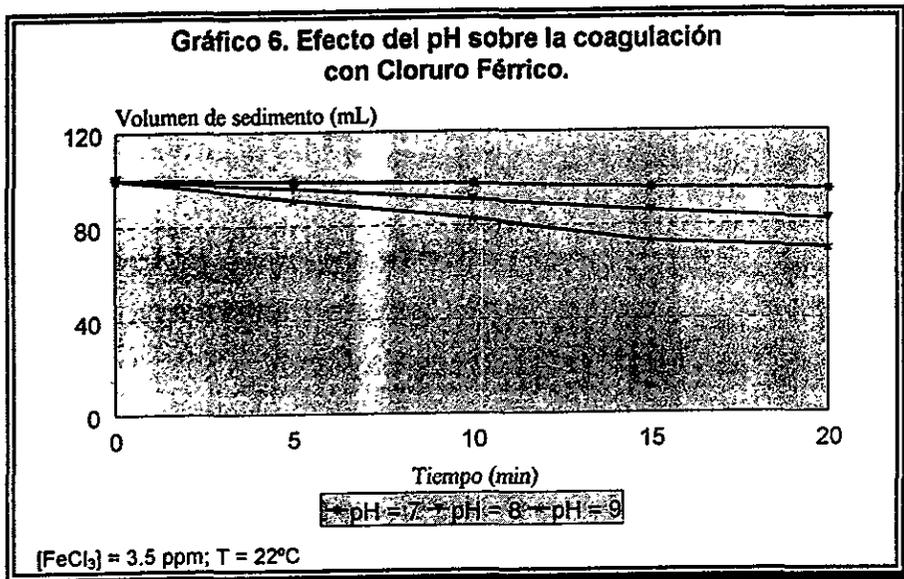
Los gráficos 5 y 6 representan la aplicación del cloruro férrico ( $\text{FeCl}_3$ ) a diferentes concentraciones y pH; cabe mencionar que los resultados obtenidos anteriormente se utilizaron como base para utilizar este reactivo, evitando realizar un gran número de determinaciones. De acuerdo con lo anterior, la concentración a la que se realizó el primer ensayo fue la óptima para el sulfato de aluminio (3.5 ppm), mientras que el pH se manejó a valores de 7, 8 y 9 (gráfico 5), encontrando como mejor resultado a 22 °C un volumen de 70 mL de sedimento formado a pH de 9, en tanto que a pH 7 y 8 se obtienen valores más altos (96 y 82 mL respectivamente), que muestra una menor eficacia como agente coagulante.

**Gráfico 5. Efecto del Cloruro Férrico en la coagulación.**



pH = 9; T = 22°C

El gráfico 6 representa el último ensayo a temperatura de 22 °C; se observa una comparación entre diferentes concentraciones de cloruro férrico (2.5, 3.5 y 4.0 ppm) a pH de 9, para evaluar si este compuesto puede mejorar su eficiencia como coagulante; sin embargo, se observa que sigue siendo la concentración de 3.5 ppm la de mejor resultado ya que con las otras concentraciones se obtiene un volumen mayor de sedimento, lo que sugiere que no se están formando flocúlos con las características adecuadas para lograr una rápida sedimentación y compactación. Por último, es importante que al comparar los resultados obtenidos con los dos coagulantes demuestra que a temperatura de 22 °C el  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  tiene una mejor función coagulante que el  $\text{FeCl}_3$ , ya que mientras con el primero se obtienen 43 mL de sedimento, con el segundo se obtiene una cantidad mayor (70 mL).

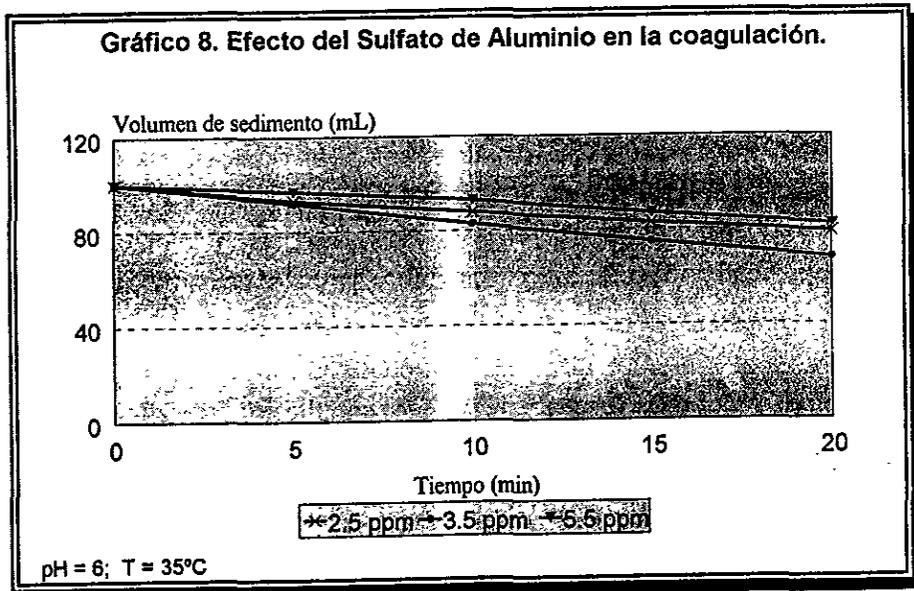
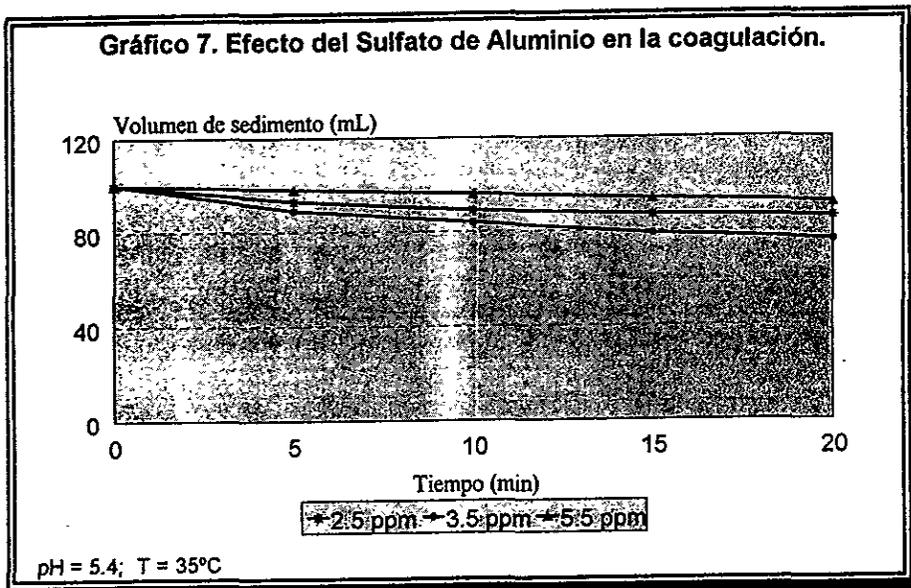


Para el análisis de los gráficos 7, 8 y 9 es importante mencionar las variables que se manejaron y se mantuvieron constantes: reactivos y sus concentraciones, así como los rangos de pH utilizados, siendo la temperatura la única variable que se modifica con un incremento a 35 °C para determinar su influencia en el poder coagulante de los reactivos.

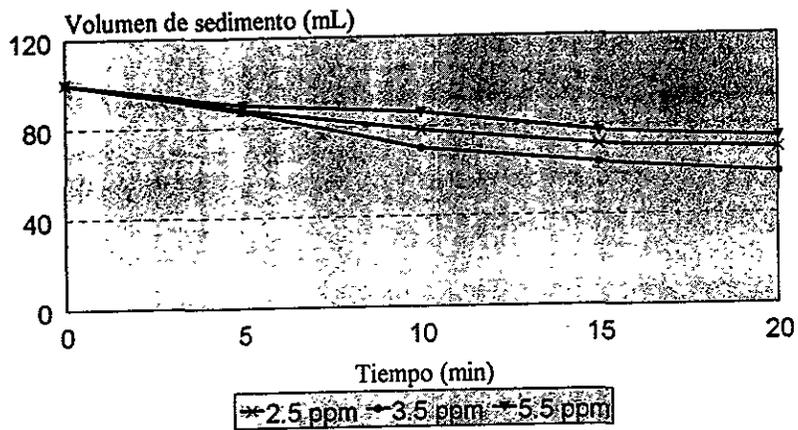
En el gráfico 7 muestra el mejor resultado a 3.5 ppm de, Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> siendo el volumen de sedimento (77 mL) muy similar al caso del gráfico 1 (79 mL), observándose el mismo comportamiento en las dos concentraciones restantes. Esto se repite en los gráficos 8 y 9 en los cuales también existe una leve reducción del volumen sedimentado, existiendo en los tres gráficos y a las diferentes concentraciones una reducción general de 3 a 4 mL.

Lo anterior puede sugerir que no se está presentando algún cambio importante con el incremento de la temperatura, sin embargo al analizar el gráfico 10 (en el cual se introdujeron los valores de pH de 7.5, 8 y 9), se aprecia una reducción más significativa del sedimento para la concentración igual a 3.5 ppm de Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> a pH 8 ya que, de 44 mL formados a 22 °C, se redujo a 37 mL a 35 °C. En este punto cabe resaltar que aunque

aparentemente esta reducción de 7 mL no implica una mayor eficiencia, el resultado obtenido es satisfactorio ya que se logró una mejor formación y estabilidad de los floculos, lo cual redunda en un volumen mayor de agua clarificada.

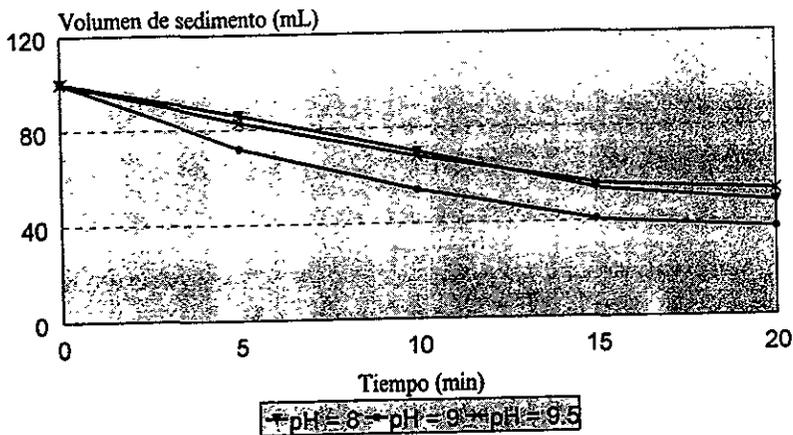


**Gráfico 9. Efecto del Sulfato de Aluminio en la coagulación.**



pH = 7, T = 35°C

**Gráfico 10. Efecto del pH sobre la coagulación con Sulfato de Aluminio.**

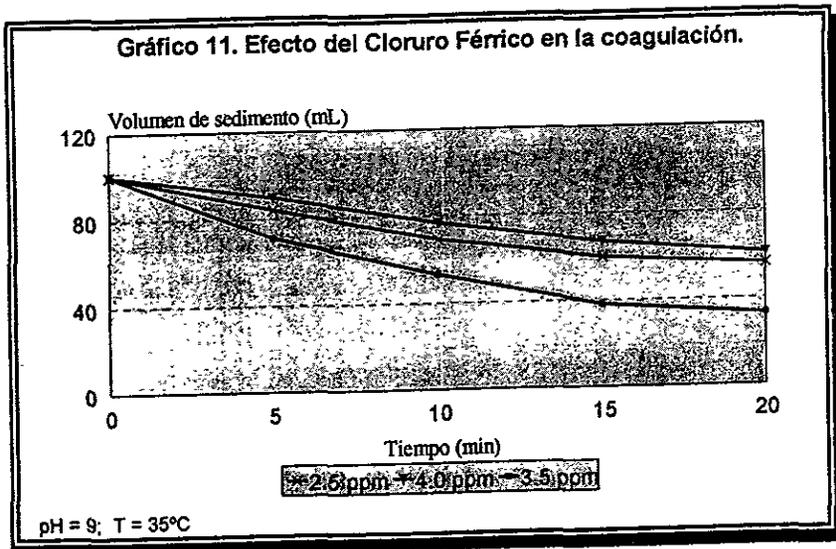


[Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>] = 3.5 ppm; T = 35°C

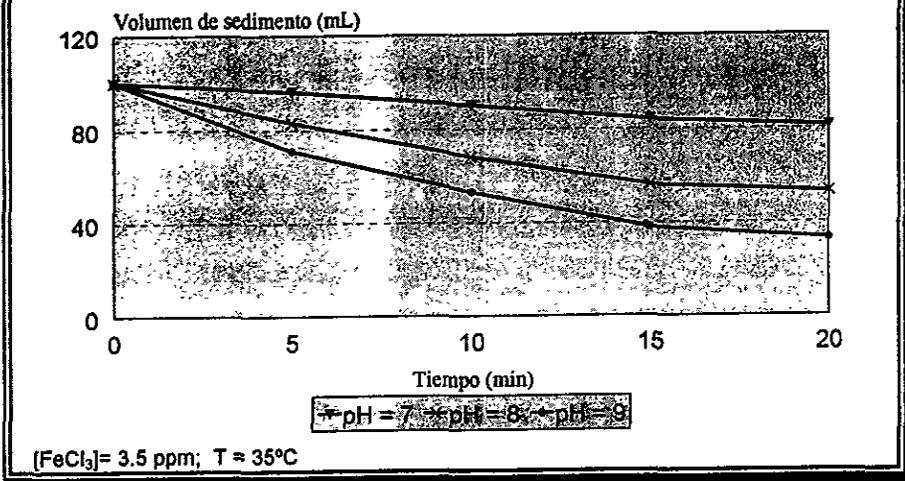
Para los ensayos con  $\text{FeCl}_3$  (gráficos 11 y 12) se tomó la concentración de 3.5 ppm, a pH 7, 8 y 9, obteniéndose resultados mucho más satisfactorios que a 22 °C ya que con a los tres valores se logró una mayor floculación y sedimentación (gráfico 11), representados por los valores de 80, 52 y 33 mL, respectivamente.

A pH de 7 se obtuvo una disminución menor en el volumen con respecto a lo obtenido con la primer temperatura, ya que presenta una reducción de 7 mL mientras que a pH 8 y 9 es de 30 y 37 mL, siendo este último el mejor resultado con lo cual se incrementa en una proporción considerable el volumen de agua clarificada.

Por último en el gráfico 12 se comparan las concentraciones diferentes (2.5, 3.5 y 4.0 ppm) de  $\text{FeCl}_3$  al pH óptimo (9). Los resultados obtenidos demuestran que la concentración 3.5 ppm sigue siendo la más eficiente ya que con las otras dos se obtiene un volumen menor de sedimento (más de diez mL menos que la concentración óptima). Por último, es importante resaltar que los resultados obtenidos a 35 °C con son mucho mejores que los logrados con  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ , esto sugiere que el primer coagulante es más eficiente que el segundo a esta temperatura, mientras que a 22 °C resultaba lo contrario, por lo cual se determina que la temperatura juega un papel muy importante en la coagulación con  $\text{FeCl}_3$ .



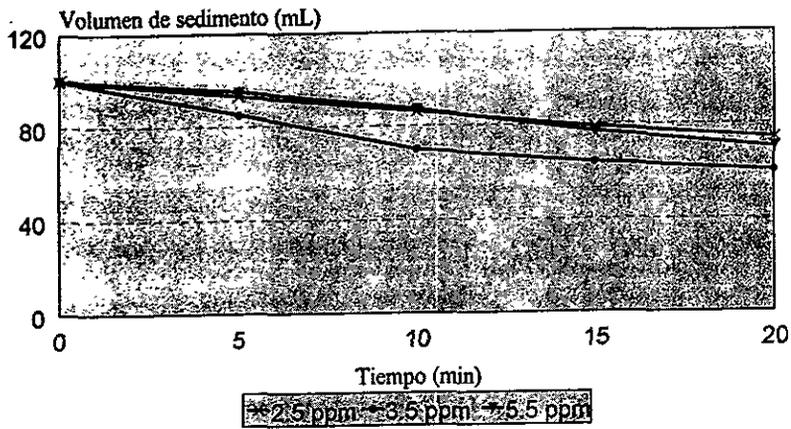
**Gráfico 12. Efecto del pH sobre la coagulación con Cloruro Férrico.**



De acuerdo a los ensayos anteriores, la temperatura se incrementó a 40 °C para llevar a cabo esta serie. Los resultados presentados en los gráficos 13, 14 y 15 demuestran que se obtiene una mayor formación de flocúlos estables y capaces de sedimentar logrando una capa más compacta, lo cual repercute en una disminución del volumen de sedimento, esta tendencia se mantiene en los tres valores de pH establecidos para las gráficas mencionadas, siendo el mejor resultado el obtenido con 3.5 ppm a pH 7 con un volumen de 50 mL de sedimento, lo que representa una disminución de 12 mL con respecto a la prueba a 22 °C.

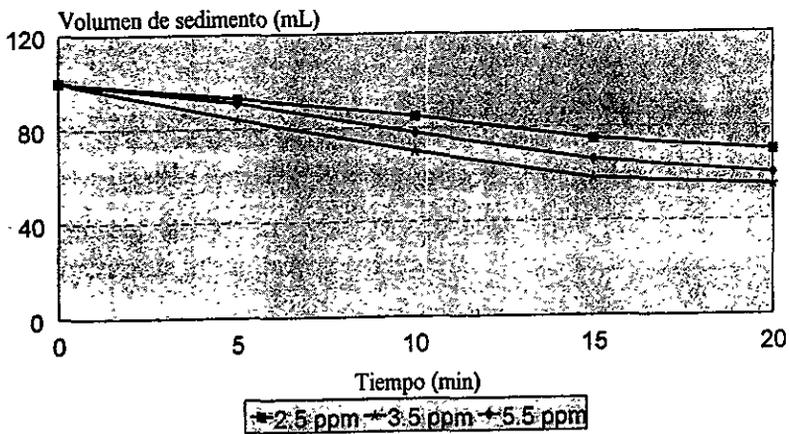
Por lo que respecta al gráfico 16 se incluyen tres valores de pH establecidos (7.5, 8 y 9), de lo cual se obtiene que a pH 8 se presenta el menor volumen de sedimento formado en todas las series realizadas (38 mL). La cantidad de agua clarificada por tanto, será la diferencia entre el volumen total (100 mL) y el de sedimento, obteniéndose así 62 mL de agua clarificada.

**Gráfico 13. Efecto del Sulfato de Aluminio en la coagulación.**



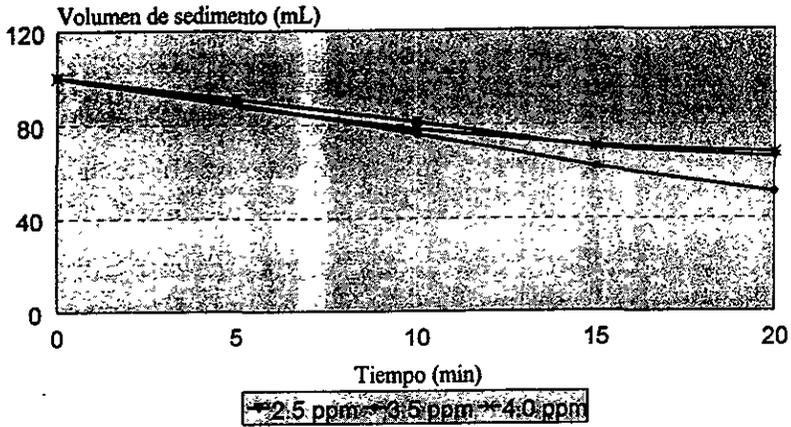
pH = 5.4; T = 40°C

**Gráfico 14. Efecto del Sulfato de Aluminio en la coagulación.**



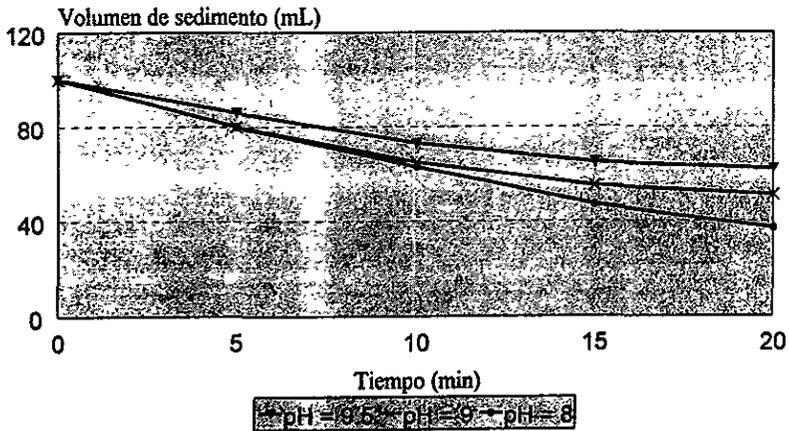
pH = 6; T = 40°C

**Gráfico 15. Efecto del Sulfato de Aluminio en la coagulación.**



pH = 7; T = 40°C

**Gráfico 16. Efecto del pH sobre la coagulación con Sulfato de Aluminio.**

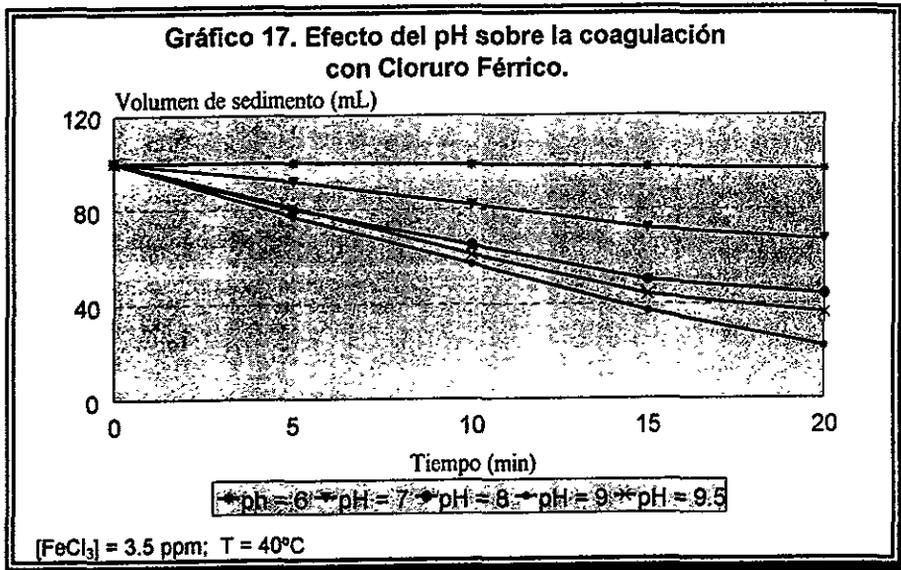


[Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>] = 3.5 ppm; T = 40°C

Es importante mencionar que los resultados de la coagulación con  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  obtenidos a esta temperatura son mejores que a 22 °C, no lo son de manera eficiente, ya que sólo existe una diferencia de entre 6 y 8 mL de disminución en los sedimentos.

Sin embargo, Dempsey (1989) menciona que en la práctica se ha observado en general que el sulfato de aluminio tiene un pobre poder en cuanto a sedimentación de floculos a temperaturas bajas. Debido a esto se debe analizar acerca de que tan conveniente es incrementar la temperatura para lograr una reducción de volumen.

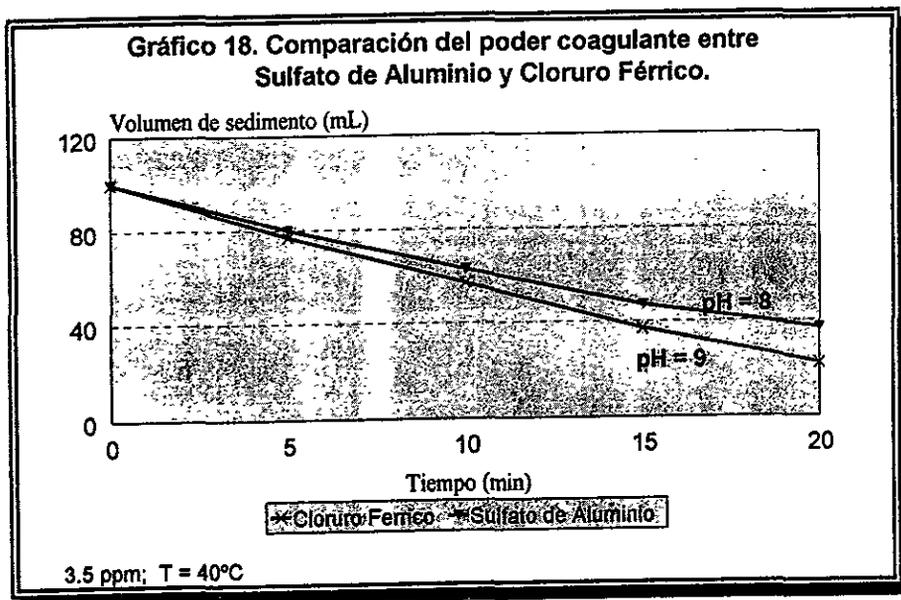
En el gráfico 17 se presentan los resultados de la coagulación con  $\text{FeCl}_3$  a una concentración de 3.5 ppm, la cual a través de las determinaciones realizadas demostró ser la más eficaz, en este ensayo se utilizaron valores de pH de 6, 7, 8, 9 y 9.5. Aunque a todos los valores se obtuvieron buenos resultados, a pH 9 resulto el óptimo, ya que se obtuvo un volumen sedimentado de 22 mL, lo que representa una reducción de 48 mL de sedimento y una 78 mL de agua clarificada, ratificándose así la importancia de la temperatura sobre el poder coagulante del  $\text{FeCl}_3$ , lo que contrasta con el  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  ya que la diferencia entre las tres temperaturas no es muy grande.



En el gráfico 18 se muestra una comparación de la capacidad de coagulación entre  $\text{FeCl}_3$  y el  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ . Las condiciones utilizadas fueron las mejores para el caso de cada reactivo, en donde podemos observar que a una concentración de 3.5 ppm, pH de 8 y temperatura  $40^\circ\text{C}$  el  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  presentó una formación de 38 mL de sedimento, con lo que se obtienen 62 mL de agua clarificada. Por otro lado en presencia de  $\text{FeCl}_3$  a una concentración de 3.5 ppm, pH 9 y temperatura  $40^\circ\text{C}$ , se logró una formación de un volumen de sedimento de 22 mL, el cual supera en 16 mL al primero.

Es importante resaltar que los flocúlos formados con  $\text{FeCl}_3$  presentan mejor estabilidad y mayor tamaño con lo cual se logran mejores resultados. Se debe mencionar también la importancia de manejar el pH ya que para el  $\text{FeCl}_3$  se reportan rangos de pH que van desde 4.5 hasta 11, mientras que para el sulfato de aluminio pH de 5.5 a 8, por lo que para cada caso en particular se debe determinar el pH óptimo al cual es eficiente el coagulante.

Por último, cabe recalcar que si los flocúlos formados son estables, tendrán una mayor facilidad para sedimentar y compactarse, y por tanto un menor volumen de sedimento y una mayor clarificación del agua, puesto que quedan menos sólidos suspendidos en ella.



### 8.5. Discusión del Proceso de Coagulación.

Una vez realizada la prueba de jarras se realizó un ensayo a pequeña escala con el proceso de coagulación de acuerdo a lo establecido en la metodología, utilizando el reactivo y sus condiciones óptimas. Los resultados obtenidos se presentan y discuten a continuación.

**Cuadro 8.6. Resultados de la caracterización física y química del agua después de la coagulación.**

Parámetro	Descarga de aceites
pH	9.0
Conductividad eléctrica (mS/cm)	95
Temperatura (°C)	38
D.Q.O. (mg/L)	6,298.5
D.B.O. <sub>5</sub> (mg/L)	2,254.3
Sólidos Totales (mg/L)	2,361
Sólidos Totales Volátiles (mg/L)	2,130
Sólidos Suspendidos Totales (mg/L)	236
Sólidos Suspendidos Volátiles (mg/L)	1,030
Sólidos Disueltos Totales (mg/L)	2,125
Sólidos Disueltos Volátiles (mg/L)	1,100
Grasas y Aceites (mg/L)	254.2

**Cuadro 8.7. Porcentaje de eficiencia de la coagulación**

Parámetro	Remoción (%)
DQO (mg/L)	81.04
DBO <sub>5</sub> (mg/L)	85.4
Sólidos Totales (mg/L)	82.01
Sólidos Suspendidos Totales (mg/L)	94.91
Sólidos Suspendidos Volátiles (mg/L)	70.14
Sólidos Disueltos Totales (mg/L)	74.92
Sólidos Disueltos Volátiles (mg/L)	67.1
Grasas y Aceites (mg/L)	96.43

**pH:** Una vez realizada la coagulación se obtuvo un pH de 9 (cuadro 8.6), siendo muy diferente al valor inicial, esto se debe principalmente a que este parámetro se tuvo que manipular en el momento de la selección del coagulante y su dosis óptima (prueba de jarras, gráficos 1 a 19), ya que el pH es uno de los factores que tienen más influencia, debido a que los reactivos utilizados para la coagulación pueden ser eficientes dentro de diferentes intervalos de pH. De esta manera y debido a que el  $\text{FeCl}_3$  utilizado presentó un mejor poder coagulante-floculante a un valor de pH de 9.0, se ajustó a este valor mediante la adición de NaOH IN.

**DBO y DQO:** Para la DQO se presenta un valor el cual es menor en 9167.1 mg/L que el reportado para la flotación, por lo tanto el porcentaje de remoción de los compuestos que determinan este parámetro se incrementa en 28.04% (cuadro 8.7) con respecto al proceso de flotación, quedando como fracción remanente 6,298.5 mg/L (cuadro 8.6), estos valores sugieren que gran parte de los compuestos presentes se encontraban en forma coloidal por lo cual sólo pudieron ser retirados por este proceso. Por otro lado de acuerdo a la cantidad remanente de los compuestos que causan una demanda de oxígeno para ser degradados por microorganismos ( $\text{DBO} = 2,254.3 \text{ mg/L}$ ) nos da una remoción de 6,600.1 mg/L de dichos compuestos, lo que representa un incremento considerable (43.4%, cuadro 8.7) en la eficiencia del tratamiento con respecto al valor obtenido en la flotación.

**Sólidos:** Los sólidos sedimentables no se mencionan debido a que después de la flotación ya no se presentaban. Por lo que respecta a los sólidos suspendidos se observa una disminución de 2264 mg/L quedando como cantidad remanente 236 mg/L. La cantidad removida representa un aumento de 48.91% de eficiencia con respecto al valor obtenido en la flotación. Tomando como sólidos en forma coloidal a los sólidos suspendidos removidos durante la coagulación, y como sólidos no coloidales a los removidos en la flotación se puede inferir que la cantidad inicial de ambos era similar, ya que los porcentajes removidos en cada proceso son similares (46% para flotación y 48.91% para coagulación).

**Grasas y aceites:** El valor reportado en el cuadro 8.6 para grasas y aceites representa la cantidad remanente en el agua, con lo cual se logró una reducción de estos compuestos de 1,535.8 mg/L. De acuerdo a este dato el incremento en la eficiencia del proceso, es de 23.53% (cuadro 8.7) más que en el proceso de flotación. Esto indica que la mayor cantidad de grasas y aceites fue retirado con el primer proceso, sin embargo una cantidad apreciable se encontraba en forma coloidal por lo que fue necesario aplicar la coagulación.

De lo mencionado anteriormente para los diferentes parámetros se puede inferir que un sistema de tratamiento que incluya un proceso de flotación seguido de coagulación química es adecuado en esta industria de elaboración de aceites comestibles, ya que se obtienen los porcentajes totales de remoción (y por tanto de eficiencia del sistema) para los parámetros descritos: 81.04% de eficiencia en la remoción de DQO, 85.4% en la remoción de DBO; 94.91% para sólidos suspendidos totales y 96.43% para grasas y aceites (cuadro 8.7). Por último en el cuadro 8.8 se muestra una comparación de la calidad del agua antes de realizar los tratamientos propuestos y después de hacerlo con lo cual se observa que a pesar de que los valores de los parámetros realizados aún son altos, la calidad del agua se ha mejorado en un porcentaje importante.

**Cuadro 8.8 Comparación de los resultados de la caracterización del agua residual antes y después de aplicarles tratamiento**

PARÁMETRO	Descarga de aceites antes de los tratamientos	Descarga de aceites después de los tratamientos
pH	5.8	9.0
Temperatura (°C)	42	95
Conductividad Eléctrica (mS/cm)	350	38
D.Q.O. (mg/L)	33,212.8	6298.5
D.B.O. <sub>5</sub> (mg/L)	15,432.6	2254.3
Sólidos Sedimentables (mL/L)	< 0.1	Ausentes
Sólidos Totales (mg/L)	13,120	2361
Sólidos Suspendidos Totales (mg/L)	4,630	236
Sólidos Totales Volátiles (mg/L)	6,794	2130
Sólidos Suspendidos Volátiles (mg/L)	3,450	1030
Sólidos Disueltos Totales (mg/L)	8,476	2125
Sólidos Disueltos Volátiles (mg/L)	3,344	1100
Grasas y Aceites (mg/L)	7,102.6	254.2

## Capítulo 9

### CONCLUSIONES

---

De los resultados presentados y su análisis se obtienen las siguientes conclusiones:

1. La generación de residuos se presenta en las etapas de desgomado, refinación y blanqueo, lo que afecta la calidad del agua e impide su reuso.
2. El incremento en la cantidad de sólidos suspendidos indica que el tren de tratamiento actual no está siendo eficiente, con lo cual se impide un reuso adecuado del agua.
3. La condiciones óptimas para el proceso de flotación fueron 5,000 cm<sup>3</sup> de inyección de aire por un tiempo de 20 minutos, con diámetro de las burbujas de 1.5 mm y temperatura del agua de 23 °C. En esta etapa del tratamiento se logró la remoción de 6,608.2 mg/L de DBO; 17,747.2 mg/l de DQO; 5,176.2 mg/L de grasas y aceites; 2,130 mg/L de sólidos suspendidos, lo que representa una eficiencia de 42%, 53%, 72.9%, y 46% respectivamente.
4. La flotación no se llevó a cabo en la descarga de jabones debido a que a la temperatura ambiente se solidifican los compuestos presentes en el agua, con lo que se dificulta la realización del proceso.
5. De acuerdo a la prueba de jarras las condiciones óptimas para el sulfato de aluminio fueron: 3.5 ppm de FeCl<sub>3</sub>; pH = 9; temperatura 40 °C, con un volumen de sedimento obtenido de 22 mL. Durante el proceso de coagulación se removieron 6,600.1 mg/l de DBO; 9,167.1 mg/L de DQO; 1,535.8 mg/L de grasas y aceites; 2,264 mg/L de sólidos suspendidos.

6. El incremento de la eficiencia con la coagulación fue de 43.4% para DBO; 28.04% para DQO; 23.53% para grasas y aceites; 48.91% para sólidos suspendidos.
7. El manejo del pH y la temperatura son determinantes en la coagulación con cloruro férrico ya que se aprecia una marcada diferencia entre los resultados obtenidos a diferentes valores de dichos parámetros, lo cual no sucede con el sulfato de aluminio.
8. El cloruro férrico presenta un mejor poder coagulante que el sulfato de aluminio, en las condiciones óptimas de cada uno, sin embargo el sulfato de aluminio es más eficiente a 22 °C.
9. Se debe adaptar un sistema de inyección de aire para realizar la flotación en el tren de tratamiento actual, mientras que la coagulación se puede llevar a cabo en los tanques existentes.
10. La eficiencia esperada de un tren de tratamiento que incluya los dos procesos es de 85.4% para DBO; 81.04% para DQO; 96.43% para grasas y aceites; 94.91% para sólidos suspendidos.

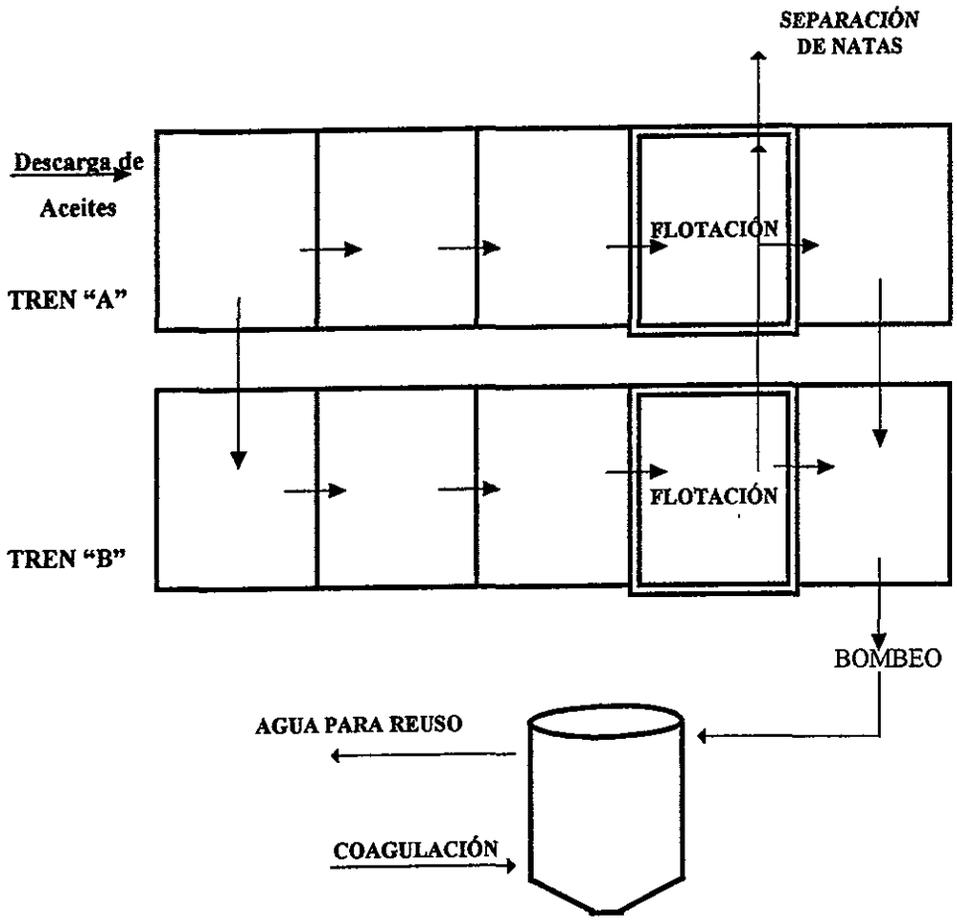
## Capítulo 10

### 8 RECOMENDACIONES.

---

1. Es importante establecer que las descargas deben ser tratadas por separado, debido al hecho de presentar características diferentes, sobre todo las provenientes de la descarga de jabones, que tienen un carácter intermitente.
2. Los sifones que comunican a las diferentes cámaras deben tener una mayor profundidad, para evitar que los sólidos pasen de una a otra.
3. Realizar la flotación en la penúltima cámara para posteriormente desde la última bombear el agua hacia los tanques en los que se realizará la coagulación, como se observa en la figura 13.
4. Se debe de tener un control del pH sobre todo si se inclina por el uso de cloruro férrico para realizar la coagulación.
5. Se debe de realizar la remoción mecánica de grasas en la superficie del agua después de la flotación, a fin de ser utilizadas en la fabricación de jabones.
6. El sedimento proveniente de la coagulación puede ser utilizado como materia prima en la elaboración de jabones.

Fig. 13 Esquema del tren de tratamiento con la modificaciones propuestas.



## Capítulo 11

### BIBLIOGRAFÍA

- 
1. APHA, AWWA, WPCF. (1992). "Métodos Normalizados Para el Análisis de Aguas Residuales". 17° Ed. Díaz de Santos S.A. España.
  2. ASTM. (1994). "Manual de Aguas para usos Industriales". 3ra Ed., ED. Limusa. México. 456 pp.
  3. AWWA. (1991). "Water Quality and Treatment. A Handbook of Community Water Supplies". 4° Ed. U.S.A. pp 78-95, 160-175.
  4. Bartolomai, A. (1991). "Fábricas de Alimentos, Procesos; Equipamientos y Costos". ED. Acriba, S.A. España. 288 pp.
  5. Bernardini, E. (1981). "Tecnología de Aceites y Grasas". ED. Alhambra. España; 499 pp.
  6. Braverman, J. B. (1980). "Introducción a la Bioquímica de los Alimentos". ED. El Manual Moderno. México, D.F.; 358 pp.
  7. Cáceres, V. L. (1994). "Procesos de Flotación por Aire Disuelto en el Tratamiento de Agua". Ingeniería Química. Junio. Chile
  8. CE, CNA, IMTA. (1994). "Memorias del Seminario Internacional del Agua. Contaminación de Cuerpos de Aguas Superficiales y Subterráneas por fuentes no puntuales". México. pp 36-38.
  9. Charley, H. (1997). "Tecnología de Alimentos. Procesos Físicos y Químicos en la preparación de Alimentos". ED. Limusa. México; 767 pp.
  10. Cheremisinoff, P.N. (1995). Handbook of the Water and Wastewater Treatment Technology". ED. Marcel Decker Inc. U.S.A.
  11. Comisión Nacional del Agua (1992). "Ley de Aguas Nacionales (y su Reglamento)". Comisión Nacional del Agua, México; 134 pp.
  12. Davis and Cornwell. (1991). "Introduction to Environmental Engineering". 2° Ed., ED. McGraw-Hill. Singapore; 822 pp.
  13. Degremont. (1979). "Manual Técnico de Agua." 4° Ed. España; 1216 pp.

14. Dempsey, B. A. (1989). "Beanch scale Production, Characterization and Application of Polyaluminium Sulfate". ED. AWWARF. U.S.A.; pp 28-35.
15. Diario Oficial de la Federación, 1980. Norma Oficial Mexicana NOM-AA-003 1980. Aguas Residuales-Muestreo. Secretaría de Patrimonio y Fomento Industrial: Dirección General de Normas. México, D.F.
16. Diario Oficial de la Federación, 1977. Norma Mexicana NOM-AA-004 1997. Determinación de Sólidos Sedimentables en Aguas Residuales. Secretaría de Patrimonio y Fomento Industrial: Dirección General de Normas. México, D.F.
17. Diario Oficial de la Federación, 1980. Norma Mexicana NOM-AA-005 1980. Determinación de grasas y aceites. Secretaría de Patrimonio y Fomento Industrial: Dirección General de Normas. México, D.F.
18. Diario Oficial de la Federación, 1980. Norma Mexicana NOM-AA-007 1980. Determinación de la temperatura. Secretaría de Patrimonio y Fomento Industrial: Dirección General de Normas. México, D.F.
19. Diario Oficial de la Federación, 1980. Norma Mexicana NOM-AA-008 1980. Determinación de pH. Secretaría de Patrimonio y Fomento Industrial: Dirección General de Normas. México, D.F.
20. Diario Oficial de la Federación, 1981. Norma Mexicana NOM-AA-028 1981. Determinación de la DBO. Secretaría de Patrimonio y Fomento Industrial: Dirección General de Normas. México, D.F.
21. Diario Oficial de la Federación, 1981. Norma Mexicana NOM-AA-034 1981. Determinación de sólidos en agua. Secretaría de Patrimonio y Fomento Industrial: Dirección General de Normas. México, D.F.
22. Diario Oficial de la Federación. 1997. Norma Oficial Mexicana NOM-001-ECOL-1996, que establece los Límites Máximos Permisibles de contaminantes en la descargas de agua residuales en aguas y bienes nacionales.
23. Diario Oficial de la Federación. 1993. Norma Oficial Mexicana NOM-031-ECOL/93, que establece los Límites Máximos Permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales provenientes de la industria, actividades agroindustriales de servicio y el tratamiento de aguas residuales a los sistemas de drenaje y alcantarillado urbano

- municipal. Secretaría de Patrimonio y Fomento Industrial: Dirección General de Normas. México, D.F.
24. Eckenfelder, W.W. (1989). "Industrial Water Pollution Control". 2° Ed., ED. McGraw-Hill Book Company. New York; 400 p.
  25. Edwards, J. D. (1995). "Industrial Wastewater Treatment. A Wide Book". ED. Lewis Publishers. U.S.A.; pp. 55-56.
  26. Fair, M. G. (1996) "Abastecimiento de Agua y Remoción de Aguas Residuales. Ingeniería Sanitaria de Aguas Residuales". ED. Limusa-Noriega, México; 764 pp.
  27. Hammer, J. M. (1996). "Water and Wastewater Technology". 3° Ed., ED. Prentice-Hall Inc. USA.; 519 pp.
  28. Hernández, M. A. (1992). "Depuración de Aguas Residuales". 2° Ed., ED. CICCIP. España; 927 pp.
  29. INEGI. (1994). "Estadísticas del Medio Ambiente". Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. México; 447 pp.
  30. Jorgensen, S.E. (1979). "Industrial Wastewater Management". Vol. 5. ED. Elsevier Scientific Publishing Company. Holanda. pp 25-34.
  31. Kawamura, S. (1991). "Integrated Design of Water Treatment Facilities". ED. John Wiley and Sons. U.S.A. 658 pp.
  32. Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente y disposiciones complementarias (1996). 14° Ed., ED. Porrúa. México. 714 pp.
  33. Mason, Ch. F. (1991). "Biology of Freshwater Pollution". 2° Ed., ED. England: Longman Scientific and Technical. New York.; 351 p.
  34. Metcalf y Eddy. (1991). "Wastewater engineering; Treatment, Disposal and Reuse." 3° Ed., ED. McGraw-Hill. New York.; 1334 p.
  35. Monroy, Otero. (1993). "Biodegradabilidad del efluente de la industria embotelladora de bebidas gaseosas": Memorias del IX Congreso Nacional del SMISA, A.C. México; pp. 13-15.
  36. NALCO, (1989). "Manual del Agua, su Naturaleza, Tratamiento y Aplicaciones." Tomo I, ED. McGraw-Hill. México.

37. National R. C. (1995). "El Suministro del Agua en la Ciudad de México: Mejorando la Sustentabilidad." ED. National Academy Press, Washington, D.C.; 114 pp.
38. Nemerow, N. L. (1991). "Industrial and Hazardous Waste Treatment". ED. Van Nostrand Reinhold, New York; 472 p.
39. Peavy, S. H. (1986). "Environmental Engineering" ED. McGraw-Hill. Singapore; 679 pp.
40. PEF (1996). "Programa de Medio Ambiente 1995-2000". Poder Ejecutivo Federal, Secretaría del Medio Ambiente Recursos Naturales y Pesca. México. 171 pp.
41. Potter, N. M. (1973). "La Ciencia de los Alimentos". ED. Harla, México; 749 pp.
42. Powell, T. S. (1981). "Manual de Aguas para usos Industriales". ED. Limusa, México; 631 pp.
43. Ramalho, R. S. (1993). "Tratamiento de Aguas Residuales." 2ªEd., ED. Reverté, S.A. Barcelona, España; 705 pp.
44. Reynolds, D. T. and Richards A.P. (1996). "Unit Operations and Process in Environmental Engineering". ED. PWS Publishing Company. USA; 789 pp.
45. SEDESOL-INE. (1994). "México: Informe de la Situación General en materia de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente 1993-1994. SEDESOL- Instituto Nacional de Ecología. México. 374 pp
46. Seoanez, C. M. (1995). "Ecología Industrial: Ingeniería Medioambiental Aplicada a la Industria y a la Empresa, Manual para Responsables Medioambientales." ED. Mundi-Prensa. Madrid, España; 522 pp.
47. SMISAAC. (1995). "La Nueva Normatividad Ambiental en Materia de Agua-Memoria de la Sesión de Conferencias". México; 78 pp.
48. Tebutt, T. H. Y. (1990). "Fundamentos del Control de la Calidad del Agua". ED. Limusa, México; 239 pp.
49. Viessman, W. and Hammer, J. M. (1993). "Water Supply and Pollution Control". 5ª Ed., ED. Harper Collins College Publishers, USA; 860 pp.
50. Winkler, A. M. (1996). "Tratamiento Biológico de Aguas de Desecho". ED. Limusa, México; 338 pp.

## ANEXO I PARÁMETROS DE CALIDAD DEL AGUA

En el cuadro A. I se muestran los parámetros utilizados por la CNA para determinar los rangos de calidad del agua

Selección de parámetros	Parámetros rutinarios		Parámetros especiales
	Parámetros de campo	Parámetros de laboratorio	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tipo de cuerpo de agua (río, lago, pozo, litoral, etc.)</li> <li>• Contaminación específica del cuerpo de agua.</li> <li>• Uso del cuerpo de agua (abastecimiento público, agrícola, industrial, recreativo, acuicultura, etc.).</li> </ul>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. pH</li> <li>2. Conductividad eléctrica</li> <li>3. Oxígeno disuelto</li> <li>4. Temperatura del agua</li> <li>5. Temperatura ambiental</li> <li>6. Materia flotante</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. pH</li> <li>2. Turbidez</li> <li>3. Color</li> <li>4. Alcalinidad</li> <li>5. Dureza</li> <li>6. Cloruros</li> <li>7. Sulfatos</li> <li>8. Nitrógeno amoniacal</li> <li>9. Nitrógeno orgánico</li> <li>10. Nitrato</li> <li>11. Fosfatos totales</li> <li>12. Ortofosfatos</li> <li>13. Demanda bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>)</li> <li>14. Demanda química de oxígeno (DQO)</li> <li>15. Detergentes (SAAM)</li> <li>16. Grasas y aceites</li> <li>17. Sólidos totales</li> <li>18. Sólidos suspendidos totales</li> <li>19. Sólidos disueltos totales</li> <li>20. Sólidos sedimentables</li> <li>21. Acidez</li> <li>22. Coliformes totales</li> <li>23. Coliformes fecales</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Boro</li> <li>2. Flúor</li> <li>3. Cianuro</li> <li>4. Arsénico</li> <li>5. Cromo hexavalente</li> <li>6. Plomo</li> <li>7. Cadmio</li> <li>8. Mercurio</li> <li>9. Selenio</li> <li>10. Berilio</li> <li>11. Litio</li> <li>12. Manganeso</li> <li>13. Níquel</li> <li>14. Cobre</li> <li>15. Hierro</li> <li>16. Fenoles</li> <li>17. Aluminio</li> <li>18. Bario</li> <li>19. Cinc</li> <li>20. Plata</li> <li>21. Molibdeno</li> <li>22. Vanadio</li> <li>23. Carbonatos</li> <li>24. Bicarbonatos</li> </ol>

FUENTE: SEDESOL-INE 1994.

## **ANEXO 2 REQUISITOS PARA EL MUESTREO Y TRANSPORTE DEL AGUA RESIDUAL**

### ***2.1 Toma de muestras.***

Las muestras deben ser representativas de las condiciones que existan en el sitio y hora de muestreo y tener el volumen suficiente, para efectuar las determinaciones correspondientes. Los valores de los parámetros en las descargas de aguas residuales a los sistemas de drenaje y alcantarillado urbano o municipal provenientes de la industria, se obtendrán del análisis de muestras compuestas, que resulten de la mezcla de las muestras simples, tomadas éstas en volúmenes proporcionales al caudal medido en el sitio y en el momento del muestreo. Las muestras simples dan las características del agua residual en el momento en que la muestra es tomada, se usa generalmente cuando el caudal del agua y su composición son relativamente constantes, y cuando el flujo es intermitente (Ramalho, 1993).

### ***2.2 Conservación de las muestras.***

El tipo de material debe asegurar que la muestra no se va a contaminar. Se prefieren los envases de vidrio o los de plástico inerte como el polietileno o PTFE, politetrafluoroetileno conocido como teflón. Las tapas de los envases no deben tampoco ser fuente de contaminación de la muestra; a menudo es preciso lavar los envases con soluciones particulares para limitar la contaminación de la muestra. Para la determinación de muchos parámetros es necesario agregar a la muestra un conservador específico al ser momento de ser tomada, e inclusive previo a este procedimiento.

En el cuadro A.2. se muestran las condiciones en las que se deben almacenar las muestras de agua así como los conservadores para las diferentes determinaciones a realizar.

**Cuadro A.2. Requerimientos especiales para la toma de muestras.**

Determinación	Envase	Tamaño mínimo de muestra (mL)	Conservación	Tiempo máximo de conservación recomendado/obligado
Aceites y Grasas	V, calibrado de boca ancha	1000	Añadir H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> hasta pH<2, refrigerar	28d/28d
DBO	P, V	1000	Refrigerar	6h/48h
DQO	P, V	100	Analizar lo antes posible o añadir H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> hasta pH<2, refrigerar	7d/28d
Sólidos	P, V	-	Refrigerar	7d/2-7d

P= Plástico, V= Vidrio.  
Tomado de APHA ,1992.

### 2.3 Cadena de Custodia

Es esencial asegurar la integridad de la muestra desde su toma hasta la emisión de informe, lo que implica efectuar una relación del proceso de posesión y manipulación de la muestra desde el momento en que fue tomada hasta su análisis final. Este proceso se denomina cadena de custodia y es importante en el caso de que los resultados deban presentarse en un litigio. Si no es este el caso, el proceso de cadena de custodia es útil para el control rutinario de las muestras, lo cual constituye un eslabón dentro del control de calidad de los análisis con el fin de evitar los errores o alteraciones.

## Anexo 2 (Continuación)

Una muestra está bajo vigilancia personal cuando se encuentran en posesión física de una persona encargada de custodiarla y protegerla de posibles falsificaciones, o cuando se encuentra en una zona de acceso limitado al personal autorizado. Los principales factores que intervienen en una cadena de custodia son los siguientes:

- Etiquetado de las muestras.
- Sellado de las muestras.
- Bitácora del registro de campo.
- Registro de la cadena de custodia.
- Hoja de petición del análisis de la muestra.
- Envío de la muestra al laboratorio.
- Recepción y almacenamiento de la muestra.
- Asignación de la muestra para su análisis.
- Descripción detallada del sitio de muestreo ilustrada mediante un croquis.
- Equipo de muestreo empleado.
- Temperatura del agua y del ambiente.
- Técnicas de preservación y preservante adicionado.

### *2.4 Transporte de las muestras.*

Para el transporte de las muestra las tapas o cierres de los recipientes deben fijarse de tal forma que se evite su derrame, manteniéndola a baja temperatura, y de acuerdo a las condiciones específicas del análisis a efectuar.