

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA  
"ANTONIO NARRO"  
UNIDAD LAGUNA**

**DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS**



**DESORCIÓN Y RECUPERACIÓN DE SULFUROS PRESENTES  
EN EL AGUA RESIDUAL PROVENIENTE DE LA ETAPA DE  
PELAMBRE**

**POR:  
ALFREDO DUARTE DIMAS**

**TESIS**

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA  
OBTENER EL TÍTULO DE:**

**INGENIERO EN PROCESOS AMBIENTALES**

**TORREÓN, COAHUILA**

**FEBRERO DEL 2006**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO  
UNIDAD LAGUNA**

**DESORCIÓN Y RECUPERACIÓN DE SULFUROS PRESENTES  
EN EL AGUA RESIDUAL PROVENIENTE DE LA ETAPA DE  
PELAMBRE**

**TESIS  
PRESENTADA POR:**

**ALFREDO DUARTE DIMAS**

**QUE SE SOMETE A LA CONSIDERACIÓN DEL H. JURADO EXAMINADOR  
COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**INGENIERO EN PROCESOS AMBIENTALES**

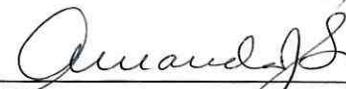
**COMITÉ EVALUADOR**

Presidente:



M.C. Amanda Jaramillo Santos

Vocal:

P.A. 

Dra. Petia Mijaylova Nacheva

Vocal:



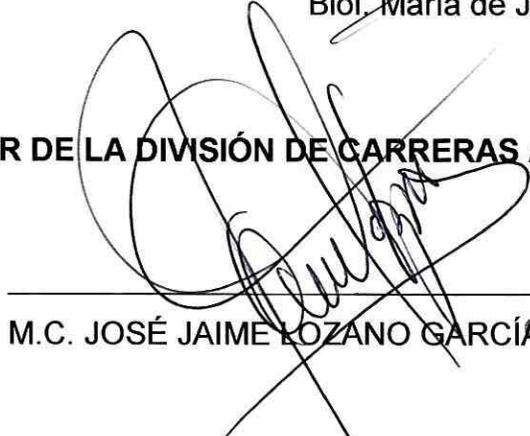
M.C. Héctor Montaña Rodríguez

Vocal Suplente:



Biól. María de Jesús Rivera González

**COORDINADOR DE LA DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS**

  
M.C. JOSÉ JAIME LOZANO GARCÍA

Coordinación de la División  
de Carreras Agronómicas

Torreón, Coahuila

Febrero del 2006



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO  
UNIDAD LAGUNA**

**DESORCIÓN Y RECUPERACIÓN DE SULFUROS PRESENTES  
EN EL AGUA RESIDUAL PROVENIENTE DE LA ETAPA DE  
PELAMBRE**

**TESIS**

**ELABORADA POR:**

**ALFREDO DUARTE DIMAS**

Bajo la supervisión del comité particular de asesoría y aprobada como requisito parcial, para obtener el grado de:

**INGENIERO EN PROCESOS AMBIENTALES**

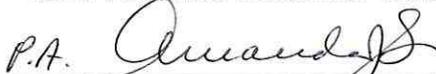
**Comité Asesor:**

Asesor principal:



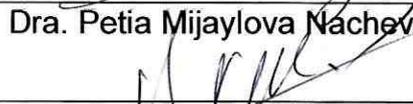
M.C. Amanda Jaramillo Santos

Asesor :



P.A. Dra. Petia Mijaylova Nacheva

Asesor:



M.C. Héctor Montaño Rodríguez

Asesor:



Biól. María de Jesús Rivera González

**COORDINADOR DE LA DIVISIÓN DE  
CARRERAS AGRONÓMICAS**



M.C. JOSÉ JAIME LOZANO GARCÍA



Coordinación de la División  
de Carreras Agronómicas

Torreón, Coahuila

Febrero del 2006

---

## DEDICATORIAS

*Este trabajo, es el resultado del esfuerzo de dos personas que se han entregado en cuerpo y alma: mis padres. Cada uno de mis logros son gracias a ustedes.*

*A Yazmín: Los tiempos difíciles ya terminaron. Tu paciencia, apoyo y amor han sido lo más importante estos años.*

*A mi hijo: Todo sacrificio es pensado en ti. Te amo*

---

## AGRADECIMIENTOS

A mi hijo: eres el regalo más grande que me ha enviado Dios, gracias por alegrarnos el día a día.

Yazmín: mi compañera, mi mejor amiga, mi amor, gracias por ser mi mayor soporte y mi razón de ser.

A mis abuelos: por darme los mejores padres.

A mi madre: Gracias por enseñarme a entregarme al máximo a cada instante, eres la imagen de la fidelidad, el amor, el sacrificio y la lucha incansable.

A mi padre: Mi modelo a seguir, aun en los tiempos difíciles has sabido conservar la calma y tus ideales. Te amo.

A Josué: Sigue adelante, tienes muchos motivos por los cuales luchar. Gracias por la nobleza de tus sentimientos.

A Nadia: Gracias por la sinceridad en tus palabras, por tu fortaleza, por tus ideales.

A la Doctora Petia Mijaylova: Gracias por su dedicación, entusiasmo, y por la experiencia transmitida. Fue un privilegio trabajar a su lado.

A los Biol. Héctor Montaña y Amanda Jaramillo, por su apoyo para durante toda la carrera.

A todos mis compañeros de generación, por los buenos tiempos.

# ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIAS.	i
AGRADECIMIENTOS.	ii
ÍNDICE GENERAL..	iii
ÍNDICE DE TABLAS Y FIGURAS.	v
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.	1
CAPÍTULO II. OBJETIVOS.	3
2.1 OBJETIVO GENERAL.	3
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.	3
CAPÍTULO III. JUSTIFICACIÓN..	4
CAPÍTULO IV. MARCO TEÓRICO.	5
4.1 PANORAMA GENERAL EN MÉXICO.	5
4.1.1 Aspectos socioeconómicos.	5
4.1.2 Tratamiento de aguas residuales.	8
4.1.3 Industria.	8
4.1.4 Reutilización de aguas residuales.	9
4.2 AGUAS RESIDUALES.	10
4.2.1 Características de las aguas residuales.	11
4.2.2 Tratamiento de aguas residuales.	11
4.2.3 Importancia del tratamiento de aguas residuales.	12
4.2.4 Tratamiento fisicoquímico..	12
4.3 DESCRIPCIÓN GRAL. DE LA INDUSTRIA CURTIDO DE PIELES.	13
4.3.1 Datos históricos.	13
4.3.2 Determinación de requerimientos de calidad del agua.	14
4.3.3 Pelambre.	17
4.3.4 Usos de agua por proceso.	18
4.3.5 Balance general de agua.	19
4.3.6 Usos de agua fresca y reactivos.	20
4.3.7 Descarga de agua residual.	21
4.3.8 Características de las aguas residuales..	22

4.3.9	Contaminantes y parámetros más representativos.	. 23
<b>4.4</b>	<b>OPERACIONES UNITARIAS, TRANSFERENCIA DE MASA.</b>	<b>. 25</b>
4.4.1	Desorción.	. 25
4.4.2	Absorción.	. 25
<b>4.5</b>	<b>CARACTERÍSTICAS DEL ÁCIDO SULFÚDRICO.</b>	<b>. 27</b>
4.5.1	Formas del ácido sulfúdrico en agua residual.	. 27
4.5.2	Propiedades fisicoquímicas.	. 28
<b>CAPITULO V.</b>	<b>METODOLOGÍA.</b>	<b>. 30</b>
5.1	DISEÑO.	. 30
5.2	ANÁLISIS PRELIMINARES.	. 34
5.3	CORRIDAS PRELIMINARES.	. 35
5.4	CORRIDAS DEFINITIVAS.	. 36
5.5	ANÁLISIS ESTADÍSTICO.	. 41
<b>CAPITULO VI</b>	<b>RESULTADOS.</b>	<b>. 42</b>
6.1	REMOCIÓN DE CORRIDAS EXPERIMENTALES.	. 43
6.1.1	Remoción de Sulfuros.	. 43
6.1.2	Remoción de DQO.	. 45
6.1.3	Remoción de SST.	. 46
6.1.4	Remoción de SSV.	. 47
6.2	ANÁLISIS ESTADÍSTICO.	. 48
6.2.1	Estadísticas Descriptivas.	. 48
6.2.2	Análisis de correlaciones.	. 54
6.2.3	Superficies de Respuesta Sulfuros.	. 59
6.2.4	Superficies de respuesta SST.	. 62
6.3	PORCENTAJE DE RECUPERACIÓN DE SULFUROS.	. 64
<b>CAPITULO VII</b>	<b>CONCLUSIONES.</b>	<b>. 66</b>
7.1	Conclusiones.	. 66
7.2	Recomendaciones.	. 69
<b>CAPITULO VIII</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA.</b>	<b>. 71</b>
<b>ANEXOS.</b>		<b>. 72</b>

---

## ÍNDICE DE TABLAS Y FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Disponibilidad media anual de agua..	5
<b>Figura 2:</b> Acuíferos sobre explotados y con intrusión salina..	7
<b>Figura 3:</b> Torre de desorción de sulfuros.	33
<b>Grafica 1:</b> Extracciones de agua dulce.	6
<b>Grafica 2:</b> Curva de neutralización.	34
<b>Grafica 3:</b> Normalidad sulfuros.	53
<b>Grafica 4:</b> Normalidad DQO.	53
<b>Grafica 5:</b> Normalidad SST.	54
<b>Grafica 6:</b> Correlación entre Sulfuros y pH.	55
<b>Grafica 7:</b> Correlación entre Sulfuros y TRH.	56
<b>Grafica 8:</b> Correlación entre DQO y TRH.	56
<b>Grafica 9:</b> Correlación entre DQO y Ph..	57
<b>Grafica 10:</b> Correlación entre DQO y Flujo.	57
<b>Grafica 11:</b> Correlación entre SST y TRH.	58
<b>Grafica 12:</b> Correlación entre SST y Flujo.	58
<b>Grafica 13:</b> Correlación entre SST y pH.	58
<b>Grafica 14:</b> Superficies de área TRH-pH- Sulfuros.	59
<b>Grafica 15:</b> Superficies de área Flujo-pH-Sulfuros.	60
<b>Grafica 16:</b> Superficies de área TRH-Flujo-Sulfuros.	61
<b>Grafica 17:</b> Superficies de área TRH-PH-SST.	62
<b>Grafica 18:</b> Superficies de área Flujo-pH-SST.	63
<b>Grafica 19:</b> Superficie de área TRH-Flujo-SST.	63
<b>Tabla 1:</b> Volúmenes de agua residual generada y tratada.	9
<b>Tabla 2:</b> Producción y venta del curtido de pieles.	15
<b>Tabla 3:</b> Materias primas y auxiliares consumidas.	16
<b>Tabla 4:</b> Volumen de agua consumida en la industria del curtido.	18

---

<b>Tabla 5:</b> Características de las descargas de aguas residuales.	. 22
<b>Tabla 6:</b> Caracterización inicial.	. 34
<b>Tabla 7:</b> Valores máximos y mínimos para la remoción de sulfuros.	. 36
<b>Tabla 8:</b> Matriz experimental 3 <sup>3</sup> .	. 37
<b>Tabla 9:</b> Matriz experimental repeticiones.	. 40
<b>Tabla 10:</b> Porcentaje de remoción sulfuros.	. 44
<b>Tabla 11:</b> Porcentaje de remoción DQO.	. 45
<b>Tabla 12:</b> Porcentaje de remoción SST..	. 46
<b>Tabla 13:</b> Porcentaje de remoción SSV.	. 47
<b>Tabla 14:</b> Valores mínimos, máximos y desviación estándar.	. 48
<b>Tabla 15:</b> Frecuencias para sulfuros.	. 49
<b>Tabla 16:</b> Frecuencias para DQO.	. 50
<b>Tabla 17:</b> Frecuencias para SST.	. 51
<b>Tabla 18:</b> Varianza y desviación estándar.	. 52
<b>Tabla 19:</b> Porcentaje de recuperación de sulfuros.	. 65

## CAPITULO I

### INTRODUCCIÓN

El proceso científico y tecnológico ha dado a la sociedad diferentes satisfactores que de otra manera no habría conseguido. Este es un proceso irreversible en la Historia Humana.

Hasta hace algunos años ese desarrollo científico y tecnológico era la meta a la cual toda sociedad debía de tender, sin importar cual fuera su precio.

No hace mucho que el hombre se concientizo que ese progreso a toda costa suponía el empleo de gran cantidad de recursos naturales ilimitados y que a la vez producía desechos que estaban dañando al medio ambiente.

Tal es el caso del agua, un recurso limitado e indispensable para la vida humana, ya sea para la industria, la agricultura, actividades recreativas o domésticas. El hombre ha estado rompiendo el equilibrio ecológico por un uso inadecuado del agua.

Nuestra nación, en su proceso de desarrollo en todos los órdenes, está padeciendo ya las consecuencias del progreso. Consecuencias que será necesario afrontar y que pueden ser agudizadas por el crecimiento demográfico y el desarrollo industrial.

El proceso de curtido es muy antiguo, nace de la necesidad del hombre por protegerse del medio, resultando las pieles de los animales que mataban una buena opción debido a su tamaño, fuerza, y calor que le brindaban en tiempos de frío.

Sin embargo, el uso de la piel presentaba tres grandes problemas: a) alta humedad, b) susceptibles a la putrefacción y c) pérdida de su flexibilidad y suavidad. De aquí surgió la industria del curtido en la que a las pieles se les da un tratamiento para prevenir los defectos citados. Este proceso ha tenido pocos cambios desde que se inventó hasta la época actual.

La tradición artesanal en la elaboración de productos de piel, junto con la disponibilidad de materias primas y mano de obra ha favorecido al desarrollo de esta industrias en nuestro país. México se encuentra ubicado entre los 10 mayores productores de pieles en el mundo con aproximadamente 4% de la producción mundial. La mayor parte de las curtidurías se encuentran localizadas en el área metropolitana de la ciudad de México y en los estados de Nuevo León, Jalisco y Guanajuato, siendo este último el mayor productor nacional, con el 65% del giro curtidor y acabado del cuero (INE- DGGIA, 1996).

El 80% de la producción de la piel terminada en México se realiza en tenerías integradas, es decir, aquellas que realizan el proceso completo. En León Guanajuato, este renglón industrial es el mas importante de la región, ya que sólo en la ciudad existen más de 500 establecimientos. No obstante, este desarrollo ha tenido asociado un costo ambiental importante, pues en forma directa y a través de la producción de materias primas, se ha dispersado sulfuros y otras sustancias de carácter salino y orgánico en el ambiente, contaminando cuerpos de agua, suelos y acuíferos.

## **CAPITULO II**

### **OBJETIVOS**

#### **2.1 OBJETIVO GENERAL**

Desarrollar una alternativa para la remoción y recuperación de sulfuros presentes en el agua residual proveniente de la etapa del pelambre del proceso de curtido de pieles.

#### **2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- Caracterización de los efluentes de la etapa del pelambre del curtido de pieles.
- Determinación de parámetros de operación en el proceso de remoción de sulfuros.
- Análisis de condiciones óptimas de operación para la remoción de sulfuros.

### **CAPITULO III**

### **JUSTIFICACIÓN**

Ha sido seria la contaminación causada en muchas partes del mundo por las descargas de las aguas residuales del curtido de pieles a los ríos. Los efluentes contienen gran proporción de materia orgánica en solución no suspendida, además de sales, compuestos orgánicos peligrosos y metales pesados; materiales que alteran el equilibrio ecológico de los cuerpos en que son vertidos. Además, por su magnitud, interfieren con el proceso de purificación natural. Entre los constituyentes que presentan dificultad para ser eliminados, se encuentran los sólidos suspendidos (incluyendo pelo y carnaza), sulfuros y compuestos de cromo.

En la ciudad de León, Guanajuato, donde la curtiduría es la principal actividad industrial, la problemática de contaminación generada por este sector, ya está siendo atacada por las autoridades, gracias a la conciencia social creciente de protección al medio ambiente.

La magnitud del impacto ha sido incrementada por largos periodos en que el manejo de los desechos ha sido inadecuado, el establecimiento de sistemas de control de contaminación se ve obstaculizado por las condiciones sociales y económicas.

Las aguas residuales utilizadas en el proceso de la curtiduría, están gravemente contaminadas, los derivados o desechos orgánicos de las propias pieles, los residuos de los compuestos químicos utilizados, hacen necesario y urgente el tratamiento de esta aguas.

## CAPITULO IV

### MARCO TEÓRICO

#### 4.1 PANORAMA GENERAL EN MEXICO

##### 4.1.1 Aspectos socioeconómicos

De acuerdo con los resultados del XII Censo General de Población y Vivienda, México tiene una población de 97.4 millones de habitantes.

La industrialización y el crecimiento de las actividades humanas en México hicieron que el perfil de desarrollo pasara de ser rural a uno predominantemente urbano. Actualmente el 75% de los mexicanos habitan en el medio urbano.

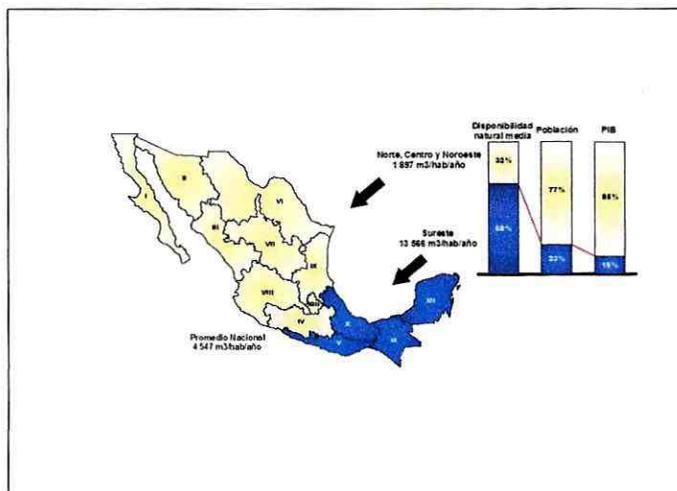
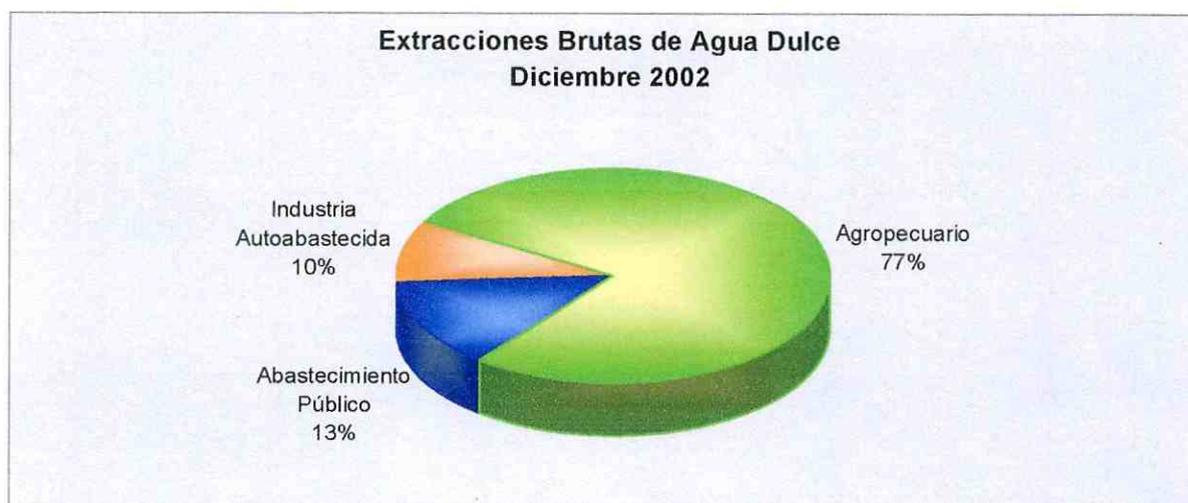


Figura 1. Disponibilidad media anual de agua. (Comisión Nacional del Agua).

La población, la actividad económica y las mayores tasas de crecimiento se concentran en el centro, norte y noreste del país, donde la disponibilidad de agua per cápita alcanza valores cercanos a los 2,000 m<sup>3</sup>/hab/año, valor internacionalmente considerado como peligrosamente bajo.

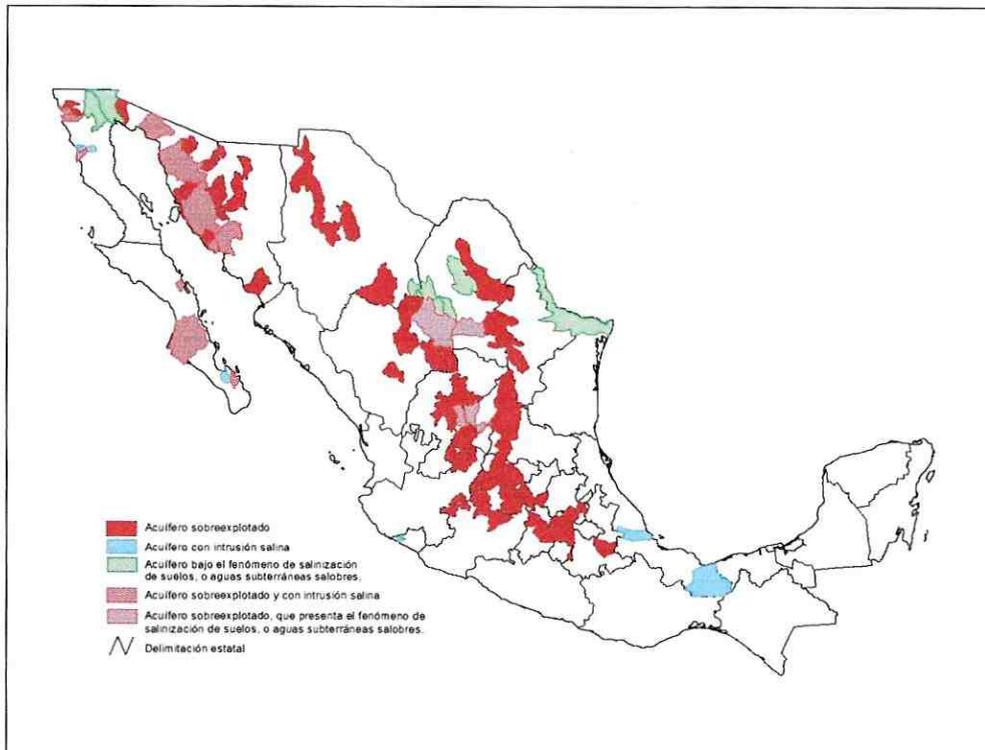
El 70% del volumen de agua que se suministra a las ciudades proviene del subsuelo, con lo que se abastecen aproximadamente 75, 000 000 de personas.



**Grafica 1.** Extracciones brutas de agua dulce. Fuente: Comisión Nacional del Agua.

En el balance nacional de agua subterránea, la extracción equivale apenas a un 37% de la recarga o volumen renovable. Sin embargo, este balance global no revela la crítica situación que prevalece en las regiones áridas, donde el balance es negativo, mientras en las porciones más lluviosas del país, de menor desarrollo, fluyen importantes cantidades de agua del subsuelo sin aprovechamiento.

El problema de la sobreexplotación de los acuíferos del país es cada día más grave, en 1975 eran 32 los acuíferos sobre explotados, número que se elevó a 96 en el 2000.



**Figura 2.** Acuíferos sobre explotados y con intrusión salina.

#### **4.1.2 Tratamiento de aguas residuales**

En diciembre del 2000 se contaba con 1018 sistemas municipales con una capacidad instalada de  $75.9 \text{ m}^3/\text{s}$ , de los cuales 793 se encuentran en operación como un caudal tratado de  $45.9 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Los procesos de tratamiento para los efluentes municipales son diversos, aunque predominan las lagunas de estabilización y los lodos activados.

No obstante la importancia que tiene el tratamiento de aguas residuales para evitar la contaminación de cuerpos receptores, la inversión en estas obras de infraestructura ha sido incipiente, ya que se otorga prioridad al servicio de agua potable.

#### **4.1.3 Industria**

La extracción de agua para uso industrial, a pesar del volumen relativamente pequeño, se ha convertido en un factor importante debido a la gran competencia con otros usuarios por el abastecimiento de agua. También reviste importancia el uso industrial por la cantidad y diversidad de contaminantes que descargan algunas industrias.

Las industrias del país emplean del orden de  $6 \text{ km}^3/\text{año}$  y descargan aproximadamente  $5.36 \text{ km}^3/\text{año}$  de aguas residuales, que se traducen en más de 6 millones de toneladas al año de carga orgánica. Los aportes de carga contaminante están centrados en un número ilimitado de actividades.

Región Administrativa	Agua residual generada	Agua residual tratada	Agua residual no tratada
IPenínsula de Baja California	1.9	1.1	0.8
IINoroeste	22.3	0.1	22.2
IIIPacífico Norte	42.7	0.4	42.2
IVBalsas	14.8	2.1	12.7
VPacífico Sur	4.4	0.2	4.2
VIRío Bravo	4.2	3.3	0.9
VII Cuencas Centrales del Norte	2.8	0.8	2.0
VIII Lerma-Santiago-Pacífico	11.1	2.7	8.4
IX Golfo Norte	14.3	1.4	12.9
X Golfo Centro	36.7	11.7	25.0
XIFrontera Sur	7.4	1.1	6.3
XIIPenínsula de Yucatán	2.4	0.1	2.3
XIII Aguas del Valle de México y Sistema Cutzamala	6.3	1.2	5.1
<b>Nacional</b>	<b>171.3</b>	<b>26.2</b>	<b>145.1</b>

**Tabla 1.** Volúmenes de agua residual generada y tratada por región administrativa de la Comisión Nacional del Agua

En materia de tratamiento de aguas residuales, al diciembre del 2000, se tiene en inventario 1479 plantas de tratamiento industriales, con una capacidad de diseño de 41.5 m<sup>3</sup>/s, de las cuales operan 1399 plantas con un gasto de 25.3 m<sup>3</sup>/s (aprox. 15% de las descargas).

#### 4.1.4 Reutilización de aguas residuales

La reutilización del agua se constituye como una alternativa de gran relevancia de los estados áridos y semiáridos del país, en donde uno de los principales problemas es la escasez del recurso.

El uso de agua residual tratada en la planta industrial mexicana tiene dos vertientes: una es la toma del agua residual tratada municipal y la otra se refiere a la reutilización del agua generada por la propia industria.

## 4.2 AGUAS RESIDUALES

El agua residual es un líquido de composición variada proveniente de diferentes usos como municipal, industrial, comercial, agrícola o de cualquier otra índole ya sea pública o privada y que por tal motivo haya sufrido degradación o alteración en su calidad original ( NMX-AA-03-1980).

Descripción de los tipos de aguas residuales:

- Doméstica: Son las que contienen desechos humanos, animales y caseros. También se incluyen la infiltración de aguas subterráneas.
- Sanitarias: Son las mismas que las domésticas pero que incluyen no solamente las aguas domésticas, sino también gran parte de todos los desechos industriales de la población.
- Pluviales: Formadas por todo el escurrimiento superficial de las lluvias, que fluyen desde los techos, pavimentos y otras superficies naturales.
- Industriales: Son las aguas que provienen de los procesos industriales, pueden colectarse y disponerse, o pueden agregarse y formar parte de las aguas residuales sanitarias.

#### 4.2.1 Características de las aguas residuales.

Las aguas residuales se caracterizan por su composición física, química y biológica, estas características dependen del tipo de agua residual y del uso que se les brinde.

- Características físicas: color, olor, sólidos, temperatura, turbidez.
- Características químicas (orgánicas): carbohidratos, grasas y aceites, pesticidas, fenoles, proteínas, agentes tensoactivos, compuestos orgánicos volátiles.
- Características químicas (inorgánicas): alcalinidad, cloruros, nitrógeno, pH, fósforo, azufre.
- Compuestos tóxicos: níquel, plomo, mercurio, cadmio, arsénico, zinc, cobre, hierro.
- Gases: nitrógeno, oxígeno, amoníaco, metano, ácido sulfhídrico, bióxido de carbono.
- Características biológicas: coliformes fecales y totales.

#### 4.2.2 Tratamiento de aguas residuales.

Es un proceso por el cual los sólidos que contienen los líquidos son separados parcialmente, haciendo que el resto de los sólidos orgánicos complejos queden convertidos en sólidos minerales o en sólidos orgánicos relativamente estables. La magnitud de este cambio depende del tipo de tratamiento empleado.

Una vez completado el proceso del tratamiento es necesario disponer los líquidos y sólidos que se hayan separados. Los procesos empleados en las plantas de tratamiento suelen clasificarse como: pretratamiento, tratamiento primario, secundario, terciario.

### **4.2.3 La importancia del tratamiento de aguas residuales.**

Es importante la promoción de la limpieza y eliminación de inmundicias y desechos hasta un área alejada del centro de actividad. Solo con estas prácticas puede mantenerse el medio ambiente en condiciones aceptables.

La necesidad de tratar aguas residuales se fijan mediante los siguientes objetivos:

1. La conservación de las fuentes de abastecimiento de agua para uso doméstico.
2. La prevención de molestias a la sociedad.
3. La reutilización y reciclaje de aguas residuales en algún otro uso aprovechable que disminuya el agua potable gastada.
4. Conservación del agua para usos industriales y agrícolas.

### **4.2.4 Tratamiento fisicoquímico.**

El sistema de tratamiento fisicoquímico incluye las unidades básicas de coagulación, floculación, sedimentación, filtración y adsorción.

Estos sistemas son usados tanto en forma autónoma, es decir, partiendo de aguas crudas para producir el efluente final o en serie, después de un tratamiento biológico. En este último caso hace las veces del tratamiento terciario.

Una de las grandes ventajas de los tratamientos fisicoquímicos es la obtención de un efluente muy clarificado, aunque la remoción de materia orgánica disuelta sólo sea del 50 al 60%, ésta limitación ha mejorado notablemente con la integración al sistema de la adsorción con carbón activado.

### **4.3 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA INDUSTRIA DEL CURTIDO DE PIELES.**

El objetivo principal de la operación del curtido de pieles, es convertir la piel de cualquier animal en un producto final que puede tener diversos usos, ya sea de tipo industrial, doméstico, etc.

En México, el mayor volumen de productos procesados lo forman la oscaría, la suela y la carnaza, que se obtienen del curtido de pieles de diferentes especies de ganado, principalmente vacuno, debido a que posee las características más ventajosas tales como: resistencia, durabilidad y mayor superficie aprovechable, cosa que no sucede con otras especies de ganado.

La industria del calzado es el principal consumidor de este tipo de piel. Le siguen, en orden de importancia, la industria del vestido y la talabartería.

La industria de la curtiduría se abastece de pieles en los rastros y en la industria empacadora de carnes, debido a que de ahí proceden las mejores piezas ya que se controla cuidadosa y constantemente el desuello de los animales y la curación de las pieles con el proceso de salado para evitar su descomposición, sin afectar su calidad y sus características. Esta industria también se abastece de pieles procesadas mediante el método de secado al sol para la conservación de las pieles lo cual, además de quitar la humedad a la piel la endurece.

#### **4.3.1 Datos Históricos.**

Hacia 1920 existían métodos rudimentarios y, para el secado de pieles al sol, necesitaban disponer de grandes espacios. Alrededor de 1940, comenzó a modificarse el proceso y el equipo, principalmente por el regreso de técnicos de la región que habían salido a Alemania y Estados Unidos de Norteamérica.

Se contaba ya con máquinas para dividir, planchar, restirar y medir las pieles. No eran muchas las máquinas; pero debido a la proximidad de las tenerías, ese reducido número podía dar servicio a numerosos curtidores mediante maquila.

La importancia de piel cruda fue un factor determinante en el desarrollo durante esta década. El concepto de tenería de principios de siglo como taller familiar difería mucho del vigente a mediados de los cincuenta; aunque todavía existen un número considerable de establecimientos pequeños y familiares.

#### **4.3.2 Determinación de Requerimientos de Calidad del Agua.**

En el campo de esta industria el agua juega un papel muy importante en el proceso productivo, sin embargo, sus características físicas, químicas y bacteriológicas no son tan importantes como lo es su volumen, debido principalmente a que la industria, por razones de calidad del producto terminado, se ve en la necesidad de utilizar dentro de sus operaciones de proceso, grandes volúmenes de agua de lavado.

El agua de proceso no es adaptada por el industrial mexicano para la manufactura de las diferentes clases de pieles que son demandadas en el mercado, de lo que se concluye que el tipo de agua y su calidad no ha afectado hasta la fecha la calidad del producto acabado.

PRODUCCIÓN Y VENTAS							
PRODUCTOS ELABORADOS	PRODUCCIÓN			VENTAS NETAS			
	CANTIDAD	VALOR	PRECIO MEDIO	TOTAL		MERCADO NACIONAL	MERCADO EXTRANJERO
				CANTIDAD	VALOR		
		MILES DE PESOS	PESOS			MILES DE PESOS	
<b>TOTAL</b>		<b>3 197 756</b>		<b>3 174 007</b>	<b>2 304 887</b>	<b>869 120</b>	
<b>CURTIDO Y ACABADO DE CUERO</b>		<b>3 197 756</b>		<b>3 174 007</b>	<b>2 304 887</b>	<b>869 120</b>	
<b>CURTIDO Y ACABADO DE VAQUETA Y SILLERO (SUELA)</b>		<b>782 807</b>		<b>740 923</b>	<b>564 860</b>	<b>176 063</b>	
DE BECERRO	6 806 500	25 479	3.743	7 477 250	28 174	5 842	22 332
DE RES	270 237 184	727 399	2.692	260 815 671	685 995	532 264	153 731
DE TERNERA	1 417 000	2 557	1.805	1 403 000	2 531	2 531	
OTRO		27 372			24 223	24 223	
<b>CUEROS PARA CALZADO (EXCEPTO SUELA)</b>		<b>1 219 934</b>		<b>1 219 458</b>	<b>1 022 079</b>	<b>197 379</b>	
DE BECERRO	29 752 920	90 138	3.03	28 843 790	85 806	32 003	53 803
DE CABRA	54 251 807	90 292	1.664	56 803 682	91 837	84 737	7 100
DE CERDO	20 798 448	70 127	3.372	24 942 170	69 873	66 715	3 158
DE RES	517 928 586	939 711	1.814	540 543 363	947 086	813 773	133 313
DE TERNERA	14 462 100	29 488	2.039	3 196 600	24 763	24 758	5
OTROS		178			93	93	
<b>CUERO PARA PRENDAS DE VESTIR</b>		<b>158 878</b>		<b>161 656</b>	<b>107 639</b>	<b>54 017</b>	
DE BECERRO	58 200	145	2.491	58 200	145	145	
DE BORREGO	1 700 585	5077	2.985	1 700 585	5 077	5 077	
DE CABRA	3 041 979	7 867	2.586	3 042 641	7 869	7 869	
DE CERDO	1 042 711	3 536	3.391	1 097 531	3 522	3 522	
DE RES	35 031 620	125 902	3.594	35 702 370	128 597	74 580	54 017
OTRO		16 351			16 446	16 446	
<b>CUERO PARA TAPICERÍA</b>		<b>58 110</b>		<b>58 110</b>	<b>58 110</b>	<b>58 110</b>	
DE RES	33 815 000	58 110	1.718	33 815 000	58 110	58 100	
<b>CUERO PARA MARROQUINERÍA</b>		<b>166 921</b>		<b>138 275</b>	<b>37 471</b>	<b>100 804</b>	
DE BECERRO	800	1	1.25	85 087	97	97	
DE BORREGO	5 026 627	8 007	1.59	5 010 627	7 968	7 968	
DE CERDO	2 454 166	2 945	1.2	1 735 830	2 083	2 083	
DE RES	33 203 120	155 968	4.697	27 423 426	128 127	27 323	100 804
<b>CURTIDO Y ACABADO DE CUERO PARA OTROS USOS INDUSTRIALES</b>		<b>701 631</b>		<b>755 818</b>	<b>424 185</b>	<b>331 633</b>	
DE BECERRO	30 208 667	45 313	1.5	30 300 000	45 455	45 455	
DE BORREGO	48 047 956	69 607	1.449	48 047 956	69 607	3 833	65 774
DE CABRA	553 000	1 106	2	553 000	1 106	1 106	
DE CERDO	522 300	1 044	1.999	522 300	1 044	1 044	
DE RES	160 639 491	584 561	3.639	184 420 735	638 606	372 747	265 859
<b>CURTIDO DE PIELES SIN DEPILAR</b>		<b>57 304</b>		<b>54 947</b>	<b>54 938</b>	<b>9</b>	
DE BECERRO	5 047 086	12 616	2.5	4 104 286	10 259	10 250	9
DE RES	16 814 000	44 688	2.658	16 814 000	44 688	44 688	
<b>DESECHOS Y SUBPRODUCTOS</b>		<b>4 239</b>			<b>4 239</b>	<b>4 239</b>	
DESECHOS Y SUBPRODUCTOS		4 239			4 239	4 239	

Tabla 2: Producción y ventas del curtido de pieles.

### 4.3.3 Pelambre.

El objetivo del pelambre y el encalado es remover el pelo y la epidermis, y en cierto grado las proteínas interfibrilares; pudiendo ser también el preparar la piel para la remoción de carne y grasa (descarne). Si se realiza el "inmunizado", el pelo puede ser desprendido, debido al ataque al folículo del pelo, el agua en esta etapa puede recircularse. El proceso de pelambre alcalino involucra un ataque químico al enlace disulfuro de la queratina, este ataque depende de varios factores:

- pH alto (arriba de 12)
- Temperatura
- Tiempo
- Acción mecánica.

Luego de la operación de remojo, las pieles suficientemente hidratadas, limpias, con algunas proteínas eliminadas de su estructura, pasan a las operaciones de pelado, donde fundamentalmente se pretende, por un lado eliminar del corium, la epidermis junto con el pelo o la lana, y por otro aflojar las fibras del colágeno con el fin de prepararlas apropiadamente para los procesos de curtido. En general, la concentración de los productos químicos involucrados así como el tiempo y tipo de proceso serán determinantes del tipo de curtido, y particularmente de la blandura y resistencia físico-mecánica de los artículos finales.(capellada, tapicería, marroquinería, vestimenta).

Por el elevado pH que comunica a la solución (sal de ácido muy fuerte y base fuerte) y su poder reductor, el  $\text{Na}_2\text{S}$  es el producto principal de la mayoría de los procesos de pelado. Provoca hinchamientos acusados y fuerte turgencia. Altas cantidades son peligrosas por el ataque en la piel.

**4.3.4 Uso de agua por proceso, servicios y pérdidas por día.**

Capacidad de producción 25,000 kg de piel curtida al día.

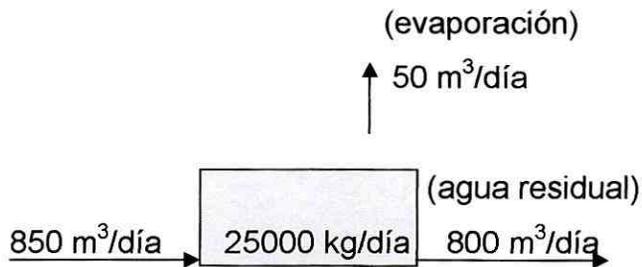
OPERACIÓN	VOLUMEN DE AGUA DEMANDADA m <sup>3</sup> /día
Remojo	53
Lavado	120
Depilado	120
2° Lavado	180
Rendido	48
Lavado ácido	25
Curtido	36
Coloreado	40
Lavado de planta	170
Evaporación	50
Sanitarios	8
TOTAL	850

**Tabla 4.** Volumen de agua consumida en la industria del curtido.

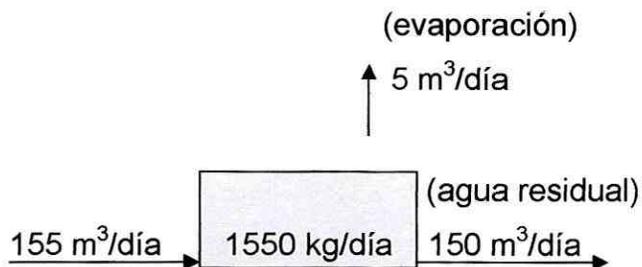
Índice de demanda = 34 litros por kg.

#### 4.3.5 Balance general de agua.

##### (A) Planta grande

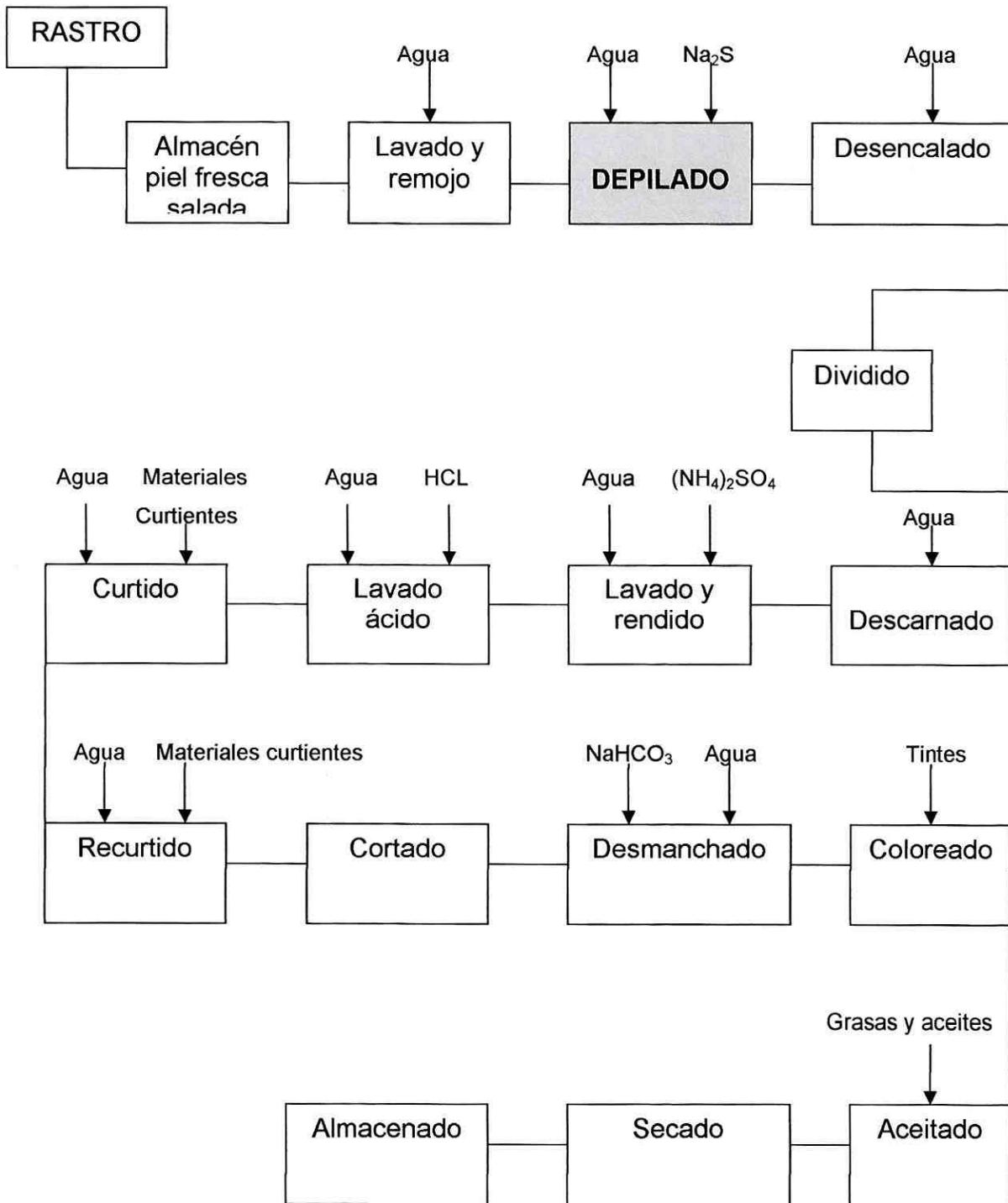


##### (B) Planta Mediana

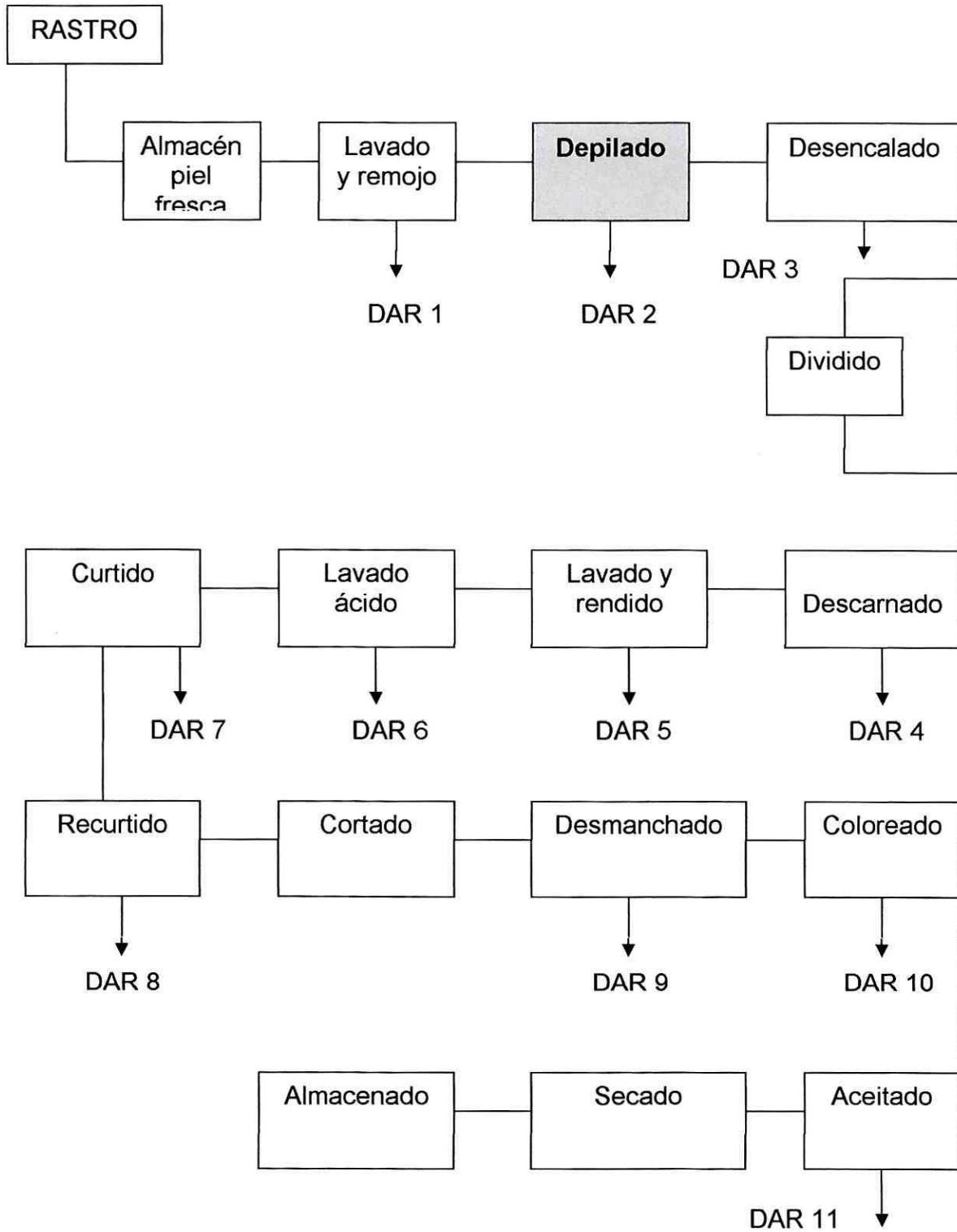


Se puede observar claramente uno de los principales problemas a los que se enfrenta el actual proceso de curtido de pieles, en el que la totalidad de el recurso agua se pierde, incrementando considerablemente tanto los costos de producción, como el impacto negativo en el medio ambiente.

4.3.6 Usos de agua fresca y reactivos.



4.3.7 Descarga de agua residual.



4.3.8 Características de las aguas residuales.

DESCARGA											
CARACTERÍSTICAS	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
SST											
ST											
DBO											
DQO											
NTK											
GYA											
CA(OH) <sub>2</sub>											
S <sup>=</sup>											
AGENTE CURTIENTE											
COLOR											
PH											

**Tabla 5.** En esta tabla se observan los principales parámetros y contaminantes de agua residual proveniente del depilado (descarga 2).

Una de las etapas más importantes por su alto nivel de contaminación producida es la del depilado, presentando un verdadero reto para este sector industrial el desarrollar alternativas de control y minimización de residuos.

A continuación se presentan de manera general los parámetros característicos de las descargas de aguas residuales de las tenerías.

#### 4.3.9 Contaminantes y parámetros mas representativos.

Contaminantes y/o parámetros más importantes, con que contribuyen las aguas residuales de la industria del curtido y acabado del cuero son:

1. Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)
2. Demanda Química de Oxígeno (DQO)
3. Sólidos Suspendidos Totales (SST)
4. Cromo ( $Cr^{+3}$ )
5. Nitrógeno Total (Kjeldahl) (NTK)
6. Sulfuros ( $S^-$ )
7. Potencial de Hidrógeno (pH)
8. Nitrógeno Amoniacal ( $NH_4$ )

1.- **Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO).**- Este parámetro es una importante medida del oxígeno consumido por los microorganismos en la descomposición aeróbica de los desechos. Una definición más simple dice que es una medida indirecta de la biodegradabilidad de los contaminantes orgánicos en los desechos. La importancia de este parámetro radica también en el hecho de que este método es una simulación del método natural de recuperación para un cuerpo receptor. Es de gran utilidad en el diseño del tratamiento de este desecho.

2.- **Demanda Química de Oxígeno (DQO).**- La DQO es una medida del contenido de materia oxidable que se encuentra en la descarga, comprendiendo tanto materia orgánica como inorgánica. Proporciona información de la descarga, mediante un agente químico oxidante en un medio ácido.

Es más comúnmente usada para medir el contenido de materia orgánica en desechos industriales y municipales conteniendo compuestos tóxicos que inhiben la acción de los microorganismos.

3.- **Sólidos Suspendidos Totales (SST).**- Los materiales encontrados en la forma de Sólidos Suspendidos en las aguas de desecho de la industria de la curtiduría consisten principalmente en sustancias proteínicas (carne, cuero y pelo) y desechos químicos insolubles como la cal que necesariamente debe ser removida para que posteriormente se pueda realizar un adecuado tratamiento biológico de los desechos.

4.- **Cromo ( $\text{Cr}^{+3}$ ).**- Muchas de las pieles producidas en el país son curtidas con sales de cromo. El cromo, en algunas concentraciones resulta dañino para la vida acuática.

5.- **Nitrógeno Total (Kjeldahl) (NTK).**- El NTK indica el contenido de Nitrógeno Amoniacal y Nitrógeno Orgánico en las aguas de desecho provenientes de la proceso de elaboración. Contribuye a la eutrofización.

6.- **Sulfuros ( $\text{S}^-$ ).**- Una cantidad considerable de sulfuro proviene de las soluciones alcalinas de las descargas. Los sulfuros pueden ser convertidos en ácido sulfhídrico ( $\text{H}^2\text{S}$ ) a un pH menor de 8.5, aumentando el contenido de este gas en la atmósfera. En los drenajes el ácido sulfhídrico puede ser oxidado a ácido sulfúrico causando con ello corrosión en las alcantarillas. Este gas es explosivo y de olor molesto.

7.- **Potencial de Hidrógeno (pH).**- El potencial de Hidrógeno de los desechos depende sobretodo del tipo de proceso empleado en las tenerías, así como del consumo de productos químicos en el proceso de curtido de pieles y cueros. Regularmente una mezcla homogénea de desechos puede variar entre 5 y 12 unidades de pH.

8.- **Nitrógeno Amoniacal ( $\text{NH}_4$ ).**- La principal fuente de Nitrógeno Amoniacal en los desechos de la curtiduría es el sulfato de amonio usado en el proceso de rendido y el que resulta de la descomposición del Nitrógeno Orgánico.

#### **4.4 OPERACIONES UNITARIAS, TRANSFERENCIA DE MASA.**

El tratamiento de remoción y recuperación de sulfuros, consta de dos operaciones unitarias, la desorción y la absorción, cuyos fundamentos se describen a continuación:

##### **4.4.1 Desorción.**

En la operación de desorción, un gas disuelto en un líquido se remueve de este poniendo en contacto la corriente con alguna sustancia química con la que pudiera reaccionar o con algún gas inerte.

Este es uno de los métodos más avanzados para remover algún contaminante en particular. Básicamente el proceso de desorción incluye el uso de algún agente químico reactante, así como un alto volumen de aire mezclando el agua para facilitar la volatilización de los contaminantes.

##### **4.4.2 Absorción.**

En la operación unitaria de absorción, uno de los constituyentes de una mezcla gaseosa se disuelve, de preferencia, en un líquido en contacto con ella. Dependiendo de la naturaleza de las moléculas que actúen en el proceso, la absorción puede o no incluir reacciones químicas.

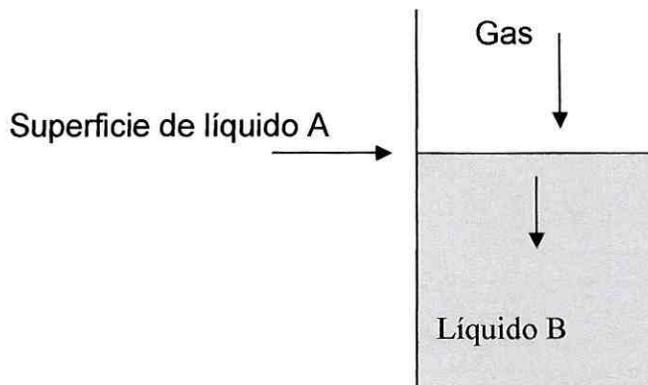
Es una operación unitaria ampliamente utilizada en la industria química para la purificación de corrientes gaseosas. En la absorción, uno o varios de los gases presentes en una corriente gaseosa se disuelven en un líquido llamado absorbente.

Los equipos más empleados son torres cilíndricas, que pueden ser:

- De relleno o empacadas
- De etapas

Las torres de relleno son columnas cilíndricas verticales, las cuales están rellenas con pequeñas piezas llamadas empaque. Estas piezas sirven para aumentar el área de contacto entre la fase gaseosa y la líquida, lo cual facilita la absorción.

Las torres de etapas son columnas cilíndricas que contienen en su interior una serie de platos perforados o con campanas de burbujeo que permiten el contacto íntimo de las fases líquida y gaseosa.



Los residuos que se generan en esta operación unitaria, son lodos que se sedimentan en el fondo de las torres al paso del tiempo, al igual que líquidos con componentes absorbidos.

Un proceso de absorción crítico en la estabilidad climática del planeta es el del dióxido de carbono que al ser absorbido por el agua del mar puede ser capturado por el plancton. Este proceso es el mismo para contaminantes tales como los orgánicos persistentes que se han acumulado en los océanos y la atmósfera, imponiendo riesgos para los organismos que los habitan.

Existen algunas confusiones al referirse a los términos absorción y adsorción, ambas operaciones son muy semejantes, con la principal diferencia de que en la adsorción, el contaminante simplemente se adhiere a la superficie de un sólido adsorbente (carbón activado, alúmina activada, gel de sílice); mientras que en la absorción el contaminante se mezcla homogéneamente en la otra fase.

#### **4.5 CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES DEL ÁCIDO SULFHÍDRICO.**

El agua residual proveniente de la etapa de pelambre contiene un alto contenido de sulfuros, los cuales al ser descargados a algún cuerpo receptor puede convertirse en ácido sulfhídrico, aumentando considerablemente la peligrosidad y toxicidad de este tipo de agua residual. el ácido sulfhídrico es un gas que presenta las siguientes características:

##### **4.5.1 Formas del ácido sulfhídrico en agua residual.**

El termino sulfuro se refiere al azufre inorgánico en su estado más reducido, esto es, con una valencia de menos dos. En las aguas residuales, los sulfuros son una mezcla de:

- Sulfuros metálicos insolubles: Es evidente que las aguas residuales pueden contener grandes cantidades de ion sulfuro. Además, pequeñas cantidades de sulfuro de zinc, cadmio y otros metales.
- Sulfuro disuelto: Este es una combinación de  $H_2S$  y  $HS^-$  (ion  $HS$ ) existiendo en equilibrio con los iones hidrógeno, como se muestra en la siguiente ecuación:



El ion sulfuros secundario,  $S^{2-}$ , no existe como fracción significativa del contenido de sulfuros, excepto a pH muy altos.

Están presentes además compuestos orgánicos de azufre, los cuales pueden ser llamados sulfuros orgánicos. Ellos no responden a los tests analíticos usados para calcular los sulfuros inorgánicos.

#### **4.5.2 Propiedades fisicoquímicas.**

El Ácido sulfhídrico es normalmente un gas, a 25°C y una atmósfera de presión, un litro de  $H_2S$  pesa 1.4 gramos, de los cuales 1.31 gramos es azufre. Es moderadamente soluble en agua.

Las proporciones de  $H_2S$  Y  $HS^-$  en la fracción de sulfuro disuelta en agua esta en función principalmente del pH, y puede ser calculado a partir de la constante de ionización en su forma logarítmica.

$$\text{Log } \frac{[HS^-]}{[H_2S]} = \text{pH} - \text{pK}$$

Pk es el logaritmo negativo de la constante de ionización. El valor de pK esta influenciado por la temperatura.

##### 1.-Olor del ácido sulfhídrico

El ácido sulfhídrico puede estar presente en materia orgánica en descomposición, particularmente en huevos podridos. Su olor es bien conocido, ha sido demostrado que el rango de detección en humanos esta entre 0.00001 y 0.0001 mg/l.

## 2.-Toxicidad del ácido sulfhídrico

Debido a que el ácido sulfhídrico no causa efectos fisiológicos notables cuando esta presente en bajas concentraciones, sus características letales han sido largamente ignoradas.

En comparación, el HCN, que puede estar presente naturalmente pero solo en bajas concentraciones, es analizado como un modelo de veneno mortal. No se han hecho comparaciones directas de la toxicidad del H<sub>2</sub>S y el HCN, pero ciertamente tienen el mismo grado de magnitud.

La muerte aparece como resultado de una concentración de ácido sulfhídrico de 30 ppm en el aire.

El ácido sulfhídrico es muy peligroso, porque la habilidad de sentirlo mediante el olfato es rápidamente perdida. Si una persona ignora la presencia del gas, sus sentidos no le darán ninguna advertencia. Si la concentración es suficientemente alta, la inconsciencia llegara repentinamente, seguida de muerte si no es atendida rápidamente.

## CAPITULO V

### METODOLOGÍA

#### 5.1 DISEÑO

Para solucionar la problemática existente con el agua residual proveniente de la etapa del pelambre del proceso del curtido de pieles, se propuso desarrollar una alternativa a nivel experimental, que permitiera la eliminación del contaminante sulfuro del agua residual y a la vez lograra su recuperación, para una posible reutilización tanto del compuesto sulfuroso, como del agua.

Se llevaron a cabo las gestiones y trámites necesarios con la empresa Cuero Centro, la cual se encuentra en la ciudad de Guanajuato, para que se realizara el muestreo de los efluentes de la etapa de pelambre de su proceso productivo, una vez establecido el convenio se tomó el muestreo continuo durante 24 hrs. de operación, durante el periodo abril- mayo.

Se consideró que a el agua residual proveniente de la etapa del pelambre, que se caracteriza por su alto contenido de  $\text{Na}_2\text{S}$ , (2500-3500 mg/l), podría adicionarse alguna solución ácida concentrada, que permitiera la disminución del pH, para desplazar el equilibrio de la solución y la consecuente liberación del sulfuro en forma del gas  $\text{H}_2\text{S}$  (ácido sulfhídrico), se determino el uso del ácido sulfúrico para lograr esta disminución de pH, lo cual se visualiza mediante la siguiente reacción química:



Para la recuperación del  $\text{Na}_2\text{S}$ , se decidió añadir una torre de absorción, en la cual el  $\text{H}_2\text{S}$  (g) proveniente de la columna de desorción, reaccionara con una solución alcalina ( $\text{NaOH}$ ), permitiendo la absorción del sulfuro mediante una transferencia de masa, con una reacción química:



Posteriormente se diseñó la torre de desorción, en el cual se consideraron algunos aspectos técnicos como la ubicación de los difusores de aire, los cuales son un factor muy importante ya que homogeniza el área del contacto entre el agua residual y el  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ; la capacidad de la torre seleccionada fue de 5 lts., buscando que el agua analizada fuera lo más representativa posible.

Es importante mencionar que se optó por una torre de desorción de vidrio, ya que al analizarse las propiedades fisicoquímicas del  $\text{H}_2\text{S}$ , se observó que este tiende a adherirse a las paredes de las superficies plásticas, lo cual significaría pérdidas considerables en la recuperación del sulfuro.

La torre de desorción consta de dos partes, para facilitar su limpieza al término de cada corrida, las cuales se ensamblan con un cinturón metálico.

Se realizó el diseño de la columna de absorción, en la cual se concluyó que era conveniente la adición de perlas de vidrio, que facilitaran la dispersión del gas proveniente de la torre de desorción, para que de esta forma existiera una mayor área de contacto y por consiguiente una mejor captación de sulfuros. La columna de absorción tiene una capacidad de 6 litros.

Se determinó la concentración necesaria de la solución de la columna de absorción (NaOH).

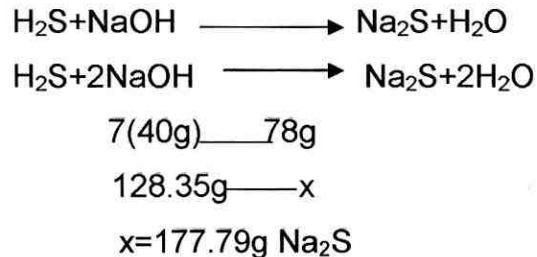
En primer lugar se calculó la cantidad de sulfuros contenidos en un garrafón de muestra (50 litros):

Cantidad de sulfuros = Vagua \* concentración de sulfuros

$$\text{Cantidad de sulfuros} = (50 \text{ l})((3646 \text{ mg/l}))$$

$$\text{Cantidad de sulfuros} = 182.35 \text{ gr}$$

Posteriormente, se realizó el siguiente balance estequiométrico con la reacción que se efectúa en la columna de absorción:



La cual es la cantidad necesaria de  $\text{Na}_2\text{S}$  en la solución, el siguiente paso fue calcular la concentración de  $\text{NaOH}$ :

$$\begin{aligned} N &= \frac{w(\text{gr})\text{solute}}{\frac{Pm}{1}} \\ & \quad \frac{177.79 \text{ gr}}{40} \\ & \quad \frac{1}{1} \\ N &= 4.4478 \longrightarrow 5 \end{aligned}$$

Se determinó una solución 10 N, la cual necesita:

$$10N = W/40 = 400 \text{ gr}$$

Se instaló un rotámetro a la salida de la toma de aire para calibrar los flujos con los que se llevaría a cabo la fase experimental.



**Figura 3:** Torre de desorción de sulfuros

En la figura 3 se observa la estructura final de la torre de desorción de sulfuros, en la cual se puede apreciar algunas características de diseño importantes como lo son: las llaves para tomas de muestras de diferentes niveles del agua residual; la entrada de aire por medio de dos difusores ubicados en la parte lateral baja de la torre; se considero conveniente la incorporación de un área cónica en la base de la torre, que facilitara el asentamiento de los sólidos suspendidos presentes en el agua residual.

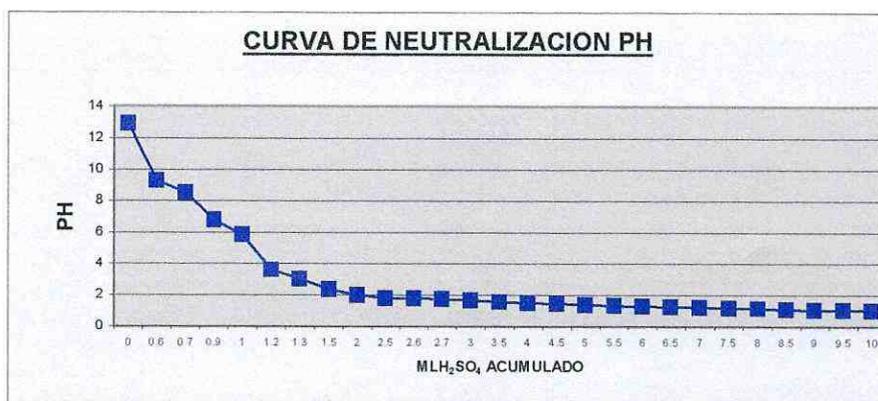
## 5.2 ANÁLISIS PRELIMINARES

Se hicieron análisis fisicoquímicos preliminares de los parámetros característicos (sulfuros, DQO, SST, SSV) de las muestras provenientes de la curtiduría Cuero Centro, arrojando los siguientes resultados:

PARAMETRO	MUESTRA 1	MUESTRA 2	MUESTRA 3	MUESTRA 4
PH	12.77	12.87	12.82	12.73
Conductividad (ms/cm)	52.5	77.5	82.5	62.5
Sólidos disueltos (g/l)	35	45	42.5	32.5
DQO (mg/l)	20,745	64196	26,098	36,874
Sulfuros (mg/l)	2466.06	3647	1667	3222

**Tabla 6 :** Caracterización inicial

Posteriormente se analizó la cantidad de ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) necesaria para disminuir el pH inicial del agua residual hasta pH de 1, en el cual, se presenta mayor remoción de este compuesto, agregando a una muestra de agua residual 1 ml de  $H_2SO_4$  con la posterior medición de su pH.



**Gráfica 2:** Curva de neutralización.

Como se puede observar, la cantidad requerida de ácido sulfúrico es relativamente poca hasta los valores de pH de 2, a partir del cual se estabiliza la curva y se presenta una disminución mínima de pH con el consecuente consumo excesivo del ácido.

Es importante mencionar que los resultados obtenidos en este análisis, sólo sirvieron como fuente de referencia, ya que la cantidad necesaria de  $H_2SO_4$  varía considerablemente dependiendo de las características del agua residual (concentración de sulfuros inicial, pH inicial, cantidad de sólidos suspendidos).

### 5.3 CORRIDAS PRELIMINARES

Se llevaron a cabo 8 corridas preliminares, en las que se analizaron cuáles variables podrían influir con una mayor relevancia en el proceso de remoción de sulfuros, concluyendo que éstas son:

- pH
- TRH (Tiempo de Retención Hidráulica)
- Flujo de aire

El factor pH es de suma importancia, ya que dependiendo de la disminución de este parámetro del agua residual, es posible liberar el sulfuro en forma de gas. El tiempo es una variable independiente de suma importancia, ya que se busca encontrar el tiempo de aereación necesario para lograr una remoción del contaminante sulfuro satisfactoria. El flujo de aire influye en relación a la homogenización del agua residual y la velocidad de sedimentación.

Se concluyó que era necesario una vez terminado el periodo de aereación, continuar con una fase de sedimentación (flujo de aire = 0) de 1 hr. para eliminar los sólidos suspendidos en el agua tratada.

Es pertinente observar que la alimentación del ácido sulfúrico se realizaba con una probeta, sin embargo; en muchas ocasiones el ácido era expulsado provocando algunos accidentes, por los que se optó por aplicar el ácido mediante una jeringa de 20 ml, obteniéndose mejores resultados.

También se determinó que los parámetros más importantes a analizar, en base a la literatura y a la experiencia adquirida, son los siguientes:

- Sulfuros.
- DQO.
- SST.

#### 5.4 CORRIDAS DEFINITIVAS

En base a las variables independientes que influyen en el proceso de desorción del sulfuro (pH, TRH y flujo de aire), se analizaron los valores mínimos (-1) y máximos (1) de estas tres variables:

VARIABLE	-1	0	1
<b>PH</b>	1	3	5
<b>TRH (hrs)</b>	1	2	3
<b>Flujo de aire (ml/min)</b>	33	105	200

**Tabla 7:** Valores máximos y mínimos para la remoción de sulfuros.

Determinándose así un diseño experimental  $3^3$ , el cual se realizó mediante la técnica de cuadro latino, de la siguiente manera:

DISEÑO EXPERIMENTAL			VARIABLES DE CORRIDAS			CORRIDAS
pH	TRH	Flujo	pH	TRH (hrs)	Flujo (ml/min)	
1	-1	-1	5	1	33	1
0	-1	-1	3	1	33	2
-1	-1	-1	1	1	33	3
1	0	-1	5	2	33	4
0	0	-1	3	2	33	5
-1	0	-1	1	2	33	6
1	1	-1	5	3	33	7
0	1	-1	3	3	33	8
-1	1	-1	1	3	33	9
1	-1	0	5	1	105	10
0	-1	0	3	1	105	11
-1	-1	0	1	1	105	12
1	0	0	5	2	105	13
0	0	0	3	2	105	14
-1	0	0	1	2	105	15
1	1	0	5	3	105	16
0	1	0	3	3	105	17
-1	1	0	1	3	105	18
1	-1	1	5	1	200	19
0	-1	1	3	1	200	20
-1	-1	1	1	1	200	21
1	0	1	5	2	200	22
0	0	1	3	2	200	23
-1	0	1	1	2	200	24
1	1	1	5	3	200	25
0	1	1	3	3	200	26
-1	1	1	1	3	200	27

Tabla 8: Matriz experimental 3<sup>3</sup>

Antes de iniciar cualquier corrida experimental se llevaba a cabo una prueba de fugas, en la cual se alimentaba la columna con agua para observar si había alguna fuga en el área de contacto de las dos partes de la columna, incrementando paulatinamente el flujo de aire, hasta llegar a un tope que garantizara la total hermeticidad del sistema.

Se determinó que las tomas de muestras se efectuaría de la siguiente manera:

- Toma de muestras inicial del agua residual (pH,  $S^{\ominus}$ , DQO, SSV y SST).
- Toma de muestra inicial de la columna de absorción ( $S^{\ominus}$ ).
- Toma de muestras a los 30 minutos de iniciada la aereación (la toma de muestra se realizó en la llave intermedia por ser la más representativa) (pH,  $S^{\ominus}$ , DQO, SSV y SST).
- Toma de muestra cada hora una vez iniciada la aereación, hasta finalizado el experimento según el diseño experimental elaborado (pH,  $S^{\ominus}$ , DQO, SSV y SST).
- Toma de muestra 1 hora después de concluida la aereación (etapa de sedimentación) de la parte clarificada (pH,  $S^{\ominus}$ , DQO, SSV y SST).
- Toma de muestra de lodo residual acumulado en la parte cónica de la torre de desorción ( $S^{\ominus}$ , ST).
- Toma de muestra final de la columna de absorción.

Tanto el almacenamiento como el análisis fisicoquímico de las muestras se llevo a cabo en el laboratorio del Departamento Ambiental de la División de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la UNAM.

En el laboratorio se analizaron las muestras obtenidas conforme a las normas establecidas para cada uno de los parámetros (ver anexos).

El control del calidad se efectuó basado en el manual de aseguramiento de calidad del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, acorde a su proceso de certificación ISO 900.

El periodo de realización las corridas experimentales comprendió los meses de Mayo, Junio, Julio, Agosto del 2003.

Una vez concluidos los 27 experimentos a analizar, se consideró conveniente realizar nueve repeticiones de los experimentos más representativos, con la finalidad de corroborar los resultados obtenidos. La selección de las corridas experimentales que se verificarían se baso en que fueran aquellas corridas con el mayor tiempo de retención hidráulica (3 horas), analizadas a los tres diferentes valores de pH.

Las corridas experimentales que se repitieron durante los meses de septiembre, octubre; fueron los siguientes:

DISEÑO EXPERIMENTAL			VARIABLES DE CORRIDAS			CORRIDAS
pH	TRH	Flujo	pH	TRH (hrs)	Flujo (ml/min)	
1	-1	-1	5	1	33	1
0	-1	-1	3	1	33	2
-1	-1	-1	1	1	33	3
1	0	-1	5	2	33	4
0	0	-1	3	2	33	5
-1	0	-1	1	2	33	6
1	1	-1	5	3	33	7
0	1	-1	3	3	33	8
-1	1	-1	1	3	33	9
1	-1	0	5	1	105	10
0	-1	0	3	1	105	11
-1	-1	0	1	1	105	12
1	0	0	5	2	105	13
0	0	0	3	2	105	14
-1	0	0	1	2	105	15
1	1	0	5	3	105	16
0	1	0	3	3	105	17
-1	1	0	1	3	105	18
1	-1	1	5	1	200	19
0	-1	1	3	1	200	20
-1	-1	1	1	1	200	21
1	0	1	5	2	200	22
0	0	1	3	2	200	23
-1	0	1	1	2	200	24
1	1	1	5	3	200	25
0	1	1	3	3	200	26
-1	1	1	1	3	200	27

Tabla 9: Matriz experimental repeticiones

## 5.5 ANALISIS ESTADÍSTICO

Una vez concluida la fase experimental y analítica del proceso, se realizó la interpretación de resultados mediante apoyos estadísticos, basados en la herramienta computacional STATISTICA, paquete de reciente aplicación a nivel investigación dentro del programa de Postgrado de la UNAM.

Mediante este programa se pudieron obtener desde los datos estadísticos descriptivos básicos (varianza, correlación, distribución normal, etc.), hasta análisis más avanzados como el análisis de superficie de respuesta, el cual es uno de los métodos más útiles para la interpretación y optimización de procesos.

## CAPITULO VI

### ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los análisis de las muestras tomadas durante las corridas experimentales, tanto las preeliminares, como las definitivas y las repeticiones fueron realizadas en el laboratorio de la Ingeniería Ambiental de La División de Estudios De Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, de acuerdo con los manuales de control de calidad analíticos, establecidos con base en el sistema de aseguramiento de calidad ISO 9000 del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

Como sistema de control se realizaba en todos los análisis fisicoquímicos, el duplicado de todos los análisis, e inclusive en algunas ocasiones triplicado, así como el análisis de una muestra blanco, que garantizara que los análisis presentaran el mínimo margen de error.

Como se determinó en la fase preliminar, los parámetros a analizarse fueron : Sulfuros, demanda química de oxígeno, sólidos suspendidos totales y volátiles, además, como factores de referencia, se analizaron también nitrógeno amoniacal y turbiedad.

El análisis de resultados se divide en tres etapas, la primera relacionada con el grado de remoción de cada uno de los parámetros anteriormente mencionados, este apartado reviste gran importancia, principalmente por las características tan variantes de las muestras iniciales de agua residual, por lo que en cada experimento se obtuvieron resultados finales diferentes, aunque con una misma tendencia.

Posteriormente, se determinó el análisis estadístico de toda la información recabada, mediante el uso del paquete computacional STATISTICA.

Finalmente, se determinó la cantidad de sulfuros recuperados mediante el proceso de absorción.

## **6.1 PORCENTAJE DE REMOCIÓN DE CORRIDAS EXPERIMENTALES.**

En esta sección se analizan los diferentes grados de remoción de los contaminantes ya mencionados anteriormente. Las tablas indican las condiciones de operación (Potencial de Hidrógeno, tiempo de retención hidráulica y flujo de aire) que se presentaron para cada uno de los 27 experimentos del proceso de desorción de sulfuros que se llevaron a cabo.

Se hizo un análisis comparativo entre los resultados obtenidos con las muestras iniciales de agua residual y el efluente generado una vez concluido el proceso de remoción de sulfuros (incluida la etapa de sedimentación).

A partir de este análisis superficial de resultados, se puede observar que existe una relación evidente entre las condiciones de operación y el nivel de remoción de los contaminantes.

### **6.1.1 Remoción de sulfuros.**

La tabla 9 nos indica el porcentaje de remoción para el contaminante sulfuro en las 27 corridas experimentales. Se puede observar que la concentración inicial de sulfuros va desde los 2,220 mg/l hasta los 6,665 mg/l.

La concentración final más baja de sulfuros obtenida fue de 53 mg/l, obtenida en el experimento número 12.

Se aprecia que el mayor porcentaje de remoción se obtuvo en el experimento 12, en el cual se removió un 98.51% del contaminante Sulfuro de Sodio, con una condición de operación de pH=1, tiempo de la aireación de una hora y un flujo de aire de 105ml/min.

Se obtuvieron remociones de más del 90% en catorce experimentos.

EXPERIMENTO	CONDICIONES DE OPERACION			CONCENTRACIÓN INICIAL SULFUROS mg/l	CONCENTRACIÓN FINAL SULFUROS mg/l	% DE REMOCION
	PH	TRH (min)	Flujo (ml/min)			
1	5	60	33	3031.8	527.1	82.614
2	3	60	33	3513.6	782.504	77.729
3	1	60	33	3513.6	273.73	92.209
4	5	120	33	5477.3	625.74	88.576
5	3	120	33	5221.632	899.264	82.778
6	1	120	33	2730.9	283.52	89.618
7	5	180	33	6635.3	681.66	89.727
8	3	180	33	5643	572.8	89.849
9	1	180	33	8993	427.8	95.243
10	5	60	105	3391.48	826.75	75.623
11	3	60	105	5099.34	391.48	92.323
12	1	60	105	3622.08	53.89	98.512
13	5	120	105	5073	434.8	91.429
14	3	120	105	5798	362.2	93.753
15	1	120	105	4614	111	97.594
16	5	180	105	2220.64	215.06	90.315
17	3	180	105	4613.9	235	94.907
18	1	180	105	4613.9	165.2	96.420
19	5	60	200	3816	324.8	91.488
20	3	60	200	4215	763.2	81.893
21	1	60	200	3411	882.9	74.116
22	5	120	200	3018.4	603.68	80.000
23	3	120	200	3816.16	86.027	97.746
24	1	120	200	5411.7	484.02	91.056
25	5	180	200	3417.28	643.56	81.167
26	3	180	200	3018.4	78.05	97.414
27	1	180	200	4215.04	603.68	85.678

**Tabla 10:** Porcentaje de remoción Sulfuros.

### 6.1.2 Remoción de Demanda Química de Oxígeno.

El análisis de la remoción de la demanda química de oxígeno nos presenta algunas aspectos relevantes, en el experimento 24 se obtuvo la mejor remoción de este parámetro, sin embargo, en la mayoría de los experimentos, no se logro obtener remociones de más del 50 %. Los resultados mas favorables se obtuvieron a pH de 1 y 3.

EXPERIMENTO	CONDICIONES DE OPERACION			CONCENTRACIÓN INICIAL DQO mg/l	CONCENTRACIÓN FINAL DQO mg/l	% DE REMOCION
	PH	TRH (min)	Flujo (ml/min)			
1	5	60	33	64375	44791.67	30.420712
2	3	60	33	62291.67	53541.6667	14.047
3	1	60	33	54583.33	54583.33	35.878
4	5	120	33	57187.5	33281.25	41.803
5	3	120	33	54968.75	33750	38.601
6	1	120	33	32812.5	19687.5	40.000
7	5	180	33	73333.33	45000.00	38.636
8	3	180	33	34375	25625	25.455
9	1	180	33	67500	50000	25.926
10	5	60	105	79583.33	43333.33	45.550
11	3	60	105	62916.67	36250.00	42.384
12	1	60	105	61458.33	46875.00	23.729
13	5	120	105	68750	54166.6667	21.212
14	3	120	105	87083.33	42500.00	51.196
15	1	120	105	21666.67	12916.67	40.385
16	5	180	105	35000	23500	32.857
17	3	180	105	30625	20750	32.245
18	1	180	105	38333.33	29000.00	24.348
19	5	60	200	34583.33	20000.00	42.169
20	3	60	200	26875	17416.6667	35.194
21	1	60	200	57916.67	23833.33	58.849
22	5	120	200	33750	25583.3333	24.198
23	3	120	200	15208.33	10416.67	31.507
24	1	120	200	33750	6770.83333	79.938
25	5	180	200	37500	29333.3333	21.778
26	3	180	200	44166.67	9250.00	79.057
27	1	180	200	35208.33	27250.00	22.604

**Tabla 11:** Porcentaje de remoción DQO.

### 6.1.3 Remoción de Sólidos Suspendidos Totales.

De la siguiente tabla se obtienen las siguientes observaciones: La concentración inicial de sólidos suspendidos totales presenta un rango muy grande, desde los 2,000 hasta los 25,000 mg/l. La remoción mayor se obtuvo en el experimento 17, alcanzando el 96% de remoción, a unas condiciones de pH=3, tiempo de 2 horas y un flujo de 105 ml/min.

EXPERIMENTO	CONDICIONES DE OPERACION			CONCENTRACIÓN INICIAL SST mg/l	CONCENTRACIÓN FINAL SST mg/l	% DE REMOCION
	PH	TRH (min)	Flujo (ml/min)			
1	5	60	33	12040	1760	85.3820598
2	3	60	33	21260	1400	93.415
3	1	60	33	9780	1620	83.436
4	5	120	33	12940	1680	87.017
5	3	120	33	19130	4100	78.568
6	1	120	33	15470	6250	59.599
7	5	180	33	22790	1990	91.268
8	3	180	33	18010	2310	87.174
9	1	180	33	13020	1750	86.559
10	5	60	105	18420	2054	88.849
11	3	60	105	17090	1640	90.404
12	1	60	105	17480	2590	85.183
13	5	120	105	18530	2300	87.588
14	3	120	105	21290	1450	93.189
15	1	120	105	11280	1380	87.766
16	5	180	105	9360	1800	80.769
17	3	180	105	3010	117.5	96.096
18	1	180	105	2030	1240	38.916
19	5	60	200	8270	1970	76.179
20	3	60	200	8930	1840	79.395
21	1	60	200	9260	2220	76.026
22	5	120	200	2338	1350	42.258
23	3	120	200	25770	2720	89.445
24	1	120	200	10480	4340	58.588
25	5	180	200	5690	1070	81.195
26	3	180	200	22100	1680	92.398
27	1	180	200	3260	1380	57.669

**Tabla 12:** Porcentaje de remoción SST.

### 6.1.4 Remoción de Sólidos Suspendidos Volátiles.

En esta tabla se concluye que los experimentos en los que se demostraron tener condiciones óptimas para la remoción de los Sólidos Suspendidos Totales fueron el número 26 y el 23, ambos con un pH de 3 y un flujo de aire de 200 ml/min.

EXPERIMENTO	CONDICIONES DE OPERACION			CONCENTRACION INICIAL SSV mg/l	CONCENTRACION FINAL SSV mg/l	% DE REMOCION
	PH	TRH (min)	Flujo (ml/min)			
1	5	60	33	5840	960	83.5616438
2	3	60	33	5240	1100	79.008
3	1	60	33	2680	760	71.642
4	5	120	33	2740	720	73.723
5	3	120	33	4480	2330	47.991
6	1	120	33	4110	1540	62.530
7	5	180	33	4800	970	79.792
8	3	180	33	3320	1030	68.976
9	1	180	33	3090	880	71.521
10	5	60	105	3430	727	78.805
11	3	60	105	3130	860	72.524
12	1	60	105	3590	1750	51.253
13	5	120	105	3520	1380	60.795
14	3	120	105	4090	820	79.951
15	1	120	105	4020	430	89.303
16	5	180	105	4230	710	83.215
17	3	180	105	1430		
18	1	180	105	1220	580	52.459
19	5	60	200	3540	620	82.486
20	3	60	200	3740	760	79.679
21	1	60	200	3780	620	83.598
22	5	120	200	2280	710	68.860
23	3	120	200	7300	470	93.562
24	1	120	200	3690	2010	45.528
25	5	180	200	2710	530	80.443
26	3	180	200	10640	150	98.590
27	1	180	200	2000	540	73.000

**Tabla 13:** Porcentaje de remoción SSV.

## 6.2 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

El objetivo principal de realizar un diseño experimental, que en este estudio fue un diseño 3<sup>3</sup>, es obtener datos apropiados, que puedan ser analizados mediante métodos estadísticos, con el objeto de producir conclusiones validas.

### 6.2.1 Estadísticas descriptivas

Las estadísticas incluidas en esta área son llamadas convencionalmente estadísticas básicas. Es importante mencionar que este es un grupo de análisis en una fase exploratoria de datos.

En la tabla 13 se presenta un análisis resumido de las principales estadísticas a analizar (media, valor mínimo, máximo y desviación estándar) para todas las variables, tanto dependientes como independientes.

Como primera observación se estipula el valor medio, el cual es una medida particularmente informativa de la tendencia central de los resultados obtenidos. Para la variable respuesta sulfuros se obtuvo una media de 457 mg/l, para la demanda química de oxígeno se observa una media de 30,383 mg/l y, finalmente, los efluentes del proceso de desorción tienen un promedio de concentración de sólidos de 2,074 mg/l.

Variable	Descriptive Statistics (Spreadsheet2 in Workbook1)				
	Valid N	Mean	Minimum	Maximum	Std.Dev.
TRH	27	2.00	1.000	3.00	0.83
PH	27	3.00	1.000	5.00	1.66
FLUJO	27	112.67	33.000	200.00	69.70
SULFUROS	27	457.02	53.890	899.26	258.80
DQO	27	30363.81	6770.833	54166.67	13741.89
SST	27	2074.13	117.500	6250.00	1183.37

**Tabla 14:** Valores máximos, mínimos y desviación estándar

Un aspecto muy importante a analizar estadísticamente es la forma de la distribución de las observaciones, la cual nos indica la frecuencia de los valores para diferentes rangos de variables independientes.

Por tal motivo, se elaboro separadamente un análisis de frecuencia para cada una de las variables respuesta, separando los resultados en seis categorías, obteniéndose los siguientes resultados:

Para la variable sulfuros, puede determinar el numero de experimentos que se encuentran dentro de cada uno de las seis categorías de valores establecidos automáticamente por el paquete STATISTICA, , se puede observar que existen 2 categorías con igual numero de observaciones (7, equivalente al 25.95% del total de los experimentos), la número 3, con valores desde los 200 mg/l hasta los 400 mg/l, y la categoría 5, con valores desde los 600 mg/l hasta los 800 mg/l.

En 5 experimentos lograron obtener concentraciones menores de 200 mg/l.

Frequency table: SULFUROS (Spreadsheet2 in Workbook1)						
K-S d=.08491, p> .20; Lilliefors p> .20						
Category	Count	Cumulative Count	Percent of Valid	Cumul % of Valid	% of all Cases	Cumulative % of All
-200.000<x<=0.000000	0	0	0.00000	0.0000	0.00000	0.0000
0.000000<x<=200.0000	5	5	18.51852	18.5185	18.51852	18.5185
200.0000<x<=400.0000	7	12	25.92593	44.4444	25.92593	44.4444
400.0000<x<=600.0000	5	17	18.51852	62.9630	18.51852	62.9630
600.0000<x<=800.0000	7	24	25.92593	88.8889	25.92593	88.8889
800.0000<x<=1000.0000	3	27	11.11111	100.0000	11.11111	100.0000
Missing	0	27	0.00000		0.00000	100.0000

**Tabla 15:** Tablas de frecuencias para la variable sulfuro.

Para el paramento demanda química de oxígeno, se concluye lo expresado a continuación:

El mayor número de observaciones se encuentra entre los 20,000 y 30,000 mg/l, lo cual equivale al 29.62% de las observaciones.

Solo en 2 Experimentos se obtuvieron concentraciones menores a los 10,000 mg/l.

Frequency table: DQO (Spreadsheet2 in Workbook1)						
K-S d= 10772, p> .20; Lilliefors p> .20						
Category	Count	Cumulative Count	Percent of Valid	Cumul % of Valid	% of all Cases	Cumulative % of All
0.000000<x<=10000.00	2	2	7.40741	7.4074	7.40741	7.4074
10000.00<x<=20000.00	5	7	18.51852	25.9259	18.51852	25.9259
20000.00<x<=30000.00	8	15	29.62963	55.5556	29.62963	55.5556
30000.00<x<=40000.00	4	19	14.81481	70.3704	14.81481	70.3704
40000.00<x<=50000.00	6	25	22.22222	92.5926	22.22222	92.5926
50000.00<x<=60000.00	2	27	7.40741	100.0000	7.40741	100.0000
Missing	0	27	0.00000		0.00000	100.0000

**Tabla 16:** Tabla de frecuencias para la variable Demanda Química de Oxígeno.

En relación al parámetro sólidos suspendidos totales, se observaron los siguientes resultados:

El 62% de los experimentos obtuvieron concentraciones entre los 1,000 y 2,000 mg/l, esto es; 17 de las 27 corridas experimentales.

Un experimento obtuvo concentraciones entre 6,000 y 7,000 mg/l. En contraparte, un experimento logro la concentración más baja al ubicarse en la categoría de menos de 1,000 mg/l.

Frequency table: SST (Spreadsheet2 in Workbook1)						
K-S d= .23582, p< .10 ; Lilliefors p< .01						
Category	Count	Cumulative Count	Percent of Valid	Cumul % of Valid	% of all Cases	Cumulative % of All
-1000.00<x<=0.000000	0	0	0.00000	0.0000	0.00000	0.0000
0.000000<x<=1000.000	1	1	3.70370	3.7037	3.70370	3.7037
1000.000<x<=2000.000	17	18	62.96296	66.6667	62.96296	66.6667
2000.000<x<=3000.000	6	24	22.22222	88.8889	22.22222	88.8889
3000.000<x<=4000.000	0	24	0.00000	88.8889	0.00000	88.8889
4000.000<x<=5000.000	2	26	7.40741	96.2963	7.40741	96.2963
5000.000<x<=6000.000	0	26	0.00000	96.2963	0.00000	96.2963
6000.000<x<=7000.000	1	27	3.70370	100.0000	3.70370	100.0000
Missing	0	27	0.00000		0.00000	100.0000

**Tabla 17:** Frecuencias para el parámetro sólidos suspendidos totales.

Posteriormente, el Programa STATISTICA desarrolla un análisis en el cual se observan algunas estadísticas descriptivas, como lo son los cuartiles bajos y altos, la varianza, la desviación estándar.

Para los sulfuros, el cuartil bajo, es decir; el valor en el cual se encuentran el 25% de los datos es de 235 mg/l. Esto significa que alrededor de 5 experimentos presentan concentraciones menores de 235 mg/l. Para el cuartil alto, se observa un valor de 643 mg/l, lo cual indica que un 75% de las observaciones se encuentran por debajo de esta concentración.

La tabla 17 nos muestra, además, que el 10% del total de los datos presenta un máximo de 86 mg/l, y que el 90% de los valores son menores que 826 mg/l.

Para la variable dependiente DQO, se observa lo siguiente: el 25% de los datos presentan concentraciones menores o iguales a 20,000 mg/l, mientras que el cuartil alto fue de 43,333 mg/l.

Dos experimentos presentan concentraciones finales menores a 10,416 mg/l, según lo expresa el percentil 10. El percentil 90 nos indica que solo el 10% presenta concentraciones mayores finales de 50,000 mg/l.

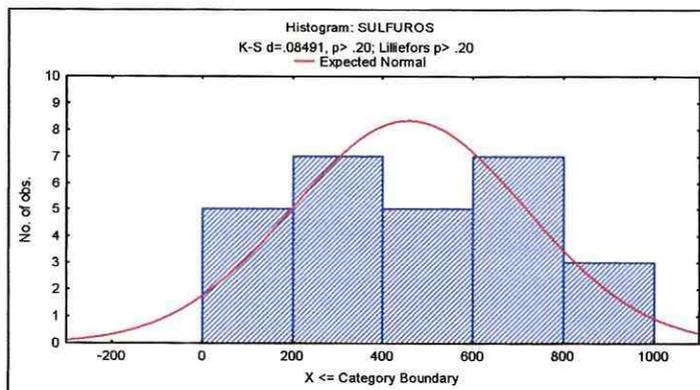
Variable	Descriptive Statistics (Spreadsheet2 in Workbook1)								
	Minimum	Maximum	Lower Quartile	Upper Quartile	Percentile 10.00000	Percentile 90.00000	Variance	Std.Dev.	Standard Error
TRH	1.000	3.00	1.00	3.00	1.00	3.00	1	0.83	0.160
PH	1.000	5.00	1.00	5.00	1.00	5.00	3	1.66	0.320
FLUJO	33.000	200.00	33.00	200.00	33.00	200.00	4857	69.70	13.413
SULFUROS	53.890	899.26	235.00	643.56	86.03	826.75	66978	258.80	49.806
DQO	6770.833	54166.67	20000.00	43333.33	10416.67	50000.00	188839584	13741.89	2644.628
SST	117.500	6250.00	1400.00	2300.00	1240.00	4100.00	1400356	1183.37	227.739

**Tabla 18:** Varianza, desviación estándar.

Mediante el análisis estadístico de el cuartil bajo, se observa que los mejores resultados presentan concentraciones por debajo de los 1,400 mg/l de sólidos suspendidos totales, con el 25% del total de observaciones.

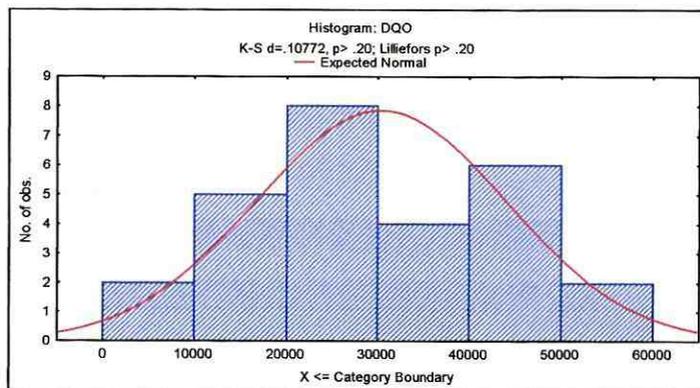
Posteriormente, se analizó la normalidad de cada una de las variables respuesta, un aspecto importante de la descripción de la variable es la forma de su distribución, la cual nos indica la frecuencia de los valores para diferentes rangos de la variable.

En el histograma elaborado para la variable respuesta sulfuros, se observa que esta tiene un comportamiento muy cercano a una distribución normal, representada claramente por su típica forma de campana, sin embargo, en esta curva no coincide el valor de la media con el que toma una distribución normal. Sin embargo, de acuerdo con la grafica 3, se observa una distribución relativamente simétrica con respecto a la media, lo cual es una característica de una distribución normal.



**Grafica 3:** Normalidad sulfuros.

En el caso de el factor dependiente Demanda química de oxígeno, en la grafica 4 se observa lo siguiente, de igual forma se presenta una tendencia hacia una distribución normal. En ambos extremos se observan el mismo número de observaciones, 2.



**Grafica 4:** Normalidad DQO.

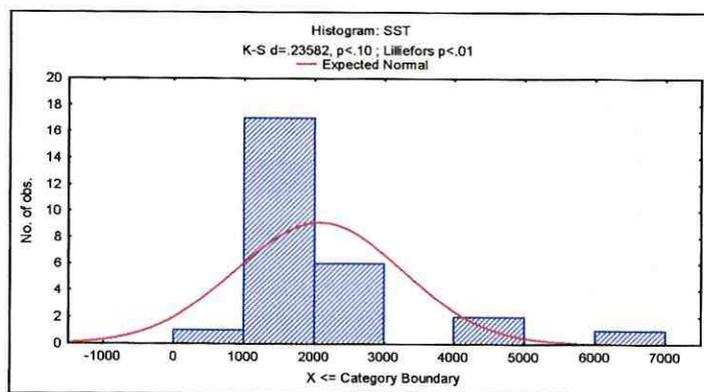
Se puede también analizar que en tres categorías se presentan prácticamente el mismo número de observaciones, entre 4 y 6, lo cual confirma el comportamiento normal que presenta esta variable.

En la grafica 5, se observa claramente el comportamiento de la variable dependiente sólidos suspendidos totales, en la cual se presenta un comportamiento bastante irregular, que altera de manera considerable la forma de su distribución.

La mayoría de los datos se encuentran en el rango de los 1,000 y 2,000 mg/l. Existen 3 experimentos que son completamente atípicos, no siguen las características de distribución del resto de los datos, y por consiguiente, alteran considerablemente la distribución de la variable de respuesta.

También es conveniente observar que este tipo de datos afectan el coeficiente de correlación entre las variables.

El histograma también nos indica que existe un 90% de posibilidades que la media se encuentre entre los 1000 y 3000 mg/l de concentración de sólidos suspendidos totales.



**Grafica 5:** Normalidad Sólidos Suspendidos Totales.

### 6.2.2 Análisis de correlaciones.

Se realizó el análisis para determinar la relación entre las variables independientes y dependientes, mediante graficas de interacción que permiten observar por separado cada variable independiente y los resultados que se obtuvieron.

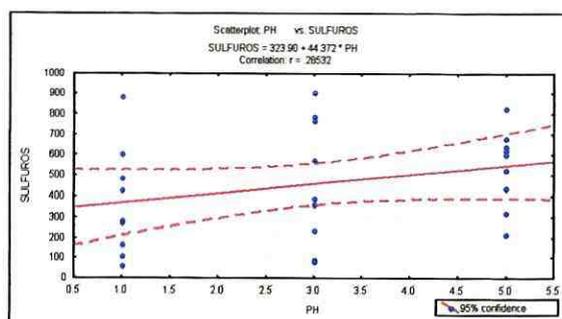
En primer lugar, se estableció el análisis de interacción entre las variables independientes y la respuesta sulfuros.

En la grafica 6, se observa la interacción existente entre el factor pH y la concentración de sulfuros. En esta grafica están representados los 27 experimentos, así como los tres niveles o condiciones de operación que tuvo el pH.

Esta relación tiene un grado de correlación de .28532, estableciéndose una correlación positiva, lo cual significa que a menor pH, se obtuvieron menores concentraciones, y en contraparte a mayor pH se obtuvieron los resultados más altos.

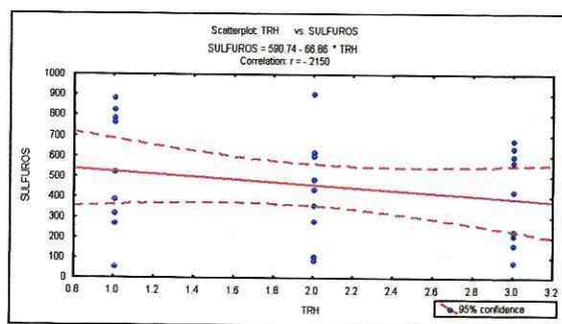
Se puede observar que, sin embargo, existen algunos resultados que no concuerdan del todo con esta hipótesis.

Se observa además que a pH 1 la mayor parte de los resultados son con concentraciones menores de 600 mg/l.



**Grafica 6:** Correlación entre pH y sulfuros.

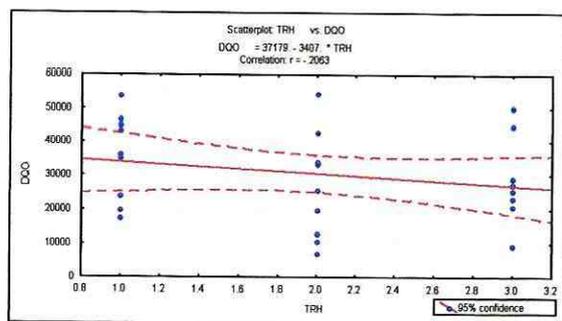
En la grafica 7 se observa la correlación existente entre el tiempo de retención hidráulica y la variable sulfuros, la cual es negativa (-.2150), lo cual indica que a mayor tiempo de retención hidráulica la remoción del contaminante sulfuro será mayor.



**Grafica 7:** interacción entre sulfuros y TRH.

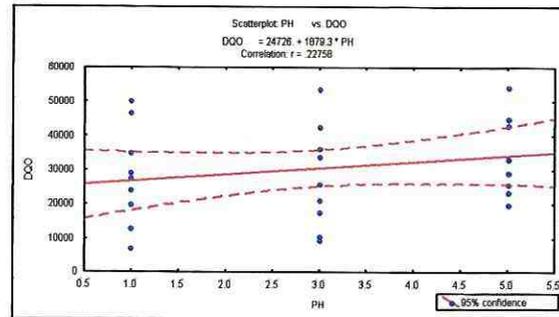
Posteriormente, se hizo el análisis de correlación para la variable de respuesta demanda química de oxígeno, obteniéndose los siguientes resultados:

Una correlación negativa de -.2063 para la relación TRH –DQO, lo cual nos muestra que se requiere el máximo tiempo para que se logre una mayor remoción de la demanda química de oxígeno.



**Grafica 8:** Correlación entre TRH y DQO

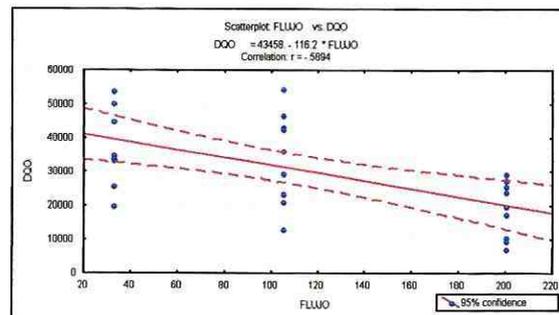
En cuanto a la relación pH- DQO, se observa en la grafica 9 que se obtuvo una correlación de .22758, lo cual indica que es necesario tener un pH bajo para lograr una mayor remoción de esta variable dependiente.



**Grafica 9:** Correlación entre pH y DQO

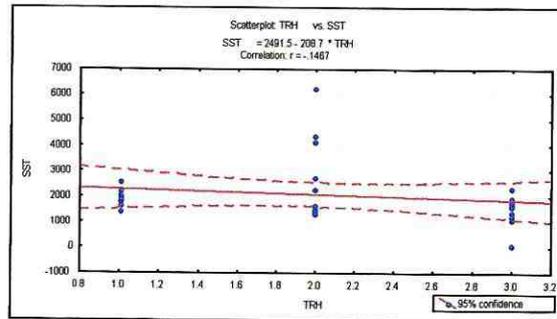
En la grafica 10 se observa claramente, que existe una fuerte correlación negativa entre el flujo y la concentración de la demanda química de oxígeno, por lo tanto es indudable suponer que se requieren altos volúmenes de aire para lograr una adecuada remoción de este contaminante.

En el flujo de 200 ml/min, todas las corridas obtuvieron valores menores a los 30,000 mg/l de DQO. Contrario a lo que sucedió a un flujo de 33 ml/min, donde la mayoría de los experimentos supero esa concentración final.



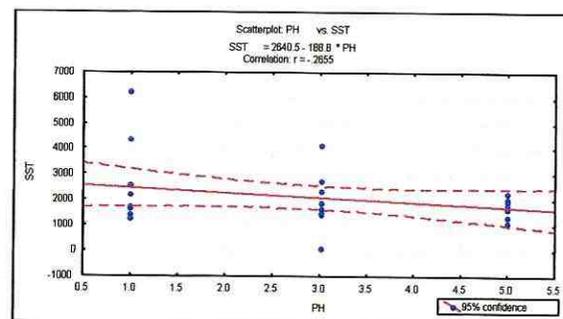
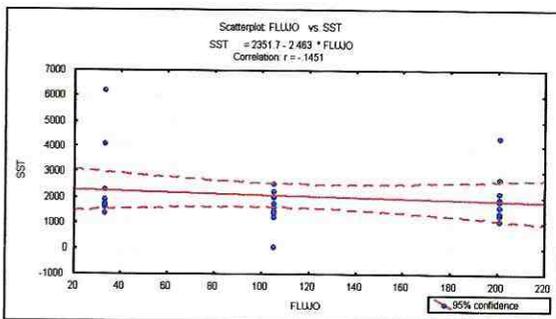
**Grafica 10:** Correlación entre flujo y DQO.

La correlación entre los sólidos suspendidos totales y la variable independiente TRH es analizada en la grafica 11, en la que se puede observar que presenta una ligera correlación negativa, ya que se obtuvieron mejores resultados con la mayor cantidad de tiempo (3 horas). Aunque se concluye que se obtuvieron resultados satisfactorios en el tiempo mínimo de aireación.



**Grafica 11:** Correlación entre TRH y SST

En la correlación Flujo SST, se observa un comportamiento similar, en donde se obtiene resultados semejantes en las tres variaciones de flujo, sin embargo, es ligeramente mayor la remoción a flujos altos. Sin embargo, en la relación SST-pH, se observaron mejores resultados a pH altos.

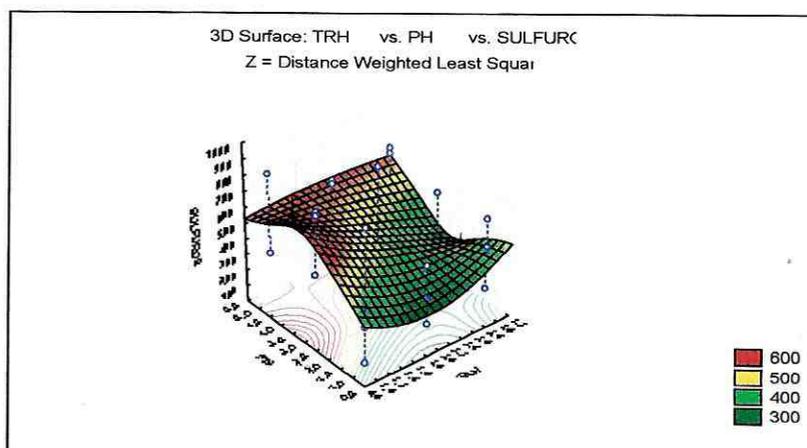


**Grafica 12:** Relación entre Flujo y SST. **Grafica 13:** Correlación entre pH y SST.

### 6.2.3 Superficies de Respuesta Sulfuros.

Como parte final del uso del programa STATISTICA, se analizó el comportamiento ideal para la remoción de sulfuros, en función a la interrelación de las tres variables independientes. De esta forma se concluyó el análisis de optimización de proceso de remoción de sulfuros, arrojando los resultados que a continuación se mencionan.

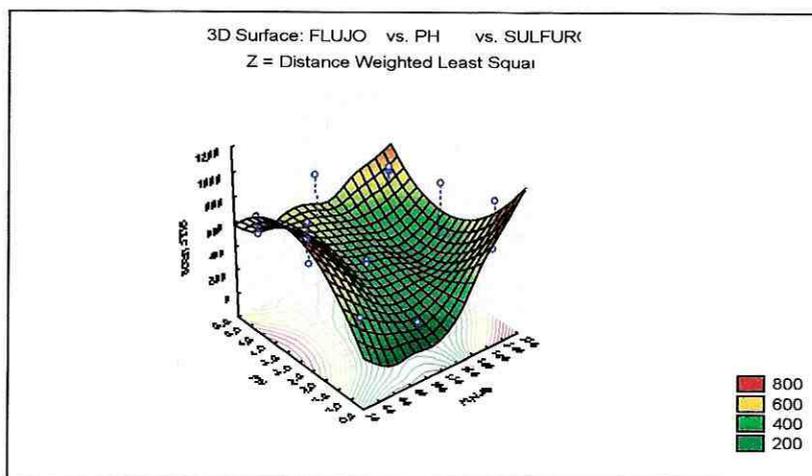
Se lograron remociones del contenido de sulfuros en más de un 90%, el pH es el factor determinante en relación a este proceso, ya que, como se observa en la grafica 23, a medida que va descendiendo la concentración de pH, desciende proporcionalmente la concentración de sulfuros en el agua, hasta lograr concentraciones de alrededor de los 50 mg/l, se observa además que a un tiempo de retención hidráulica de 2 horas es suficiente para obtener los porcentajes de remoción más altos. Es posible obtener remociones aceptables de este contaminante a Ph altos, esto mediante un tiempo más prolongado de aereación.



Grafica 14: Superficies de área TRH-pH-Sulfuros

En la interrelación Flujo-pH, se confirma que las concentraciones mínimas de sulfuros se obtienen a los niveles más bajos de pH, con un flujo de bajo a medio (33 a 105 ml/min).

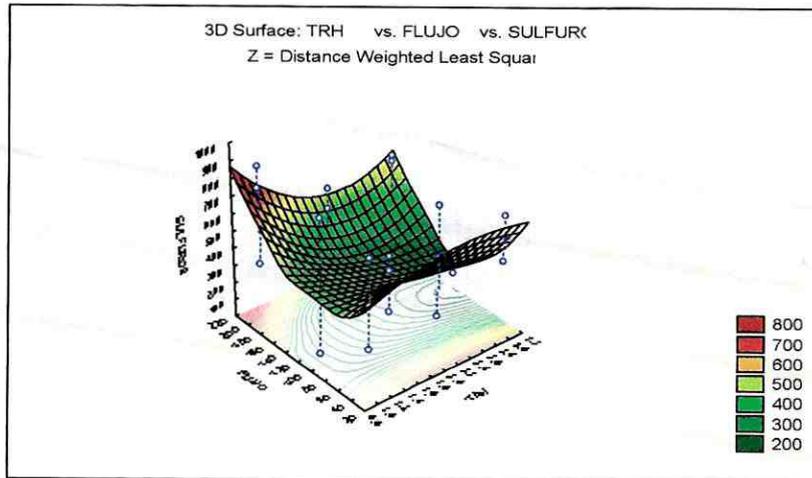
En este análisis comparativo se puede observar una particularidad de esta interrelación, a pesar de que se tengan pH bajos, si el volumen de flujo es muy alto, no se obtiene una remoción adecuada.



**Grafica 15:** Superficies de área Flujo-pH- Sulfuros

De igual manera se concluye que los resultados obtenidos a pH altos, son aceptables siempre que se mantenga un rango de flujo medio (103 ml/l)

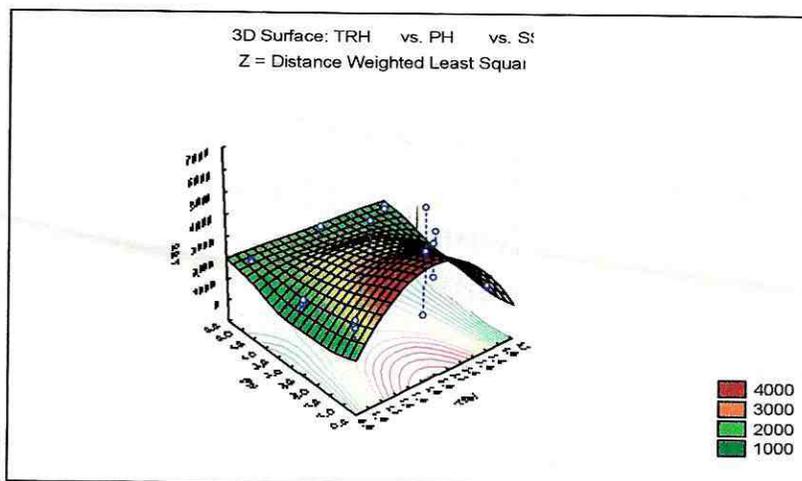
En contraparte, la grafica 25 nos permite observar que los flujos muy bajos no permiten una remoción eficiente de la concentración de sulfuros, además; es evidente que el factor tiempo de retención hidráulica influye de una manera poco considerable a esta remoción, al presentarse una tendencia lineal a lo largo del eje X.



**Grafica 16:** Superficies de área TRH-Flujo-Sulfuros

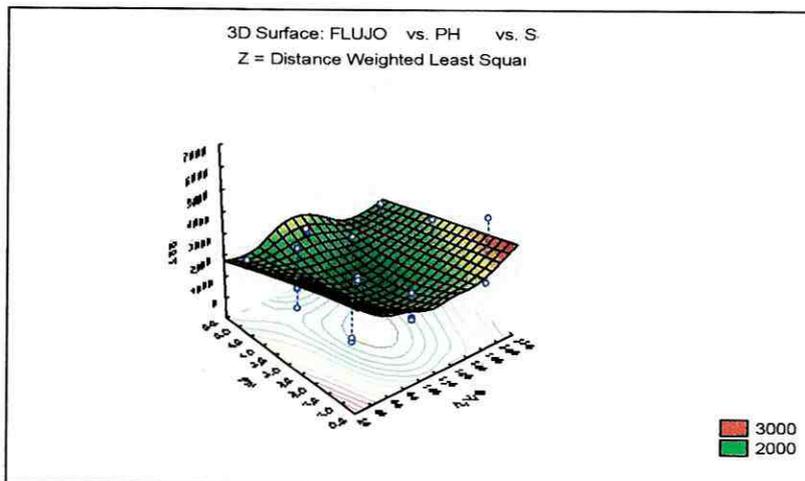
#### 6.2.4 Superficies de respuesta Sólidos Suspendidos Totales.

El proceso de desorción del agua residual proveniente de las tenerías, mostró resultados sumamente satisfactorios en cuanto a la remoción de sólidos suspendidos totales, en las siguientes graficas de superficie de respuesta se observa claramente de que manera influyeron cada una de las tres variables independientes en su proceso de remoción.



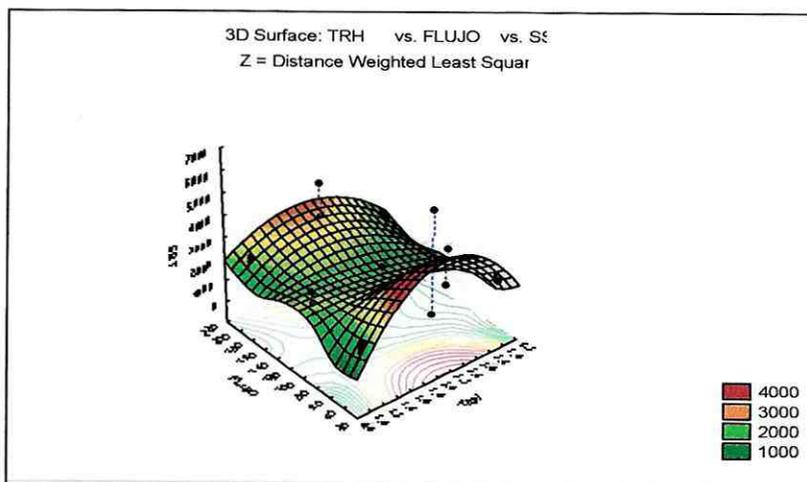
**Grafica 17:** Superficies de área TRH-PH-SST

En el análisis comparativo entre pH y el tiempo de aereación, se observa que a pH bajos los dos los dos tiempos extremos de retención hidráulica (una y tres horas, presentan una remoción similar, esta situación se regula a pH altos, donde , independientemente del tiempo de retención hidráulica, se presenta una remoción eficiente, con concentraciones menores a 2000 mg/l



**Grafica 18:** Superficies de área Flujo-pH-SST

Un comportamiento sumamente homogéneo se presenta en la comparación entre el factor pH y la variable flujo, obteniéndose mejores resultados a partir de un nivel de aeración mayores a 105 ml/min, así como a un pH de tres unidades.



**Grafica 19:** Superficie de área TRH-Flujo-SST

### 6.3 PORCENTAJE DE RECUPERACIÓN DE SULFUROS.

Como parte final del análisis de datos, se realizó un estudio sobre la capacidad de la torre de absorción para recuperar los sulfuros desprendidos del proceso de desorción.

En primer lugar, se determinó la cantidad de sulfuros que salían de la columna de desorción; esto es, la concentración inicial del agua residual menos la concentración final del agua tratada.

Posteriormente, se determinó de igual manera la diferencia entre las concentraciones iniciales y finales de la torre de absorción, para de esta forma conocer qué cantidad de sulfuros fue capturada.

Una vez realizados estos cálculos, se puede determinar el porcentaje de recuperación de sulfuros.

Se puede observar que en solo 4 casos se logró una recuperación del contaminante sulfuro mayor al 50%, lo cual nos indica que no se lograron resultados satisfactorios. El resultado más favorable se obtuvo en el experimento 22, con una recuperación del 61%.

La menor cantidad de sulfuros recuperados se presentó en el experimento 13, con solo un 1% de recuperación, sin embargo, cabe señalar que en este experimento se presentaron algunas fallas técnicas que impidieron una adecuada administración del ácido sulfhídrico proveniente de la columna de desorción.

	ABS 1	ABS 2	DIFERENCIA	S <sup>-</sup> INICIAL	S <sup>-</sup> FINAL	DIFERENCIA	% DE RECUPERACIÓN
E4	5907.808	6807.94	900.128	5477.3	625.74	4851.56	18.55
E5	7981.152	10485.9	2504.704	5221.632	899.264	4322.368	57.95
E7	384.2336	1951.18	1566.9504	6635.3	681.66	5953.64	26.32
E9	3757.28	5280.7	1523.424	8993	427.8	8565.2	17.79
E10	2995.568	4845.44	1849.872	3391.48	826.75	2564.73	72.13
E11	5628.416	7296.93	1668.512	5099.34	391.48	4707.86	35.44
E12	2102.752	3408.54	1305.792	3622.08	53.89	3568.19	36.60
E13	3263.456	3336	72.544	5073	434.8	4638.2	1.56
E14	2900.736	3916.35	1015.616	5798	362.2	5435.8	18.68
E16	5674.816	6552.35	877.536	2220.64	215.06	2005.58	43.75
E17	4500.8	5896.88	1396.08	4613.9	235	4378.9	31.88
E18	2278.976	2677.86	398.88	4613.9	165.2	4448.7	8.97
E19	5298.560	7093.520	1794.96	3816	324.8	3491.2	51.41
E20	6694.64	7891.28	1196.64	4215	763.2	3451.8	34.67
E21	6694.64	7492.4	797.76	3411	882.9	2528.1	31.56
E22	5298.56	6794.36	1495.8	3018.4	603.68	2414.72	61.95
E23	6495.2	7691.84	1196.64	3816.16	86.027	3730.133	32.08
E24	5298.56	6594.92	1296.36	5411.7	484.02	4927.68	26.31
E25	7546	12532	4986	3417.28	643.56	2773.72	179.76
E26	4301.360	5896.880	1595.52	3018.4	78.05	2940.35	54.26
E27	5298.56	6295.76	997.2	4215.04	603.68	3611.36	27.61

**Tabla 19:** Porcentaje de recuperación de sulfuros.

Abs1 = Concentración inicial absorber (mg/l)

Abs2 = Concentración final absorber (mg/l)

S<sup>-</sup> Inicial = Concentración muestra inicial sulfuros (mg/l)

S<sup>-</sup> Final = Concentración muestra final sulfuros (mg/l)

## CAPITULO VII

### CONCLUSIONES

#### 7.1 CONCLUSIONES

La industria del curtido de pieles, que reviste gran importancia en el centro del país como el principal ramo productor de esta región, se ha caracterizado también por los graves daños que ocasiona al medio ambiente, principalmente por la alta concentración de compuestos tóxicos característicos de sus aguas residuales.

El proceso de desorción y absorción de sulfuros del agua residual proveniente de la etapa de pelambre del curtido de pieles, es un proceso innovador, que puede resolver uno de los numerosos problemas de contaminación de aguas residuales.

El proceso de desorción logró una remoción del 98.51% del contenido inicial de sulfuros del agua residual, a un pH = 1.

Cabe mencionar que aunque se obtuvo una mejor remoción a un pH =1, se debe llevar a cabo un estudio de factibilidad, ya que la cantidad necesaria de ácido sulfúrico para alcanzar ese pH es muy alta, en comparación con un pH =2, por lo que sería pertinente realizar un diseño experimental que contemplara este valor del factor independiente pH.

Además, el efluente final después del proceso de sedimentación, a pH=1; presenta un color blanco lechoso no muy agradable a la vista, en cambio, el agua tratada a un pH =3 se presenta prácticamente incolora. Por ello se debe tomar en cuenta si el agua tratada se va a reutilizar en el proceso (por ejemplo, en la etapa de remojo) o si se va a depositar en algún cuerpo de agua.

Se puede observar que la mayor parte de la remoción ocurre durante la primer media hora, en la cual se eliminan alrededor del 94% del total de los sulfuros; por lo que se puede considerar como un proceso con una rapidez aceptable.

La etapa de sedimentación es muy importante para disminuir la cantidad de sólidos suspendidos totales y la demanda química de oxígeno, un periodo de 1 hora es suficiente para lograr resultados aceptables.

Cabe mencionar que es posible aumentar el flujo de aire hasta 400 ml/min, con esta aereación se impide que haya una sedimentación en la parte cónica de la torre de absorción, favoreciendo un mayor contacto entre el ácido sulfúrico y el agua residual, además; el flujo es un factor que afecta en gran medida a la remoción de la DQO.

El lodo residual contenía aun valores muy altos de sulfuros, esto debido principalmente a que había una rápida sedimentación y compactación de los sólidos, impidiendo con esto su reacción con el ácido sulfúrico.

El análisis de la superficie de respuesta tiene una gran utilidad en la interpretación de experimentos factoriales, ya que con este se pueden determinar las condiciones óptimas de operación.

La recuperación de sulfuros no obtuvo los valores esperados, esto se debe principalmente a dos factores:

1.- Hubo una ruptura en la salida del ácido sulfhídrico hacia la columna de absorción, lo cual pudo haber ocasionado fugas de este gas hacia la atmósfera.

2.- La concentración de sulfuros presentes en el absorber era muy alta, lo cual pudo haber provocado una saturación y por consiguiente una pobre captación del sulfuro.

El proceso de desorción absorción de sulfuros es un proceso que ofrece las siguientes ventajas:

- Requiere poco tiempo de operación.
- Se obtiene un alto porcentaje de remoción de sulfuros y sólidos suspendidos.
- Permite la reutilización del agua tratada.
- Poca variabilidad de resultados.
- Permite la captación del ácido sulfhídrico, impidiendo que cause serios daños al ambiente por su toxicidad.

Desventajas:

- Está limitado por las características tan variables del efluente del proceso de pelambre.
- Implica un alto costo por el consumo del ácido sulfúrico concentrado y la necesidad de una alta aereación.
- Requiere personal capacitado para su operación.
- Es un proceso químico altamente riesgoso, en el cual se deben cumplir todas las normas de seguridad necesarias.
- Tiene que ser monitoreado constantemente por la posible formación de espuma durante el proceso de aereación.

## 7.2 RECOMENDACIONES

Como se ha observado, el uso del ácido sulfúrico juega un papel muy importante en la remoción de sulfuros del agua residual proveniente de la etapa del pelambre, sin embargo; al ser una sustancia ácida concentrada, es necesario tomar en cuenta todas las normas de seguridad y analizar las principales características de este compuesto químico, así como las del ácido sulfhídrico, revisando sus respectivas MSDS (Hojas de datos de seguridad).

Durante el desarrollo de las corridas experimentales, se observó que es posible acidificar la columna cuando se inicia la aireación, sin embargo; es recomendable esperar un lapso de tiempo (1 min aproximadamente) entre cada dosis para permitir que se establezca la reacción, y de esta manera evitar problemas de formación de espuma en grandes cantidades.

Es necesario modificar la posición de los difusores de aire, colocándolos en la base de la torre de desorción, permitiendo de esta forma una mezcla más homogénea, evitando la rápida sedimentación y la formación de zonas muertas, en las que no ocurre la desorción de los sulfuros, asimismo disminuyendo la presencia de los sulfuros en el lodo final formado después de la sedimentación.

Es muy importante considerar también un mantenimiento preventivo continuo, ya que los difusores normalmente son impregnados por el alto contenido de sólidos del agua residual, ocasionando una aireación no homogénea.

Se debe tomar en cuenta una caracterización preliminar del agua residual a tratar, ya que de las condiciones iniciales depende en gran medida la operación del proceso (posible formación de espuma, necesidad de una mayor cantidad de ácido sulfúrico, etc).

Debido a la gran variabilidad de las condiciones iniciales de los efluentes del proceso del pelambre, es muy difícil estimar la cantidad necesaria de ácido sulfúrico para obtener el pH deseado, sin embargo; esto se puede solucionar mediante la incorporación al proceso de desorción de un medidor de pH, que nos indique cuando se haya alcanzado el pH óptimo y sea necesario suspender la acidificación.

Es necesario analizar el punto de saturación de la solución de NaOH 10 N de la columna de absorción, para que de esta forma sea posible una captación más eficiente de sulfuros.

## CAPITULO VIII

### BIBLIOGRAFÍA

1. Estudios sobre usos del Agua, Métodos y costos para el control de la contaminación del agua residual en la industria de la curtiduría. Proyectos Interamericanos S.A.
2. XV Censo Industrial. Censos económicos 1999. Industrias manufactureras subsector 32. Producción de textiles, prendas de vestir e industria del cuero. Productos y materias primas 1999.
3. Process design manual for sulfide. Control in sanitary sewerage systems, Washington. D.C. EPA
4. Centro de Información y actualización de conocimientos, A.C. Diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales.
5. México. Plan Nacional Hidráulico. Uso del agua en la industria: Índices de uso y contaminación.
6. Jenkins, Química del agua. Limusa, Noriega Editores, 2000.
7. Water pollution control federation, wastewater treatment plant design.
8. Fundamentos de transferencia de momento, calor y masa, Limusa, Noriega Editores 1994.

**ANEXOS**

## ANEXO I.- RESULTADOS DE EXPERIMENTOS

### EXPERIMENTO 1

TRH (min)	Ph	Flujo (ml/min)	SULFUROS (mg/l)	DQO (mg/l)	SST (mg/l)	SSV (mg/l)
0	12.25	33	3031.8	64375	12040	5840
30	5.24	33	738.38	43833.33	12340	3460
60	5.38	33	542.7	46916.67	21850	7350
0	5.42	33	527.1	44791.67	1760	960

### EXPERIMENTO 2

TRH (min)	Ph	Flujo (ml/min)	SULFUROS (mg/l)	DQO (mg/l)	SST (mg/l)	SSV (mg/l)
0	12.3	33	3513.6	62291.67	21260	5240
30	2.7	33	802.072	50625.00	1330	920
60	2.92	33	723.8	54166.6667	860	490
0	3.27	33	782.504	53541.6667	1400	1100

### EXPERIMENTO 3

TRH (min)	Ph	Flujo (ml/min)	SULFUROS (mg/l)	DQO (mg/l)	SST (mg/l)	SSV (mg/l)
0	12.29	33	3513.6	54583.33	9780	2680
30	1.13	33	410.71	38958.33	2260	1520
60	1.3	33	332.44	40416.67	3040	1730
0	1.43	33	273.73	35000.00	1620	760

### EXPERIMENTO 4

TRH (min)	Ph	Flujo (ml/min)	SULFUROS (mg/l)	DQO (mg/l)	SST (mg/l)	SSV (mg/l)
0	12.6	33	5477.3	57187.5	12940	2740
30	4.49	33	1042.4	44375	14000	4820
60	4.57	33	650.96	41093.75	22760	7980
120	4.46	33	781.44	39531.25	21400	7820
0	4.48	33	625.74	33281.25	1680	720

**EXPERIMENTO 5**

TRH (min)	Ph	Flujo (ml/min)	SULFUROS (mg/l)	DQO (mg/l)	SST (mg/l)	SSV (mg/l)
0	12.7	33	5221.632	54968.75	19130	4480
60	2.32	33	1008.84	34531.25	26390	15590
120	2.14	33	860.128	35625	13310	7390
0	2	33	899.264	33750	4100	2330

**EXPERIMENTO 6**

TRH (min)	Ph	Flujo (ml/min)	SULFUROS (mg/l)	DQO (mg/l)	SST (mg/l)	SSV (mg/l)
0	12.86	33	2730.9	32812.5	15470	4110
30	1.02	33	166.11	17500	4420	1530
60	0.73	33	391.14	16250	4090	1190
120	1.18	33	263.95	19843.75	4390	1260
0	1.34	33	283.52	19687.5	6250	1540

**EXPERIMENTO 7**

TRH (min)	Ph	Flujo (ml/min)	SULFUROS (mg/l)	DQO (mg/l)	SST (mg/l)	SSV (mg/l)
0	12.54	33	6635.3	73333.33	22790	4800
30	4.83	33	863.02	58541.67	23750	8590
60	5.04	33	826.75	59583.33	20310	7370
120	5.3	33	100.6	55416.67	15340	5760
180	5.42	33	645.39	57500.00	9990	3940
0	5.5	33	681.66	45000.00	1990	970

**EXPERIMENTO 8**

TRH (min)	Ph	Flujo (ml/min)	SULFUROS (mg/l)	DQO (mg/l)	SST (mg/l)	SSV (mg/l)
0	12.45	33	5643	34375	18010	3320
30	3.14	33	1553	30937.5	26440	12160
60	3.16	33	1171	33437.5	17490	8160
120	3.31	33	990	27812.5	9180	4600
180	3.2	33	699.8	27500	8990	4310
0	3.12	33	572.8	25625	2310	1030

**EXPERIMENTO 9**

TRH (min)	Ph	Flujo (ml/min)	SULFUROS (mg/l)	DQO (mg/l)	SST (mg/l)	SSV (mg/l)
0	12.44	33	8993	67500	13020	3090
30	1.32	33	645.4	44375	11230	4840
60	1.46	33	572.8	47083.3333	6820	2970
120	1.5	33	572.8	37916.6667	3240	1800
180	1.6	33	500.3	41250	2750	1510
0	1.51	33	427.8	50000	1750	880

**EXPERIMENTO 10**

TRH (min)	Ph	Flujo (ml/min)	SULFUROS (mg/l)	DQO (mg/l)	SST (mg/l)	SSV (mg/l)
0	12.74	105	3391.48	79583.33	18420	3430
30	5.3	105	855.52	63750.00	29290	9920
60	5.4	105	899.29	57291.67	24909	8745
0	5.52	105	826.75	43333.33	2054	727

**EXPERIMENTO 11**

TRH (min)	Ph	Flujo (ml/min)	SULFUROS (mg/l)	DQO (mg/l)	SST (mg/l)	SSV (mg/l)
0	12.7	105	5099.34	62916.67	17090	3130
30	2.53	105	1116.93	45000.00	20270	8700
60	2.55	105	717.93	42916.67	11580	5380
0	2.5	105	391.48	36250.00	1640	860

**EXPERIMENTO 12**

TRH (min)	Ph	Flujo (ml/min)	SULFUROS (mg/l)	DQO (mg/l)	SST (mg/l)	SSV (mg/l)
0	12.64	105	3622.08	61458.33	17480	3590
30	0.9	105	108.3	49791.67	5670	2750
60	0.6	105	35.76	46875.00	4710	2840
0	0.71	105	53.89	46875.00	2590	1750

**EXPERIMENTO 13**

TRH (min)	Ph	Flujo (ml/min)	SULFUROS (mg/l)	DQO (mg/l)	SST (mg/l)	SSV (mg/l)
0	12.8	105	5073	68750	18530	3520
30	4.64	105	942.6	64166.6667	27750	8700
60	4.71	105	543.6	66875	22030	7930
120	4.77	105	398.5	64166.6667	17930	6720
0	4.86	105	434.8	54166.6667	2300	1380

**EXPERIMENTO 14**

TRH (min)	Ph	Flujo (ml/min)	SULFUROS (mg/l)	DQO (mg/l)	SST (mg/l)	SSV (mg/l)
0	13.1	105	5798	87083.33	21290	4090
30	2.68	105	579.8	57291.67	24770	10200
60	2.74	105	543.6	50416.67	17980	8090
120	2.56	105	398.5	56250.00	12380	6060
0	2.85	105	362.2	42500.00	1450	820

**EXPERIMENTO 15**

TRH (min)	Ph	Flujo (ml/min)	SULFUROS (mg/l)	DQO (mg/l)	SST (mg/l)	SSV (mg/l)
0	11.74	105	4614	21666.67	11280	4020
30	1.4	105	361.7	18833.33	6840	2740
60	1.36	105	111	17666.67	4950	2210
120	1.42	105	138.8	16166.67	3250	1360
0	1.46	105	111	12916.67	1380	430

**EXPERIMENTO 16**

TRH (min)	Ph	Flujo (ml/min)	SULFUROS (mg/l)	DQO (mg/l)	SST (mg/l)	SSV (mg/l)
0	11.66	105	2220.64	35000	9360	4230
30	4.9	105	534.17	25583.3333	6230	3210
60	4.44	105	434.45	25750	6630	3360
120	4.52	105	294.85	31916.6667	5740	2860
180	4.52	105	235.01	24333.3333	4400	2240
0	4.22	105	215.06	23500	1800	710

**EXPERIMENTO 17**

TRH (min)	Ph	Flujo (ml/min)	SULFUROS (mg/l)	DQO (mg/l)	SST (mg/l)	SSV (mg/l)
0	11.7	105	4613.9	30625	3010	1430
30	3	105	713.67	30000	10280	4390
60	2.96	105	534.2	28500	9220	4100
120	3.14	105	314.8	24583.3333	8220	2980
180	3.06	105	274.9	24916.6667	294.85	24750
0	3.05	105	235	20750	117.5	10375

**EXPERIMENTO 18**

TRH (min)	Ph	Flujo (ml/min)	SULFUROS (mg/l)	DQO (mg/l)	SST (mg/l)	SSV (mg/l)
0	11.86	105	4613.9	38333.33	2030	1220
30	1.97	105	145.26	31750.00	5940	1470
60	2.08	105	135.3	28666.67	5000	2260
120	2.01	105	125.3	28750.00	2160	870
180	1.9	105	205.1	31250.00	2880	1300
0	1.8	105	165.2	29000.00	1240	580

**EXPERIMENTO 19**

TRH (min)	Ph	Flujo (ml/min)	SULFUROS (mg/l)	DQO (mg/l)	SST (mg/l)	SSV (mg/l)
0	11.8	200	3816	34583.33	8270	3540
30	4.96	200	922.8	29750.00	7361	4000
60	5.01	200	603.7	25083.33	8580	4310
0	4.95	200	324.8	20000.00	1970	620

**EXPERIMENTO 20**

TRH (min)	Ph	Flujo (ml/min)	SULFUROS (mg/l)	DQO (mg/l)	SST (mg/l)	SSV (mg/l)
0	12.1	200	4215	26875	8930	3740
30	2.81	200	1162	25416.6667	9950	4150
60	2.86	200	882.9	23916.6667	7400	3420
0	2.74	200	763.2	17416.6667	1840	760

**EXPERIMENTO 21**

TRH (min)	Ph	Flujo (ml/min)	SULFUROS (mg/l)	DQO (mg/l)	SST (mg/l)	SSV (mg/l)
0	11.73	200	3411	57916.67	9260	3780
30	1.2	200	1162.1	15833.33	4340	1510
60	1.21	200	922.78	16000.00	3150	1080
0	1.26	200	882.9	23833.33	2220	620

**EXPERIMENTO 22**

TRH (min)	Ph	Flujo (ml/min)	SULFUROS (mg/l)	DQO (mg/l)	SST (mg/l)	SSV (mg/l)
0	11.76	200	3018.4	33750	2338	2280
30	4.37	200	142.4	31083.3333	7560	2380
60	4.4	200	843.01	30750	5540	1920
120	4.44	200	803.12	31333.3333	5880	1620
0	4.53	200	603.68	25583.3333	1350	710

**EXPERIMENTO 23**

TRH (min)	Ph	Flujo (ml/min)	SULFUROS (mg/l)	DQO (mg/l)	SST (mg/l)	SSV (mg/l)
0	12.36	200	3816.16	15208.33	25770	7300
30	2.62	200	175.18	23166.67	15120	7380
60	2.65	200	135.29	25666.67	17860	7440
120	2.8	200	125.32	14750.00	7060	3780
0	3.25	200	86.027	10416.67	2720	470

**EXPERIMENTO 24**

TRH (min)	Ph	Flujo (ml/min)	SULFUROS (mg/l)	DQO (mg/l)	SST (mg/l)	SSV (mg/l)
0	12.34	200	5411.7	33750	10480	3690
30	2.11	200	922.78	23916.6667	13920	5610
60	2.13	200	763.23	13833.3333	8820	3480
120	2.13	200	603.68	18000	6120	1960
0	2.12	200	484.02	6770.83333	4340	2010

**EXPERIMENTO 25**

TRH (min)	Ph	Flujo (ml/min)	SULFUROS (mg/l)	DQO (mg/l)	SST (mg/l)	SSV (mg/l)
0	11.93	200	3417.28	37500	5690	2710
30	5.32	200	1002.56	28000	6910	2440
60	5.23	200	803.12	35333.3333	5560	2200
120	5.17	200	843	30083.3333	5500	1940
180	5.1	200	683.45	30000	3590	1350
0	5.06	200	643.56	29333.3333	1070	530

**EXPERIMENTO 26**

TRH (min)	Ph	Flujo (ml/min)	SULFUROS (mg/l)	DQO (mg/l)	SST (mg/l)	SSV (mg/l)
0	12.29	200	3018.4	44166.67		
30	2.39	200	205.096	34916.67	22100	10640
60	2.45	200	165.2	24916.67	16460	8280
120	2.62	200	145.26	13833.33	12380	5040
180	2.65	200	105.37	19333.33	9360	5000
0	2.6	200	78.05	9250.00	1680	150

**EXPERIMENTO 27**

TRH (min)	Ph	Flujo (ml/min)	SULFUROS (mg/l)	DQO (mg/l)	SST (mg/l)	SSV (mg/l)
0	11.94	200	4215.04	35208.33	3260	2000
30	1.83	200	1162.11	31750.00	4640	1900
60	1.57	200	922.78	28750.00	2650	1280
120	1.25	200	843	27666.67	2460	820
180	1.54	200	643.56	28166.67	1720	780
0	1.9	200	603.68	27250.00	1380	540

## ANEXO 2.- RESULTADOS REPETICIONES DE EXPERIMENTOS

### EXPERIMENTO 7

TRH (min)	Ph	Flujo (ml/min)	SULFUROS (mg/l)	DQO (mg/l)	SST (mg/l)	SSV (mg/l)
0	12.2	33	4215.04	19791.67	17540	6600
30	5.14	33	1082.336	38750.00	13970	6840
60	5.33	33	1002.56	26833.33	9960	5460
120	5.52	33	843.008	29333.33	8560	4660
180	5.63	33	763.232	28166.67	8100	4000
0	5.57	33	683.456	26750.00	2640	1000

### EXPERIMENTO 8

TRH (min)	Ph	Flujo (ml/min)	SULFUROS (mg/l)	DQO (mg/l)	SST (mg/l)	SSV (mg/l)
0	12.3	33	3417.28	21666.67	14800	5660
60	3.08	33	1082.336	47333.33	15600	7360
120	3.39	33	603.68	24500.00	13040	6940
180	3.6	33	563.792	22666.67	9980	5220
0	3.72	33	484.016	17583.33	2290	510

### EXPERIMENTO 9

TRH (min)	Ph	Flujo (ml/min)	SULFUROS (mg/l)	DQO (mg/l)	SST (mg/l)	SSV (mg/l)
0	12.15	33	4215.04	22916.67	13580	5400
30	1.57	33	683.456	14833.33	5360	1740
60	1.72	33	922.784	17500.00	7520	2420
120	1.75	33	603.68	16666.67	2720	560
180	1.83	33	523.904	14416.67	2060	620
0	1.86	33	364.352	13583.33	2320	420

### EXPERIMENTO 16

TRH (min)	Ph	Flujo (ml/min)	SULFUROS (mg/l)	DQO (mg/l)	SST (mg/l)	SSV (mg/l)
0	12.19	105	5012.8	42916.67	17820	7320
30	5.08	105	1162.112	84166.67	16240	9420
60	5.13	105	922.784	86041.67	11400	6440
120	5.29	105	683.456	68125.00	9860	5480
180	5.36	105	444.128	80833.33	9620	6220
0	5.41	105	364.352	34583.33	2200	660

**EXPERIMENTO 17**

TRH (min)	Ph	Flujo (ml/min)	SULFUROS (mg/l)	DQO (mg/l)	SST (mg/l)	SSV (mg/l)
0	12.21	105	4613.92	91458.33	19240	7440
30	3.46	105	843.008	41083.33	20760	12820
60	3.43	105	603.68	41000.00	19260	11920
120	3.51	105	444.128	36083.33	15960	10240
180	3.6	105	404.24	33500.00	15000	9340
0	3.63	105	364.352	17416.67	2400	660

**EXPERIMENTO 18**

TRH (min)	Ph	Flujo (ml/min)	SULFUROS (mg/l)	DQO (mg/l)	SST (mg/l)	SSV (mg/l)
0	12.11	105	4414.48	30000	42460	24000
30	1.3	105	523.904	40833.33	7740	3400
60	1.31	105	444.128	40416.67	5020	2240
120	1.3	105	324.464	37500.00	4040	1600
180	1.34	105	125.32	36041.67	3020	960
0	1.11	105	115.348	32083.33	2120	340

**EXPERIMENTO 21**

TRH (min)	Ph	Flujo (ml/min)	SULFUROS (mg/l)	DQO (mg/l)	SST (mg/l)	SSV (mg/l)
0	12.17	220	3018.4	57916.67	17460	7380
30	1.04	220	95.404	15833.33	12080	5560
60	1.05	220	75.46	16000.00	9220	4200
0	1.13	220	82.0384	23833.33	2300	340

**EXPERIMENTO 25**

TRH (min)	Ph	Flujo (ml/min)	SULFUROS (mg/l)	DQO (mg/l)	SST (mg/l)	SSV (mg/l)
TRH	Ph	Flujo	SULFUROS	DQO	SST	SSV
0	12.2	220	3816.16	66250	19900	7020
30	5.53	220	1002.56	47166.67	20080	10580
60	6	220	843.008	37000.00	17340	8960
120	6.4	220	683.456	35666.67	16880	8060
180	6.67	220	523.904	31500.00	15160	6600
0	6.54	220	484.016	28583.33	4780	2060

**EXPERIMENTO 27**

TRH (min)	Ph	Flujo (ml/min)	SULFUROS (mg/l)	DQO (mg/l)	SST (mg/l)	SSV (mg/l)
TRH	Ph	Flujo	SULFUROS	DQO	SST	SSV
0	12.06	220	3018.4	60000	15240	5840
30	1.59	220	404.24	35416.67	15680	8100
60	1.28	220	284.576	34000	14940	8760
120	1.16	220	364.352	16500	7060	3480
180	1.18	220	125.024	17833.33	6960	2520
0	1.14	220	74.0608	11666.67	2580	320

**EXPERIMENTO 27 TRIPLICADO**

TRH (min)	Ph	Flujo (ml/min)	SULFUROS (mg/l)	DQO (mg/l)	SST (mg/l)	SSV (mg/l)
TRH	Ph	Flujo	SULFUROS	DQO	SST	SSV
0	12.21	240	4215.04	48541.67	23780	8200
30	1.66	240	763.232	31833.33	13940	7640
60	1.52	240	683.456	28500.00	9380	5060
120	0.85	240	763.232	22916.67	8400	4300
180	0.96	240	643.568	25750.00	6860	3520
0	0.98	240	603.68	14916.67	1840	480

### ANEXO 3.-SÓLIDOS TOTALES

EXPERIMENTO	ST(mg/L)
E1-lodo	244755
E2-Lodo	257600
E3-Lodo	308493
E4-Lodo	96925
E5-Lodo	203820
E6-Lodo	154005
E7-Lodo	169056
E8-Lodo	213730
E9-Lodo	205484
E10-Lodo	90672
E11-lodo	191624
E12-Lodo	260337
E13-Lodo	111320
E14-Lodo	183856
E15-Lodo	131832
E16-lodo	69880
E17-Lodo	119110
E18-Lodo	133280
E19-Lodo	74330
E20-Lodo	130420
E21-Lodo	165530
E23-Lodo	125110
E24-Lodo	99290
E25-Lodo	85440
E26-Lodo	127030
E27-Lodo	209350

### SÓLIDOS TOTALES REPETICIONES

E7-lodo	114180
E8-Lodo	8825
E9-Lodo	132000
E16-Lodo	134450
E17-Lodo	122010
E18-Lodo	107830
E21-Lodo	145480
E25-Lodo	128000
E27-Lodo	133000
EU-Lodo	107030