

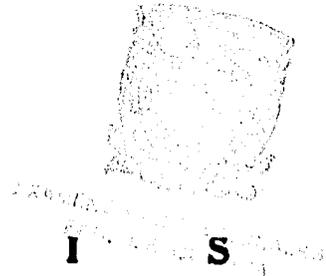
29
28j



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

CALCULO DE UNA PLANTA DE
TRATAMIENTO DE AGUA POR
CLARIFLOCULACION QUIMICA PARA
UNA INDUSTRIA METAL-METALICA



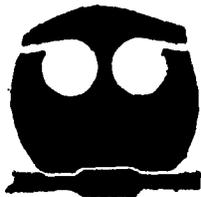
T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE

INGENIERO QUIMICO

P R E S E N T A

JOSE LUIS CARDOSO PONCE DE LEON



MEXICO, D.F.

1995

FALLA DE ORIGEN

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Jurado Asignado:

Presidente Prof. José Francisco Guerra Recasens
Vocal Prof. Ramón Arnaud Huerta
Secretario Prof. José Agustín Texta Mena
1er. Suplente Prof. Rodolfo Torres Barrera
2do. Suplente Prof. Humberto Rangel Dávalos

Sitio donde se desarrollo el tema:

Kampe S.A. de C.V.
Av. División del Norte 1228-801
México D.F.

Asesor:


Ing. Ramón Arnaud Huerta

Sustentaute:


José Luis Cardoso Ponce de León



A mis Padres

AGRADECIMIENTOS

A mis Padres, ya que sin ellos no hubiera podido realizar mis estudios. A Pablo, por su ayuda y orientación.

Al M. en A. Ramón Arnaud Huerta por su paciencia, motivación y dirección durante mis estudios y durante la elaboración de este trabajo; asimismo, por la confianza y el tiempo que me dedicó.

Al jurado M. en I. José Francisco Guerra Recasens, M. en A. Ramón Arnaud Huerta, Ing. José Agustín Texta Mena, Ing. Rodolfo Torres Barrera, Ing. Humberto Rangel Dávalos, por el tiempo dedicado y los valiosos comentarios realizados durante la revisión de este trabajo.

Al Ing. Miguel Angel Luna y al Ing. Luis Castillo por el apoyo incondicional y las facilidades que recibí para elaborar mi tesis.

A Cristina y a Gina que siempre estuvieron dispuestas a ayudarme y orientarme durante la parte experimental este trabajo.

A Carlos, Flor, Federico y Víctor compañeros de toda la carrera. A Javier y a Francisco amigos de toda la vida.

A Vanessa, por haberme soportado durante la carrera y por haber sido más que una amiga.

A todos los maestros que forman parte de la Universidad que me guiaron durante mis estudios.

A la Universidad por haberme dado la oportunidad de formar parte de ella

ÍNDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN	1
2. GENERALIDADES	4
2.1. CONCEPTOS GENERALES	5
2.1.1. Definiciones.....	6
2.1.2. Examen de Aguas Residuales.....	9
2.1.3. Métodos de Tratamiento de las Aguas Residuales	9
2.2. TRATAMIENTO PRELIMINAR	11
2.2.1. Rejas y Cribas de Barras	12
2.2.2. Desmenuzadores.....	12
2.2.3. Desarenadores	12
2.2.4. Tanques de Preaeración.....	13
2.3. TRATAMIENTO PRIMARIO	13
2.3.1. Sedimentación.....	13
2.3.2. Filtración	15
2.3.3. Flotación.....	16

2.4. TRATAMIENTO SECUNDARIO	16
2.4.1. Lodos Activados.....	16
2.4.2. Filtros Goteadores o Rociadores.....	20
2.4.3. Aeración por Contacto.....	20
2.4.4. Floculación	22
2.5. TRATAMIENTO Terciario.....	23
2.5.1. Ozonificación.....	24
2.6. TRATAMIENTO Y ELIMINACIÓN DE LODOS	25
2.6.1. Espesamiento.....	27
2.6.2. Digestión	27
2.6.3. Secado en Filtros de Arena.....	28
2.6.4. Acondicionamiento Químico	28
2.6.5. Elutriación	29
2.6.6. Filtración	30
2.6.7. Secado por Calentamiento.....	30
2.6.8. Enterrado.....	31
2.6.9. Relleno	32
2.6.10. Fertilizante.....	32
2.6.11. Incineración	32
2.7. NORMATIVIDAD EXISTENTE.....	33
3. PRUEBAS DE LABORATORIO.....	35
3.1. PRUEBA DE JARRAS.....	36
3.2. AERACIÓN	38
3.3. OZONIFICACIÓN	38
3.4. ANÁLISIS GENERALES.....	39
3.4.1. Determinación de la Demanda Química de Oxígeno	39
3.4.2. Determinación de la Demanda Biológica de Oxígeno.....	42
3.4.3. Determinación de Sólidos Sedimentables.....	43
3.4.4. Determinación de Sólidos Suspendidos	44
3.4.5. Determinación de Sólidos Totales	45
3.4.6. Determinación de Sólidos Disueltos.....	47
3.4.7. Determinación de Metales.....	47
3.4.8. Determinación de Grasas y Aceites	50
3.4.9. Determinación de Detergentes.....	52
3.5. DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN.....	56
4 TRATABILIDAD	58
4.1. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DEL AGUA EN ESTUDIO.....	59
4.2. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL AGUA EN ESTUDIO.....	59
4.3. PRUEBAS DE TRATABILIDAD	60
4.3.1. Procedimiento Experimental.....	62
4.3.2. Resultados Obtenidos.....	65
4.3.3. Eficiencia Alcanzada	66
4.3.4. Análisis de Resultados.....	74

4.4. PRUEBAS DE SEDIMENTACIÓN.....	74
4.5. RESUMEN DE RESULTADOS	75
5. DISEÑO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO	79
5.1. DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO.....	81
5.2. BASES DE DISEÑO.....	83
5.3. CRITERIOS DE DISEÑO.....	86
5.3.1. Cuarto de Reactivos.....	86
5.3.1.1. Alimentadores de Tasa Constante.....	87
5.3.1.2. Alimentadores Proporcionales.....	89
5.3.2. Unidades Mezcladoras	90
5.3.3. Tanques de Floculación.....	94
5.3.4. Tanques de Sedimentación	96
5.4. DISEÑO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO.....	104
5.4.1. Capacidad de la Planta de Tratamiento.....	104
5.4.2. Cuarto de Reactivos.....	105
5.4.2.1. Tanques de Preparación de Reactivos.....	106
5.4.2.2. Mezcladores	106
5.4.2.3. Alimentadores.....	107
5.4.3. Canal Parshall	107
5.4.4. Floculador	108
5.4.5. Sedimentador.....	108
5.4.6. Filtro Prensa	108
5.4.7. Tanques.....	109
5.4.8. Bombas y Accesorios.....	109
5.4.9. Servicios.....	110
5.5. RESUMEN DE EQUIPOS Y MATERIALES	110
5.6. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO.....	111
6. OPERACIÓN DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO.....	112
6.1. PREPARACIÓN DE REACTIVOS.....	113
6.2. ARRANQUE, OPERACIÓN Y LIMPIEZA	114
6.3. RECOMENDACIONES.....	116
6.4. MANTENIMIENTO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO	117
6.5. PERSONAL REQUERIDO.....	118
7. PRESUPUESTO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO	119
7.1. COSTOS DE MATERIALES Y EQUIPO.....	119
7.2. COSTOS DE CONSTRUCCIÓN	120
7.3. PRESUPUESTO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO	121
7.4. CATÁLOGO DE CONCEPTOS	122
7.5. ANÁLISIS DE LA RENTABILIDAD DEL TRATAMIENTO.....	128

8. CONCLUSIONES	130
9. BIBLIOGRAFÍA	133

Índice de Figuras

Figura 2.1. Esquema Funcional de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales por Aeración.....	15
Figura 2.2. Esquema del Tratamiento de Lodos Activados	19
Figura 2.3. Representación Esquemática del Tratamiento por Flocculación	23
Figura 3.1. Equipo Agitador para Realizar la Prueba de Jarras.....	37
Figura 3.2. Altura de la Interfase Durante la Sedimentación.....	57
Figura 4.1. Desarrollo de la Tratabilidad.....	61
Figura 5.1. Distribución de Equipos de una Planta de Tratamiento de Agua Residual.....	83
Figura 5.2. Alimentador de Solución de Carga Constante	88
Figura 5.3. Alimentador de Orificio de Carga Constante.....	89
Figura 5.4. Esquema de un Canal Parshall.....	93
Figura 5.5. Flocculador con Mamparas de Flujo Horizontal.....	94
Figura 5.6. Sedimentador de Flujo Horizontal	98
Figura 5.7. Dispositivo de Entrada a un Sedimentador.....	102

Índice de Gráficas

Gráfica 4.1. Costo de Reactivos.....	73
Gráfica 4.2. Distancia vs Tiempo de Sedimentación	75
Gráfica 4.3. Resultados Obtenidos.....	77
Gráfica 5.1. Volumen de Descarga	105
Gráfica 7.1. Costo de Construcción.....	125
Gráfica 7.2. Costo de Equipos, Materiales y Accesorios.....	126
Gráfica 7.3. Presupuesto de la Planta de Tratamiento	127

Índice de Tablas

Tabla 2.1. Límites Máximos Permisibles de la Descarga de Agua Residual.....	33
Tabla 3.1. Hoja de Registro de Datos para Realizar la Prueba de Jarras.....	37
Tabla 3.2. Volumen de Muestra contra la Concentración Esperada de ABS.....	54
Tabla 4.1. Resultados del Análisis de Agua Residual	59
Tabla 4.2. Resultados del Análisis del Agua Tratada.....	65
Tabla 4.3. Eficiencia Alcanzada de la Muestra No. 4	67
Tabla 4.4. Dosis Óptima para la Muestra No. 4	67
Tabla 4.5. Eficiencia Alcanzada de la Muestra No. 6	68
Tabla 4.6. Dosis Óptima para la Muestra No. 6	68
Tabla 4.7. Eficiencia Alcanzada de la Muestra No. 7	69
Tabla 4.8. Dosis Óptima para la Muestra No. 7	69
Tabla 4.9. Eficiencia Alcanzada de la Muestra No. 8	70
Tabla 4.10. Dosis Óptima para la Muestra No. 8.....	70
Tabla 4.11. Eficiencia Alcanzada de la Muestra No. 9	71
Tabla 4.12. Dosis Óptima para la Muestra No. 9.....	71
Tabla 4.13. Eficiencia Alcanzada de la Muestra No. 10	72
Tabla 4.14. Dosis Óptima para la Muestra No. 10	72
Tabla 4.15. Eficiencia Alcanzada y Costo del Tratamiento.....	73
Tabla 4.16. Resultados de la Prueba de Sedimentación	74
Tabla 4.17. Comparación de Resultados del Análisis del Agua Residual y el Agua Tratada.....	76
Tabla 4.18. Dosis Óptima de Reactivos	76
Tabla 4.19. Parámetros Óptimos para la Floculación	78
Tabla 5.1. Alternativas para el Tratamiento de Agua Residual	80
Tabla 5.2. Capacidad de la Garganta de un Canal Parshall para Diferentes Gastos	92
Tabla 5.3. Dimensiones del Canal Parshall.....	93
Tabla 5.4. Tiempos de Retención contra Carga Superficial y Profundidad.....	100
Tabla 5.5. Criterios de Diseño de un Sedimentador Rectangular	103
Tabla 5.6. Registro del Volumen de Descarga de Agua Residual	104
Tabla 7.1. Costo de Materiales y Equipo	120
Tabla 7.2. Costos de Construcción	120
Tabla 7.3. Costos Totales.....	121

Índice de Anexos

Anexo 1. Memoria de Cálculo.....	136
Anexo 2. Cálculo de la Rentabilidad del Tratamiento.....	142
Anexo 3. Análisis de Precios Unitarios.....	153
Anexo 4. Planos y Diagramas.....	163
Anexo 5. Criterios de la Calidad del Agua para Reutilizarla en Diferentes Sectores.....	171

1. INTRODUCCIÓN

El agua puede contaminarse en forma natural o como resultado de la acción del hombre (contaminación antropogénica). En el primer caso, más que contaminación se le suele denominar deterioro de la calidad y ocurre cuando las corrientes o los almacenamientos de agua se ponen en contacto con aguas fósiles salinas o con rocas solubles. La contaminación antropogénica, se produce por lo general a causa de las descargas que rebasan la capacidad de autopurificación del agua en los cuerpos receptores. La contaminación de uno y otro origen limita o impide el uso posterior del líquido. Los factores que agravan los problemas de contaminación inducida por el hombre son el crecimiento de la actividad de los diferentes sectores de la economía y los costos asociados al establecimiento de mecanismos de control.

Un 80% de la contaminación del agua en el país proviene de la industria manufacturera, principalmente de las ramas de explotación y refinación del petróleo; fabricación de azúcar, papel y celulosa; industria textil, química y siderúrgica.

En la actualidad, las cuencas con mayores problemas de contaminación son las del Valle de México y las de los ríos Lerma, Pánuco, Coatzacoalcos, Blanco y San Juan. Las áreas de mayor contaminación del agua subterránea son La Laguna y El Valle de México¹.

Gran parte del agua residual que se produce al norte de la Ciudad de México, se descarga al sistema de drenaje profundo, el cual la conduce por el Río Tula a la presa Endó, en Hidalgo, utilizándola finalmente como agua de riego de la zona del Valle del Mezquital. Aunque el agua se autopurifica de manera natural, una gran cantidad de contaminantes son absorbidos por las plantas y regresados a la Ciudad de México en las legumbres que se consumen día con día.

En los últimos años, México ha entrado en una época en la que la concientización del mejor aprovechamiento del agua se ha activado con la formulación de Normas Legales, las cuales, establecen concentraciones límites permitidas de contaminantes en descargas a cualquier tipo de fuente receptora.

Para la mejor utilización y aprovechamiento del agua, se requiere conocer las alternativas de tratamiento existentes, para que después de un análisis desde el punto de vista técnico, económico y social, se seleccione la más adecuada, en base a exigencias de calidad, descarga o reúso al que se destine el agua residual tratada, así como el cumplimiento de las normas que establece la ley para las descargas de aguas residuales.

A pesar de la gran variedad de empresas que desechan aguas altamente contaminadas, en este trabajo se estudiará únicamente a una industria metal-metálica a fin de describir la forma en que se deben de realizar todos los estudios y cálculos que permitan

¹ "Agua y Sociedad". Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. México. 1988.

obtener los parámetros fundamentales para diseñar una planta de tratamiento, y estimar los costos de construcción y operación de la misma.

Aunque se quiere realizar un estudio completo, éste en ningún caso es general, pues todos los tratamientos dependen de las características del agua en estudio. Sin embargo, la secuencia del procedimiento es aplicable a una gran variedad de casos.

Como ya se mencionó, el agua a estudiar es el desecho de una empresa metal-metálica. Se escogió a este tipo de empresa por ser representativa del tipo de industria donde existe una gran cantidad de sustancias contaminantes en el agua residual cuyas concentraciones rebasan los límites permitidos por la legislación existente. Entre las sustancias contaminantes objeto de este estudio se encuentran gran cantidad de metales disueltos, grasas y aceites, condiciones muy ácidas y una gran variedad de componentes que dificultan el tratamiento.

Se presenta una breve descripción de los diversos tipos de tratamiento de aguas que pueden ser aplicados a diferentes casos. Asimismo, se describe como realizar los análisis que permiten obtener los parámetros de calidad del agua en estudio.

Este estudio parte de una manera general en un recorrido por las instalaciones donde se utiliza agua para conocer sus usos y sus posibles contaminantes. Posteriormente, se observan los puntos donde se descarga el agua para averiguar los mejores lugares donde se pueda obtener una muestra representativa que contenga los contaminantes. Se sigue con un análisis del agua residual, para obtener los contaminantes principales, continuando con pruebas de tratabilidad y finalmente de un análisis del agua ya tratada. Una vez seleccionado el mejor tratamiento se procede al diseño de la planta y el cálculo de los costos de construcción y operación.

2. GENERALIDADES

El conocimiento de los efectos acumulativos de la contaminación ha llevado a una mayor preocupación general y a una legislación cada vez más estricta en lo que concierne a la descarga de residuos industriales, líquidos y gaseosos. En el transcurso del tiempo se han establecido tres clases de normas para las aguas receptoras:

1. Normas que protegen la calidad del agua receptora, al prescribir el grado de dilución de las aguas residuales que aportará la corriente receptora.
2. Normas para los efluentes, que prescriben el grado de calidad requerido, para que se permita descargar los mismos en las aguas receptoras.
3. Normas respecto a las corrientes, que prescriben la calidad requerida en las aguas receptoras en sí, después de que han recibido las aguas residuales o efluentes.

La prevención de la contaminación en las corrientes de agua tiene sólidas razones económicas, ya que el agua es una materia prima esencial para numerosos procesos industriales y constituye por consiguiente un vital recurso natural.

El tratamiento del agua de desecho industrial puede ser muy complejo o relativamente simple, dependiendo del uso que se le haya dado. Se emplean muchos métodos y combinaciones de ellos, pero todos abarcan uno de los cuatro procesos básicos: tratamiento físico, químico, fisicoquímico y biológico².

En el diseño de procesos de tratamiento de aguas de desecho es necesario tener en mente los siguientes objetivos:

1. La conservación de las fuentes de abastecimiento de agua para uso doméstico.
2. La conservación del agua para usos industriales y agrícolas.
3. La prevención de enfermedades y molestias.
4. Mantener limpias las aguas que se usan para la propagación y supervivencia de peces.

Una planta de tratamiento se diseña para retirar de las aguas de desecho las cantidades suficientes de sólidos orgánicos e inorgánicos, sin infringir los objetivos antes establecidos.

2.1. CONCEPTOS GENERALES

Las aguas residuales son fundamentalmente las aguas de abastecimiento de una población, después de haber sido contaminadas por diversos usos. Resultan de la combinación de los líquidos o desechos arrastrados por el agua, procedentes de las casas

² Ramalho, R.S. "Introduction to Wastewater Treatment Process". New York, Academic Press, 1983.

habitación, edificios e industrias, y las aguas subterráneas, superficiales o de precipitación que puedan agregarse³.

Las aguas residuales pueden ser originadas por:

1. Desechos humanos y animales.
2. Desperdicios caseros.
3. Corrientes pluviales.
4. Infiltraciones de aguas subterráneas.
5. Desechos industriales.

Los desechos industriales contienen agentes espumantes, detergentes y muchas otras sustancias químicas que interfieren con la eliminación final de las aguas negras de la comunidad, o que dañan las alcantarillas y otras estructuras, por lo que no pueden agregarse directamente a las aguas negras sanitarias, sino que deben recibir un tratamiento previo.

2.1.1. Definiciones

Desechos Industriales. Son las aguas de desecho provenientes de los procesos industriales. Pueden colectarse y tratarse aisladamente o combinarse con las aguas negras sanitarias.

Demanda Teórica de Oxígeno (DThO). Corresponde a la cantidad estequiométrica de oxígeno requerida para oxidar completamente un compuesto. Esta demanda tiene poca aplicación, pues rara vez se conoce con exactitud la concentración de todos los compuestos presentes en el agua en estudio.

³ "Manual de Tratamiento de Aguas Negras". Departamento de Sanidad del Estado de Nueva York. Ed. Limusa. 1993

Demanda Total de Oxígeno (DTO). Corresponde a la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar todos los compuestos orgánicos presentes.

Demanda Química de Oxígeno (DQO). Corresponde a la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar una fracción orgánica. En las aguas domésticas generalmente

$$DQO \approx 80-85\% DThO$$

Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO). Es la cantidad de oxígeno que se requiere para la oxidación biológica de los sólidos orgánicos de las aguas residuales. Se utiliza para conocer de manera indirecta la cantidad de materia orgánica biodegradable a tratar⁴.

Por lo general:

DThO	100%
DTO	92%
DQO	83%
DBO	65%

Sólidos Orgánicos. Sólidos de origen vegetal o animal, que incluyen los productos de desecho de la vida: la materia animal muerta, organismos y tejidos vegetales. Se incluyen también compuestos orgánicos tales como proteínas, hidratos de carbono y grasas. Estos sólidos pueden ser quemados.

Sólidos Inorgánicos. Son sustancias inorgánicas que por lo general no están sujetas a descomposición biológica. Por lo general no son combustibles, entre estos se encuentran: arena, grava y sales minerales.

⁴ "Manual de Tratamiento de Aguas Negras". Departamento de Sanidad del Estado de Nueva York. Ed. Limusa. 1993

Sólidos Suspendidos. Son aquellos que se encuentran en suspensión y pueden ser vistos a simple vista. Estos sólidos se pueden separar por medios mecánicos.

Sólidos Sedimentables. Forman parte de los sólidos suspendidos y son aquellos cuyo tamaño y peso son suficientes para que sedimenten durante un cierto período de tiempo. Es un parámetro aplicable para considerar la necesidad de contar con un sistema de pretratamiento, o bien, para determinar el llamado índice volumétrico de lodos, un parámetro de control para la operación de unidades de tratamiento biológico.

Sólidos Coloidales Suspendidos. Son la diferencia entre los sólidos suspendidos totales y los sólidos suspendidos sedimentables. Constituyen la fracción de los sólidos suspendidos totales que no puede eliminarse fácilmente por medios mecánicos.

Sólidos Disueltos. Son todos los sólidos que pasan a través de la capa filtrante de asbesto de un crisol Gooch. Es un parámetro indicador de la cantidad de sales del influente.

Sólidos Totales. Son todos los constituyentes sólidos de las aguas residuales. Representan la totalidad de los sólidos orgánicos e inorgánicos, es decir, la suma de los sólidos suspendidos y disueltos.

Metales. Debe dedicarse mucha atención a la presencia de ellos por su toxicidad no únicamente como de agua de uso, sino también porque pueden inhibir parcial o totalmente la actividad microbiana.

Detergentes. Se les conoce como Sustancias Activas al Azul de Metileno (SAAM). Son grandes moléculas orgánicas ligeramente solubles en agua que causan problemas de espumas en las plantas de tratamiento. Aquellos que provienen de los sulfonatos de alquilbenceno (ABS) causan dificultades por su resistencia a la descomposición por medios biológicos.

Grasas y Aceites. Son compuestos orgánicos muy estables, no pueden ser fácilmente descompuestos por las bacterias. En el caso de los aceites flotan llegando a formar una capa que no permite la transferencia de gases entre la atmósfera y el agua por tratar. Se pueden retirar por el proceso de flotación.

2.1.2. Examen de Aguas Residuales

En general, las pruebas incluidas en el análisis de aguas negras, efluentes de planta de tratamiento y aguas contaminadas, están dentro de alguna de las siguientes categorías que se superponen en mayor o menor grado:

1. Pruebas que miden o reflejan la concentración de las aguas residuales en relación con sólidos y materia orgánica.
2. Pruebas que miden la composición de las aguas negras.
3. Pruebas que miden la condición de las aguas negras y que explican el progreso de la descomposición de las sustancias orgánicas en las aguas residuales, efluentes y aguas receptoras.
4. Pruebas referentes a los procesos de tratamiento.
5. Pruebas funcionales.

2.1.3. Métodos de Tratamiento de las Aguas Residuales

En el tratamiento de las aguas residuales los sólidos que el líquido contiene son separados parcialmente, logrando que los sólidos orgánicos muy putrescibles queden convertidos en sólidos relativamente estables. Asimismo, se eliminan los metales disueltos y otras sustancias orgánicas e inorgánicas. Finalmente, se destruyen los organismos patógenos presentes.

Los métodos usados para el tratamiento de las aguas, pueden incluirse dentro de los procesos siguientes:

1. **Tratamiento preliminar.** Sirve para eliminar o separar los sólidos mayores o flotantes, para eliminar sólidos inorgánicos pesados y eliminar cantidades excesivas de grasas y aceites. Comúnmente se emplean los siguientes dispositivos: rejas de barras, desmenuzadores, desarenadores, tanques de preaeración, etc.
2. **Tratamiento primario.** En este tipo de tratamiento se separa la mayoría de los sólidos suspendidos. En este tratamiento se trata de disminuir la velocidad de las aguas para que puedan sedimentarse los sólidos. Los tanques de sedimentación utilizados se pueden dividir en las siguientes categorías: tanques sépticos, tanques de doble acción, tanques de sedimentación simple y clarificadores de flujo ascendente. Si se utilizan productos químicos, se necesitan unidades auxiliares como lo son: unidades alimentadoras de reactivos, mezcladores y floculadores.
3. **Tratamiento secundario.** Este tratamiento depende principalmente de los organismos aerobios y anaerobios. Los equipos que se utilizan para este tratamiento son principalmente: filtros goteadores, tanques de aeración, filtros de arena intermitentes y estanques de estabilización.
4. **Cloración.** Este es un método auxiliar que sirve para destruir organismos patógenos, abatir o ajustar la DBO, oxidar cierto tipo de compuestos, etc.
5. **Tratamiento de los lodos.** Los lodos son principalmente sólidos que se eliminan en los tratamientos anteriores, generalmente es necesario tratarlos para prepararlos o acondicionarlos para disponer de ellos. Entre los métodos que se pueden utilizar se encuentran los siguientes: espesamiento, digestión, secado, elutriación, filtración e incineración.

Una vez llevado a cabo el tratamiento de las aguas, éstas se pueden eliminar de tres maneras:

1. **Eliminación por irrigación.** Consiste en derramar las aguas de desecho sobre la superficie del terreno.
2. **Eliminación subsuperficial.** Consiste en hacer llegar las aguas a la tierra por debajo de su superficie, a través de excavaciones o enlozados.
3. **Eliminación por dilución.** Consiste en descargar las aguas residuales en ríos, lagos o al mar.

2.2. TRATAMIENTO PRELIMINAR

El objetivo de este tratamiento consiste en separar de las aguas residuales aquellos constituyentes que pudiesen obstruir o dañar las bombas, o interferir con los procesos subsecuentes del tratamiento. Este tratamiento sirve para:

1. Separar o disminuir el tamaño de los sólidos orgánicos grandes, tales como trozos de madera, telas, papel, basura, etc.
2. Separar los sólidos inorgánicos pesados como la arena, la grava y algunos objetos metálicos.
3. Separar cantidades excesivas de aceites y grasas.

Para realizar el tratamiento preliminar se utilizan los siguientes equipos: rejas y cribas de barras, desmenuzadores, desarenadores y tanques de preareación.

2.2.1. Rejas y Cribas de Barras

Estas rejas y cribas se encuentran formadas por barras espaciadas desde 2 hasta 15 cm. Tienen claros de 2.5 a 5 cm. Los sólidos separados por estas rejas, se pueden eliminar depositándolos en rellenos sanitarios, incinerándolos o reduciéndolos de tamaño con trituradoras o desmenuzadoras y reintegrándolos a las aguas residuales.

2.2.2. Desmenuzadores

En este tratamiento se utilizan molinos, cortadoras y trituradoras, con el fin de romper o cortar los sólidos hasta un tamaño tal que no exista peligro de obstruir las bombas y tuberías. También se utiliza este método cuando los sólidos presentes pueden interferir en el tratamiento posterior al que se someterá el agua residual.

2.2.3. Desarenadores

Debido a que las arenas presentes en las aguas residuales pueden causar abrasión en las bombas, dificultades de operación en los tanques de sedimentación o acumularse alrededor de las salidas de los tanques causando obstrucciones, se deben eliminar. Esta eliminación se lleva en desarenadores, que son tanques en forma de canales, donde la velocidad del agua disminuye lo suficiente para que se depositen los sólidos inorgánicos pesados. La velocidad debe de ser lo más cercana a 30 cm/segundo, pues a velocidades mayores no se asentarán las arenas y a velocidades inferiores se pueden sedimentar los sólidos suspendidos presentes.

2.2.4. Tanques de Preaeración

En ocasiones se utiliza un tanque de preaeración antes de un tratamiento primario para lograr lo siguiente:

1. Obtener una mayor eliminación de sólidos suspendidos en los tanques de sedimentación.
2. Ayudar a la eliminación de grasas y aceites.
3. Refrescar las aguas sépticas antes de llevar a cabo el tratamiento.
4. Disminuir la DBO.

Estos tanques de preaeración son similares a los tanques de aeración utilizados en el tratamiento primario.

2.3. TRATAMIENTO PRIMARIO

El objetivo del tratamiento primario consiste en retirar de las aguas residuales los sólidos orgánicos e inorgánicos sedimentables, mediante el proceso físico de sedimentación. Esto se lleva a cabo reduciendo la velocidad del agua a 1 o 2 cm/segundo. Los principales dispositivos para el tratamiento primario son los tanques de sedimentación.

2.3.1. Sedimentación

La función principal de los tanques de sedimentación consiste en separar los sólidos sedimentables de las aguas residuales, mediante el proceso de asentamiento. Los sólidos asentados se sustraen continuamente o en intervalos frecuentes, para no dar tiempo a que se desarrolle la descomposición con formación de gases. Los sólidos pueden irse acumulando por gravedad, en una tolva o embudo, o hacia un punto más bajo del fondo del tanque, de donde se bombean o descargan por la acción de la presión hidrostática.

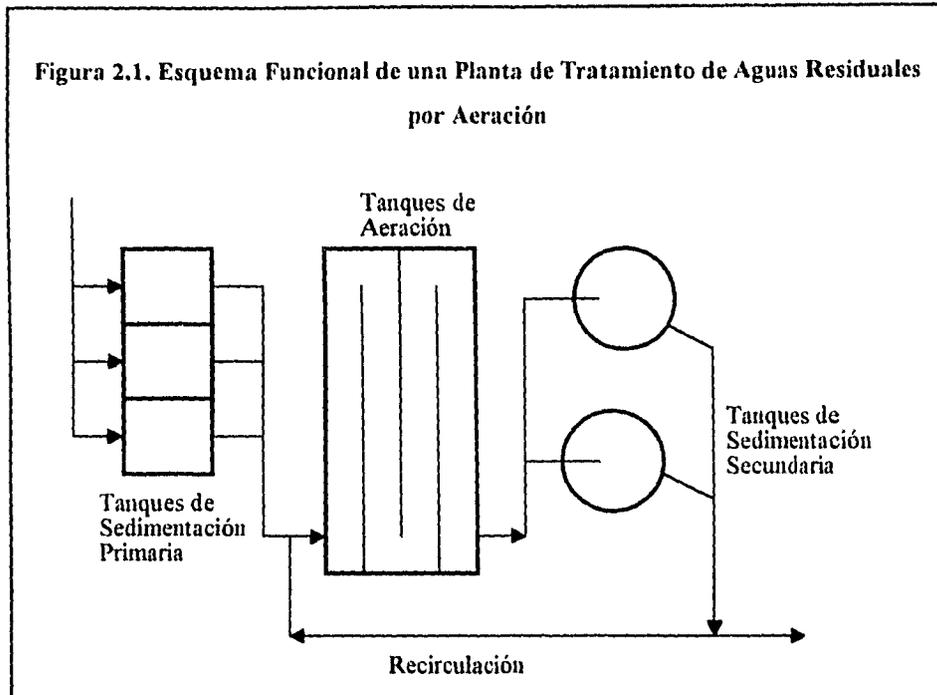
La sedimentación es útil para remover partículas que se asientan con facilidad, impurezas coaguladas e impurezas precipitadas. Los tanques de sedimentación pueden ir precedidos de tanques de aeración y floculación. En el tratamiento de aguas residuales estos tanques se clasifican en:

1. **Cámaras desarenadoras.** La función de estas cámaras consisten en separar los sólidos inertes presentes. Se utilizan al inicio del tratamiento.
2. **Tanques de sedimentación primarios.** Tienen el propósito de colectar gran parte de la carga de sólidos en suspensión, antes de la descarga a una etapa de tratamiento posterior.
3. **Tanques de sedimentación secundarios.** Estos tanques sirven para colectar las sustancias convertidas en sólidos sedimentables, que se han acondicionado mediante un proceso de tratamiento físico, químico o biológico en los lodos y flóculos.

Por ejemplo, en la figura 2.1 se muestra el esquema funcional de una planta de tratamiento de aguas residuales con tanques de sedimentación primarios y secundarios.

El tamaño, peso y forma de la partícula, así como su resistencia a la fricción y viscosidad, desempeñan un papel importante en el diseño de los sedimentadores; esto se debe a que engloban el agua determinando de esta manera la geometría de la zona de asentamiento o elevación. Su concentración en volumen y el lapso esperado de almacenamiento establecen las dimensiones de la zona de fondo y de la zona para espumas.

Los depósitos de sedimentación pueden construirse de tierra, madera, concreto o acero; su forma puede ser rectangular o circular y el período de retención varía generalmente entre 4 y 12 horas. Para que la operación sea eficiente, la entrada y la salida del agua debe distribuirse de tal forma que proporcione un flujo uniforme dentro del depósito.



2.3.2. Filtración

La filtración es un proceso que consiste en separar las impurezas suspendidas del agua mediante el paso a través de un medio poroso. Este proceso es complementario al proceso de sedimentación, por lo que podría ser un tratamiento terciario.

Las dimensiones de los filtros y de sus accesorios dependen de la calidad del agua entrante, tipo de filtro, carga de proceso e hidráulica, naturaleza, tamaño y material del filtro. Los filtros que separan los flocos formados del agua que fue sometida al tratamiento de floculación y posteriormente a sedimentación, pueden ser pequeños, de grano grueso o de velocidad elevada.

2.3.3. Flotación

La flotación es una operación unitaria que se aplica, por lo general, de las dos formas siguientes: flotación natural y flotación por medio de aire. En la flotación natural, los aceites, grasas y otras sustancias más ligeras que el agua tienden a elevarse hacia la superficie de los tanques. Las natas superficiales que se forman se separan en forma análoga a la remoción de los lodos de los tanques de sedimentación. En la flotación por medio de aire, las partículas finas que son más pesadas que el agua, se elevan y se mantienen en la superficie de los tanques debido a la ayuda del aire y agentes de flotación.

2.4. TRATAMIENTO SECUNDARIO

En este tipo de tratamiento se emplean cultivos biológicos para llevar a cabo una descomposición del material orgánico en presencia o ausencia de oxígeno, transformándolo en compuestos más estables. Principalmente se utilizan en este tratamiento dos métodos: los lodos activados y los filtros goteadores. Entre estos existe una diferencia operacional: en los filtros goteadores, los organismos están adheridos al medio filtrante y hacia ellos va el material orgánico. En los lodos activados, son los organismos los que se llevan hasta la materia orgánica. En ambos métodos se deben mantener las condiciones ambientales que sean favorables para el ciclo vital de los organismos y controlar la cantidad de materia orgánica que descompongan.

2.4.1. Lodos Activados

El desarrollo del proceso de lodos activados ha marcado un progreso importante en el tratamiento secundario de las aguas residuales. Asimismo, es el proceso biológico de mayor uso en el tratamiento de aguas residuales domésticas e industriales.

Este proceso está basado en la eliminación de la DBO soluble. Esta eliminación es resultado del proceso de oxidación biológica que ocurre en un tanque aerador. La DBO insoluble es removida por sedimentación. En el proceso convencional de lodos, la DBO soluble se reduce hasta el 15~5% de la alimentación, es decir, la eficiencia de eliminación es del 85~95%⁵.

El proceso consiste, principalmente, en poner en contacto las aguas residuales con organismos vivos aerobios, mezclándose en un medio ambiente favorable para la descomposición aerobia de los sólidos. La materia en suspensión y la coloidal que contienen las aguas negras se elimina rápidamente, pues cuando se agitan en presencia de aire, los sólidos suspendidos forman núcleos sobre los cuales se desarrolla la vida biológica, formando partículas más grandes que se conocen como lodos activados. Esta materia y los nutrientes disueltos se descomponen lentamente por el metabolismo microbiano. Los requerimientos de oxígeno de los flóculos se suplen por absorción del aire, la que se origina en la atmósfera o en el aire comprimido inyectado a las aguas residuales que fluyen.

Sólo una pequeña porción de los microorganismos presentes en los lodos genera una nueva masa microbiana. Un considerable número de los organismos no se reproduce, pero conserva cierta actividad bioquímica. La naturaleza floculenta de los lodos está asociada con su condición moribunda. Los flóculos frescos generados espontáneamente, es decir, sin la recirculación de flóculos previamente formados, durante el paso de las aguas residuales a través de la unidad de aeración, no son suficientemente grandes en volumen o en área para que exista una transferencia considerable de las impurezas del líquido a la fase sólida.

Para alcanzar las concentraciones necesarias de flóculos y las intensidades de exposición, se recirculan flóculos formados previamente hacia el influente. Después de que se ha alcanzado un estado estable, una parte de los lodos se debe desechar como un exceso en vez de recircularse al reactor.

⁵ Ramalho, R.S. "Introduction to Wastewater Treatment Process". New York, Academic Press, 1983.

Los lodos activados son flóculos de color pardo, formados por materia orgánica, bacterias y otras formas de vida biológica, como hongos y protozoarios. Tienen la propiedad de absorber y adsorber la materia orgánica coloidal y disuelta, utilizándola como alimento y convirtiéndola en sólidos insolubles no putrescibles. Esta transformación se realiza en varias etapas: primero, algunas bacterias descomponen las sustancias complejas presentes desechando compuestos simples. Posteriormente, otras bacterias utilizan estos productos de desecho produciendo sustancias aún más simples, el proceso continúa hasta que no se pueden seguir transformando las sustancias⁶.

El proceso de oxidación suministra la energía necesaria para la operación de las etapas de adsorción y asimilación. Cuando se alcanza el grado de tratamiento que se desea, los lodos se separan por sedimentación. La mayor parte del lodo asentado se regresa a la etapa de aeración para mantener la concentración de lodos en el tanque de aeración al nivel necesario para un tratamiento efectivo y para que actúe como un inóculo microbiano. Debido a que se producen mayor cantidad de lodos de los que se requieren, una parte de estos se retira del proceso de tratamiento y se acondiciona para su eliminación final.

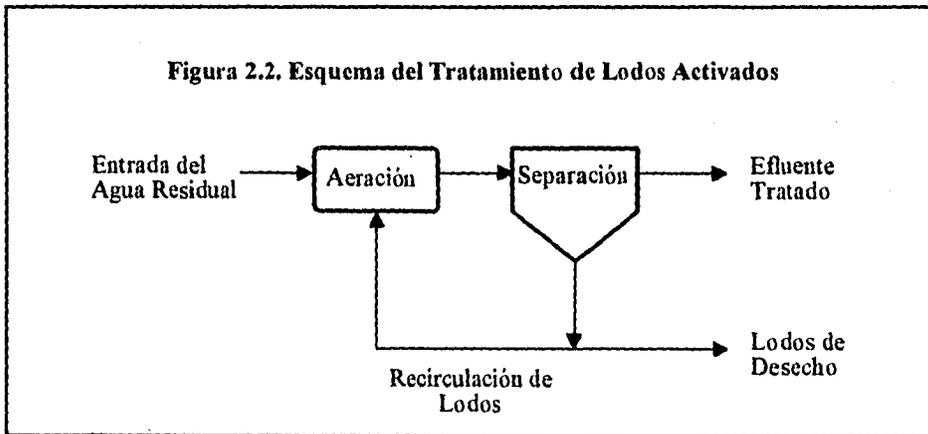
La eficacia del proceso depende principalmente del oxígeno disuelto en las aguas negras y de que los lodos se mantengan en suspensión durante el período de contacto. Las etapas del proceso de lodos activados son las siguientes:

1. Mezclado y agitación de los lodos activados con las aguas residuales que se van a tratar.
2. Aeración y agitación de este licor durante un período de tiempo.
3. Separación de los lodos del licor mezclado.
4. Recirculación de los lodos.
5. Eliminación del exceso de lodos activados.

Durante la operación de una planta de tratamiento de lodos activados se debe considerar lo siguiente:

⁶ Winkler, Michael A. "Tratamiento Biológico de Aguas de Desecho". Ed. Limusa. 1993

1. El contenido de oxígeno disuelto debe de ser mayor de 2 ppm durante todo el tiempo a través del volumen total de los tanques de aeración, excepto en las inmediaciones de la alimentación.
2. Los lodos activados se deberán recircular continuamente desde el tanque de sedimentación final a los tanques de aeración. La proporción óptima de recirculación varía entre el 20 y 30% del gasto de aguas residuales.
3. El contenido óptimo de sólidos suspendidos en los tanques de aeración varía entre 1,000 y 2,500 ppm. El contenido de los sólidos suspendidos puede ser controlado por la cantidad de lodos que se recirculen.
4. Los lodos que se mantengan demasiado tiempo en el tanque de sedimentación final, se volverán sépticos, perderán su actividad y agotarán el contenido de oxígeno disuelto.



Las aguas industriales contienen sustancias que pueden resultar inapropiadas para el metabolismo microbiano, por lo que en algunos casos es necesario añadir nutrientes suplementarios a las aguas. También se puede obtener el balance nutritivo mezclando las

aguas residuales industriales con los residuos domésticos, para dar un tratamiento combinado.

2.4.2. Filtros Goteadores o Rociadores

Un filtro goteador es un dispositivo que pone en contacto las aguas residuales sedimentadas con cultivos biológicos. Estos filtros son unidades resistentes que no se dañan fácilmente por cargas violentas, distinguiéndose por la estabilidad de su funcionamiento y por ser capaces de resistir malos tratos. La desventaja de estos filtros es que ocupan grandes superficies y su construcción es muy costosa.

Un filtro goteador típico se encuentra formado por tres partes:

1. Lecho o medio filtrante.
2. Sistema recolector.
3. Mecanismo para distribuir uniformemente las aguas sobre la superficie del filtro.

2.4.3. Aeración por Contacto

Los sistemas de aeración tienen varios objetivos:

1. Adición de oxígeno a las aguas para oxidar hierro y manganeso disueltos. Para mantener la concentración de oxígeno disuelto necesaria en el tratamiento y evacuación de las aguas residuales.
2. Sirve para eliminar el bióxido de carbono y reducir la corrosión e interferencia cuando se realiza el ablandamiento con cal.

3. Sirve para remover el ácido sulfhídrico y eliminar olores, disminuir la corrosión de los metales que forman las tuberías y la desintegración del cemento y concreto.
4. Por medio de la aeración se puede retirar el metano disuelto, previniendo así explosiones e incendios.
5. Finalmente, se pueden remover aceites y otras sustancias volátiles.

La aeración es sólo una de las formas de intercambio de gases. Existen otras en las que el agua se encuentra expuesta a un gas específico en vez de al aire natural. Por ejemplo, se puede adicionar bióxido de carbono para recarbonatar el agua y remover ácido sulfhídrico. También, se puede agregar ozono o cloro gaseoso, para eliminar olores y obtener una oxidación completa.

Las plantas de aeración por contacto consisten en cinco tanques en serie, en los que se lleva a cabo la sedimentación primaria, la primera etapa de aeración, la sedimentación intermedia, la segunda etapa de la aeración y la sedimentación final, respectivamente.

La disolución del oxígeno no es la única función del sistema de aeración, ya que también suministra la agitación necesaria para mantener en suspensión los flocos de lodo y el licor mezclado tan homogéneamente como sea posible en un sistema de tres fases. Si la agitación es insuficiente para mantener en suspensión a los flocos de lodos, el contacto reducido entre microorganismos y nutrientes retardará la tasa de remoción de nutrientes. En el peor de los casos, los lodos pueden estar asentados en el fondo del tanque de aeración y formar una capa anaeróbica putrefacta de limo.

Existen sistemas de aeración por burbujas con difusores de burbujas finas, medias y gruesas, y sistemas de aeración mecánica, donde se encuentran los aeradores de paletas, de turbina, sistemas combinados de agitación y aeración por aspersión así como sistemas de chorros de líquido. Asimismo, existen aeradores por gravedad y de boquillas.

2.4.4. Floculación

La floculación es el proceso en el cual las partículas floculentas o floculadas se unen entre sí mientras el fluido se mueve lentamente. Estrictamente hablando, la floculación es el movimiento lento o agitación del agua residual que contiene floculos. El movimiento o agitación puede iniciar tan pronto como se agrega un coagulante químico⁷.

Este tratamiento consiste en agregar uno o más reactivos a las aguas residuales para producir un floculo, el cual, es un compuesto químico insoluble con una enorme área de superficie por unidad de volumen y que absorbe la materia coloidal, envolviendo a los sólidos suspendidos no sedimentables y que se deposita rápidamente. La sustancia química que se precipita, también se disocia o ioniza en las aguas residuales y neutraliza las cargas eléctricas que tienen las partículas coloidales, haciendo que se aglomeren y formen grumos fácilmente sedimentables.

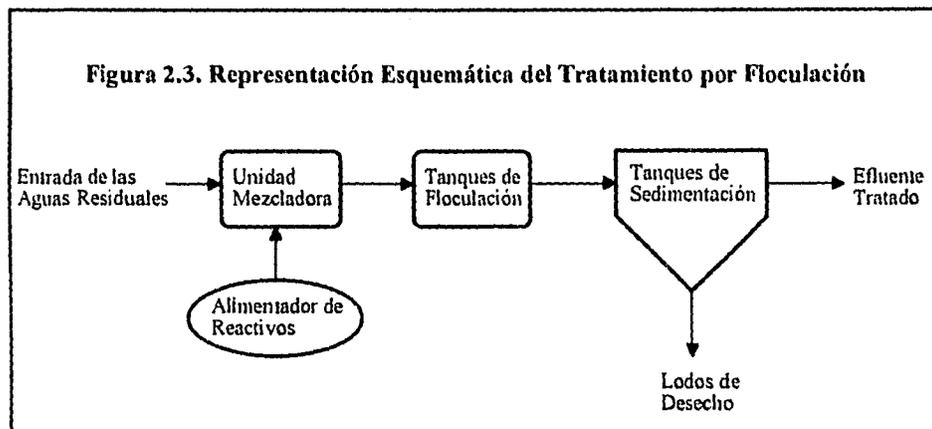
Generalmente una planta de tratamiento por floculación consta de las siguientes unidades:

1. **Alimentadores de reactivos.** Se requiere una unidad de alimentación de reactivos, en cantidades controladas ya sea secos o en solución. Deben de ser de diseño sencillo y fáciles de operar.
2. **Unidades mezcladoras.** Al agregar los reactivos, éstos se deben mezclar completa y rápidamente para que las reacciones sean completas y uniformes. Esto se logra con una agitación violenta durante un corto período de tiempo. Para realizar este mezclado existen unidades como los canales Parshall, mezcladores de salto hidráulico y vertedores.

⁷ Schulz, Christopher R. y Okun, Daniel A. "Tratamiento de Aguas Superficiales para Países en Desarrollo". Ed. Limusa. 1990.

3. **Tanques de floculación.** Estos equipos tienen la finalidad de producir gradientes de velocidad altos en su entrada y bajos en su salida, con el objeto de obtener un mezclado y aglomeración eficiente de las partículas floculadas. Existen de muy diversos tipos como los floculadores con canal de mamparas, de chorro hidráulico y de lecho de grava.
4. **Tanques de sedimentación.** En estos tanques se separan los flóculos del agua utilizando la acción que ejerce la fuerza de gravedad sobre las partículas más pesadas. Existen tanques de flujo horizontal y de flujo vertical.

El esquema típico de un tratamiento por floculación es el siguiente:



2.5. TRATAMIENTO Terciario

El objetivo de este tipo de tratamiento es lograr una calidad del efluente muy superior a la obtenida por los métodos de tratamiento anteriores. Dentro de los tratamientos que se encuentran clasificados como terciarios se pueden citar: adsorción con carbón activado, ósmosis inversa, electrodiálisis, procesos de oxidación química, eliminación de fósforo y nitrógeno.

2.5.1. Ozonificación

El ozono tiene una serie de características que lo hacen atractivo para la purificación del agua:

1. Es un oxidante fuerte que reacciona rápidamente con la mayoría de los compuestos orgánicos y microorganismos presentes.
2. No imparte gustos y olores al agua.
3. Se produce a partir del oxígeno atmosférico por medio de energía eléctrica, lo cual dentro de la tecnología moderna constituye un proceso altamente atractivo, considerando la disponibilidad del aire y los avances en generación de energía eléctrica.

Las desventajas se refieren a los costos y rendimientos del equipo generador de ozono, y a la calidad de los métodos de inyección de gas; ya que el gas debe inyectarse con una ligera presión con el fin de evitar pérdidas de la mezcla ozono/aire u ozono/oxígeno que es costosa, tóxica y corrosiva.

El ozono se aplica para:

1. Eliminar color, sabor y olor.
2. Desinfectar.
3. Eliminar hierro y manganeso.
4. Oxidar fenol y cianuro.

El ozono esta sujeto a descomposición en fase gaseosa y en disolución. Esta descomposición aumenta con la temperatura y es catalizada por sustancias tales como bases sólidas, metales, óxidos metálicos, carbón y humedad presentes en la fase gaseosa. En disolución, esta descomposición es mucho más rápida puesto que se cataliza con el ion hidruro.

La elevada reactividad del ozono viene reflejada por su fuerte tendencia a descomponerse. Tiene la capacidad de oxidar la mayor parte de elementos y compuestos a su estado más elevado de oxidación. Sin embargo, esto implica unas condiciones de reacción ideales que rara vez se encuentran en los sistemas de tratamiento de aguas residuales. El curso y grado de las oxidaciones por ozono puede variar considerablemente de un caso a otro, dependiendo de factores tales como, la naturaleza y concentración de los reactivos, la temperatura, el pH y el tiempo de reacción. Es raro que se descompongan compuestos poco reactivos como hidrocarburos saturados y alifáticos halogenados.

El ozono se genera en el mismo lugar y momento, debido a su inestabilidad. Se genera a partir de aire seco u oxígeno aplicando una descarga eléctrica de alto voltaje. Una descarga eléctrica de 5 mil a 30 mil voltios tiene lugar entre electrodos separados por una capa eléctrica a través de la cual circula un caudal de aire u oxígeno. El rendimiento es aproximadamente de 150 g de ozono/kW-h.

2.6. TRATAMIENTO Y ELIMINACIÓN DE LODOS

Los lodos de las aguas residuales son una mezcla de aguas residuales y sólidos sedimentados. Por su origen reciben el nombre de primarios, secundarios, exceso de lodos activados o lodos químicos. Por su estado o tratamiento recibido pueden denominarse crudos o frescos, digeridos, elutriados, húmedos o secos.

Los lodos se tratan para facilitar su eliminación. Los diversos procesos de tratamiento tienen dos objetivos:

1. Disminuir el volumen de material que va a ser manejado, por la eliminación de parte o toda la porción líquida.

2. Descomponer la materia orgánica muy putrescible a compuestos orgánicos e inorgánicos, relativamente estables o inertes, de los cuales pueda separarse el agua con mayor facilidad.

La cantidad y composición de los lodos varían según las características de las aguas residuales de donde hayan sido retirados y depende del proceso de tratamiento por medio del cual hayan sido obtenidos.

La proporción de sólidos y de agua en los lodos depende de la naturaleza de los sólidos, de su procedencia y de la frecuencia con que sean removidos. La concentración de los lodos es importante porque el volumen que ocupan es inversamente proporcional al contenido de sólidos. Es conveniente manejar lodos lo más concentrados posibles, por las siguientes razones:

1. Para economizar espacio de almacenamiento en el digestor.
2. Para hacer que dure más el periodo de digestión de los sólidos.
3. Para economizar capacidad en las bombas.
4. Para que los digestores con calentamiento requieran menores cantidades de calor.

Entre los métodos de tratamiento de lodos se pueden citar los siguientes: espesamiento, digestión con o sin calentamiento, secado sobre lecho de arena, acondicionamiento químico, elutriación, filtración al vacío, secado con calor y oxidación química.

Una vez que se han cambiado las características de los lodos y reducido su volumen, éstos deben eliminarse. Existen dos métodos para eliminar los lodos: su eliminación en el agua y su eliminación en la tierra.

La eliminación en agua, es el método más económico, pero poco común, debido a que depende de la disponibilidad de masas de agua adecuadas que lo permitan.

La eliminación en la tierra consiste en deshacerse de los lodos por diferentes métodos: confinamiento, relleno, incineración y aplicación como fertilizantes.

2.6.1. Espesamiento

Este proceso consiste en concentrar los lodos diluidos para hacerlos más densos, en tanques especiales diseñados para este propósito. Su uso se limita principalmente al exceso de lodos acuosos del proceso de lodos activados, y a las plantas grandes de este tipo en las que los lodos se mandan directamente a los digestores.

El tanque espesador está equipado con paletas verticales de movimiento lento, construidas como vallas de defensas. Los lodos se bombean continuamente del tanque de sedimentación al espesador, el cual tiene una baja velocidad de derrame, de manera que el exceso de agua se derrama y los sólidos de los lodos se concentran en el fondo. Se mantiene una capa de lodo en el fondo, mediante su remoción controlada, que puede ser continua y lenta.

2.6.2. Digestión

El propósito de la digestión es lograr una disminución en el volumen y la descomposición de la materia orgánica muy putrescible hasta formar compuestos orgánicos e inorgánicos inertes. La digestión de los lodos se lleva a cabo en ausencia de oxígeno libre, por los organismos anaerobios. Los organismos vivos rompen la compleja estructura molecular de los lodos, liberando agua y obteniendo oxígeno y alimento para su desarrollo.

Cuando la digestión de los lodos se lleva a cabo en un solo tanque, los sólidos frescos se van agregando a intervalos frecuentes con los sólidos estabilizados que se van retirando para ser sometidos a un tratamiento posterior o a eliminación.

Como la digestión es efectuada por organismos vivos, conviene proporcionarles un medio ambiente en el que sean más activos y lleven a cabo su trabajo en el menor tiempo posible. Los factores ambientales que intervienen son: la humedad, la temperatura, la disponibilidad de alimentación adecuada y la alcalinidad. A estos factores podría añadirse la presencia de productos químicos tóxicos para tales organismos.

Hay muchos tipos de unidades que se usan para la digestión de lodos, con diferencias en su construcción y en los recursos para la operación.

2.6.3. Secado en Filtros de Arena.

Aún en el mejor de los casos, los lodos más concentrados de un digestor, contienen demasiada agua para que puedan ser eliminados satisfactoria y económicamente. El lecho secador es un dispositivo que elimina una cantidad de agua suficiente para que el resto pueda manejarse como material sólido, con un contenido de humedad inferior al 70%.

Uno de los dispositivos para secado es el lecho secador de arena, el cual consiste de una capa de grava de tamaño regular, bajo una capa de arena limpia. Bajo la capa de grava debe haber colectores de teja de junta abierta.

2.6.4. Acondicionamiento Químico

El acondicionamiento químico de los lodos por medios químicos, los prepara para un mejor y más económico tratamiento ulterior con filtros al vacío o centrífugas. Se han empleado productos químicos muy variados, como el ácido sulfúrico, el alumbre, el sulfato ferroso, el cloruro férrico, cal y otros más. El factor determinante es el costo de los productos químicos.

La adición del producto químico baja el valor del pH, hasta el punto que las partículas más chicas se coagulan formando otras más grandes y el agua contenida en los sólidos de los lodos se separa más fácilmente. No hay un valor óptimo de pH definido para todos los lodos, por lo que debe determinarse en el laboratorio.

2.6.5. Elutriación

Este método consiste en extraer de los lodos, por medio de agua o efluentes de plantas de tratamiento, los compuestos amínicos o amoniacales que se encuentren en cantidades excesivas para disminuir la demanda de coagulante. Por lo tanto, se usa como un pretratamiento antes de la coagulación con productos químicos. El proceso se lleva a cabo mezclando los lodos con agua o efluente de la planta de tratamiento durante un periodo de tiempo corto, por medio de agitación mecánica o por aire difundido. Entonces se deja sedimentar y el sobrenadante se regresa al proceso de tratamiento de aguas residuales.

La elutriación presenta las siguientes ventajas:

1. Una disminución del 65 al 80% de la cantidad de productos químicos necesarios para el acondicionamiento.
2. Un menor contenido de cenizas en la torta del filtro.
3. Se requiere poca o ninguna cal como producto acondicionador.

Las desventajas de este proceso son los costos del equipo, de su operación y del tratamiento del agua de lavado, por lo que deberán compararse contra el ahorro en los productos químicos.

2.6.6. Filtración

El filtro al vacío se emplea para eliminar el agua de los lodos, consta de un tambor sobre el cual descansa el medio filtrante formado por una tela de algodón, lana, nylon, dynel, fibra de vidrio o plástico, o bien una malla de acero inoxidable. Al aplicar vacío en el interior del medio filtrante se extrae el agua de los lodos y mantiene el lodo adherido al medio filtrante. La filtración tiene la ventaja de requerir de menor superficie para eliminar los lodos y la desventaja de aumentar los costos de operación.

Otro tipo de dispositivos para la filtración lo constituyen los filtros prensa, éstos están constituidos por el acoplamiento de varias placas cóncavas entre las que se coloca un paño filtrante. El cierre del sistema se consigue por la presión que efectúa un husillo contra la primera placa. El líquido turbio llega impulsado por una bomba a las cámaras que dejan entre sí las placas. Los filtros prensa se pueden construir de materiales muy variados: madera, metales y aleaciones. El material filtrante en estos aparatos es siempre un tejido, el cual puede ser de naturaleza muy variada (lana, seda, algodón, nylon, etc.).

2.6.7. Secado por Calentamiento

Cuando la eliminación final de los lodos requiere que éstos contengan una humedad inferior al 10%, se emplea el secado por calentamiento. Para ello, se hace uso de uno de los siguientes equipos: horno secador rotatorio, secador instantáneo, secador de pulverizadores y horno de hogar múltiple.

Horno Secador Rotatorio. Consiste en un cilindro que gira sobre un eje inclinado. Los lodos que se van a secar entran por un extremo y son acarreados hasta la descarga por gravedad, deshaciéndose y mezclándose por medio de deflectores helicoidales fijados en la pared del cilindro. En el cilindro se introducen gases calientes a contracorriente.

Secador Instantáneo. En este equipo, la torta de lodos mezclada con lodos previamente secados, pasa a un molino de martillo donde las partículas de lodos se secan casi instantáneamente a medida que se dispersan y se mantienen en suspensión en una corriente de gases calientes. Las partículas de lodo así obtenidas, pasan a un separador donde el lodo seco es separado de los gases cargados de humedad.

Secador de Pulverizadores. Consiste de una torre caliente vertical, por la que pasa hacia abajo una corriente de gases calientes. Los lodos húmedos se aspersan dentro de esta torre. El agua de las partículas atomizadas se evapora y sale con los gases calientes, en donde los sólidos secos caen al fondo de la torre. El polvo arrastrado por los gases se aparta de ellos por medio de un separador de polvos.

Horno de Hogar Múltiple. Este es considerado como un secador por calor y como un incinerador, debido a que una parte de la unidad se usa para secar los sólidos por medio del calor, lo cual es necesario hacer antes de incinerarlos. El horno de hogar múltiple consta de un cilindro vertical forrado de ladrillo u otro material refractario que contiene una serie de cuatro o más hogares, uno encima de otro. Los lodos parcialmente deshidratados se alimentan al hogar superior y se secan parcialmente por los gases calientes que llegan de los hogares inferiores. Estos lodos se hacen bajar al siguiente hogar inferior, mediante cepillos rotatorios o rastrillos mecánicos, hasta que alcanzan tal grado de sequedad que entran en ignición y se consumen.

2.6.8. Enterrado

Este método se usa principalmente para lodos crudos en lugares donde, a no ser que se cubran con tierra, originen serias molestias por el olor. Los lodos se llevan a zanjas de 0.60 a 0.90 m de ancho y de 0.60 m de profundidad. Se cubren con 0.30 m de tierra como mínimo. Cuando se dispone de grandes superficies de terreno, el enterrado de los lodos crudos es quizá el método más económico para eliminarlos. En las zanjas, los lodos pueden

permanecer húmedos y mal olientes durante años, de modo que un terreno que se ha usado una vez, no puede usarse durante mucho tiempo.

2.6.9. Relleno

El empleo de los lodos como material de relleno se limita casi exclusivamente a los lodos digeridos, los cuales quedan a la intemperie sin producir molestias. Ya sea mojados o parcialmente deshidratados, los lodos se pueden usar para rellenar terrenos bajos.

2.6.10. Fertilizante

Este método se utiliza cuando el lodo no contiene sustancias tóxicas, se emplea casi exclusivamente para el lodo proveniente del tratamiento de las aguas negras, pues contiene elementos esenciales para la vida vegetal.

2.6.11. Incineración

La incineración tiene ventajas de economía, supresión del olor, independencia del clima y gran disminución del volumen y peso del producto final. Su producto final son cenizas que pueden eliminarse fácilmente. En todo tipo de incineradores los gases de combustión deben permanecer a una temperatura superior a 675°C, para que los lodos queden completamente incinerados.

2.7. NORMATIVIDAD EXISTENTE

El agua residual se encuentra sometida a la Norma Oficial Mexicana NOM-CCA-031-ECOL/1993, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 18 de Octubre de 1993. Esta Norma dice lo siguiente:

Norma Oficial Mexicana NOM-CCA-031-ECOL/1993, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales provenientes de la industria, actividades agroindustriales de servicios y el tratamiento de aguas residuales a los sistemas de drenaje y alcantarillado urbano o municipal.

Las descargas de aguas residuales provenientes de la industria, actividades agroindustriales y el tratamiento de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal a que se refiere esta norma debe cumplir con las indicaciones que se indican a continuación:

Tabla 2.1. Límites Máximos Permisibles de la Descarga de Agua Residual

Parámetro	Límite Máximo Permissible		
	Promedio Diario	Instantáneo	Unidades
Temperatura		40	°C
pH	6-9	6-9	
Sólidos Sedimentables	5	10	ml/l
Grasas y Aceites	60	100	mg/l
Conductividad Eléctrica	5,000	8,000	µmhos/cm
Aluminio	10	20	ppm
Arsénico	05	1.0	ppm
Cadmio	0.5	1.0	ppm
Cianuros	1.0	2.0	ppm
Cobre	5	10	ppm

(Continuación)

Parámetro	Límite Máximo Permisible		
	Promedio Diario	Instantáneo	Unidades
Cromo Hexavalente	0.5	1.0	ppm
Cromo Total	2.5	5.0	ppm
Fluoruros	3	6	ppm
Níquel	4.0	8.0	ppm
Plata	1.0	2.0	ppm
Plomo	1.0	2.0	ppm
Zinc	6.0	12.0	ppm
Fenoles	5.0	10.0	ppm
SAAM	30	60	mg/l

Asimismo, no se deberán descargar o depositar en los sistemas de drenaje y alcantarillado urbano o municipal, sustancias o residuos considerados peligrosos en las normas oficiales mexicanas correspondientes, sustancias sólidas o pastosas que puedan causar obstrucciones al flujo en dichos sistemas, así como los que puedan solidificarse, precipitarse o aumentar su viscosidad a temperaturas entre 5°C a 40°C o lodos provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales⁸.

⁸ Norma Oficial Mexicana NOM-CCA-031-ECOL/1993. Límites Máximos Permisibles de Contaminantes en las Descargas de Aguas Residuales Provenientes de la Industria, Actividades Agroindustriales, de Servicios y el Tratamiento de Aguas Residuales a los Sistemas de Drenaje y Alcantarillado Urbano o Municipal. Dirección General de Normas. Secretaría de Patrimonio y Fomento Industrial

3. PRUEBAS DE LABORATORIO

Las aguas industriales de desecho contienen materia mineral suspendida, coloidal y disuelta, así como sólidos orgánicos. Además pueden ser excesivamente ácidas o alcalinas y tener baja o alta concentración de materias colorantes. Estos desechos pueden contener materiales inertes, orgánicos o tóxicos. Los desechos que contengan constituyentes tóxicos deben ser estudiados cuidadosamente con respecto a las restricciones existentes, antes de descargarlos en el sistema de alcantarillado.

Los desechos de las industrias de acabado de metales contienen usualmente ácidos, iones metálicos, cianuros y cromatos. Estos provienen de los procesos del bruñido del acero, del hierro y de los procesos galvanoplásticos. Estos desechos deben tratarse antes de descargarlos por contener sustancias difíciles de tratar y muy tóxicas para los microorganismos y seres vivos.

El método de tratamiento más apropiado para una descarga de tipo industrial, así como las condiciones de operación del proceso solo puede ser determinadas en el laboratorio, a partir de pruebas específicas. Asimismo, para poder optimizar los costos del tratamiento de las aguas residuales, como son los costos del terreno, energía y mano de obra, así como los requerimientos del efluente, es necesario realizar pruebas especiales en escala de laboratorio o de planta piloto.

3.1. PRUEBA DE JARRAS

Esta prueba sirve para determinar la dosis de coagulantes más efectiva y económica para un tratamiento de floculación. La dosis de coagulantes no se puede determinar analíticamente, pues depende de factores como el pH, temperatura, tiempo de mezclado, parámetros que dependen del agua en estudio.

Para realizar esta experimentación se requiere de un aparato para prueba de jarras, el cual consiste de un instrumento que proporciona agitación rápida y agitación lenta, durante un cierto período de tiempo, a seis vasos de precipitado de cierto volumen. La prueba consiste en ir variando la cantidad de reactivos para diferentes condiciones de pH, temperatura, tiempo de agitación y así poder determinar las dosis exactas de los mismos y las mejores condiciones de operación. En esta prueba resulta muy importante la observación del flóculo y del sobrenadante.

Para poder optimizar los parámetros que intervienen en la prueba de jarras es necesario llevar un registro adecuado de la experimentación. Se propone el siguiente⁹:

⁹ Schulz, Cristopher R. y Okun, Daniel A. "Tratamiento de Aguas Superficiales para Países en Desarrollo". Ed. Limusa. 1990.

Tabla 3.1. Hoja de Registro para Realizar la Prueba de Jarras

Fecha _____	Muestra No. _____
Prueba No. _____	
pH _____	Color _____
Temperatura _____ °C	Conductividad _____
Cantidad de Agua Utilizada _____ ml	
Tiempo de agitación lenta _____ min	
Tiempo de Sedimentación _____ min	

Vaso	Reactivos (ml)			Flóculos			Sobrenadante	
				Tamaño	Cantidad	Sedimentación	Turbiedad	Color
1								
2								
3								
4								
5								
6								

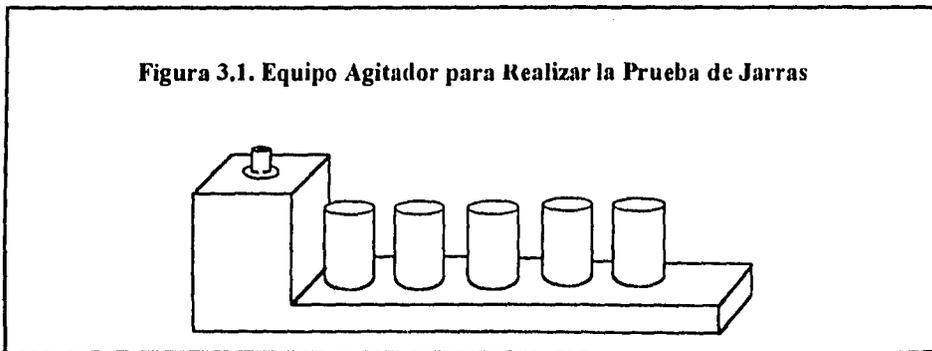
Concentración de los Reactivos Utilizados:

_____ %	_____ %	_____ %
_____ %	_____ %	_____ %

Notas y Comentarios _____

Realizó _____

Figura 3.1. Equipo Agitador para Realizar la Prueba de Jarras



3.2. AERACIÓN

Para esta prueba se requiere de un reactor de 7 litros aproximadamente. Como se introduce aire, las burbujas mantienen el contenido de la cámara en mezclado completo. Al inicio, se pone en la cámara de aeración la muestra de agua a tratar, previamente neutralizada, se siembra una cantidad de lodos activados colectados de una planta en funcionamiento, y gradualmente se realiza la aclimatación al agua que se va a estudiar. Esto es, en el caso de que se estudie agua que contenga desechos tóxicos para los microorganismos, se puede mezclar esta agua con agua doméstica y gradualmente ir incrementando la proporción de agua industrial.

Periódicamente, se mide la cantidad de lodos presentes y se toman muestras para su análisis a fin de determinar la cantidad de DBO, DQO y parámetros complementarios que indiquen la calidad del agua.

3.3. OZONIFICACIÓN¹⁰

En el caso de la ozonificación, se puede utilizar agua tratada como se mencionó anteriormente o bien la muestra original. El procedimiento es muy sencillo y consiste en colocar una cantidad conocida de la muestra en un recipiente e introducir ozono durante cierto tiempo. Cuando se observa que ya no se producen espumas y precipitados, se toma una muestra para su análisis posterior. Los resultados obtenidos se comparan con el análisis inicial del agua en estudio.

¹⁰ Eckenfelder, W. Wesley. "Industrial Water Pollution Control". Ed. McGraw-Hill 1989

3.4. ANÁLISIS GENERALES

Estos análisis consisten en pruebas para determinar la calidad del agua en estudio¹¹. Se estudiarán los siguientes:

3.4.1. Determinación de la Demanda Química de Oxígeno¹²

Este parámetro mide el oxígeno equivalente del contenido de materia orgánica en una muestra de agua, que es susceptible a oxidarse en presencia de un agente químico oxidante fuerte.

Para esta determinación se aplica el método volumétrico de reflujos con dicromato de potasio, en el cual, la cantidad de materia orgánica oxidable es proporcional al dicromato consumido.

Al agregar sulfato de plata como catalizador se logran mejores resultados, ya que se logra una oxidación de compuestos alifáticos lineales, de hidrocarburos aromáticos, alcoholes lineales, ácidos y piridinas. La adición de sulfato mercúrico inhibe las interferencias ocasionadas por los iones cloruros. Otras interferencias ocasionadas por los nitritos se inhibe con la adición de ácido sulfúrico.

- Equipo a Utilizar

1. Material común de laboratorio
2. Canastillas de calentamiento
3. Equipo para reflujos

¹¹ "Métodos Normalizados para el Análisis de Aguas Potables y Residuales". American Public Health Association (APHA). American Water Works Association (AWWA). Water Pollution Control Federation (WPCF). 17 Edición. 1989.

¹² Norma Oficial Mexicana NOM-AA-30-1981. "Determinación de la Demanda Química de Oxígeno". Dirección General de Normas. Secretaría de Patrimonio y Fomento Industrial.

- Reactivos y Soluciones**• Reactivos**

1. Sulfato mercúrico (HgSO_4)
2. Dicromato de potasio ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$)
3. Ácido sulfúrico concentrado (H_2SO_4)
4. Sulfato de plata (Ag_2SO_4)
5. Sulfato ferroso amoniacal hexahidratado ($\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)
6. Sulfato ferroso heptahidratado ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)
7. 1,10-fenantrolina monohidratada ($\text{C}_{12}\text{H}_8\text{N}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$)

• Soluciones

1. Solución de dicromato de potasio 0.25 N. Disolver 12.259 g de dicromato de potasio de grado estándar primario en agua destilada y llevar a un volumen de 1000 ml.
2. Solución de sulfato ferroso amoniacal 0.25 N. Disolver 98 g de sulfato ferroso amoniacal hexahidratado en agua destilada, adicionar 20 ml de ácido sulfúrico concentrado, enfriar y llevar a un volumen de 1000 ml. Esta solución se valora diariamente con una solución de dicromato de potasio 0.25 N de la siguiente forma: diluir 10 ml de la solución de dicromato de potasio aproximadamente a 100 ml con agua destilada, adicionar 30 ml de ácido sulfúrico concentrado y enfriar. Titular con la solución de sulfato ferroso amoniacal usando 2 o 3 gotas de ferroína como indicador.
3. Indicador de ferroína. Disolver 1.485 g de 1,10-fenantrolina monohidratada y 0.695 g de sulfato ferroso heptahidratado en agua destilada y llevar a un volumen de 100 ml.

- Procedimiento

En un matraz de bola tomar 1 ml de muestra y llevar a un volumen de 20 ml con agua destilada, agregar 10 ml de la solución de dicromato, un poco de sulfato de plata y una pizca de sulfato de mercurio. Agregar 30 ml de ácido sulfúrico concentrado en forma lenta auxiliándose de un agitador y colocando el matraz en un recipiente con hielo para evitar proyecciones.

Agregar piedras de ebullición y poner a reflujo durante 2 horas en las canastillas a una temperatura aproximada de 145°C. Enfriar y lavar el condensador con 50 ml de agua destilada de tal forma que el agua de lavado descienda hacia el matraz.

Titular con la solución de sulfato ferroso amoniacal, usando como indicador 3 gotas de ferroína hasta alcanzar el vire de naranja a café.

- Cálculos

La concentración de DQO en ppm se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\text{DQO} = \frac{V_1 - V_2}{V_3} \times N \times \text{Eq} \times 1000$$

Donde:

V_1 = Volumen de titulante gastado en el testigo, en ml.

V_2 = Volumen de titulante gastado en la muestra, en ml.

V_3 = Volumen tomado de muestra, en ml.

N = Normalidad de la solución de sulfato ferroso amoniacal (0.25 N).

Eq = Equivalente químico del oxígeno (8).

3.4.2. Determinación de la Demanda Biológica de Oxígeno¹³.

Este parámetro mide el oxígeno requerido para oxidar la materia orgánica en presencia de microorganismos capaces de efectuar la oxidación; esta oxidación requiere de un período de tiempo muy largo. En el laboratorio un período de 5 días proporciona resultados de oxidación de entre 70 a 80 %. Las mediciones del oxígeno están basadas en las determinaciones del oxígeno disuelto.

Las principales fuentes de contaminación que incrementan la DBO son los desechos domésticos, los generados por la industria textil, cervecera, papelera y azucarera.

- Equipo a Utilizar

1. Aparato manométrico para determinar DBO₅, marca HACH
2. Material común de laboratorio

- Reactivos y Soluciones

1. Nutrientes.
2. Grasa Lubriderm.
3. Hidróxido de litio (en cartuchos para prueba de DBO).

- Procedimiento

Agitar la muestra y tomar un volumen adecuado de la misma en las botellas color ámbar del dispositivo para la prueba de DBO₅, marca HACH, colocar el agitador magnético. Agregar nutrientes y engrasar los capuchones y boquillas en la parte externa e interna de las botellas. Colocar dentro de las botellas un imán y colocar los capuchones en las mismas.

¹³ Norma Oficial Mexicana NOM-AA-28-1981. "Determinación de la Demanda Bioquímica de Oxígeno". Dirección General de Normas. Secretaría de Patrimonio y Fomento Industrial.

Con un embudo agregar cuidadosamente el hidróxido de litio en los capuchones, procurando no inhalarlo, ni estar en contacto con el mismo. Conectar las botellas al dispositivo de medición sin cerrar herméticamente durante media hora para que alcancen el equilibrio.

Una vez transcurrido este tiempo, ajustar la escala, tapar bien las botellas y conectar el dispositivo. Realizar las lecturas de DBO cada 24 hrs durante 5 días.

- Cálculos

Registrar las lecturas de la demanda bioquímica de oxígeno realizadas por un periodo de 5 días. El último registro corresponde al valor de la concentración de DBO deseado.

3.4.3. Determinación de Sólidos Sedimentables¹⁴

La determinación de sólidos sedimentables utiliza el método volumétrico del cono Imhoff. El método se basa en la propiedad que tienen los materiales sólidos de sedimentarse en niveles progresivos de acuerdo con sus diferentes densidades. Los sólidos sedimentables son las partículas sólidas que se depositan en el fondo de un recipiente debido a la sedimentación por efecto de la gravedad.

- Equipo a Utilizar

1. Cono Imhoff
2. Soporte con anillo de metal
3. Agitador de vidrio

¹⁴ Norma Oficial Mexicana NOM-AA-4-1977. "Determinación de Sólidos Sedimentables". Dirección General de Normas. Secretaría de Patrimonio y Fomento Industrial.

- Procedimiento

Agitar bien la muestra y servir un litro en el cono Imhoff. Dar un tiempo de sedimentación de 45 minutos. Una vez transcurrido este tiempo, agitar suavemente las paredes del cono con una varilla de vidrio. Dar otro tiempo de sedimentación de 15 minutos. Leer directamente en el cono Imhoff la cantidad sedimentada de sólidos y reportarla en ml/l.

3.4.4. Determinación de Sólidos Suspendidos¹⁵

La determinación de sólidos suspendidos es extremadamente valiosa en los análisis de aguas contaminadas y de aguas residuales. Es uno de los parámetros usados para valorar la concentración de materia orgánica de las aguas residuales y para calcular la eficiencia de las unidades en sistemas de tratamiento.

- Equipo a Utilizar

1. Balanza analítica
2. Bomba de vacío
3. Crisol Gooch de porcelana de 50 ml.
4. Homo eléctrico
5. Matraz Kitasato con accesorios
6. Pinzas para estufa.

- Procedimiento

1. Colocar un crisol Gooch a peso constante.

¹⁵ Norma Oficial Mexicana NOM-AA-34-1981. "Determinación de Sólidos". Dirección General de Normas. Secretaría de Patrimonio y Fomento Industrial.

2. Introducir un filtro con microfibra de vidrio de 2.4 cm dentro de un crisol Gooch con la cara rugosa hacia arriba, filtrar 5 ml de agua destilada y dejar secar en el horno para sólidos.
3. Enfriar y pesar el crisol en la balanza analítica.
4. Filtrar un volumen conocido de muestra auxiliándose de la bomba de vacío. Colocar el crisol Gooch en el horno de sólidos para secar a una temperatura de 103 a 105°C. Pesar el crisol Gooch después de dos horas.

- Cálculos

Para calcular las partes por millón de sólidos suspendidos totales se utiliza la siguiente ecuación:

$$\text{Sól. Susp. Tot} = \frac{P_{FG} - P_{IG}}{V} \times 10^6$$

Donde:

P_{FG} = Peso final del Gooch, en g.

P_{IG} = Peso inicial del Gooch, en g

V = Volumen de muestra filtrada, en ml.

3.4.5. Determinación de Sólidos Totales¹⁶

En general, los sólidos totales son la expresión que se aplica a los residuos de material que quedan en un recipiente después de la evaporación de la muestra a una temperatura de 103 a 105°C. El término sólidos en todas sus formas abarca 10 diferentes formas de sólidos. Dichas determinaciones se llevan a cabo gravimétricamente o por

¹⁶ Norma Oficial Mexicana NOM-AA-34-1981. "Determinación de Sólidos". Dirección General de Normas. Secretaría de Patrimonio y Fomento Industrial.

diferencias entre una y otra. Los análisis de sólidos son importantes en el control de tratamiento biológico y físico de aguas residuales.

Los sólidos totales incluyen los sólidos totales suspendidos y los sólidos disueltos totales.

- Equipo a Utilizar

1. Balanza analítica
2. Horno eléctrico
3. Cápsula de porcelana.

- Procedimiento

1. Pesar una cápsula de porcelana que se encuentre a peso constante en la balanza analítica.
2. Poner 40 ml de muestra dentro de la cápsula e introducirla al horno de sólidos y dejar evaporar a una temperatura de 105°C.
3. Una vez evaporada la muestra, pesar la cápsula.

- Cálculos

Para determinar los sólidos totales en ppm se utiliza la siguiente expresión:

$$\text{Sólidos Totales} = \frac{P_{FC} - P_{IC}}{V} \times 10^6$$

Donde:

P_{FC} = Peso final de la cápsula, en g.

P_{IC} = Peso inicial de la cápsula, en g.

V = Volumen utilizado de la muestra, en ml.

3.4.6. Determinación de Sólidos Disueltos¹⁷

Los sólidos pueden afectar negativamente la calidad del agua. Los análisis de sólidos son importantes en el control de procesos de tratamiento biológico y físico de aguas residuales. Los sólidos disueltos son sustancias orgánicas e inorgánicas solubles en agua.

Para determinar los sólidos disueltos totales presentes en una muestra no se requiere de ningún procedimiento, pues están dados directamente por la diferencia que existe entre los sólidos totales y los sólidos suspendidos totales, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\text{Sólidos Disueltos Totales} = \text{Sólidos Totales} - \text{Sólidos Suspendidos Totales}$$

Si los sólidos totales y los sólidos suspendidos se encuentran en ppm, los sólidos disueltos se encontrarán en ppm.

3.4.7. Determinación de Metales¹⁸

El método espectrofotométrico de absorción atómica sirve para la determinación de aluminio, arsénico, cadmio, cobre, cromo total, mercurio, níquel, plata, plomo y zinc que se encuentran disueltos y suspendidos en aguas naturales y residuales.

Este método se basa en la medición de la cantidad de luz monocromática absorbida por el elemento atomizado a determinarse en una flama, por medio de un detector, siendo dicha energía absorbida proporcional a la concentración del elemento.

¹⁷ Norma Oficial Mexicana NOM-AA-34-1981. "Determinación de Sólidos". Dirección General de Normas. Secretaría de Patrimonio y Fomento Industrial.

¹⁸ Norma Oficial Mexicana NOM-AA-51-1981. "Determinación de Metales, Método Espectrofotométrico de Absorción Atómica". Dirección General de Normas. Secretaría de Patrimonio y Fomento Industrial.

El espectrofotómetro de absorción atómica consiste de una fuente de luz que emite el espectro de línea de un elemento (lámpara de cátodo hueco) y un sistema para atomizar la muestra (normalmente una flama), un medio para aislar una línea de resonancia a una longitud de onda determinada (monocromador); un detector fotoeléctrico con equipo de amplificación y medición electrónica.

En la determinación de la mayoría de los metales que pueden determinarse por aspiración directa, la interferencia más frecuente es la llamada química que se debe a que el metal por analizar se encuentra en estado molecular y para que exista absorción deber estar en forma atómica. Otras interferencias se deben a cationes o aniones presentes en la muestra. Para eliminar todo tipo de interferencia en cada elemento ser necesario consultar el manual de operación del aparato que se disponga.

- Equipo a Utilizar

1. Espectrofotómetro de absorción atómica.
2. Quemador
3. Cabezas de quemador.
4. Lámparas de cátodo hueco.

- Reactivos

1. Ácido nítrico concentrado

- Procedimiento

De ser posible, filtrar y acidificar la muestra en el momento de su extracción en el campo, dependiendo del tipo de análisis que se vaya a efectuar.

El tratamiento de la muestra dependerá del tipo de metales que se van a determinar. Si se requiere metales totales o extractables no se debe filtrar la muestra; si se desea determinar metales disueltos, la muestra se filtra a través de una membrana de 0.45 micrómetros (previamente lavada con una solución de ácido nítrico). En cualquier caso acidificar la muestra con ácido nítrico concentrado hasta un pH de 2 o menor.

Si la muestra tiene materiales suspendidos o materia orgánica se requiere otro tratamiento específico que consistirá en una digestión.

Para determinar aluminio, cadmio, cromo, plomo, níquel y zinc totales se utiliza el siguiente procedimiento: transferir una porción representativa de la muestra bien mezclada (50 a 100 ml) a un vaso de precipitados, agregar 5 ml de ácido nítrico concentrado y cubrir el vaso con un vidrio de reloj. Evaporar casi a sequedad en una placa de calentamiento asegurándose que la muestra no hierva.

Enfriar el vaso de precipitados y agregar otros 5 ml de ácido nítrico concentrado. Volver a cubrir el vaso y regresarlo a la placa de calentamiento. Aumentar la temperatura hasta reflujo lento. Continuar calentando cuando sea necesario, añadir ácido nítrico concentrado, hasta que la digestión sea completa, esto se indica por un residuo de color claro. Agregar 1 o 2 ml de ácido nítrico concentrado y calentar el vaso de precipitados ligeramente para disolver el residuo. Lavar las paredes del vaso y el vidrio de reloj con agua. Filtrar la muestra para evitar que los silicatos y otros materiales insolubles obstruyan el atomizador.

Llevar a un volumen de 50 ml o 100 ml según el volumen de muestra tomando originalmente. La muestra está lista para ser analizada. Reportar los resultados como metales totales, en $\mu\text{g/l}$ o mg/l .

Analizar con un flama de aire-acetileno, excepto para determinar aluminio en la que se utiliza una flama NO_2 -acetileno.

Para la determinación de la concentración de metales en material suspendido, se filtra la muestra con un filtro de membrana de 0.45 micrómetros y se procede a la digestión del filtro junto con el material que contenga. Posteriormente, se sigue el procedimiento anterior.

Para operar el espectrofotómetro de absorción atómica se sigue el siguiente procedimiento. Encender el aparato y colocar la lámpara de cátodo hueco. Poner el slit y la longitud de onda de acuerdo con lo sugerido por el instructivo del aparato para el elemento que se va a medir. Instalar el quemador. Optimizar. Calibrar. El aparato está listo para correr los estándares y las muestras. Antes de hacer la determinación para las diferentes muestras se debe implementar la curva de calibración para cada metal. Cuando se termine de trabajar, extinguir la flama desconectando primero el acetileno y luego el aire.

3.4.8. Determinación de Grasas y Aceites¹⁹

Las grasas y aceites pueden estar presentes en el agua como una emulsión de residuos industriales o fuentes similares, o en solución como una fracción ligera del petróleo. El término grasas y aceites comprende una serie de compuestos orgánicos tales como hidrocarburos, ácidos grasos, jabones, sebos, ceras y aceites. Cuando estas sustancias son descargadas en aguas residuales a efluentes tratados, forman películas que interfieren en la transferencia del oxígeno atmosférico al agua, el cual es indispensable tanto para la autpurificación de cuerpos naturales de agua, como en los sistemas de tratamiento biológico, impartiendo además sabor, olor y apariencia desagradable al agua.

El método seleccionado para la determinación de este parámetro es el método Soxhlet, que es un método con un alto porcentaje de extracción de grasas.

¹⁹ Norma Oficial Mexicana NOM-AA-5-1980. "Determinación de Grasas y Aceites". Dirección General de Normas. Secretaría de Patrimonio y Fomento Industrial.

- Equipo a Utilizar

1. Aparato de extracción Soxhlet.
2. Bomba de vacío.
3. Canastillas de calentamiento.
4. Cartuchos de papel para Soxhlet.
5. Horno eléctrico.
6. Material común de laboratorio.
7. Papel Filtro sin cenizas No. 40.

- Reactivos y Soluciones

1. Ácido clorhídrico o sulfúrico.
2. Suspensión de tierra de diatomeas-silice.
3. Hexano con punto de ebullición de 69°C o grado analítico.

- Procedimiento

Preparar un filtro con el disco de tela de muselina sobreponiéndole el disco de papel filtro, colocar en el embudo Buchner, humedecer la tela y el papel. Pasar aproximadamente 100 ml de la suspensión de tierras de diatomeas (hasta la saturación de los poros), se lava con 1000 ml de agua destilada.

Filtrar un volumen conocido de muestra, en el filtro anterior auxiliándose de una bomba de vacío, una vez filtrada toda la muestra, se retira el papel y se dobla para introducirlo a un cartucho de papel. Repetir esta operación 3 veces más y anotar el volumen de muestra filtrado.

Pesar previamente un matraz de bola que este etiquetado, con piedras de ebullición y que se encuentre a peso constante, este peso se registra como el peso inicial.

Colocar el cartucho de papel que contenga los filtros en la corneta Soxhlet y unirla al matraz de bola y proceder a adicionar 150 ml de hexano por la boca de la corneta.

Unir el refrigerante a la corneta y aplicar calor para extraer las grasas y aceites por medio de reflujo de hexano durante 4 horas. Transcurrido el tiempo de extracción se destila el hexano hasta evaporación completa. Desechar el matraz por un tiempo aproximado de 15 minutos y de ser necesario colocar en el horno hasta conseguir un peso constante. Dejar enfriar y pesar nuevamente el matraz, dicho peso corresponde al peso final de matraz.

- Cálculos

Para calcular la cantidad de grasas y aceites en ppm presentes en la muestra se aplica la siguiente ecuación:

$$\text{Grasas y Aceites} = \frac{P_1 - P_2}{V_1} \times 10^6$$

Donde:

P_1 = Peso constante del matraz, en g.

P_2 = Peso del matraz con residuos de grasas y aceites, en g.

V_1 = Volumen de la muestra, en ml.

3.4.9. Determinación de Detergentes²⁰

Los detergentes son conocidos también como tensoactivos o surfactantes, en general una molécula de surfactante contiene una cadena polar alifática que es hidrofílica y una parte aromática que es hidrofóbica. Su grado de descomposición biológica depende de su estructura química, las ramificaciones de la cadena alifática causan un retardo muy marcado en su degradación que aún persiste después de un tratamiento biológico.

²⁰ Norma Oficial Mexicana NOM-AA-39-1980. "Determinación de Sustancias Activas al Azul de Metileno". Dirección General de Normas. Secretaría de Patrimonio y Fomento Industrial.

Los detergentes contienen un elevado porcentaje de fosfatos los cuales son nutrientes que estando presentes en un cuerpo de agua contribuyen a una sobrepoblación de la flora acuática y que al degradarse, ocasionan una mayor demanda de oxígeno perjudicial para la fauna.

En México el surfactante más empleado es el sulfonato de alquil benceno (ABS), por lo que el método de determinación más empleado es el método colorimétrico del azul de metileno. Este método se basa en la formación de una sal, cuando el azul de metileno reacciona con los surfactantes, dicha sal es soluble en cloroformo y la intensidad del color es proporcional a su concentración.

- Equipo a Utilizar

1. Fibra de vidrio.
2. Material común de laboratorio.
3. Espectrofotómetro.
4. 2 Embudos de separación de 500 ml c/u.

- Reactivos y Soluciones

- Reactivos.
 1. Sulfonato de alquil benceno.
 2. Fenolftaleína.
 3. Hidróxido de sodio (NaOH).
 4. Ácido sulfúrico (H_2SO_4).
 5. Cloroformo.
 6. Azul de metileno.
 7. Fosfato de sodio monohidratado ($NaH_2PO_4 \cdot H_2O$).

• Soluciones

1. Solución indicadora de fenolftaleína. Disolver 5 g de fenolftaleína en 500 ml de alcohol etílico o isopropílico al 95% y adicionar 500 ml de agua destilada.
2. Solución de hidróxido de sodio al 20%.
3. Solución de ácido sulfúrico 1:20.
4. Solución de azul de metileno. Disolver 100 mg de azul de metileno en 100 ml de agua destilada. Transferir 30 ml de esta solución a un matraz volumétrico de 1000 ml, el cual contiene una disolución de 50 g de fosfato de sodio dihidrogenado monohidratado en 500 ml de agua destilada adicionar 6.8 ml de ácido sulfúrico concentrado y diluir a 1000 ml con agua destilada.
5. Solución de lavado. Disolver 50 g de fosfato de sodio dihidrogenado monohidratado en 500 ml de agua destilada adicionar 6.8 ml de ácido sulfúrico concentrado y llevar a volumen de 1000 ml.
6. Solución patrón de ABS. Pesar 1.0000 g de ABS, disolver en agua destilada y llevar a volumen de 1000 ml. Se debe preparar cada semana y refrigerarla a 4°C.

- Procedimiento

El volumen de la muestra de agua para ser analizada, se toma de acuerdo a la concentración esperada de ABS, según se indica en la tabla siguiente:

Tabla 3.2. Volumen de Muestra contra la Concentración Esperada de ABS

Muestra a Tomar (ml)	Concentración Esperada de ABS (mg/l)
400	0.025-0.080
250	0.080-0.40
100	0.40-2.0
20	2.0-10.0
2	10.0-100

Nota: Si el volumen es menor de 100 ml, se debe diluir con agua a este volumen.

Poner la muestra a pH neutro adicionando una gota de fenolftaleína, una gota de hidróxido de sodio al 20% y la cantidad suficiente de ácido sulfúrico 1:20 hasta que desaparezca la coloración rosa.

Transferir la muestra a un embudo de separación y agregar 6 ml de azul de metileno, dejar reposar durante 3 minutos. Posteriormente, agregar 10 ml de cloroformo, tapan el embudo y agitar vigorosamente durante 30 segundos y dejar separar las dos fases.

Transferir la fase más densa a un segundo embudo de separación que contiene 50 ml de la solución de lavado. Repetir la operación anterior 2 veces más. Agitar el embudo con la solución de lavado y los 3 extractos obtenidos durante 30 segundos, dejar separar las fases y vaciar la fase más densa a un matraz aforado de 100 ml, filtrando a través de un embudo que contenga fibra de vidrio. Diluir con cloroformo hasta la marca del matraz o un poco menos de la marca del aforo y leer la absorbancia de la solución a 652 nm contra un testigo de cloroformo.

Para realizar la curva de calibración, se deben preparar una serie de embudos de separación con 0.0, 1.0, 3.0, 5.0, 7.0, 11.0, 13.0, 15.0 y 20.0 ml de la solución patrón de ABS. Agregar agua hasta un volumen de 100 ml en cada embudo de separación. Seguir el procedimiento anteriormente descrito y trazar una curva de calibración de mg de ABS contra absorbancia.

- Cálculos

Leer los miligramos de ABS presentes en la curva de calibración, realizada anteriormente. Calcular la concentración de detergente (ABS) con la siguiente ecuación:

$$\text{ppm de detergente} = \frac{A \times 1000}{V_1}$$

Donde:

A = Lectura de la curva de calibración.

V_1 = Volumen de muestra en ml.

3.5. DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN²¹

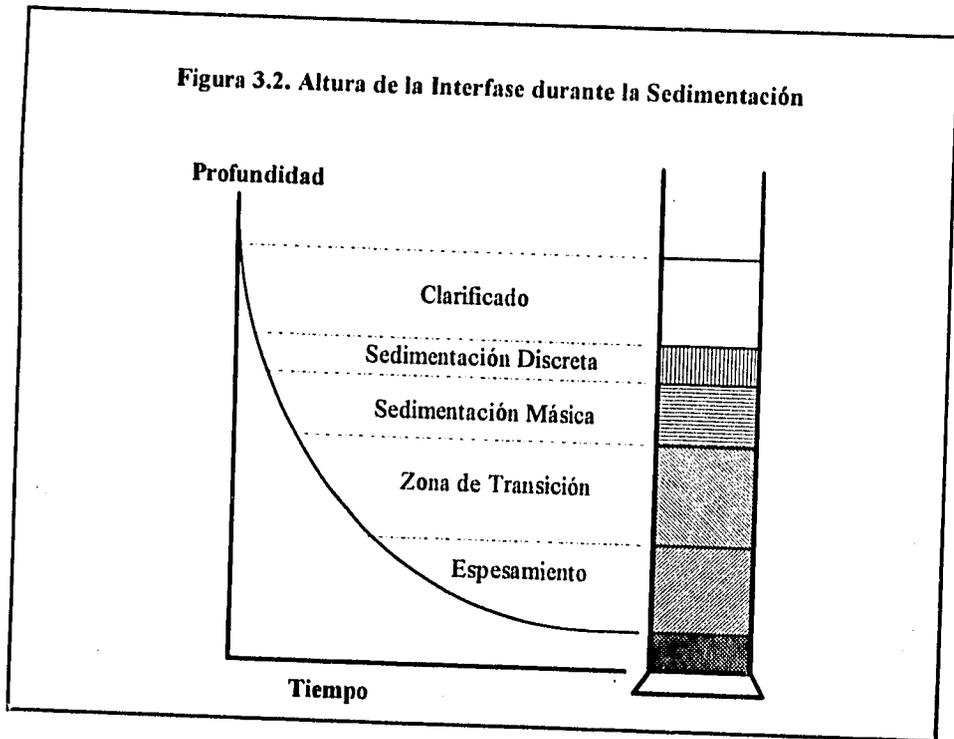
Considerando que los sólidos suspendidos presentes en las aguas residuales son partículas de diferentes tamaños y formas, al estar en reposo, las partículas grandes sedimentan más rápidamente que las pequeñas. A medida que aumenta la profundidad de un tanque de sedimentación, aumenta la oportunidad de contacto entre las partículas, por lo tanto, en la sedimentación floculenta, la eficiencia del sedimentador depende de la profundidad, de las características físicas del fluido, de la concentración de las partículas suspendidas, de la velocidad de sedimentación, del tamaño de las partículas y de la carga de superficie. Los efectos de estos parámetros que afectan la eficiencia de remoción únicamente pueden ser determinados experimentalmente.

La prueba de la columna permite calcular la velocidad de sedimentación de las partículas en suspensión. Esta prueba consiste en colocar un volumen de agua en una columna de acrílico construida bajo medidas estandarizadas, cuenta con orificios espaciados a una cierta distancia conocida.

El agua es sometida a floculación, se agregan los reactivos anteriormente determinados, se registra el tiempo que las partículas tardan en sedimentarse y se anota la distancia que recorren. Posteriormente, se traza una gráfica tiempo vs profundidad que permite conocer la velocidad de sedimentación de las partículas.

²¹ Metcalf & Eddy. "Wastewater Engineering: Treatment, Disposal and Reuse". Ed. McGraw-Hill. 1991.

Figura 3.2. Altura de la Interfase durante la Sedimentación



4. TRATABILIDAD

Para realizar la tratabilidad de las aguas en estudio se consideraron diversos factores, entre los que se encuentran:

1. Descripción del proceso al que fue sometida el agua que se va a tratar.
2. Características físicas y químicas del agua residual.
3. Tratamiento más apropiado para el agua en estudio.
4. Resultados y costos de operación obtenidos.

El objetivo de la tratabilidad es lograr que el agua residual se encuentre caracterizada dentro de normas y se pueda reutilizar dentro del proceso, para usos sanitarios o de riego.

4.1. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DEL AGUA EN ESTUDIO

El agua que se va a tratar es el agua residual de la empresa SACHS de México S.A. de C.V. Ésta es una empresa que se dedica, dentro de la rama metal-metálica, a la construcción de partes automotrices. Esta empresa se encuentra ubicada en la calle de Poniente 150 No. 888, Colonia Industrial Vallejo, Delegación Azcapotzalco, Distrito Federal.

El agua en estudio fue utilizada en un proceso de fosfatado de metales, donde las piezas metálicas sufren de un desengrasado, un fosfatado y un sellado. Para este proceso se utilizan ácidos, bases y zinc mezclados con agua. Este proceso se realiza por lotes, el gasto de descarga es de aproximadamente 16,200 litros, que se almacena en una fosa de captación de 18 m³ de capacidad. Actualmente, el agua residual se neutraliza y se descarga al drenaje municipal. Por el proceso al que fue sometida el agua, se espera que tenga concentraciones elevadas de metales.

4.2. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL AGUA EN ESTUDIO

Posteriormente a su muestreo, el agua residual se analizó dentro de un laboratorio. En general, se encontraron los siguientes resultados:

Tabla 4.1. Resultados del Análisis del Agua Residual

Parámetro	Muestra	Norma Oficial	Unidades
Conductividad	5,550	5,000	µmhos/cm
pH	3,59	6-9	
Temperatura	20.2	No se indica	°C
Sólidos Sedimentables	4.5	10.0	ml/l
Sólidos Totales	9,869.7	No se indica	ppm
Sólidos Suspendedos	75	No se indica	ppm
Sólidos Disueltos	9,794.7	No se indica	ppm

(continuación)

Parámetro	Muestra	Norma Oficial	Unidades
DBO	20	No se indica	mg/l
DQO	7,800	No se indica	mg/l
Grasas y Aceites	187.4	60	mg/l
SAAM	200	30	mg/l
Fenoles	ND	5	mg/l
Aluminio	2.0	10.0	ppm
Cadmio	ND	0.5	ppm
Cianuro	ND	1.0	ppm
Cobre	0.1	5.0	ppm
Cromo total	ND	2.5	ppm
Flúor	0.6	3.0	ppm
Níquel	55.0	4.0	ppm
Plomo	1.5	1.0	ppm
Zinc	900.0	6.0	ppm

Nota: ND = No Detectable

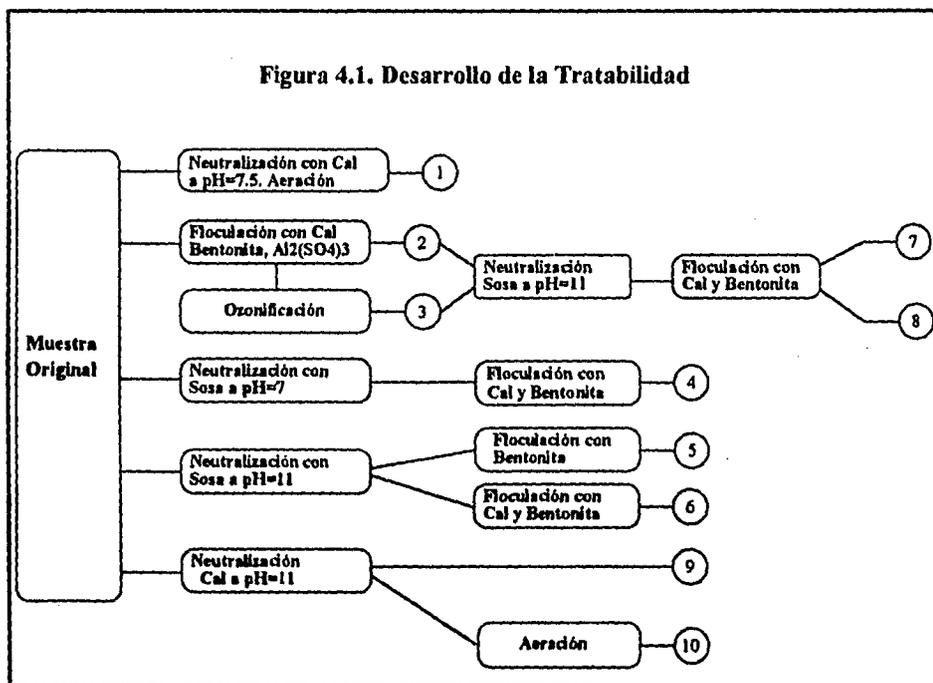
Como se puede observar, el agua no cumple con los requerimientos de pH, grasas y aceites, sustancias activas al azul de metileno, níquel, plomo y zinc. El zinc se encuentra arriba de la norma en un 14,900% y el níquel en un 1,275%, por lo que se utilizarán como parámetros principales para optimizar en la tratabilidad.

4.3. PRUEBAS DE TRATABILIDAD

A pesar de la gran cantidad de métodos de tratamiento que existen, se utilizaron únicamente tres por considerarse los más apropiados en este caso. En primer lugar se inició en todos los casos con una neutralización, con el fin de tener condiciones apropiadas de pH para el tratamiento biológico y para el tratamiento de floculación, ésto por la gran cantidad de sólidos disueltos que se deben eliminar. Se utilizó el tratamiento de aeración con presencia de microorganismos. Finalmente, se utilizó la ozonificación como un tratamiento auxiliar a los anteriores mencionados.

Se desecharon otros tratamientos por que se consideró que no aplican en estos casos. Por ejemplo, no se utilizó ningún tipo de tratamiento preliminar por no existir sólidos grandes presentes. La flotación no se utilizó al no tenerse cantidades exageradas de grasas y aceites presentes.

El desarrollo de la tratabilidad se ilustra en el siguiente esquema:



Como se puede observar en la figura anterior, todos los métodos se combinaron entre sí para no dejar alternativas sin estudiar. Resulta importante mencionar que en todos los casos se inició con una neutralización, ya sea con sosa o con cal, con el fin de variar el pH a condiciones óptimas de precipitación de zinc (pH=11) y para tener un medio ambiente adecuado para la vida de los microorganismos (pH=7). Se debe hacer notar que tanto los

lodos como los flóculos producidos fueron separados por decantación, previa sedimentación; el sobrenadante fue filtrado antes de realizar los análisis del mismo.

4.3.1. Procedimiento Experimental

A continuación se describen los procedimientos y las observaciones obtenidas para cada una de las pruebas realizadas.

1. Neutralización con Cal. Aeración

Se colocó en un recipiente apropiado 7 litros de la muestra, previamente agitada. Se realizó la neutralización de la misma con cal sólida hasta un $\text{pH}=7.5$. Posteriormente, se agregaron los microorganismos y se dejó aerar durante un día. Finalmente, se decantó y filtró el sobrenadante.

Cuando se empezó a neutralizar el agua, ésta pasó de un color gris claro a un verde oscuro, dejó de hacer una gran cantidad de espuma. Al sedimentarse los lodos, éstos formaron dos capas, una muy gruesa de color verde y otra más delgada y ligera de color rojo óxido. El sobrenadante fue casi incoloro y no se observaron sólidos suspendidos. Al sobrenadante analizado se denominó muestra No. 1.

2. Floculación

Para llevar a cabo este proceso se utilizó la prueba de jarras, los reactivos utilizados fueron los siguientes:

Cal (3% peso)

Bentonita (6% peso)

Sulfato de Aluminio (2% peso)

Al realizarse las pruebas de floculación se fueron variando las cantidades de cada uno de los reactivos mencionados. Se observaron tanto las características de los flóculos como las del sobrenadante. Se buscó que los flóculos no fueran muy pesados, ni muy ligeros, así como la menor cantidad de éstos. Simultáneamente, se buscó que el sobrenadante no tuviera partículas en suspensión y fuera incoloro brillante.

Cuando se obtuvieron las mejores condiciones de operación, el sobrenadante se decantó, se filtró y se realizaron los análisis correspondientes. Para las mejores condiciones encontradas se utilizaron las siguientes cantidades de reactivos: Para 200 ml de muestra, 30 minutos de agitación lenta y 30 minutos de sedimentación a temperatura ambiente, 29 ml de cal, 17 ml de bentonita y 2 ml de sulfato de aluminio. El sobrenadante filtrado fue llamado muestra No. 2.

3. Floculación y Ozonificación

Buscando mejor calidad de agua, a la muestra anterior se le aplicó ozono durante 2 horas. Esto se realizó utilizando un ozonificador. Al aplicar el ozono se produjeron nuevos precipitados y se eliminó la producción de espumas al 100%. Una vez realizada la ozonificación, la muestra se filtró y se realizó su análisis. Esta muestra se denominó No. 3.

4. Neutralización y Floculación

Para realizar estas pruebas se siguieron varias alternativas, teniendo en común que la neutralización se realizó utilizando sosa en vez de cal y posteriormente se realizó una floculación. También se realizó la floculación a pH=11, por ser ésta la condición en la que mayor cantidad de zinc precipita.

Para la primera prueba se neutralizó la muestra con sosa hasta llegar a un pH=7. Se continuó agregando cal hasta un pH=11, después se agregó la bentonita y se dejó flocular. Las mejores condiciones se tuvieron al agregar 16 ml de cal y 10 ml de bentonita en 200 ml

de muestra, el tiempo de floculación fue de 30 minutos y el de sedimentación de 1 hora. La muestra filtrada se denominó No. 4.

Para la segunda y tercera prueba se alcalinizó la muestra original con sosa hasta un $\text{pH} = 11$; a la segunda se le agregó únicamente bentonita y a la tercera bentonita y cal. Para la segunda muestra las mejores condiciones se obtuvieron al agregar 10 ml de bentonita y para la tercera al agregar 8 ml de cal y 9 ml de bentonita por cada 200 ml de muestra. Las muestras obtenidas se enumeraron como 5 y 6, respectivamente.

5. Floculación, Ozonificación, Neutralización y Floculación

No conformes con los resultados obtenidos de las muestras 2 y 3, se sometieron éstas nuevamente a una alcalinización con sosa hasta un $\text{pH} = 11$ y se les agregaron cal y bentonita para dejarse flocular nuevamente. Las mejores condiciones se obtuvieron al agregar 10 ml de cal y 10 ml de bentonita por cada 200 ml de muestra. Las muestras obtenidas se enumeraron como 7 y 8, respectivamente.

6. Neutralización y Aeración

Buscando alternativas más sencillas de tratamiento, se realizó una alcalinización de la muestra original con cal hasta un $\text{pH} = 11$, esta muestra se dejó sedimentar y se filtró, enumerándose con el número 9. Esta misma muestra fue sometida durante 1 día a una aeración con microorganismos. Una vez realizado el proceso ésta se filtró y se enumeró como 10. Cabe mencionar de que para llevar la muestra original hasta un pH de 11 se necesitaron 3 gramos de cal sólida por cada 200 ml de agua.

4.3.2. Resultados Obtenidos

Una vez realizadas todas las pruebas se procedió a analizar cada una de las muestras obtenidas, compararlas con las originales y con las normas vigentes. Estos son los resultados:

Tabla 4.2. Resultados del Análisis del Agua Tratada

Muestra	Cond. µmhos/cm	pH	Sól Sed. ml/l	Sól Tot. mg/l	Sól Susp. mg/l	DBO mg/l	DQO mg/l	Grasa mg/l	SAAM mg/l	Pb ppm	Cu ppm	Al ppm	Zn ppm	Ni ppm
Original	5,550	3.59	4.5	9,870	75.0	20	7,800	187	200	1.5	0.12	2.0	900.0	55.0
1	2,450	7.5	ND	4,235	359.0	ND	200	152	59	0.6	ND	1.5	1.1	0.4
2	2,760	5.16	ND	6,523	226.0	ND	4,400	97	42	0.2	ND	4.0	150.0	40.0
3	1,500	3.78	ND	5,328	53.4	ND	2,600	37	10	0.0	ND	4.0	150.0	40.0
4	2,680	11	ND	2,570	42.8	ND	750	59	28	0.4	ND	1.3	0.1	0.1
5	2,370	11	ND	2,358	25.6	ND	630	53	39	0.5	ND	1.3	20.0	0.1
6	2,390	11	ND	3,415	37.4	ND	1,000	49	25	0.5	ND	1.3	0.6	0.1
7	2,180	11	ND	2,175	29.4	ND	800	50	21	0.5	ND	2.3	2.1	0.0
8	1,390	11	ND	2,291	8.3	ND	900	32	8	0.5	ND	2.3	2.5	0.2
9	2,400	11	ND	2,570	20.6	ND	330	47	23	0.7	0.01	1.4	0.8	0.1
10	2,400	11	ND	2,318	18.7	ND	300	43	19	0.7	0.01	1.4	0.8	0.1
Norma	5,000	6-9	No se Indica					60	30	1.0	5.0	10.0	6.0	4.0

Nota: el cadmio, el cromo total, el cromo hexavalente, el cianuro y la plata no se encuentran tabulados por ser cero en todos los casos.

ND = No Detectable

Como se puede observar la mejor calidad de agua se obtiene cuando se trabaja a pH's superiores a 7, que es cuando se logra reducir la concentración de zinc hasta 0.1 ppm, y la de níquel hasta 0.1 ppm. Ajustándose a la norma vigente, se observa que 6 muestras cumplen con ella. Asimismo, se observa que la cal es un factor muy importante para retirar las altas concentraciones de zinc presentes.

Cabe mencionar que para poder descargar el agua al drenaje, se debe de neutralizar a $\text{pH} = 7$ al final del tratamiento. También, se debe mencionar que existe en todos los casos una formación muy elevada de flóculos.

4.3.3. Eficiencia Alcanzada

En las Tablas 4.3 a 4.14 se presenta la eficiencia alcanzada en las muestras que cumplen en todos sus parámetros con la normatividad existente; asimismo, se presenta la dosis óptima de reactivos utilizados y los costos de los mismos para llevar a cabo el tratamiento de un metro cúbico de agua.

Tabla 4.3. Eficiencia Alcanzada de la Muestra No. 4

Parámetro	Unidades	Muestra		% Eficiencia
		Original	Tratada	
Conductividad	μmhos/cm	5,550	2,680	51.71
Sól. Sedimentables	ml/l	4.5	ND	100.00
Sólidos Totales	mg/l	9,870	2,570	73.96
Sólidos Suspendedos	mg/l	75	42.8	42.93
DBO	mg/l	20	ND	100.00
DQO	mg/l	7,800	750	90.38
Grasas y Aceites	mg/l	187	59	68.45
SAAM	mg/l	200	28	86.00
Plomo	ppm	1.5	0.4	73.33
Cobre	ppm	0.12	ND	100.00
Aluminio	ppm	2.0	1.3	35.00
Zinc	ppm	900	0.1	99.99
Níquel	ppm	55	0.1	99.82

Nota: ND = No Detectable

Tabla 4.4. Dosis Óptima para la Muestra No. 4

Material	Dosis (kg/m ³)	Costo Unitario (NS/kg)	Costo (NS/m ³)
Cal	2.40	0.83	1.99
Bentonita	3.00	0.42	1.26
Total			3.25

Tabla 4.5. Eficiencia Alcanzada de la Muestra No. 6

Parámetro	Unidades	Muestra		% Eficiencia
		Original	Tratada	
Conductividad	μmhos/cm	5,550	2,390	56.94
Sól. Sedimentables	ml/l	4.5	ND	100.00
Sólidos Totales	mg/l	9,870	3,415	65.40
Sólidos Suspendidos	mg/l	75	37.4	50.13
DBO	mg/l	20	ND	100.00
DQO	mg/l	7,800	1,000	87.18
Grasas y Aceites	mg/l	187	49	73.80
SAAM	mg/l	200	25	87.50
Plomo	ppm	1.5	0.5	66.67
Cobre	ppm	0.12	ND	100.00
Aluminio	ppm	2.0	1.3	35.00
Zinc	ppm	900	0.6	99.93
Níquel	ppm	55	0.1	99.82

Nota: ND = No Detectable

Tabla 4.6. Dosis Óptima para la Muestra No. 6

Material	Dosis (kg/m ³)	Costo Unitario (NS/kg)	Costo (NS/m ³)
Cal	1.20	0.83	1.00
Bentonita	2.70	0.42	1.13
Total			2.13

Tabla 4.7. Eficiencia Alcanzada de la Muestra No. 7

Parámetro	Unidades	Muestra		% Eficiencia
		Original	Tratada	
Conductividad	μmhos/cm	5,550	2,180	60.72
Sól. Sedimentables	ml/l	4.5	ND	100.00
Sólidos Totales	mg/l	9,870	2,175	77.96
Sólidos Suspendidos	mg/l	75	29.4	60.80
DBO	mg/l	20	ND	100.00
DQO	mg/l	7,800	800	89.74
Grasas y Aceites	mg/l	187	50	73.26
SAAM	mg/l	200	21	89.50
Plomo	ppm	1.5	0.5	66.67
Cobre	ppm	0.12	ND	100.00
Aluminio	ppm	2.0	2.3	0.00
Zinc	ppm	900	2.1	99.77
Níquel	ppm	55	ND	100.00

Nota: ND = No Detectable

Tabla 4.8. Dosis Óptima para la Muestra No. 7

Material	Dosis (kg/m ³)	Costo Unitario (NS/kg)	Costo (NS/m ³)
Cal	6.53	0.83	5.42
Bentonita	5.25	0.42	2.21
Sulfato de Aluminio	0.20	1.02	0.20
Total			12.18

Tabla 4.9. Eficiencia Alcanzada de la Muestra No. 8

Parámetro	Unidades	Muestra		% Eficiencia
		Original	Tratada	
Conductividad	µmhos/cm	5,550	1,390	74.95
Sól. Sedimentables	ml/l	4.5	ND	100.00
Sólidos Totales	mg/l	9,870	2,292	76.79
Sólidos Suspendidos	mg/l	75	8.3	88.93
DBO	mg/l	20	ND	100.00
DQO	mg/l	7,800	900	88.46
Grasas y Aceites	mg/l	187	32	82.89
SAAM	mg/l	200	8.0	96.00
Plomo	ppm	1.5	0.5	66.67
Cobre	ppm	0.12	ND	100.00
Aluminio	ppm	2.0	2.3	0.00
Zinc	ppm	900	2.5	99.72
Níquel	ppm	55	0.2	99.64

Nota: ND = No Detectable

Tabla 4.10. Dosis Óptima para la Muestra No. 8

Material	Dosis (kg/m ³)	Costo Unitario (NS/kg)	Costo (NS/m ³)
Cal	6.53	0.83	5.42
Bentonita	5.25	0.42	2.21
Sulfato de Aluminio	0.20	1.02	0.20
Ozono	0.075	25.33	1.90
Total			14.08

Tabla 4.11. Eficiencia Alcanzada de la Muestra No. 9

Parámetro	Unidades	Muestra		% Eficiencia
		Original	Tratada	
Conductividad	µmhos/cm	5,550	2,400	56.70
Sól. Sedimentables	ml/l	4.5	ND	100.00
Sólidos Totales	mg/l	9,870	2,570	73.96
Sólidos Suspendidos	mg/l	75	20.6	72.53
DBO	mg/l	20	ND	100.00
DQO	mg/l	7,800	330	95.77
Grasas y Aceites	mg/l	187	47	74.87
SAAM	mg/l	200	23	88.50
Plomo	ppm	1.5	0.7	55.33
Cobre	ppm	0.12	0.01	91.67
Aluminio	ppm	2.0	1.4	30.00
Zinc	ppm	900	0.8	99.91
Níquel	ppm	55	0.1	99.82

Nota: ND = No Detectable

Tabla 4.12. Dosis Óptima para la Muestra No. 9

Material	Dosis (kg/m ³)	Costo Unitario (NS/kg)	Costo (NS/m ³)
Cal	15.0	0.83	12.45
Bentonita	3.0	0.42	1.26
Total			13.71

Tabla 4.13. Eficiencia Alcanzada de la Muestra No. 10

Parámetro	Unidades	Muestra		% Eficiencia
		Original	Tratada	
Conductividad	μmhos/cm	5,550	2,400	56.76
Sól. Sedimentables	ml/l	4.5	ND	100.00
Sólidos Totales	mg/l	9,870	2,318	76.51
Sólidos Suspendidos	mg/l	75	18.7	75.07
BOD	mg/l	20	ND	100.00
COD	mg/l	7,800	300	96.15
Grasas y Aceites	mg/l	187	43	77.01
SAAM	mg/l	200	19	90.50
Plomo	ppm	1.5	0.7	53.33
Cobre	ppm	0.12	0.01	91.67
Aluminio	ppm	2.0	1.4	30.00
Zinc	ppm	900	0.8	91.91
Niquel	ppm	55	0.1	99.82

Nota: ND = No Detectable

Tabla 4.14. Dosis Óptima para la Muestra No. 10

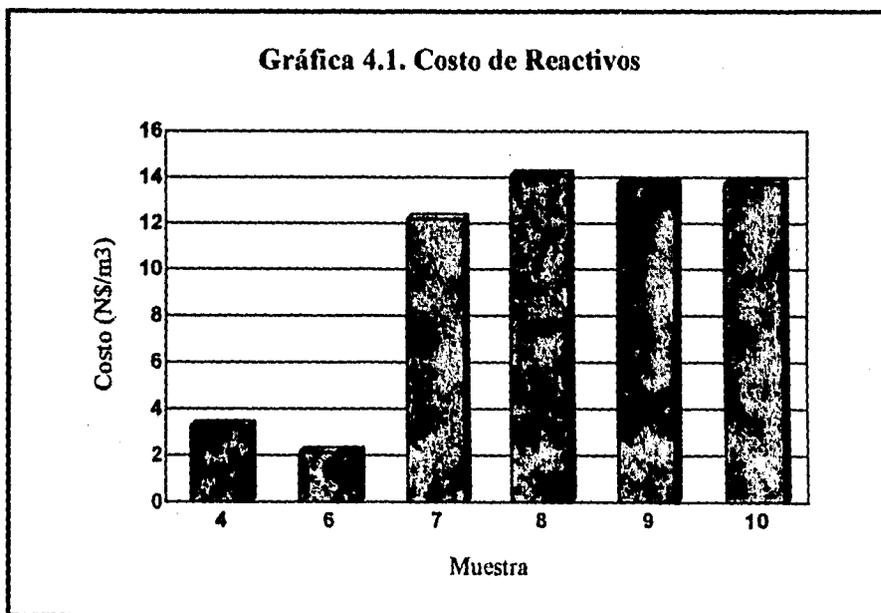
Material	Dosis (kg/m ³)	Costo Unitario (NS/kg)	Costo (NS/m ³)
Cal	15.0	0.83	12.45
Bentonita	3.00	0.42	1.26
Total			13.71

El resumen de los porcentajes de eficiencia alcanzada y de los costos del tratamiento se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 4.15. Eficiencia Alcanzada y Costos del Tratamiento

Parámetro	M-4	M-6	M-7	M-8	M-9	M-10
Conductividad	51.71	56.94	60.72	74.95	56.70	56.76
Sólidos Totales	73.96	65.40	77.96	76.79	73.96	76.51
Sólidos Suspendedos	42.93	50.13	60.80	88.93	72.53	75.07
DQO	90.38	87.18	89.74	88.46	95.77	96.16
Grasas y Aceites	68.45	73.80	73.26	82.89	74.87	77.01
SAAM	86.00	87.50	89.50	96.00	88.50	90.50
Plomo	73.33	66.67	66.67	66.67	55.33	55.33
Cobre	100.00	100.00	100.00	100.00	91.67	91.67
Aluminio	35.00	35.00	0.00	0.00	30.00	30.00
Zinc	99.99	99.93	99.77	99.72	99.91	99.91
Níquel	99.82	99.82	100.00	99.64	99.82	99.82
Costo Trat. (NS/m³)	3.25	2.13	12.18	14.08	13.71	13.71

Nota: Estos costos no incluyen el precio del ácido y de la sosa para neutralizar las muestras



4.3.4. Análisis de Resultados

Únicamente 6 de las 10 muestras analizadas cumplen con los requisitos de la normatividad existente. Como se puede observar las eficiencias alcanzadas son elevadas en todos los casos, por lo que el tratamiento se seleccionará en función a los costos de los reactivos utilizados. Se decidió por la muestra No. 4 por ser esta la que tiene los costos de operación más bajos junto con la sencillez del tratamiento.

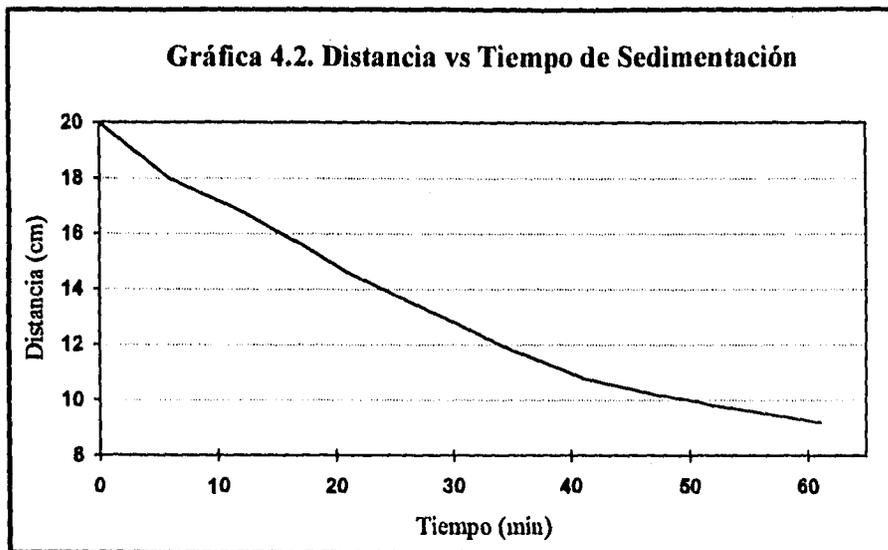
4.4. PRUEBAS DE SEDIMENTACIÓN

Una vez seleccionado el mejor tratamiento se realizaron las pruebas de sedimentación correspondientes para poder obtener la velocidad de sedimentación de las partículas, un parámetro necesario para el diseño de un sedimentador.

Esta prueba consistió en colocar una cantidad conocida de agua en una probeta, inducir a la floculación e ir registrando el tiempo que tardan las partículas en sedimentarse, se registró el tiempo contra la distancia recorrida de los flóculos, los resultados obtenidos fueron los siguientes:

Tabla 4.16. Resultados de la Prueba de Sedimentación

Tiempo (min)	Distancia (cm)	Tiempo (min)	Distancia (cm)
0	20.00	31	12.60
6	18.00	35	11.80
9	17.40	41	10.80
12	16.80	47	10.20
17	15.60	50	10.00
21	14.60	52	9.80
24	14.00	55	9.60
28	13.20	61	9.20



De la pendiente de esta gráfica se obtiene que la velocidad de sedimentación es de 0.25 cm/min.

4.5. RESUMEN DE RESULTADOS

A continuación se presenta un resumen con todos los resultados obtenidos:

La muestra seleccionada es la 4, el proceso de tratamiento consistió en neutralizar el agua residual con sosa hasta un pH=7, se produjo la floculación con cal y bentonita. Una vez llevada a cabo la floculación la muestra se dejó sedimentar y se filtró. Finalmente, se llevó a cabo una neutralización con ácido sulfúrico, para llevar el agua tratada desde un pH=11 a un pH=7.

Los resultados de laboratorio para esta muestra fueron los siguientes:

Tabla 4.17. Comparación de Resultados del Análisis del Agua Residual y del Agua Tratada

Parámetro	Unidades	Muestra		% Eficiencia	Norma
		Original	Tratada		
Conductividad	µmhos/cm	5,550	2,680	51.71	5,000
pH		3.59	7		6-9
Sól. Sedimentables	ml/l	4.5	ND	100.00	No Indica
Sólidos Totales	mg/l	9,870	2,570	73.96	No Indica
Sólidos Suspendedos	mg/l	75	42.8	42.93	No Indica
BOD	mg/l	20	ND	100.00	No Indica
COD	mg/l	7,800	750	90.38	No Indica
Grasas y Aceites	mg/l	187	59	68.45	60
SAAM	mg/l	200	28	86.00	30
Plomo	ppm	1.5	0.4	73.33	1.0
Cobre	ppm	0.12	ND	100.00	5.0
Aluminio	ppm	2.0	1.3	35.00	10.0
Zinc	ppm	900	0.1	99.99	6.0
Níquel	ppm	55	0.1	99.82	4.0

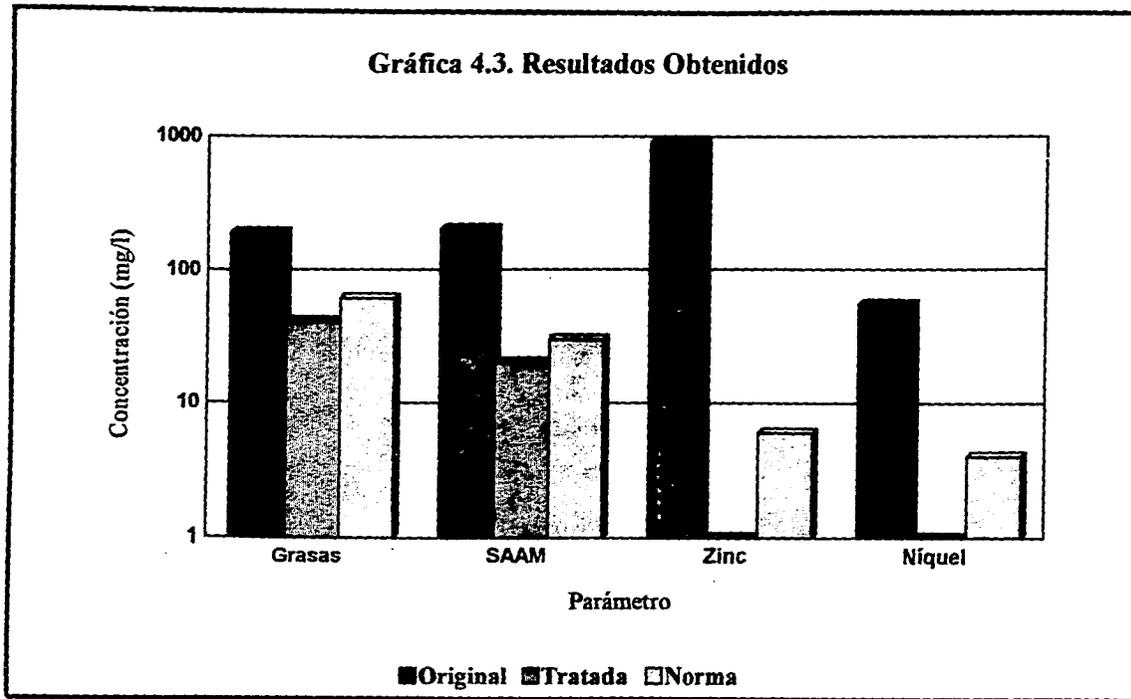
Nota: ND = No Detectable

La dosis óptima de reactivos es la siguiente:

Tabla 4.18. Dosis Óptima de Reactivos

Material	Dosis (kg/m ³)	Costo Unitario (NS/kg)	Costo (NS/m ³)
Cal	2.40	0.83	1.99
Bentonita	3.00	0.42	1.26
Total			3.25

Nota: No incluye el ácido y la sosa para las neutralizaciones



Los parámetros óptimos para la floculación son los siguientes:

Tabla 4.19. Parámetros Óptimos para la Floculación

Tiempo en agitación rápida	1 min
Velocidad de agitación rápida	100 RPM
Tiempo en agitación lenta	30 min
Velocidad en agitación lenta	25 RPM
Velocidad de formación del flóculo	25 seg
Tamaño del flóculo	mediano
Velocidad de sedimentación del flóculo	0.25 cm/min
Turbiedad del agua decantada	10 u
Turbiedad del agua filtrada	3 u
pH del agua sin neutralizar	11
Porcentaje de lodos húmedos	15%
Descarga Máxima Promedio	16,200 m ³ /día

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

5. DISEÑO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO

Antes de comenzar a diseñar una planta de tratamiento se debe seleccionar el tipo de operaciones unitarias que van a intervenir, ésto se lleva a cabo en función de los parámetros que mayor peso tienen en el agua residual. En la tabla siguiente se presentan las diferentes alternativas para el tratamiento²²:

²² Metcalf & Eddy. "Wastewater Engineering: Treatment, Disposal and Reuse". Ed. McGraw-Hill. 1991.

Tabla 5.1. Alternativas para el Tratamiento de Agua Residual

Parámetro	Alternativa
Sólidos en Suspensión	Sedimentación Desbaste y aeración Variaciones de filtración Flotación Adición de polímeros y productos químicos Coagulación / Sedimentación
Materia Orgánica Biodegradable	Variaciones de lodos activados Película fija: filtros percoladores Película fija: discos biológicos Variaciones de lagunas Filtración intermitente en arena Sistemas fisicoquímicos
Patógenos	Cloración Hipocloración Ozonización
Nitrógeno	Denitrificación Arrastre de amoníaco Intercambio de iones Cloración / Desinfección
Fósforo	Adición de sales metálicas Coagulación y sedimentación con cal Eliminación biológica y química del fósforo
Moléculas orgánicas	Adsorción en carbón Ozonización
Metales pesados	Precipitación química Intercambio de iones
Sólidos inorgánicos disueltos	Intercambio de iones Osmosis inversa Electrodialisis

Revisando el análisis del agua y las características de la planta industrial se determinó que para este caso el método que aplica es el tratamiento fisicoquímico, porque la calidad, la cantidad de agua y el espacio disponible no permiten un tratamiento biológico. Por consiguiente, se propone que el tratamiento más adecuado sea el tratamiento de clarifloculación química, seguida por una sedimentación.

Para poder determinar la dosis de coagulantes más efectiva y económica para un tratamiento de floculación, se llevó a cabo la prueba de jarras, debido a que la cantidad de coagulantes no se puede determinar analíticamente, pues depende de factores como el pH, temperatura, tiempo de mezclado; parámetros que a su vez dependen del agua en estudio. Asimismo, se determinaron los parámetros necesarios para poder diseñar la planta.

5.1. DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO

Después de haber realizado la tratabilidad del agua residual y de revisar los resultados obtenidos se propone una planta de tratamiento que constará de los siguientes equipos:

- 1. Tanque de Almacenamiento.** Este consistirá de una cisterna en donde se almacenará el agua residual proveniente del proceso para su tratamiento posterior.
- 2. Cuarto de Reactivos.** Este consistirá de un cuarto en donde se tendrán dos tanques de acero inoxidable y en donde se prepararán los reactivos que se utilizarán en el tratamiento. Estos tanques tendrán un mezclador que permitirá la agitación de los reactivos. Los tanques estarán elevados para que se alimenten los reactivos por gravedad. A la salida de los tanques existirá una unidad dosificadora que permite agregar la cantidad exacta de reactivos al tratamiento.
- 3. Unidad Mezcladora.** Esta consistirá de un canal Parshall donde se mezclarán los reactivos con el agua residual. El canal Parshall permite el mezclado rápido del agua residual con los reactivos por medio de un salto hidráulico, por lo que se evita el uso de un mezclador mecánico. Asimismo, el canal Parshall, que produce una pérdida de carga mínima, se puede construir de diversos materiales en una amplia cantidad de tamaños, por lo que puede manejar cualquier flujo de agua que se pueda presentar.

4. **Tanques de Floculación.** Este consistirá en un floculador de canal con mamparas de flujo horizontal. Estos floculadores son fáciles de limpiar y de drenar. Constan de un tanque de concreto que se encuentra dividido por mamparas de madera. El agua recorre todo el tanque cambiando continuamente de dirección, lo que produce una agitación lenta, ideal para una buena floculación. El floculador puede tener varias secciones y las mamparas pueden estar separadas a diferentes distancias en cada sección. Los floculadores con mamparas son de fácil construcción y mantenimiento, funcionan eficazmente con gastos variables.

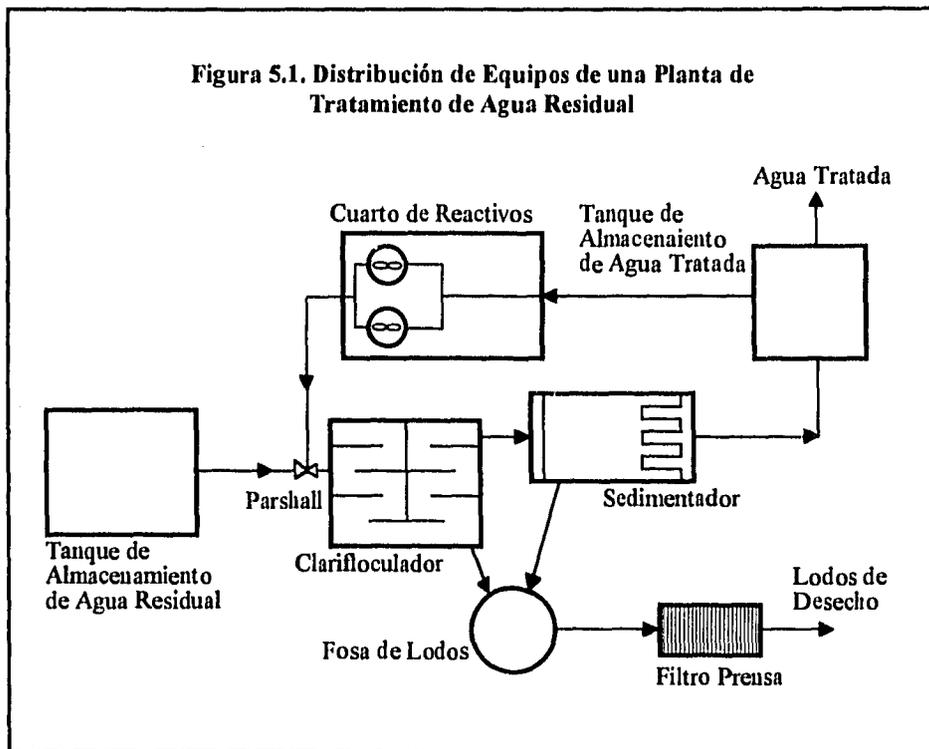
5. **Tanques de Sedimentación.** Para la planta de tratamiento que se propone se requerirá de un tanque de sedimentación de flujo horizontal, sin eliminación mecánica de lodos. Estos consisten en un tanque rectangular donde el agua recorre lentamente la longitud del tanque depositando los flóculos en el fondo del mismo. Este tanque tiene el fondo inclinado para facilitar la limpieza y eliminación de los lodos. Estos sedimentadores tienen la ventaja de tener costos de construcción bajos y su operación y mantenimiento son sencillos.

6. **Tanque de Almacenamiento de Agua Tratada.** El objetivo de este tanque es utilizar el agua tratada para utilizarla en la preparación de reactivos y permitir la neutralización final para descargarla al drenaje. Consistirá en una cisterna con capacidad adecuada al gasto de agua que se trate.

7. **Tanque de Acumulación de Lodos.** La función de este tanque es permitir acumular los lodos producidos en el floculador y en el sedimentador para su eliminación final.

8. **Equipos Auxiliares.** Estos consistirán de todas las bombas necesarias para permitir el flujo del agua, así como de todas las tuberías, válvulas y accesorios que permitan a los equipos estar conectados entre sí.

En la figura 5.1 se ilustra el esquema de distribución de los equipos de la planta de tratamiento²³.



5.2. BASES DE DISEÑO

Función de la Planta. La función de la planta que se va a diseñar es tratar el agua residual de la empresa SACHS de México, una industria metal-metálica. El objetivo del tratamiento es dejar el agua con una calidad que permita descargarla al drenaje cumpliendo con la legislación existente o reutilizarla en el proceso.

²³ Schulz, Christopher R. y Okun, Daniel A. "Tratamiento de Aguas Superficiales para Países en Desarrollo". Ed. Limusa. 1990.

Tipo de Proceso. El tratamiento que se impartirá en la planta es una floculación química seguida por una sedimentación; proceso apropiado para las características del agua residual.

Capacidad de la Planta de Tratamiento. La capacidad de diseño de la planta de tratamiento será de 5,000 l/h.

Ampliaciones Futuras. No se contemplan ampliaciones futuras en la planta por encontrarse ésta sobrediseñada, y por no existir espacio que permita ampliaciones.

Especificaciones de los Reactivos. Los reactivos que se utilizarán para el tratamiento son los siguientes:

Hidróxido de Sodio.

Estado Físico: Polvo

Forma de Recibo: Costales de 20 kg

Proveedor sugerido: Materias Primas S.A. de C.V.

Ácido Sulfúrico

Estado Físico: Líquido

Forma de Recibo: Garrafrones de 20 l.

Proveedor sugerido: Materias Primas S.A. de C.V.

Cal (Hidróxido de Calcio)

Estado Físico: Polvo

Forma de Recibo: Costales de 20 kg

Proveedor sugerido: Cal de Apasco S.A.

Bentonita

Estado Físico: Polvo

Forma de Recibo: Costales de 20 kg.

Proveedor sugerido: Minerales y Moliendas S.A. de C.V.

Especificaciones del Agua Tratada. El agua residual una vez tratada debe cumplir con todos los lineamientos establecidos en la norma NOM-CCA-031-ECOL/1993, que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales provenientes de la industria, actividades agroindustriales, de servicios y el tratamiento de aguas residuales que serán vertidas a los sistemas de drenaje y alcantarillado urbano o municipal; y la norma NOM-CCA-017-ECOL/1993, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores provenientes de la industria de acabados metálicos.

Condiciones de la Alimentación. El agua residual que sale del proceso llega a una cisterna de almacenamiento, donde se acumula una cantidad suficiente para ser tratada. El agua se bombeará de la cisterna a la planta de tratamiento por medio de una bomba de abastecimiento de 1.5 HP.

Condiciones de la Descarga. El agua una vez tratada es llevada a un tanque de almacenamiento y a partir de este punto tendrá diferentes destinos: una parte será descargada al drenaje, otra se reutilizará en el proceso, otra se empleará para la limpieza de la planta y finalmente una última parte será utilizada para preparar las soluciones que se emplean en el tratamiento.

Eliminación de los Lodos Producidos. El tratamiento de floculación produce lodos, que son resultado de la contaminación que se le retiró al agua, estos lodos son considerados por SEDESOL como residuos peligrosos, los cuales deben ser confinados respecto a la Ley, con base en el Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en Materia de Residuos Peligrosos.

5.3. CRITERIOS DE DISEÑO

A pesar de que no es necesario diseñar todos los equipos que intervienen en una planta de tratamiento por clarifloculación química pues muchos se encuentran disponibles en el mercado, se decidió diseñarlos al detalle para ejemplificar la manera en que ésto se realiza. A continuación se presentan algunos de los criterios de diseño que se utilizaron.

5.3.1. Cuarto de Reactivos

El cuarto de reactivos es el lugar donde se prepararán y alimentarán los reactivos a la unidad mezcladora. En sí, se deberán tener dentro de este cuarto tanques de solución, unidades que permitan alimentar un flujo constante de solución, para aplicar los coagulantes necesarios para la floculación. Algunos requerimientos para el diseño de estos alimentadores son:

1. En el punto de aplicación, se debe instalar un mínimo de dos alimentadores de productos químicos, de manera que la alimentación no se interrumpa cuando una unidad esté fuera de servicio.
2. La capacidad combinada de los alimentadores químicos debe ser mayor que la dosis máxima requerida, pero no tan grande como para permitir inexactitudes durante los períodos de flujo bajo.
3. Si existen tanques de concreto, éstos deben estar protegidos contra la corrosión mediante una capa de esmalte biturástico, plástico, hule o alguna sustancia de naturaleza similar.
4. Se necesitan tuberías para desagüe de tamaño adecuado a fin de facilitar la limpieza de los tanques y la remoción de los sedimentos acumulados.

5. Debe considerarse el uso de paletas ya sea manuales o accionadas por el motor para el mezclado de las soluciones químicas.
6. Se necesitan tuberías de alimentación de productos químicos hechas de manguera de plástico o hule, sostenidas a intervalos cortos. Los canales abiertos son recomendados para transportar suspensiones de cal.
7. La localización de los alimentadores de productos químicos debe ser tan cercana como sea posible al punto de aplicación de los productos químicos.

Los alimentadores de productos químicos en solución se pueden clasificar en tres grupos:

1. De tasa constante
2. Proporcionales
3. De solución saturada.

5.3.1.1. Alimentadores de Tasa Constante

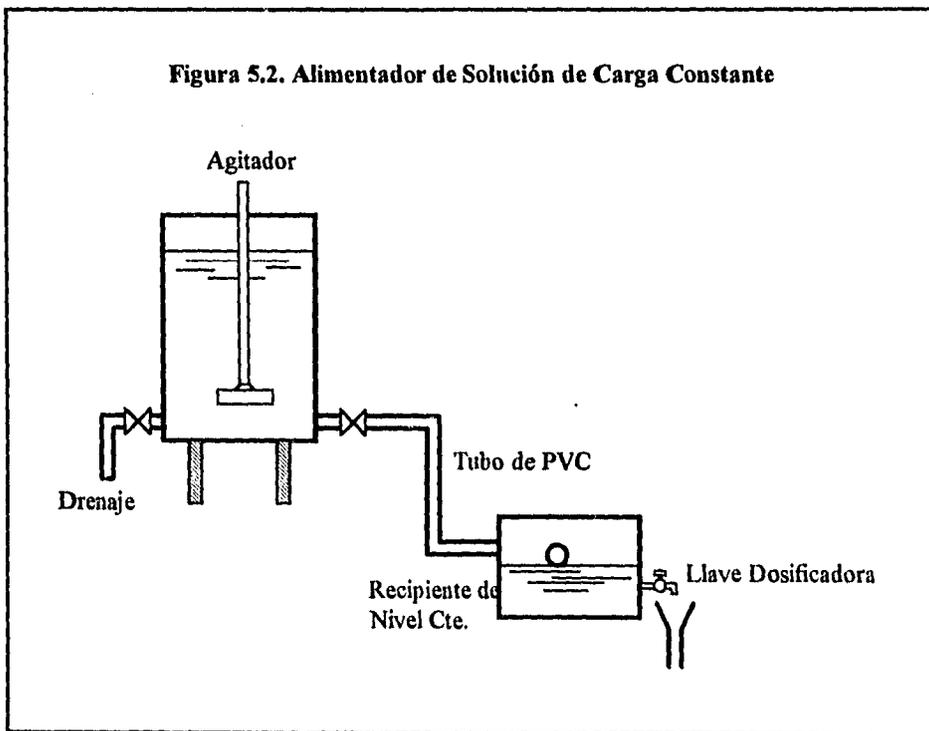
Este tipo de alimentador es ampliamente utilizado para alimentar productos químicos en plantas de tratamiento²⁴. El sistema se compone de los siguientes equipos:

1. Un tanque, para disolver y/o mezclar los productos químicos en el agua y producir soluciones de concentración conocida.
2. Una caja de carga constante con una válvula de flotador.

²⁴ Schulz, Christopher R. y Okun, Daniel A. "Tratamiento de Aguas Superficiales para Países en Desarrollo". Ed. Limusa. 1990.

3. Una llave dosificadora o un orificio ajustable instalado en el lado de salida de la caja de carga constante para ajustar el flujo de la solución.

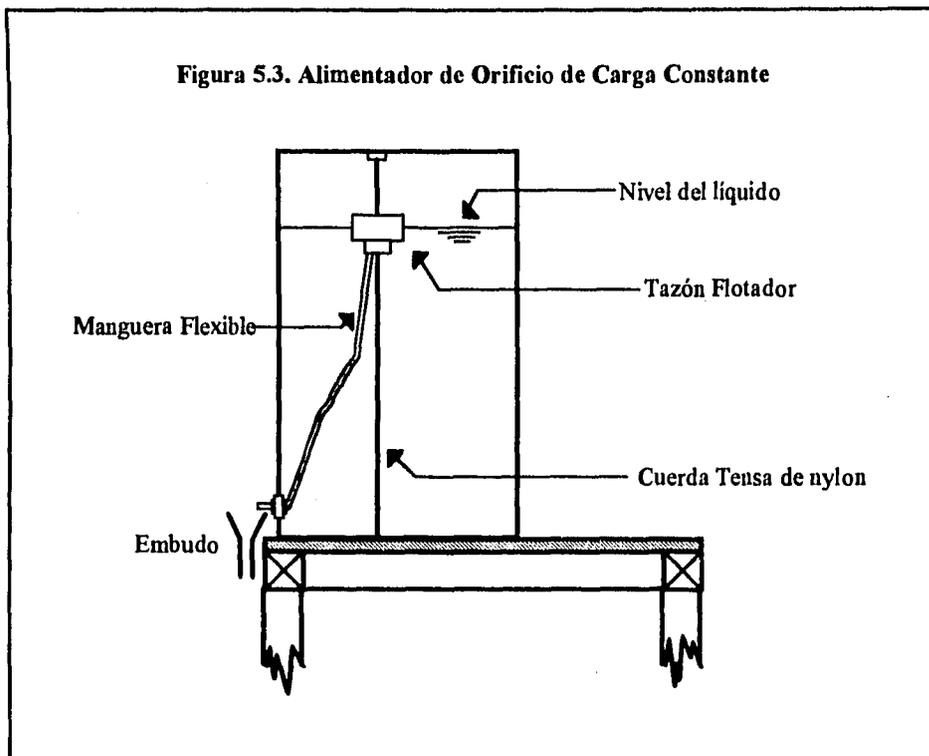
Todas las partes expuestas se deben proteger contra la corrosión, incluyendo el flotador, el cual se puede hacer de hule endurecido, vidrio o cerámica. Se pueden conectar dos tanques de solución a una sola caja de carga constante para asegurar el funcionamiento ininterrumpido cuando se está llenando un tanque.



Un alimentador de productos químicos sencillo sin caja de carga constante es un alimentador de orificio de carga constante²⁵, en el cual, el orificio de descarga es fácilmente

²⁵ Schulz, Christopher R. y Okun, Daniel A. "Tratamiento de Aguas Superficiales para Países en Desarrollo". Ed. Limusa. 1990.

ajustable. La tasa de alimentación se controla manteniendo una carga constante sobre el orificio de descarga que flota a una profundidad constante por debajo de la superficie del líquido.



5.3.1.2. Alimentadores Proporcionales

En este tipo de alimentadores, el flujo en el canal de influentes impulsa una rueda de paletas a una velocidad proporcional a la tasa de flujo. La rueda impulsa una flecha, la que a su vez hace girar a los recipientes disifcadores montados en la flecha. Éstos se colocan en dos tanques de solución localizados a ambos lados del canal de agua cruda. Los recipientes se sumergen en la solución química del tanque o cada uno vacía un volumen constante de

solución en un embudo, el cual vierte la solución al canal en un punto inmediatamente aguas arriba de la rueda de paletas por medio de un tapón de hule.

5.3.2. Unidades Mezcladoras

Para tener una buena floculación es necesario dispersar los coagulantes uniformemente en toda la masa de agua con la máxima rapidez que se pueda alcanzar. Para realizar este propósito es necesario utilizar un dispositivo de mezclado hidráulico rápido, el cual se localiza en el inicio de la planta y está diseñado para generar turbulencia intensa en el agua.

Estos mezcladores se diseñan para cualquiera de dos tipos de condiciones de flujo: flujo en canal abierto o a presión en tuberías. Cuando es factible, se prefiere el flujo en canal abierto que en canales a presión ya que con esto se eliminan las tuberías y accesorios.

Como unidad mezcladora se seleccionó el canal de Parshall²⁶, el cual fue ideado originalmente para mediciones de agua para irrigación en canales abiertos donde puede haber mucho escombros y cieno; donde se pueden tolerar pequeñas pérdidas de carga.

En principio, este canal es similar al medidor de Venturi porque tiene una sección de entrada con sus lados levemente convergentes hacia una angostura o garganta, de dimensiones cuidadosamente fijadas y una sección de salida cuyos lados divergen en mayor proporción hacia la anchura original del canal.

Tiene la siguientes ventajas:

²⁶ Schulz, Christopher R. y Okun, Daniel A. "Tratamiento de Aguas Superficiales para Países en Desarrollo". Ed. Limusa. 1990.

1. El salto hidráulico evita la necesidad de utilizar agitación mecánica.
2. Se reducen las obstrucciones causadas por material suspendido.
3. Funciona como un dispositivo individual de carga con una pérdida mínima de la misma.
4. Se puede construir de materiales baratos como concreto y madera.

Se compone de tres secciones: una sección convergente, una sección de paredes verticales llamada garganta y una sección divergente. El piso de la sección convergente es horizontal; el de la garganta descendente y el de la sección divergente es ascendente.

El flujo a través de un canal Parshall se puede verificar en dos condiciones diferentes, que corresponden a dos regímenes distintos:

1. **Flujo o descarga libre:** la descarga se hace libremente como en un vertedor, en que la vena vertiente es independiente de las condiciones de aguas abajo.
2. **Ahogamiento o sumersión:** cuando el nivel de aguas abajo es suficientemente elevado para influir y retardar el flujo a través del medidor, es el régimen comúnmente señalado como descarga sumergida, de características diferentes de aquellas que se emplean para los vertedores.

El ahogamiento es causado por condiciones de aguas abajo, obstáculos existentes, falta de declive o niveles obligados en tramos o unidades subsecuentes.

Cuando se utiliza un canal Parshall para determinar el gasto es suficiente medir la altura del líquido si se tiene flujo libre.

La selección del medidor Parshall de tamaño más conveniente para cualquier gama de caudales envuelve consideraciones como las siguientes: ancho del canal existente, tirante del agua en ese canal, pérdida de carga admisible, posibilidad de nuevos caudales, etc.

Frecuentemente el ancho de la garganta del Parshall está comprendido entre un tercio y la mitad del ancho de los canales existentes. Sin embargo, no se aplica a los canales con tirantes bajos, a los profundos o estrechos.

Por lo general, puede seleccionarse el tamaño del medidor por el límite superior e inferior del flujo que va a manejar.

Tabla 5.2. Capacidad de la Garganta para Diferentes Gastos

Ancho de la Garganta (W) (cm)	Capacidad (l/s)	
	Mínima	Máxima
7.6	0.85	53.8
15.2	1.52	110.4
22.9	2.55	251.9
30.5	3.11	455.6
45.7	4.25	696.7
61.0	11.89	936.7
91.5	17.26	1,426.3
122.0	36.79	1,921.5
152.5	62.8	2,422.0
183.0	74.4	2,929.0
213.5	115.4	3,440.0
244.0	130.7	3,950.0

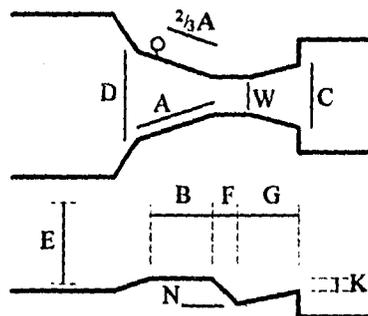
Una vez seleccionado el ancho de la garganta (W), se obtienen las dimensiones del canal con ayuda de la siguiente tabla:

Tabla 5.3. Dimensiones del Canal Parshall

W	A	B	C	D	E	F	G	K	N
2.5	36.3	35.6	9.3	16.8	22.9	7.6	20.3	1.9	2.9
7.6	46.6	45.7	17.8	25.9	38.1	15.2	30.5	2.5	5.7
15.2	62.1	61.0	39.4	40.3	45.7	30.5	45.7	7.6	11.4
22.9	88.0	86.4	38.0	57.5	61.0	30.5	61.0	7.6	11.4
30.5	137.2	134.4	61.0	84.5	91.5	61.0	91.5	7.6	22.9
45.7	144.9	142.0	76.2	102.6	91.5	61.0	91.5	7.6	22.9
61.0	152.5	149.6	91.5	120.7	91.5	61.0	91.5	7.6	22.9
91.5	167.7	164.5	122.0	157.2	91.5	61.0	91.5	7.6	22.9
122.0	183.0	179.5	152.5	193.8	91.5	61.0	91.5	7.6	22.9
152.5	198.3	194.1	183.0	230.3	91.5	61.0	91.5	7.6	22.9
183.0	213.5	209.0	213.5	266.7	91.5	61.0	91.5	7.6	22.9
213.5	228.8	224.0	244.0	303.0	91.5	61.0	91.5	7.6	22.9
244.0	244.0	239.2	274.5	340.0	91.5	61.0	91.5	7.6	22.9
305.0	274.5	427.0	366.0	475.9	122.0	91.5	183.0	15.3	34.3

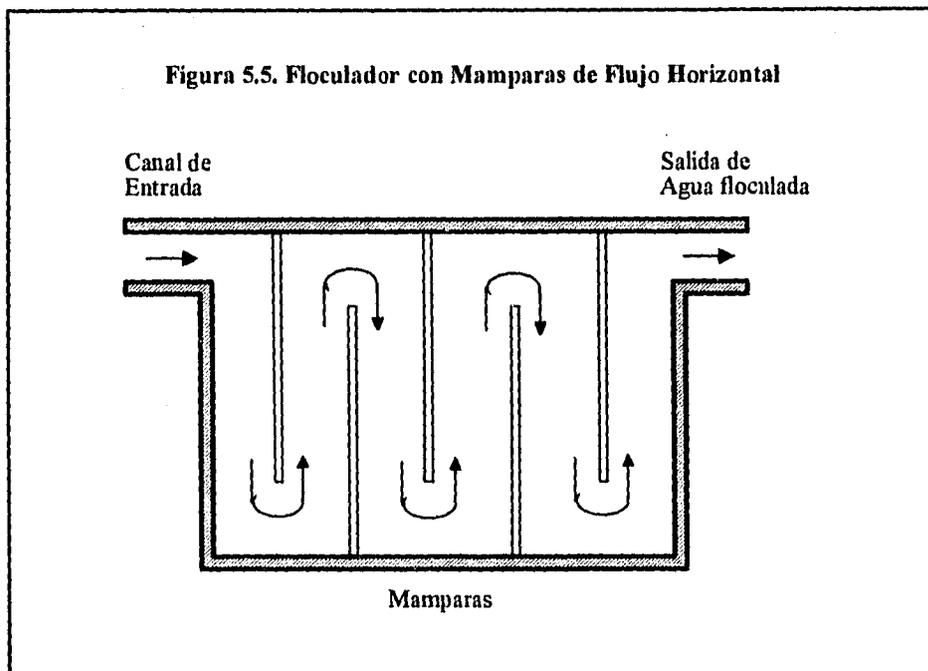
Nota: todas las dimensiones en cm.

Figura 5.4. Esquema de un Canal Parshall



5.3.3. Tanques de Floculación

En los floculadores de canal con mamparas, el mezclado se logra invirtiendo el flujo de agua a través de canales formados por mamparas. Estos floculadores tienen la ventaja de funcionar en condiciones de flujo pistón, evitándose así los problemas de cortocircuito²⁷.



Se prefieren los floculadores de flujo horizontal con mamparas en uno y otro lado, sobre los de flujo vertical con mamparas arriba y abajo, debido a que aquéllos son más fáciles de limpiar y drenar; además, la caída de presión, que regula el grado de mezclado, se puede cambiar fácilmente instalando mamparas adicionales o removiendo porciones de las ya

²⁷ Schulz, Christopher R. y Okun, Daniel A. "Tratamiento de Aguas Superficiales para Países en Desarrollo". Ed. Limusa. 1990.

existentes. La profundidad del agua en los canales de las unidades puede ser hasta de 3 metros, requiriéndose así menor área superficial.

Para calcular la caída de presión en un floculador se utiliza la siguiente ecuación:

$$h = \kappa \frac{v^2}{2g}$$

Donde:

h = caída de presión, en m.

κ = constante empírica, cuyo valor varía entre 2.5 y 4.

v = velocidad del líquido, en m/seg.

g = constante de la gravedad, 9.81 m/seg².

El valor de κ no se puede determinar anticipadamente con exactitud; por lo tanto, es mejor diseñar para un valor bajo de κ , ya que siempre se pueden añadir tablas a las mamparas en caso de que se necesite una caída de presión adicional.

El número de mamparas necesarias para lograr el gradiente de velocidad deseado en unidades de flujo horizontal, se puede calcular a partir de la siguiente ecuación:

$$n = \sqrt[3]{\frac{2\mu t}{\rho(1.44 + f)} \times \frac{HLG^2}{Q}}$$

Donde:

n = Número de mamparas en el tanque.

H = Profundidad del agua en el tanque, en m.

L = Longitud del tanque, en m.

G = Gradiente de velocidad, en seg⁻¹.

Q = Gasto, en m³/seg.

- t = Tiempo de floculación, en seg.
 ρ = Densidad del agua, en kg/m^3 .
 μ = Viscosidad dinámica, en $\text{kg/m}\cdot\text{seg}$.
 f = Coeficiente de fricción de las mamparas.
 W = Ancho del tanque, en m.

La velocidad del agua generalmente varía de 0.3 a 0.1 m/seg. El tiempo de residencia varía de 15 a 30 minutos. En general el gradiente de velocidad debe variar entre 100 y 10 seg^{-1} . Algunos otros criterios de diseño son los siguientes, aunque no son generales:

1. La distancia entre mamparas no debe ser menor de 45 cm para permitir la limpieza.
2. La distancia libre entre el extremo de cada mampara y el muro es de aproximadamente $1\frac{1}{2}$ veces la distancia entre las mamparas y no debe ser menor de 60 cm.
3. La profundidad del agua no debe ser menor de 1.0 m.
4. Para las mamparas se debe utilizar madera resistente al deterioro, la construcción con madera se prefiere a las partes metálicas.
5. Evitar utilizar mamparas de asbesto-cemento ya que se corroen al pH de coagulación con sulfato de aluminio.

La floculación de energía disminuida en los canales de mamparas, generalmente se logra variando el espaciamiento entre las mamparas, ésto es: disminuyéndolo, para gradientes altos de velocidad, y aumentándolo, para gradientes bajos de velocidad.

5.3.4. Tanques de Sedimentación

Una de las operaciones más utilizadas en el tratamiento de aguas residuales es la sedimentación por medio del asentamiento gravitacional de las partículas en suspensión de mayor densidad que el agua, en este proceso ocurre de manera natural la flotación de los residuos de baja densidad.

Las partículas presentes en una suspensión sedimentan de acuerdo a su concentración y características. Existen cuatro mecanismos que describen este comportamiento:

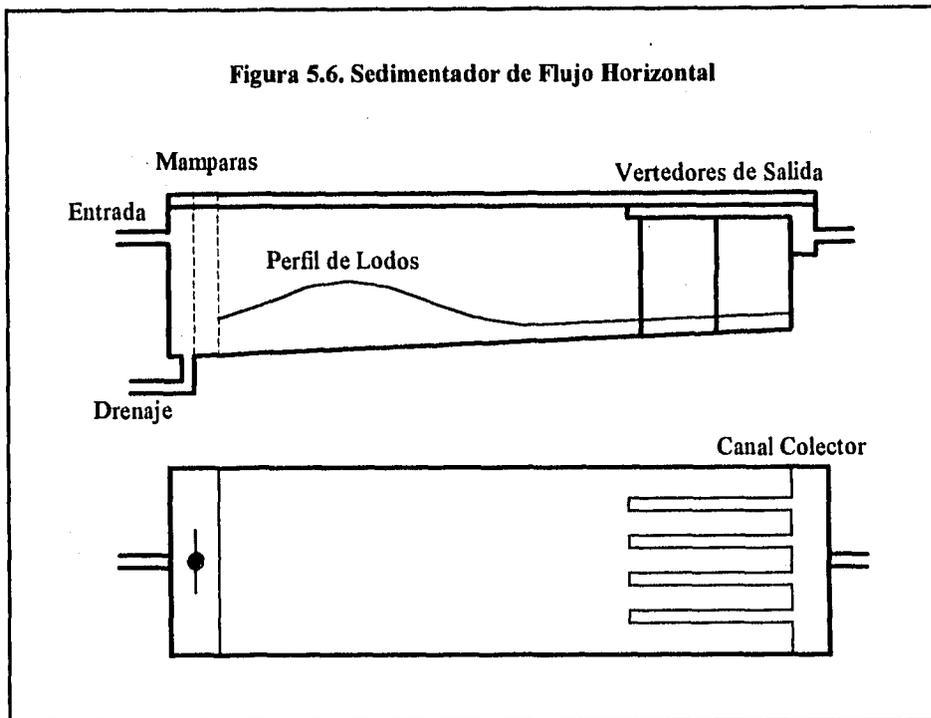
1. **Sedimentación de Partículas Discretas.** Ocurre en aguas con baja concentración de partículas. Estas sedimentan individualmente sin interactuar con las demás.
2. **Sedimentación Floculenta.** Se presenta en aguas con un contenido importante de sólidos en suspensión, en este caso se espera que las partículas se aglomeren de manera natural incrementando su tamaño, masa y velocidad de asentamiento.
3. **Sedimentación Másica o Impedida.** Ocurre en suspensiones de concentración intermedia en las que se forma una estructura que sedimenta como una unidad.
4. **Espesamiento.** Ocurre en medio de alta concentración formándose una estructura que se comprime debido al peso de las partículas que se van uniendo a la estructura.

Durante el proceso de sedimentación comúnmente ocurren los cuatro mecanismos simultáneamente.

La función principal de la sedimentación es remover de manera eficiente los sólidos suspendidos, para producir un efluente clarificado. Los sedimentadores deben estar diseñados para colectar las partículas sedimentadas, espesándolas para facilitar su manejo posterior.

En un sedimentador rectangular de flujo horizontal, el agua floculada se distribuye uniformemente a través de la zona de entrada por medio de un sistema distribuidor, tal como una mampara perforada. El agua recorre lentamente la longitud del tanque depositando flóculos en el fondo del mismo y formando una capa de lodo. El sobrenadante clarificado se acumula en los vertedores de salida o en las artesas sumergidas. El piso inclinado del fondo

facilita la limpieza manual y el drenaje del lodo, usualmente por medio de mangueras de alta presión o boquillas fijas en el piso del tanque.



Las ventajas que tiene el sedimentador de flujo horizontal son las siguientes:

1. El proceso es tolerante a las variaciones hidráulicas y de calidad.
2. El proceso proporciona un rendimiento predecible en la mayoría de las condiciones climáticas y operacionales.
3. Los resultados a escala laboratorio son aplicables a escala de planta.
4. El proceso opera excepcionalmente bien cuando las cargas de lodo son muy altas.
5. Los costos de construcción son bajos y permiten ampliación.
6. La operación y el mantenimiento son sencillos.

Los criterios que regulan el diseño de los tanques de sedimentación son los siguientes:

1. Cantidad de agua que se va a tratar.
2. Tiempo de residencia determinado.
3. Gasto superficial seleccionado.

El gasto superficial se define como la relación entre el gasto del influente y el área superficial del tanque. Las fórmulas básicas que se aplican para el diseño de tanques de sedimentación son:

$$t = 24 \frac{V}{Q}$$
$$v_s = 24 \frac{H}{t}$$
$$v_s = \frac{Q}{WL}$$

Donde:

v_s = Gasto superficial o velocidad de sedimentación, en $m^3/día/m^2$ o $m/día$.

t = Tiempo de residencia, en horas.

Q = Gasto, en $m^3/día$.

V = Volumen del tanque, en m^3 .

H, W, L = Profundidad, ancho y largo del tanque, respectivamente, en m .

Para diseñar un sedimentador se debe tomar en cuenta los factores que afectan la velocidad de sedimentación:

Características de las aguas. La eficiencia de remoción depende de la concentración de sólidos presentes en las aguas, y de las características de las partículas tales como distribución de tamaños, densidad y forma.

Tiempo de Residencia. Es uno de los parámetros de diseño más importantes, ya que debido a la concentración y características de los sólidos, las partículas se unen entre sí, sedimentando de manera floculenta.

A medida que aumenta el tiempo de residencia aumenta la probabilidad de unión entre las partículas. Se recomiendan tiempos de residencia de 120 a 180 minutos.

Carga de Superficie. Los sedimentadores se diseñan en base a la carga superficial; ésta depende de la concentración de sólidos suspendidos.

Tabla 5.4. Tiempos de retención contra carga superficial y profundidad

Carga de Superficial (m ³ /m ² /día)	Profundidad			
	3 m	3.5 m	4 m	5 m
24	3.0	3.5	4.0	5.0
32	2.3	2.6	3.0	3.8
48	1.5	1.8	2.0	2.5
60	1.2	1.4	1.6	2.0
80	0.9	1.1	1.2	1.5
100	0.7	0.8	0.8	1.2

Nota: Tiempos de Retención en horas.

Dispositivos de Entrada y Salida del Agua. Los mecanismos de entrada y salida tienen gran influencia en la eficiencia del sedimentador. Con los mecanismos de entrada se debe asegurar distribución uniforme del flujo y la disipación de energía. Esta puede ser por la parte superior o inferior, radial o axial. No debe ocasionar turbulencia, asegurando régimen laminar para evitar la resuspensión.

Una estructura de entrada eficiente es una mampara perforada en una pared difusora colocada después de unas mamparas de impacto. Se recomiendan velocidades a través de la mampara perforada de 0.2 a 0.3 m/s. La caída de presión a través de las lumbreras se estima en 1.7 veces la carga de velocidad ($v^2/2g$). La pared difusora se puede construir de

concreto, madera o mampostería de ladrillos. En el diseño de mamparas perforadas para tanques de sedimentación se debe propugnar por cuatro requerimientos básicos:

1. La velocidad a través de las lumbreras debe ser aproximadamente cuatro veces más alta que cualquiera de las velocidades de aproximación a fin de igualar la distribución de flujo lento tanto horizontal como vertical.
2. Para evitar fragmentar los flocúlos, el gradiente de velocidad a través de los conductos y lumbreras de entrada se debe mantener en un valor cercano a, o un poco más alto que, el de la última porción del floculador.
3. Se debe instalar el máximo número posible de lumbreras, a fin de reducir la turbulencia de entrada producida por la difusión de los chorros sumergidos provenientes de las lumbreras en la entrada de la mampara perforada.
4. La configuración de la lumbrera debe ser tal que asegure que los chorros de descarga dirigirán el flujo hacia la salida del tanque.

Debido a que estos conceptos antagonizan entre sí, se debe buscar una transacción razonable.

Los vertedores o arsesas perforadas son las estructuras de salida más utilizadas para sacar del tanque de sedimentación el agua efluente. La longitud de los vertedores se debe seleccionar de tal modo que se eviten las velocidades altas de aproximación y perturbación de la capa de lodos. La fórmula siguiente es útil para determinar la longitud del vertedor:

$$L = 0.2 \frac{Q}{Hv}$$

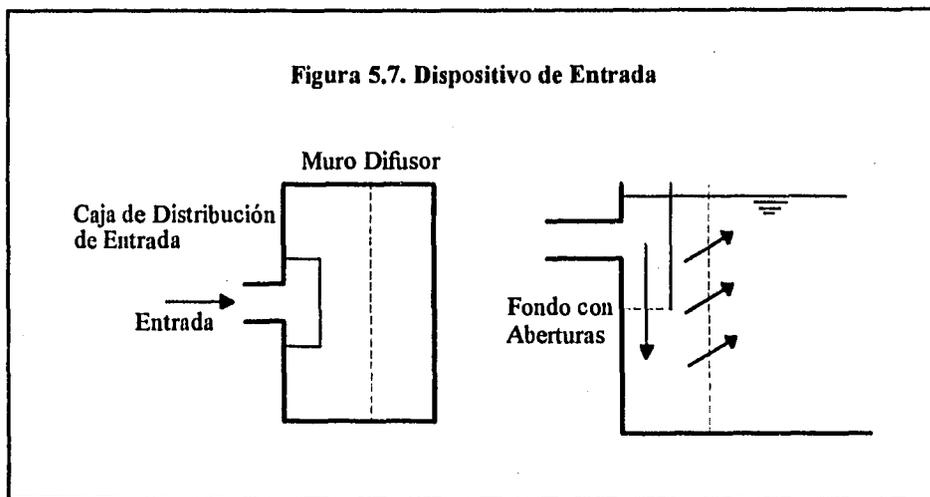
Donde:

L = longitud de vertedero combinada, en m.

Q = Gasto, en $m^3/día$.

H = Profundidad del tanque, en m.

v_s = Velocidad de sedimentación, en $m/día$.



Las artesas o vertederos de salida se pueden arreglar ya sea paralela o transversalmente a la dirección del flujo en el tanque.

Los vertederos triangulares ajustables son convenientes para asegurar un flujo uniforme a través de la pila colectora, especialmente cuando se utilizan gastos bajos de derrame. Se construyen de tiras metálicas con muescas en V de aproximadamente 5.0 cm de profundidad y una separación entre sí de 15 a 30 cm, y se sujetan con tornillos a la pared de concreto de la pila colectora.

Velocidad del Flujo a través del Sedimentador. Experimentalmente se ha encontrado que para velocidades superiores a 1.2 m/min la eficiencia disminuye a medida que aumenta la velocidad²⁸.

Tabla 5.5. Criterios de Diseño de un sedimentador rectangular

Parámetro	Rango	Típico
Profundidad (m)	3.0-5.0	3.6
Longitud (m)	1.5-90	25-40
Ancho (m)	3-24	6-10
Velocidad (m/min)	0.6-1.2	1.0

Remoción de lodos. En los sedimentadores que trabajan correctamente, la capa de lodo sedimentado tenderá a ser más profunda en la entrada que en la salida. Cuando la capa de lodo excede los límites de almacenamiento del tanque, el tanque de sedimentación se debe sacar de servicio y limpiar. Para facilitar el drenaje eficiente del tanque, el piso debe tener una pendiente del 10% de las paredes laterales al centro y de 5 a 8% del extremo de salida al extremo de entrada.

Cuando se diseña un tanque de sedimentación es necesario tener en cuenta las siguientes consideraciones con respecto a la extracción de los lodos:

1. Las líneas de succión y descarga de lodos deben ser cortas, para minimizar las pérdidas de carga y reducir costos de bombeo.
2. Se deben utilizar bombas capaces de succionar lodos densos; que su capacidad de bombeo no varíe con las características de los lodos.

²⁸ Metcalf & Eddy. "Wastewater Engineering: Treatment, Disposal and Reuse". Ed. McGraw-Hill. 1991.

5.4. DISEÑO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO

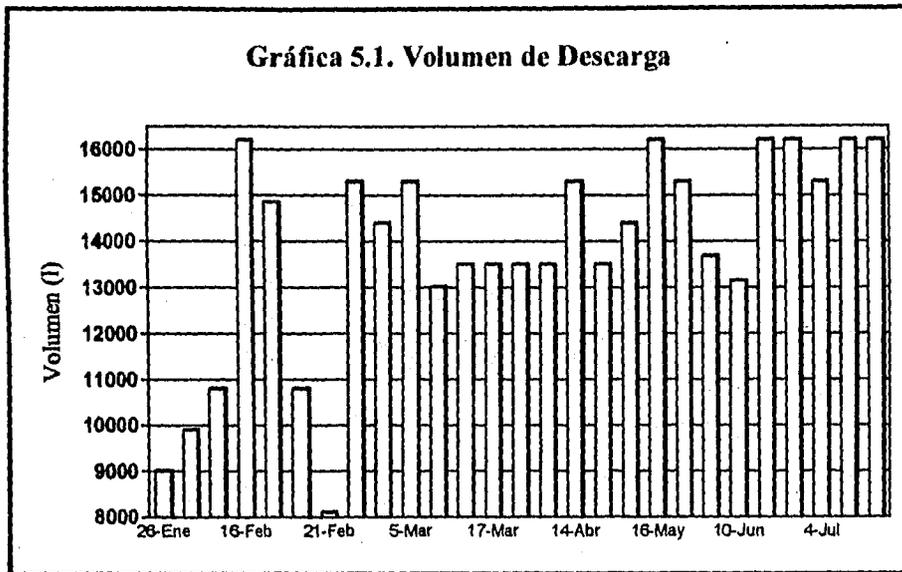
A continuación se presentan todos los resultados obtenidos del diseño de la planta de tratamiento. Los cálculos y operaciones se encuentran en la memoria de cálculo. Asimismo, los planos de los equipos se encuentran en el anexo 4.

5.4.1. Capacidad de la Planta de Tratamiento

Antes de realizar el diseño de los equipos que intervendrán se requiere de especificar la capacidad de la planta de tratamiento. Para realizar esto se cuenta con el registro del volumen de la descarga de agua residual de la empresa desde el 20 de Diciembre de 1993 y hasta el 13 de Julio de 1994. El registro es el siguiente:

Tabla 5.6. Registro del Volumen de Descarga de Agua Residual

Fecha	Descarga (litros)	Fecha	Descarga (litros)
20-Dic-93	11,970	29-Mar-94	13,500
26-Ene-94	9,000	8-Abr-94	13,500
9-Feb-94	9,900	14-Abr-94	15,300
14-Feb-94	10,800	19-Abr-94	13,500
16-Feb-94	16,200	27-Abr-94	14,400
17-Feb-94	14,850	16-May-94	16,200
18-Feb-94	10,800	20-May-94	15,300
21-Feb-94	8,100	26-May-94	13,680
28-Feb-94	15,300	10-Jun-94	13,140
3-Mar-94	14,400	21-Jun-94	16,200
5-Mar-94	15,300	28-Jun-94	16,200
9-Mar-94	13,050	4-Jul-94	15,300
14-Mar-94	13,500	6-Jul-94	16,200
17-Mar-94	13,500	13-Jul-94	16,200



Como se puede observar el volumen máximo de descarga que se ha tenido en el año en curso es de 16,200 l/día, tomando en cuenta que se tiene una cisterna de 18,000 litros donde se almacena el agua antes de descargarla, se tomará éste como el gasto máximo de descarga. Para el diseño de la planta de tratamiento al gasto de 18,000 litros se le aumentará un 10% de sobrediseño, lo que dará una capacidad de 19,800 litros/día que se redondeará a 20,000 litros/día. Se toma en consideración que se trabaja únicamente un turno de 8 horas, si se quiere tratar el volumen de agua en 4 horas y dejar 4 horas para limpieza de la planta dará un gasto por hora de 5,000 l/h. En resumen, la capacidad de la planta de tratamiento será de 5,000 l/h, una capacidad que permite tratar 20,000 litros en 4 horas.

5.4.2. Cuarto de Reactivos

Se determinó que el cuarto de reactivos contará con los siguientes equipos: tanques de preparación de reactivos, mezcladores para la preparación de los reactivos y una unidad de alimentación para abastecer de reactivo a la unidad de mezclado hidráulico rápido.

5.4.2.1. Tanques de Preparación de Reactivos

Se determinó que se requieren cuatro tanques de preparación de reactivos: el primero para preparar la solución de cal, el segundo para preparar la solución de bentonita, el tercero para preparar la solución de sosa y el cuarto para preparar la solución de ácido sulfúrico.

Los primeros dos tanques requieren tener una capacidad mínima de 480 litros, para preparar la solución de cal, y de 600 litros, para preparar la solución de bentonita. Se seleccionaron dos tanques de 750 litros.

Se recomienda que los tanques sean de polietileno de alta densidad para que resistan la corrosión de la cal. Se recomienda este material en vez del acero inoxidable por ser más barato.

Para preparar la solución de hidróxido de sodio y de ácido sulfúrico se requiere de dos tanques de 200 litros de acero inoxidable, resistentes a la corrosión.

5.4.2.2. Mezcladores

Para la eficiente preparación de los reactivos se recomienda utilizar un agitador mecánico de paletas para cada tanque, la velocidad de cada agitador será de 1,500 rpm. Estos agitadores deberán tener su propia base y ser resistentes a la corrosión causada por los reactivos.

5.4.2.3. Alimentadores

Para realizar la conducción de los reactivos hasta la unidad de mezclado se requiere de utilizar un alimentador de productos químicos. Para realizar esto se proponen tres alternativas:

1. Bombas dosificadoras, las cuales tienen un flujo controlado y tienen pocos problemas de operación sin embargo requieren de energía eléctrica para funcionar, son caras y se necesita instalar un sistema de control de nivel en los tanques para protección de las mismas.
2. Un alimentador de flotador carga constante, el cual es mucho más barato, aunque más rudimentario, no tiene problemas de consumo de energía y no requiere de un sistema de control de nivel.
3. Instalar a la salida del tanque una manguera elástica con una piñza de presión que regule el flujo por medio de la carga hidrostática presente. Este es el mecanismo más económico, aunque el más inexacto.

Por motivos de económica se seleccionó la segunda alternativa, estos reguladores de alimentación deberán calibrarse en la planta.

5.4.3. Canal Parshall

A partir del gasto que se va a tratar se seleccionó un canal Parshall de garganta de $1\frac{1}{2}$ ". Este canal tiene una capacidad mínima de 0.45 l/s y una capacidad máxima de 25.3 l/s. El gasto de tratamiento es de 1.4 l/s, por lo que se está dentro de los límites de tolerancia. El material del canal es de fibra de vidrio. El diseño del canal Parshall se presenta al final del documento.

5.4.4. Floculador

Se seleccionó un floculador de canal con mamparas de flujo horizontal. El floculador tendrá una profundidad de 0.70 m, un largo de 2.20 m y un ancho total de 2.8 m. Constará de dos secciones, cada una con 6 mamparas de madera separadas a 0.33 m una de otra. El material de construcción del floculador es de mampostería. El diseño del floculador se presenta en los planos del Anexo 4.

Antes de instalar las mamparas de madera se deben de sumergir en aceite quemado para darle a la madera mayor resistencia y evitar que se hinche. Se seleccionó madera oyamel para la construcción de las mamparas.

5.4.5. Sedimentador

Se seleccionó un sedimentador de flujo horizontal sin eliminación mecánica de lodos, de mampostería, con 1.20 m de profundidad en la entrada y 0.92 m en la salida, 1.6 m de ancho y 4.8 m de largo. El diseño del sedimentador se presenta en los planos del Anexo 4.

5.4.6. Filtro Prensa

Para el filtrado de los lodos producidos se requiere de un filtro prensa de placas bicóncavas de 12" × 12", con capacidad de 28.32 litros. Con medio filtrante de algodón. El material de construcción del filtro es de fierro fundido.

5.4.7. Tanques

Para acumular el agua tratada y para la fosa de lodos se requiere de dos tanques. El agua tratada parará finalmente a un tanque para su neutralización final y también para tener una cantidad de agua tratada que será utilizada para preparar las soluciones del tratamiento y limpieza de la planta. La fosa de lodos se utilizará para acumularlos y bombearlos al filtro prensa.

El tanque de almacenamiento de agua tratada deberá tener 18 m³ de capacidad y ser construido de mampostería. La fosa de lodos será de 5 m³ de capacidad, de mampostería.

5.4.8. Bombas y Accesorios

Para hacer llegar el agua a los equipos se requieren de accesorios como son válvulas, tuberías y bombas.

Se requieren:

- 4 válvulas de paso de ½" a la salida de los tanques de reactivos.
- 2 válvulas de paso de ¾" a la salida del floculador y sedimentador para drenaje.
- 4 válvulas de paso de 1" para conexión de los equipos.
- 50 metros de tubería de ¾" de PVC.
- 20 metros de manguera de hule de 1".
- 20 metros de tubería de 1½" de acero inoxidable 0.304
- 50 metros de tubería de 1" de acero inoxidable 0.304
- 1 bomba centrífuga de 1.5 HP para descargar y recircular agua tratada.
- 1 bomba neumática de doble diafragma para bombeo de los lodos.

Asimismo, las conducciones y el drenaje se realizará en trincheras de concreto de 0.30 m de ancho y 0.20 m de profundidad.

5.4.9. Servicios

Para operar la planta de tratamiento se requiere de diversos servicios como lo son:

- Energía eléctrica: 120 W a 60 ciclos.
- Aire comprimido: 20 psia.
- Agua potable: la necesaria

5.5. RESUMEN DE EQUIPOS Y MATERIALES

A continuación se presenta un resumen con todos los equipos y materiales que se requieren para construir la planta de tratamiento:

- 2 Tanques de polietileno de alta densidad de 750 l.
- 2 Tanques de acero inoxidable 0.304 de 100 l.
- 4 Agitadores de paletas de 1,500 rpm.
- 1 Canal Parshall con garganta de 1½" de fibra de vidrio.
- 1 Tanque de floculación de 0.7 × 2.0 × 2.5 m, con mamparas de madera.
- 1 Tanque de sedimentación de 1.2 × 1.6 × 4.8 m.
- 1 Filtro prensa de FoFo con placas bicóncavas de 12" × 12", con medio filtrante de algodón.
- 1 Tanque de mampostería de 18 m³ de capacidad.
- 1 Tanque de mampostería de 5 m³ de capacidad.
- 4 válvulas de paso de ½".
- 2 válvulas de paso de ¾".
- 4 válvulas de paso de 1".
- 50 metros de tubería de 1½" de PVC.
- 20 metros de manguera de hule de 1".
- 20 metros de tubería de 1½" de acero inoxidable 0.304.
- 50 metros de tubería de 1" de acero inoxidable 0.304.

1 bomba centrífuga de 1.5 HP.

1 bomba neumática de doble diafragma.

5.6. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

El agua residual proveniente de un proceso de fosfatado de metales, contaminada con gran cantidad de níquel, zinc, plomo, grasas y aceites y SAAM es almacenada en una cisterna de almacenamiento de agua residual. De este punto es alimentada con una bomba de abastecimiento a un canal Parshall, donde se lleva a cabo un mezclado rápido con el hidróxido de sodio, cal y bentonita, soluciones preparadas anteriormente en el cuarto de reactivos. Los tanques alimentan los reactivos al canal Parshall a gravedad.

En el canal se produce un mezclado rápido y homogéneo del agua y los reactivos. Esta solución es alimentada a un floculador de flujo horizontal con mamparas donde el agua se mantiene en agitación lenta durante 30 minutos, para tener una buena floculación.

Una vez que el agua ha cruzado por el floculador pasa a un sedimentador de flujo horizontal donde se separan las partículas floculadas del agua. El sobrenadante sale de la parte superior del tanque de sedimentación y se conduce a un tanque de almacenamiento de agua tratada donde es neutralizado con ácido sulfúrico a un pH neutro. Los lodos se extraen del fondo del sedimentador y se llevan a una fosa de captación de lodos, donde son bombeados a un filtro prensa donde se separan del agua. El agua filtrada se conduce al tanque de almacenamiento de agua tratada y la torta de lodos se confina en tambores de 200 litros para su eliminación final.

El agua contenida en el tanque de almacenamiento de agua tratada se utiliza para la preparación de las soluciones necesarias para la floculación, para la limpieza de la planta de tratamiento una vez finalizado el proceso y el exceso de puede reutilizar o tirarse en el drenaje municipal.

6. OPERACIÓN DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO

A continuación se presenta todo el proceso de operación de la planta de tratamiento, iniciando con la preparación de los reactivos, arranque, operación normal, paro y limpieza.

Al realizar el diseño se consideró que se dispone de aire a presión para operar las bombas neumáticas y de corriente eléctrica. En caso de no existir se debe de comprar el equipo necesario.

6.1. PREPARACIÓN DE REACTIVOS

Para la buena floculación del agua residual se requiere de cuatro reactivos: solución de cal al 10%, solución de bentonita al 10%, solución de sosa al 20% y solución de ácido sulfúrico 1:20.

La preparación de los reactivos se realiza como se indica a continuación:

Solución de cal al 10%. Se agregan 480 litros de agua tratada en el tanque correspondiente. Se inicia la agitación y se agrega poco a poco 48 kg de cal sólida. Durante todo el proceso se debe mantener la agitación, pues esta solución sedimenta fácilmente y puede obstruir las tuberías.

Solución de bentonita al 10%. Se agregan 600 litros de agua tratada dentro del tanque correspondiente. Se inicia la agitación y se agrega lentamente 60 kg de bentonita en polvo. Al entrar en contacto la bentonita con el agua ésta se hincha, por lo tanto, se debe evitar agregarle de golpe pues de lo contrario se producirán grumos difíciles de deshacer. Esta solución también sedimenta, por lo que se debe mantener en agitación durante el tratamiento.

Solución de sosa al 20%. Se colocan 200 litros de agua tratada en el tanque, se inicia la agitación y se agrega con cuidado 20 kg de sosa en polvo o en lentejas. Esta operación debe realizarse cuidadosamente pues se desprende calor. Para manejar la sosa en polvo se debe de utilizar el equipo de protección personal correspondiente. Una vez preparada la solución, no es necesario seguirla agitando, pues ésta es homogénea. Se debe de tapar muy bien el recipiente donde se encuentra contenida la sosa en polvo pues absorbe el agua del ambiente.

Solución de ácido sulfúrico 1:20. Esta solución es sumamente corrosiva y puede causar proyecciones por lo que se tiene que preparar con cuidado y con equipo de protección personal adecuado. Se colocan 180 litros de agua tratada en el tanque, se inicia la agitación

y se agrega con mucho cuidado 9 litros de ácido sulfúrico concentrado. Nunca se debe de colocar primero el ácido sulfúrico y después el agua pues se producen proyecciones. Una vez preparada la solución puede dejar de agitarse.

En caso de que no se cuente con agua tratada para preparar los reactivos, se puede utilizar agua cruda para realizar esta operación.

6.2. ARRANQUE, OPERACIÓN Y LIMPIEZA

Una vez que se han preparado los reactivos, el arranque de la planta es el siguiente:

1. Se cierran todas las válvulas de drenaje de los equipos.
2. Se prepara el filtro prensa siguiendo las instrucciones del fabricante.
3. Se calibra el flujo de los reactivos de la siguiente manera:
 - 3.1. Se desconecta la manguera de hule del canal Parshall y se introduce en una probeta de 2 litros.
 - 3.2. Se abre un poco la válvula de paso del fondo de los tanques de sosa, cal y bentonita.
 - 3.3. Se calibra el flujo de reactivo abriendo o cerrando la pinza de presión en la manguera de hule.
 - 3.4. El flujo de calibración es el siguiente:

Solución de cal	0.033 l/s
Solución de bentonita	0.416 l/s
Solución de sosa	0.014 l/s
Solución de ácido sulfúrico	0.013 l/s

- 3.5. Una vez calibrado cada reactivo, se cierra la válvula de paso y se conecta nuevamente la manguera de hule en el canal Parshall.

- 3.6 El flujo de agua tratada se calibra arrancando la bomba de abastecimiento y sin agregar reactivos se comprueba que tenga un flujo de 1.39 l/s.
4. Se arranca la bomba de abastecimiento de agua residual y se abren las válvulas de paso de los tanques de reactivos.
5. Se deja llenar el floculador libremente, así como el sedimentador.
6. Una vez que comienza a descargar el sedimentador se abre la válvula del tanque de ácido sulfúrico.
7. Una vez que se ha tratado toda el agua residual, se procede a terminar el tratamiento cerrando todas las válvulas y apagando la bomba de abastecimiento.
8. Se procede a descargar todos los lodos almacenados en el tanque de floculación y el sedimentador abriendo las válvulas de drenaje.
9. Se arranca la bomba de lodos filtrándolos en el filtro prensa, cuidando que el agua filtrada descargue al tanque de almacenamiento de agua tratada.
10. Una vez filtrados todos los lodos, se para la bomba y se procede a la limpieza de los equipos, utilizando el agua tratada para este procedimiento.
11. El agua que se utilizó para la limpieza se puede descargar a la fosa de lodos y filtrarse nuevamente.
12. La torta de lodos que queda en el filtro prensa se confina en tambos para su eliminación final.

6.3. RECOMENDACIONES

1. Durante todo el proceso se debe vigilar que el pH del agua una vez mezclada con los reactivos esté comprendido entre 10 y 12. En caso contrario, se puede aumentar o disminuir la cantidad de sosa agregada.
2. Asimismo, se debe comprobar que el pH de la solución en el tanque de almacenamiento de agua tratada se encuentre lo más cercano a 7, en caso contrario se puede aumentar o disminuir el flujo de ácido sulfúrico agregado.
3. En caso de que al final del tratamiento el agua tratada tenga un pH menor de 7, se puede agregar un poco de sosa para neutralizarlo.
4. Evitar, en todo momento, agitar el agua contenida en el tanque de floculación y en el de sedimentación.
5. La cantidad de solución que se prepara es para tratar 20,000 litros por operación, en caso de tener cantidades mayores o menores de agua, se puede preparar un volumen de solución diferente al citado anteriormente, recordando que para cada metro cúbico de agua que se va a tratar se utiliza la siguiente cantidad de solución:

Cal al 10%	24 l/m ³
Bentonita al 10%	30 l/m ³
Sosa al 20%	10 l/m ³
Ácido Sulfúrico 1:20	10 l/m ³

6. En caso de que se observe que los lodos sedimentados se encuentran casi al borde del sedimentador, se puede abrir la válvula de drenaje para descargarlos a la fosa de lodos.
7. En caso de que la fosa de lodos se encuentre al límite de su capacidad, se puede iniciar el filtrado.

8. Se debe tener mucho cuidado al preparar las soluciones de sosa y de ácido sulfúrico, pues éstas son corrosivas.
9. Debido a que las características del agua residual pueden cambiar dependiendo de la operación a la que fue sometida, resulta importante realizar análisis periódicos del agua tratada para observar que tiene la calidad adecuada

6.4. MANTENIMIENTO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO

Al dar a una planta de tratamiento el mantenimiento adecuado se previenen emergencias y descomposturas. Tres factores deben tomarse en cuenta para el debido mantenimiento: diseño, construcción y operación.

Para el buen funcionamiento y conservación de una planta de tratamiento es indispensable tener reservas de agua que se puedan usar a presión para limpiar y lavar tanques, líneas, equipos, etc.

Para dar el mantenimiento de forma eficiente a la planta se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones:

1. Conservar la planta aseada y ordenada.
2. Establecer un plan sistemático para la ejecución de las operaciones cotidianas.
3. Establecer un programa rutinario de inspección y lubricación.
4. Llevar los datos y registros de cada pieza de equipo, enfatizando lo relativo a incidentes poco usuales y condiciones operatorias deficientes.
5. Observar las medidas de seguridad.

Asimismo, es recomendable que los operadores conozcan la siguiente información de los equipos que accionan:

1. Instrucciones para la lubricación.
2. Instrucciones de operación.
3. Procedimientos para armar y desarmar.
4. Lista de partes e instrucciones para las reparaciones.

Para que un programa de mantenimiento funcione adecuadamente se requieren de cuatro condiciones básicas:

1. Completo conocimiento del equipo.
2. Empleo de la herramienta adecuada.
3. Reparación perfecta de las piezas.
4. Programa planeado.

6.5. PERSONAL REQUERIDO

Para operar la planta de tratamiento se requiere de un supervisor que vigile que el tratamiento se lleva a cabo satisfactoriamente. De un trabajador que se encargue de la preparación de los reactivos, calibración de los flujos y operación de la planta. Asimismo, que realice la limpieza de los equipos una vez terminado el tratamiento.

El tiempo de operación de la planta es de 8 horas, de las cuales se requieren 4 horas para tratar el agua y de 4 horas para realizar las operaciones de preparación del arranque y de limpieza de la planta.

7. PRESUPUESTO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO

Para obtener el costo de la planta de tratamiento, se calculó el costo de los equipos y de las cantidades de materiales que se requieren. Posteriormente, se estimó el costo que tendrá la instalación de los equipos y construcción de los tanques. Finalmente, se agregaron los costos de la supervisión de la construcción. Al costo calculado se le agregó un margen de seguridad por imprevistos que ocurran durante la construcción.

7.1. COSTOS DE MATERIALES Y EQUIPO

Como se puede observar en el catálogo de conceptos, la relación de los costos por adquisición de equipo y materiales de construcción es la siguiente:

Tabla 7.1. Costo de Materiales y Equipo

Costo de equipos	N\$63,650.00
Costo de materiales de obra	N\$6,108.00
Costo de accesorios	N\$2,787.60
Total	N\$72,545.60

En este costo se incluyen todos los materiales que se necesitan para construir la planta de tratamiento, así como todos los equipos que se deberán instalar y todos los accesorios necesarios para conectar los equipos entre sí.

7.2. COSTOS DE CONSTRUCCIÓN

Para calcular los costos de construcción de la planta de tratamiento se estimó que los costos de preparación del terreno y del tendido de tuberías es el 10% del costo de los materiales y equipos. El costo de instalación de los equipos y construcción del floculador y sedimentador es el 20% del costo de los materiales y equipos y el costo de la supervisión y diseño es el 15% del costo de los materiales y equipos²⁹.

Tabla 7.2. Costos de Construcción

Concepto	%	Costo (NS)
Costo de preparación del terreno y tendido de tuberías	10	7,254.56
Costo de instalación y construcción de equipos	20	14,509.12
Costo de supervisión y diseño	15	10,881.84
Total		32,645.52

²⁹ Schulz, Cristopher R. y Okun, Daniel A. "Tratamiento de Aguas Superficiales para Países en Desarrollo". Ed. Limusa. 1990.

Estos costos incluyen todas las modificaciones que se deberán realizar en el terreno para instalar los equipos, todos los gastos de construcción como lo son salarios de los trabajadores, maquinaria y fletes, así como los gastos de diseño y de supervisión de la obra.

7.3. PRESUPUESTO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO

Una vez calculados los costos de adquisición de equipo y accesorios, así como los costos de construcción se puede calcular el costo de la planta de tratamiento, al que se añadirá un 10% extra por margen de imprevistos:

Tabla 7.3. Costos Totales

Costo de adquisición de equipos y materiales	N\$72,545.60
Costo de construcción	N\$21,763.68
Costo de supervisión y diseño	N\$10,881.84
Subtotal	N\$105,191.12
+11% de imprevistos	N\$13,150.86
Total	N\$118,341.98

Por lo tanto, el costo de la planta de tratamiento será de N\$118,341.98 precio al que se le deberá incluir un 10% de IVA.

7.4. CATÁLOGO DE CONCEPTOS

La relación de equipos que se debe adquirir son los siguientes:

Partida	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario (NS)	Importe (NS)
1	Agitador de Paletas. Velocidad de salida 1,500 RPM. Marca Agimex o similar.	Pieza	4	2,000.00	8,000.00
2	Bomba centrífuga de 1.5 HP. Marca Little Giant o similar. Hd máx = 6.0 m.	Pieza	1	1,750.00	1,750.00
3	Bomba neumática de doble diafragma marca Warren Rupp Sand Piper o similar, fabricada en polipropileno y EPDM.	Pieza	1	2,350.00	2,350.00
4	Canal Parshall de fibra de vidrio con garganta de 1½"	Pieza	1	1,000.00	1,000.00
5	Control de paro y arranque.	Pieza	2	750.00	750.00
6	Filtro Prensa Marca Shriver o similar en Fo-Fo de placas bicóncavas de 12"×12", de capacidad de 1 ft ³ . Con medio filtrante de algodón.	Pieza	1	20,000.00	20,000.00
7	Indicador de pH. Marca Metronics o similar. Rango 1-14.	Pieza	1	800.00	800.00
8	Tanque de polietileno de alta densidad reforzado con capacidad mínima de 750 l.	Pieza	2	5,500.00	11,000.00
9	Tanque de acero inoxidable 0.304 con capacidad de 200 l	Pieza	2	9,000.00	18,000.00
Total					63,650.00

La relación de los accesorios que se deben comprar es:

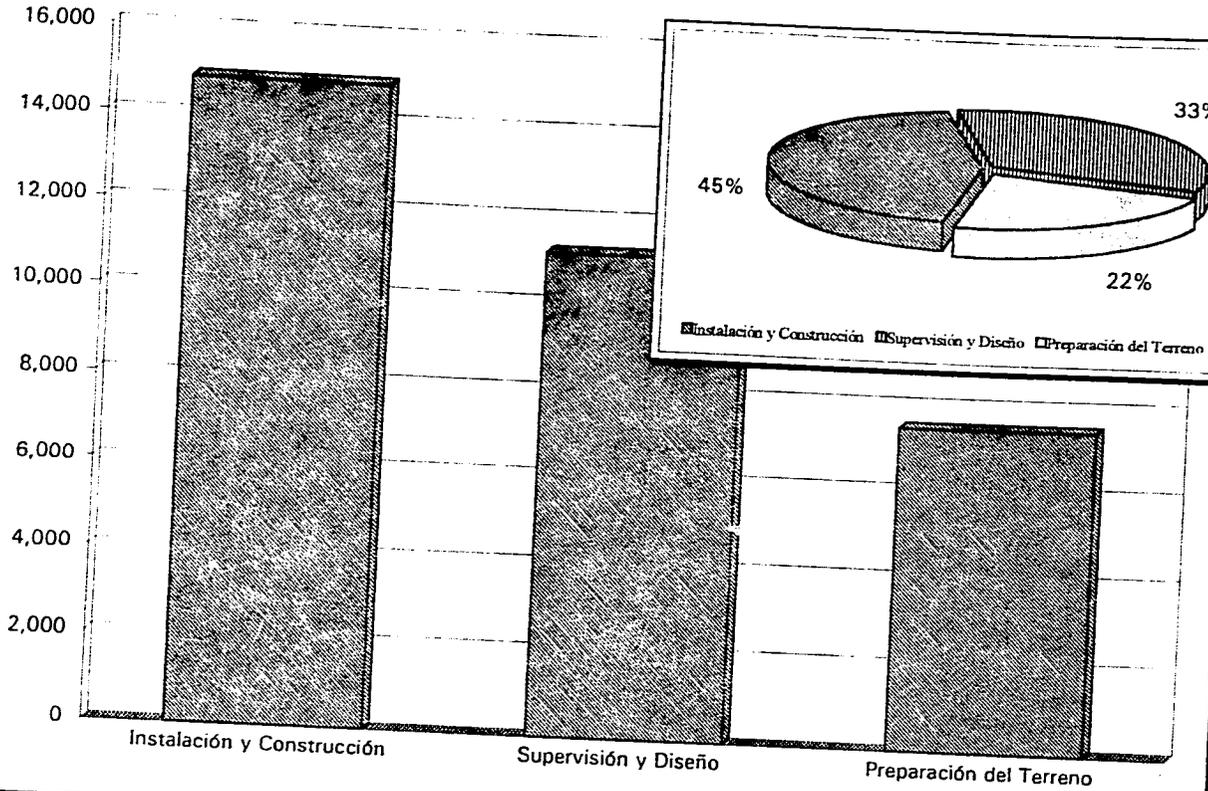
Partida	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Importe
1	Abrazadera de acero al carbón	Pieza	20	2.50	50.00
2	Codo de 45° de PVC de 1½"	Pieza	2	2.20	4.40
3	Codo de 90° de acero inoxidable de 1"	Pieza	4	4.20	16.80
4	Codo de 90° de acero inoxidable de 1½"	Pieza	4	5.60	22.40
5	Codo de 90° de PVC de 1½"	Pieza	4	2.50	10.00
6	Codo de tres vías de acero inoxidable de 1"	Pieza	3	20.20	60.60
7	Conexión para manguera de 1½" de acero inoxidable	Pieza	6	3.75	22.5
8	Embudos de PVC de 15 cm de diámetro	Pieza	4	6.80	27.2
9	Manguera de hule de 1"	m	20	8.00	160.00
10	Rejilla de fierro de 30 cm para cubierta de trinchera	m	50	12.20	610.00
11	Tubería de 1" de acero inoxidable 0.304	metro	50	15.60	780.00
12	Tubería de 1½" de acero inoxidable 0.304	metro	20	17.90	358.00
13	Tubería de 1½" de PVC	metro	50	8.20	410.00
14	Válvula de paso de ½". Marca IUSA	Pieza	4	18.20	72.80
15	Válvula de paso de ¾". Marca IUSA	Pieza	2	22.50	45.00
16	Válvula de paso de 1". Marca IUSA	Pieza	4	25.50	102.00
17	Válvula de compuerta de 1". Marca IUSA	Pieza	1	35.90	35.90
Total (NS)					2,787.60

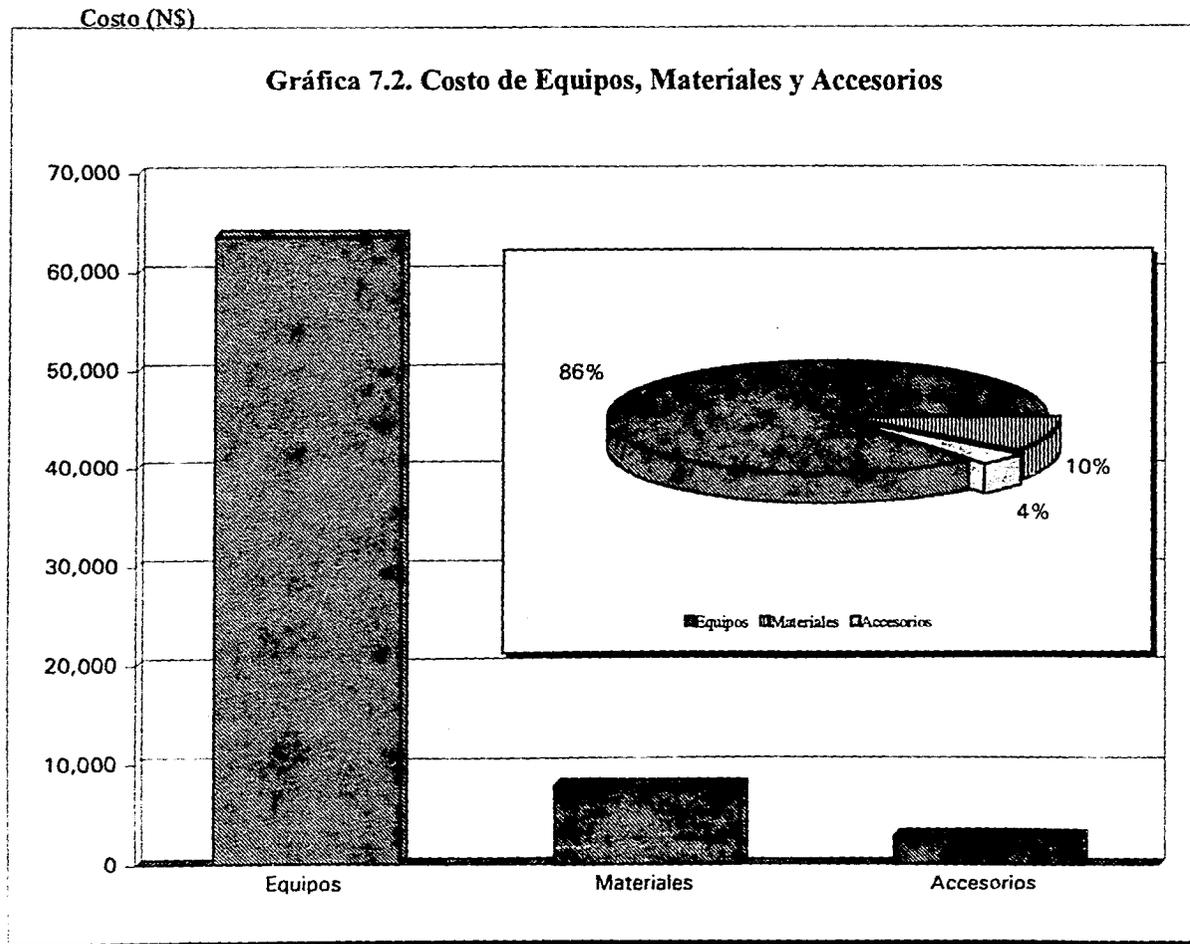
Adicional a lo anterior se requiere de los siguientes materiales para la construcción del floculador, el sedimentador y los tanques.

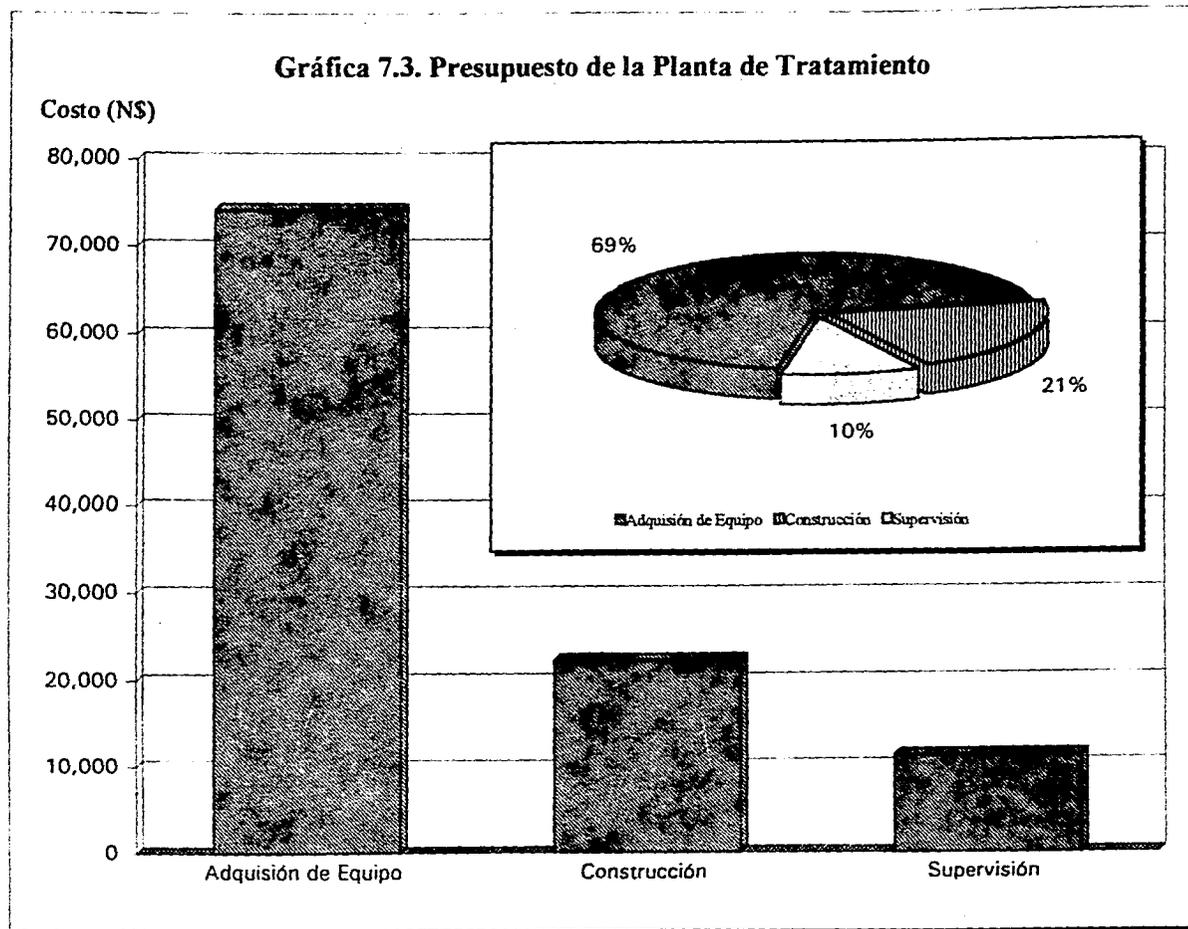
Partida	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario (NS)	Importe (NS)
1	Concreto de 150 kg/cm ²	Ton	3	250.00	750.00
2	Alambrón de ¼"	Ton	0.1	1,275	127.50
3	Ladrillo rojo de 26 × 6.5 cm	Pieza	8,000	0.40	3,200.00
4	Madera de Oyamel	ft	38	3.50	133.00
5	Varilla de acero FV=420 #6 (3/8)"	Ton	1.5	1,265.00	1,897.50
Total					6,108.00

Costo (NS)

Gráfica 7.1. Costos de Construcción







7.5. ANÁLISIS DE LA RENTABILIDAD DEL TRATAMIENTO

Para calcular la rentabilidad del tratamiento se realizó, en primer lugar, un análisis comparativo entre: los costos de construcción y operación de la planta de tratamiento por parte de la empresa contra los costos que conlleva descargar el agua al drenaje sin ningún tratamiento, esto es, el pago al municipio por concepto de la descarga.

Del análisis comparativo antes mencionado se llegó a la conclusión de que el costo de descargar el agua sin tratamiento al drenaje es aproximadamente tres veces menor que el costo de construir y operar la planta por parte de la empresa; esto es, al ser esta relación menor que uno, se concluye que la construcción y operación de la planta resulta poco rentable y en consecuencia la inversión no es económicamente atractiva para los empresarios. Por otro lado, desechar el agua al drenaje sin ningún tratamiento y excediendo los límites permitidos por la legislación vigente puede conllevar a la clausura de la empresa.

Tomando en cuenta lo anterior se realizó el análisis económico haciendo una comparación entre los costos de construir y operar la planta *versus* las pérdidas que se tendrían con una clausura temporal por 15 y 30 días.

Del análisis anterior se concluye que las pérdidas por concepto de salarios pagados durante 15 días son suficientes para pagar la construcción de la planta de tratamiento; asimismo, las utilidades que se dejan de percibir durante el período resultan mayores a los costos de operación y mantenimiento de la planta durante un año.

Por lo motivos antes mencionados se tiene que una clausura por 15 días se traduce en un costo 3.6 veces superior a la construcción y operación de la planta durante un año; es decir, que con las pérdidas producto de una clausura se podrían construir y operar casi 4 plantas de tratamiento. Por tanto se concluye que la construcción de la planta de tratamiento es económicamente factible. La memoria de cálculo de la estimación se encuentra en el Anexo 2.

Cabe mencionar que en el análisis anterior no se tomó en cuenta el daño producido al medio ambiente traducido a pesos y centavos, el cual, reflejaría aún más los beneficios económicos de tratar el agua.

8. CONCLUSIONES

Al realizarse este estudio se contempló una pequeña parte de la gran cantidad de factores que intervienen en el diseño de una planta de tratamiento de aguas. Aunque se quiso realizar un diseño completo, se escaparon diversos puntos dentro de la materia de tratamiento de aguas; entre éstos se pueden citar el estudio que se debe realizar sobre la eliminación completa de los lodos, la comparación de la planta de tratamiento contra las plantas paquete existentes en el mercado y el diseño de una nueva tecnología de tratamiento de agua.

Para realizar el diseño de la planta de tratamiento se tomó como punto de partida el análisis del proceso en el que se contamina en agua, para buscar posibles contaminantes, se continuo con el muestreo del agua, se realizaron todas las pruebas y los análisis de laboratorio necesarios para diseñar la planta de tratamiento y finalmente se calcularon los

costos totales de construcción, incluyendo criterios de diseño de los equipos que intervienen y su diseño con diagramas.

1. Se puede concluir que el tratamiento de aguas residuales industriales es específico para cada agua, pues los contaminantes que pueden estar presentes son muy variados y requieren de un tratamiento particular en cada caso. Aunque el diseño de los equipos si es general para todos los casos, la dosis de reactivos y ciertos parámetros de diseño se deben encontrar en el laboratorio. No es conveniente realizar el diseño de una planta de tratamiento sin realizar primero todos los estudios correspondientes que permitan seleccionar el proceso de tratamiento más eficiente.
2. Resulta importante aclarar que la selección de la alternativa de tratamiento debe realizarse cuidadosamente, pues no sólo depende de los parámetros de calidad del agua; también intervienen factores como la disponibilidad del terreno, la tecnología disponible, los costos de construcción y operación, la capacitación del personal y la producción de lodos de desecho.
3. Debido a que el proceso donde se contamina el agua puede tener variaciones, el agua residual tendrá también cambios en la composición de sus contaminantes, por lo que es necesario realizar periódicamente análisis del agua residual y del agua tratada para determinar si el tratamiento resulta eficiente o requiere de modificaciones.
4. Al calcular los costos de construcción y de operación de la planta de tratamiento se encontró que éste es mucho mayor que el costo de tirar al drenaje agua contaminada, por lo que el tratamiento de aguas rara vez resulta una inversión económicamente atractiva, sólo la conciencia de los empresarios y las presiones legislativas pueden promover la construcción de plantas de tratamiento que eviten que se siga deteriorando el ecosistema en el que vivimos.

-
5. Por lo poco económico que resulta el tratamiento de aguas se deben buscar alternativas que provoquen que éste se vuelva atractivo económicamente, como puede ser el regenerar los metales que se encuentran en los lodos de desecho, el recircular el agua tratada dentro del proceso o utilizarla para riego o bien para usos sanitarios para así disminuir el consumo de agua potable.

9. BIBLIOGRAFÍA

Libros

1. Eckenfelder, W. Wesley., *Industrial Water Pollution Control*, Ed. McGraw-Hill, 1989.
2. Fair, Gordon M. Geyer, John C y Okun, Daniel A., *Purificación de Aguas y Tratamiento de Aguas Residuales*, Vol. 2, Ed. Limusa, 1984.
3. Metcalf & Eddy. *Wastewater Engineering: Treatment, Disposal and Reuse*, Ed. McGraw-Hill, 1991.
4. Ramalho, R.S., *Introduction to Wastewater Treatment Process*, New York, Academic Press, 1983.
5. Schulz, Cristopher R. y Okun, Daniel A., *Tratamiento de Aguas Superficiales para Países en Desarrollo*, Ed. Limusa, 1990.

6. Thuesen, H. G, Fabricky W. J. y Thuesen G. J., *Ingeniería Económica*, Ed. Prentice-Hall, México, 1986.
7. Weber, Walter J., *Control de la Calidad del Agua, Procesos Fisicoquímicos*, Ed. Reverté, España, 1979.
8. Winkler, Michael A., *Tratamiento Biológico de Aguas de Desecho*, Ed. Limusa, 1993.

Leyes y Manuales

1. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos., *Agua y Sociedad*, México, 1988.
2. *Ley de Aguas Nacionales*, Ed. Porrúa, Segunda Edición, México, 1994.
3. *Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente*, Ed. Porrúa, Novena Edición, México, 1994.
4. *Manual de Aguas para Usos Industriales*, ASTM, Ed. Limusa, 1991.
5. *Manual de Diseño de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Sistemas Alternativos de Tratamiento de Aguas Residuales y Lodos Producidos*, CNA, Gerencia de Normas Técnicas, Libro II, México, Septiembre, 1994
6. *Manual de Tratamiento de Aguas Negras*, Departamento de Sanidad del Estado de Nueva York, Ed. Limusa, 1993.
7. *Métodos Normalizados para el Análisis de Aguas Potables y Residuales.*, American Public Health Association (APHA). American Water Works Association (AWWA). Water Pollution Control Federation (WPCF), 17 Edición, 1989.
8. Varela A. L., *Costos de Construcción Pesada y Edificación. Edificaciones e Instalaciones*, Tomo 1, Ed. Compuobras, México, Junio, 1994.

9. Varela A. L., *Costos de Construcción Pesada y Edificación. Obra Pesada*, Tomo 2, Ed. Compuobras, México, Junio, 1994.

Normas

1. Norma Oficial Mexicana NOM-AA-4-1977. *Determinación de Sólidos Sedimentables*. Dirección General de Normas. Secretaría de Patrimonio y Fomento Industrial.
2. Norma Oficial Mexicana NOM-AA-5-1980. *Determinación de Grasas y Aceites*. Dirección General de Normas. Secretaría de Patrimonio y Fomento Industrial.
3. Norma Oficial Mexicana NOM-AA-28-1981. *Determinación de la Demanda Bioquímica de Oxígeno*. Dirección General de Normas. Secretaría de Patrimonio y Fomento Industrial.
4. Norma Oficial Mexicana NOM-AA-30-1981. *Determinación de la Demanda Química de Oxígeno*. Dirección General de Normas. Secretaría de Patrimonio y Fomento Industrial.
5. Norma Oficial Mexicana NOM-AA-34-1981. *Determinación de Sólidos*. Dirección General de Normas. Secretaría de Patrimonio y Fomento Industrial.
6. Norma Oficial Mexicana NOM-AA-39-1980. *Determinación de Sustancias Activas al Azul de Metileno*. Dirección General de Normas. Secretaría de Patrimonio y Fomento Industrial.
7. Norma Oficial Mexicana NOM-AA-51-1981. *Determinación de Metales-Método Espectrofotométrico de Absorción Atómica*. Dirección General de Normas. Secretaría de Patrimonio y Fomento Industrial.
8. Norma Oficial Mexicana NOM-CCA-031-ECOL/1993. *Límites Máximos Permisibles de Contaminantes en las Descargas de Aguas Residuales Provenientes de la Industria, Actividades Agroindustriales, de Servicios y el Tratamiento de Aguas Residuales a los Sistemas de Drenaje y Alcantarillado Urbano o Municipal*. Dirección General de Normas. Secretaría de Patrimonio y Fomento Industrial.

Anexo 1. Memoria de Cálculo

1. Cantidad de Agua que se requiere para preparar las soluciones:

Dosis

Cal	2.4 kg/m ³	Solución al 10% en peso
Bentonita	3.0 kg/m ³	Solución al 10% en peso
Sosa	1.0 kg/m ³	Solución al 20% en peso
H ₂ SO ₄	0.5 kg/m ³	Solución 1:20

Cal

$$20 \text{ m}^3 \left(\frac{2.4 \text{ kg}}{\text{m}^3} \right) \left(\frac{1 \text{ m}^3}{100 \text{ kg}} \right) = 0.48 \text{ m}^3$$

Bentonita

$$20 \text{ m}^3 \left(\frac{3 \text{ kg}}{\text{m}^3} \right) \left(\frac{1 \text{ m}^3}{100 \text{ kg}} \right) = 0.60 \text{ m}^3$$

Sosa

$$20\text{m}^3 \left(\frac{1\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \left(\frac{1\text{m}^3}{200\text{kg}} \right) = 0.10\text{m}^3$$

Ácido Sulfúrico

$$20\text{m}^3 \left(\frac{1\text{lt}}{\text{m}^3} \right) \left(\frac{1\text{m}^3}{200\text{lt}} \right) = 0.10\text{m}^3$$

Cantidad de Agua para preparar las soluciones:

$$\text{Agua} = 0.48 + 0.60 + 0.10 + 0.10 = 1.28\text{m}^3$$

2. Diseño de los tanques de Cal y de Bentonita (FB-04 y FB-05)

Volumen 750 litros
 Presión 1 atm
 Temperatura 25°C
 Material Polietileno de alta densidad

$$L = \frac{4V}{\pi D^2} = \frac{4(0.75)}{\pi D^2}$$

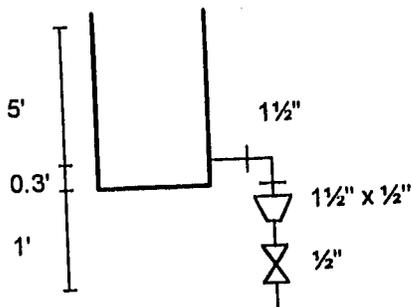
Diámetro (m)	Longitud (m)	Área (m ²)
0.5	3.81	3.18
0.7	1.94	2.51
0.8	1.49	2.37
0.9	1.17	2.29
1.0	0.95	2.28
1.2	0.66	2.37
1.5	0.42	2.75

Tipo de Tapas: Planas

Diámetro 0.8 m
 Longitud 1.5 m

Boquilla

A 10 cm del fondo
 Enroscada
 PVC de 1½"



$$Z_1 = Z_2 + \Sigma f$$

$$\Delta Z = \Sigma f$$

$$\Sigma f = 6' \text{ de agua}$$

$$L_{eq} = 1 + (108)(0.0518) = 6.6 \text{ ft}$$

Lleno

$$\Delta P = \frac{6}{2.31} = 2.59 \text{ psi}$$

$$\Delta P_{100} = \frac{2.59}{6.6} \times 100 = 39.24 \text{ psi}$$

$$Q = 8 \text{ GPM} = 0.5 \text{ l/s}$$

Vacío

$$\Delta P = \frac{0.348}{2.31} = 0.15 \text{ psi}$$

$$\Delta P_{100} = \frac{0.15}{6.6} \times 100 = 2.28 \text{ psi}$$

$$Q = 2 \text{ GMP} = 0.12 \text{ l/s}$$

3. Diseño de los tanques de Sosa y de Ácido Sulfúrico (FB-06 y FB-07)

Volumen	200 litros
Presión	1 atm
Temperatura	25°C
Material	Acero inoxidable 0.304
Corrosión	0.125"
Espesor	0.218"

$$L = \frac{4V}{\pi D^2} = \frac{4(0.2)}{\pi D^2}$$

Diámetro (m)	Longitud (m)	Área (m ²)
0.3	2.82	1.39
0.4	1.59	1.12
0.5	1.01	0.99
0.6	0.70	0.94

Tipo de Tapas: Planas

Diámetro	0.5 m
Longitud	1.0 m

Boquilla

En el fondo
Enroscada
PVC de 1½"

4. Diseño del Floculador

Gasto de Diseño	5000 l/h = 120 m ³ /día
Tiempo de Floculación	30 minutos
No. de secciones	2
Profundidad	0.50 metros
Largo	2.00 metros

Volumen del floculador:

$$\text{Vol} = (30 \text{ min}) \left(120 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \right) \left(\frac{\text{día}}{1440 \text{ min}} \right) = 2.5 \text{ m}^3$$

Ancho total:

$$W = \frac{V}{LH} = \frac{2.5 \text{ m}^3}{(0.5 \text{ m})(2 \text{ m})} = 2.5 \text{ m}$$

Ancho de cada sección:

$$W_s = \frac{2.5 \text{ m}}{2} = 1.25 \text{ m}$$

Se tendrán 6 mamparas en cada sección

El régimen de flujo es laminar

La caída de presión es despreciable

5. Diseño del Sedimentador

Gasto de Diseño $5 \text{ m}^3/\text{h} = 120 \text{ m}^3/\text{día}$

Tiempo de Residencia 1.5 horas

Velocidad de Sedimentación:

$$V_s = 2.5 \frac{\text{cm}}{\text{min}} = 3.6 \frac{\text{m}}{\text{día}}$$

Volumen del sedimentador:

$$V = \left(5 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}\right)(1.5 \text{ h}) = 7.5 \text{ m}^3$$

Profundidad del sedimentador

$$H = \frac{(3.6 \text{ m/día})(1.5 \text{ h})}{24 \text{ h/día}} = 0.22 \text{ m} = 1 \text{ m}$$

Área del Sedimentador

$$WL = \frac{7.5 \text{ m}^3}{1 \text{ m}} = 7.5 \text{ m}^2$$

Como $W/L = 3$

Largo = 4.8 m

Ancho = 1.6 m

Longitud del Vertedor

$$L_v = \frac{0.2Q}{H V_s} = \frac{0.2(120 \text{ m}^3 / \text{día})}{(1 \text{ m})(3.6 \text{ m} / \text{día})} = 6.6 \text{ m}$$

Se ajusta a 3 vertedores de 2 m de largo y 0.20 m de ancho

ANEXO 2. CÁLCULO DE LA RENTABILIDAD DEL TRATAMIENTO

Evaluación 1

a) Información General

- | | |
|---|-------------------|
| 1. Vida útil de la planta de tratamiento | 10 años |
| 2. Veces que opera la planta por semana | 2 veces |
| 3. Volumen de agua que se trata por operación | 20 m ³ |
| 4. Volumen de agua tratada por año: | |

$$20 \text{ m}^3 \left(\frac{2 \text{ veces}}{\text{semana}} \right) \left(\frac{52 \text{ semanas}}{\text{año}} \right) = 280 \text{ m}^3 / \text{año}$$

5. Costo de la Planta de tratamiento	N\$118,342.00
6. Tasa de interés anual	30%

b) Costos Fijos

Si la planta se paga en 10 años se tendrá un pago anual de:

$$\text{Pago Anual} = \left[\frac{0.30(1+0.30)^{10}}{(1+0.30)^{10} - 1} \right] \times 118342 = \text{N\$ } 38,279.3$$

Al dividir entre el volumen de agua tratada por año se obtienen los costos fijos por metro cúbico de agua:

$$\text{C.F.} = \frac{\text{N\$ } 38,279.31}{2080\text{m}^3} = \text{N\$ } 18.40/\text{m}^3$$

c) Costos de Operación**1. Reactivos:**

Reactivo	N\$/kg	kg/m ³	N\$/m ³
H ₂ SO ₄	3.15	0.5	1.58
Cal	0.83	2.4	1.99
Bentonita	0.42	3.0	1.26
Sosa	2.49	2.0	4.98
Total			9.81

2. Mano de Obra

Trabajador	Número	N\$/turno	N\$/m ³
Operador	1	18.00	0.90
Supervisor	1	35.00	1.75
Total			2.65

3. Costos de energía eléctrica

Equipo	Número	HP
Bomba	3	1.5
Aerador	4	1.0
Total		8.5

$$8,5\text{HP} = 6,34 \text{ kW}$$

Horas de operación de los equipos 4 h

Costo del kW-h N\$0.15

Costos de energía eléctrica N\$3.8/turno
N\$0.19/m³

4. Costos de mantenimiento

Se estima que serán el 2% del costo de los reactivos

Mantenimiento preventivo 0.20 N\$/m³

5. Costos totales de operación:

$$C. Op. = 9.81 + 2.65 + 0.19 + 0.20 = \text{N}\$12.85/\text{m}^3$$

d) Costos Totales

C. Totales = C. Fijos + C. Operación

$$C. Totales = 18.40 + 12.85 = \text{N}\$31.25/\text{m}^3$$

e) Costos por Tirar el Agua sin Tratamiento Alguno

Costo del Agua Potable	N\$2.56/m ³
Costo de Tirar agua contaminada	N\$8.40/m ³
Total	N\$10.90/m³

f) Rentabilidad

La rentabilidad se define como el cociente entre el costo de tirar agua contaminada y el costo del tratamiento

$$\text{Rentabilidad} = \frac{10.90}{31.25} = 0.3488$$

Como el valor de la rentabilidad es menor de 1 se concluye que el tratamiento del agua no es atractivo desde el punto de vista económico, pues resulta más caro tratar el agua que seguir pagando multas por tirar al drenaje el agua sin ningún tratamiento. Sin embargo, se debe considerar que de seguir tirando el agua contaminada se puede producir la clausura de la empresa, lo que representaría costos aún mayores.

Evaluación 2

En esta evaluación se considerará que la planta de tratamiento se paga en el primer año y los posteriores tendrán únicamente los costos de operación.

Año	Sin Tratamiento	Con Tratamiento
0	N\$0	N\$118,342
1	N\$22,672	N\$31,907
2	N\$22,672	N\$31,907
3	N\$22,672	N\$31,907
4	N\$22,672	N\$31,907
5	N\$22,672	N\$31,907
6	N\$22,672	N\$31,907
7	N\$22,672	N\$31,907
8	N\$22,672	N\$31,907
9	N\$22,672	N\$31,907
10	N\$22,672	N\$31,907

1. Valor Presente

$$VP(30)_{ST} = -70,091$$

$$VP(30)_{CT} = -216,983$$

2. Cantidad Anual Equivalente

$$AE(30)_{ST} = -22,672$$

$$AE(30)_{CT} = -70,190$$

3. Valor Futuro

$$VF(30)_{ST} = -966,280$$

$$VF(30)_{CT} = -2,991,339$$

4. Evaluación:

La siguiente relación es válida si la tasa de interés y el número de años son iguales para las dos alternativas.

$$\frac{VP(30)_{ST}}{VP(30)_{CT}} = \frac{AE(30)_{ST}}{AE(30)_{CT}} = \frac{VF(30)_{ST}}{VF(30)_{CT}} = 0.323$$

Al ser el cociente menor que 1 se tiene que la alternativa de tratamiento es menos atractiva económicamente que la de no tratar el agua. Sin embargo debido a las razones anteriormente mencionadas se recomienda la construcción de la planta de tratamiento.

CÁLCULO DE LAS PÉRDIDAS POR CLAUSURA**A. Tiempo de Clausura de 15 días.**

Número de Empleados 210
 Salario Mínimo 18.00 N\$/día

1. División del Personal y Salarios

Puesto del Personal	Cantidad	Salario			Total Diario N\$	Total Clausura N\$
		Mínimos	Diario N\$/Empleado	Mensual N\$/Empleado		
Gerentes	2	20	360.00	10,800.00	720.00	10,800.00
Jefes de Departamento	5	11	198.00	5,940.00	990.00	14,850.00
Secretarías	18	3	54.00	1,620.00	972.00	14,580.00
Compradores	5	5	90.00	2,700.00	450.00	6,750.00
Vendedores	15	5	90.00	2,700.00	1,350.00	20,250.00
Supervisores	15	7	126.00	3,780.00	1,890.00	28,350.00
Obreros	150	2	36.00	1,080.00	5,400.00	81,000.00
Total	210	53	954.00	28,620.00	11,772.00	176,580.00

2. Producción

	Piezas		Costo		
	Diaria	Total Clausura	N\$/pieza	N\$/día	N\$/Clausura
Producción	150	2,250			
Costo de Materia Prima			150.00	22,500.00	337,500.00
Costo de Producción			40.00	6,000.00	90,000.00
Costo Total de Producción			190.00	28,500.00	427,500.00

3. Servicios

Servicio	Unidades	Precio Unitario (N\$)	Cantidad		Costo	
			Diaria	Clausura	Diario (N\$)	Clausura (N\$)
Agua	m3	2.56	65	975	166.40	2,496.00
Electricidad	kW-h	0.15	3,000	45,000	450.00	6,750.00
Combustible	l	0.98	400	6,000	392.00	5,880.00
Teléfono	---	---	---	---	100.00	1,500.00
Varios	---	---	---	---	200.00	3,000.00
Total					1,308.40	19,626.00

No se consideró la renta del terreno.

4. Ingresos Totales

Precio de Venta de Cada Pieza N\$300.00

	Diario	Clausura
Piezas Vendidas	150	2,250
Ventas Totales	45,000.00	675,000.00

5. Egresos Totales

Concepto	Diario	Clausura
Salarios	11,722.00	176,580.00
Producción	28,500.00	427,500.00
Servicios	1,308.40	19,626.00
Total	41,580.40	623,706.00

6. Utilidades

	Diario	Clausura
Ingresos Totales (N\$)	45,000.00	675,000.00
Egresos Totales (N\$)	41,580.40	623,706.00
Total	3,419.60	51,294.00

7. Multas

La multa será de 1000 días de salario mínimo, lo que equivale a N\$18,000.00

8. Pérdidas por Clausura de 15 días

Concepto	Diario (N\$)	Clausura (N\$)
Multa	1,200.00	18,000.00
Salarios	11,772.00	176,580.00
Servicios	1,308.40	19,626.00
Utilidades sin Percibir	3,419.60	51,294.00
Total	17,700.00	265,500.00

B. Tiempo de Clausura de 30 días.

Número de Empleados 210

Salario Mínimo 18.00 N\$/día

1. División del Personal y Salarios

Puesto del Personal	Cantidad	Salario			Total Diario N\$	Total Clausura N\$
		Mínimos	Diario N\$/Empleado	Mensual N\$/Empleado		
Gerentes	2	20	360.00	10,800.00	720.00	21,600.00
Jefes de Departamento	5	11	198.00	5,940.00	990.00	29,700.00
Secretarias	18	3	54.00	1,620.00	972.00	29,160.00
Compradores	5	5	90.00	2,700.00	450.00	13,500.00
Vendedores	15	5	90.00	2,700.00	1,350.00	40,500.00
Supervisores	15	7	126.00	3,780.00	1,890.00	56,700.00
Obreros	150	2	36.00	1,080.00	5,400.00	162,000.00
Total	210	53	954.00	28,620.00	11,772.00	353,160.00

2. Producción

	Piezas		Costo		
	Diaria	Total Clausura	N\$/pieza	N\$/dia	N\$/Clausura
Producción	150	4,500			
Costo de Materia Prima			150.00	22,500.00	675,000.00
Costo de Producción			40.00	6,000.00	180,000.00
Costo Total de Producción			190.00	28,500.00	855,000.00

3. Servicios

Servicio	Unidades	Precio Unitario (N\$)	Cantidad		Costo	
			Diaria	Clausura	Diario (N\$)	Clausura (N\$)
Agua	m3	2.56	65	1,950	166.40	4,992.00
Electricidad	kW-h	0.15	3,000	90,000	450.00	13,500.00
Combustible	l	0.98	400	12,000	392.00	11,760.00
Teléfono	---	---	---	---	100.00	3,000.00
Varios	---	---	---	---	200.00	6,000.00
Total					1,308.40	39,252.00

No se consideró la renta del terreno.

4. Ingresos Totales

Precio de Venta de Cada Pieza N\$300.00

	Diario	Clausura
Piezas Vendidas	150	4,500
Ventas Totales	45,000.00	1,350,000.00

5. Egresos Totales

Concepto	Diario	Clausura
Salarios	11,722.00	353,160.00
Producción	28,500.00	855,000.00
Servicios	1,308.40	39,252.00
Total	41,580.40	1,247,412.00

6. Utilidades

	Diario	Clausura
Ingresos Totales (N\$)	45,000.00	1,350,000.00
Egresos Totales (N\$)	41,580.40	1,247,412.00
Total	3,419.60	102,588.00

7. Multas

La multa será de 1000 días de salario mínimo, lo que equivale a N\$18,000.00

8. Pérdidas por Clausura de 30 días

Concepto	Diario (N\$)	Clausura (N\$)
Multa	600.00	18,000.00
Salarios	11,772.00	353,160.00
Servicios	1,308.40	39,252.00
Utilidades sin Percibir	3,419.60	102,588.00
Total	17,100.00	513,000.00

ANEXO 3. ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS

A continuación se presenta el análisis de precios unitarios de algunos de los conceptos que se utilizaron para determinar los costos de los materiales que intervienen en la construcción de la planta de tratamiento.

Cada uno de estos conceptos se encuentran desglosados en tres partes: la primera parte representa el costo del personal que interviene, la segunda parte representa el costo de los materiales y la tercera, el costo de la herramienta.

Este anexo es importante pues presenta de manera clara y completa algunos de los factores que intervienen en la construcción de una estructura.

CONCEPTO

CONCRETO HECHO IN SITU F' C 150 AGREGADOS
PRODUCIDOS POR EL CONTRATISTA

UNIDAD

m³

CUADRILLAS DE PERSONAL (M.O.)				
CONCEPTO	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO (N\$)	IMPORTE (N\$)
Peón	Jor	1.0000	42.79	42.79
Cabo	Jor	0.1000	93.68	9.37
SUBTOTAL				52.16
RENDIMIENTO		m ³ /Jor	3.2000	
SUBTOTAL				16.30

MATERIALES Y PROCESOS				
CONCEPTO	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO (N\$)	IMPORTE (N\$)
Cemento gris en planta por saco	Ton	0.2990	362.88	108.50
Carga+descarga+acarreo 20 m Cemento	Ton	0.5980	17.44	10.43
Grava triturada 1 1/2" (totalmente) acarreo 20 m, agregados producidos por el contratista	m ³	0.3700	22.25	8.23
Grava cribada (pepena acarreo 20 m) y triturada parcialmente (50%)	m ³	0.3700	3.96	1.47
Arena de banco cribada (acarreo 20 m), obtenida por el contratista	m ³	0.5400	8.57	4.63
Acarreo km subsecuente c/volteo (medio suelto) **1.28 m ³ agregados x 10 km	m ³ /km	12.8000	1.09	13.95
Extracción de agua 1er. km con pipa 10 m ³	m ³	0.1770	4.45	0.79
Acarreo de agua kilómetros subsecuentes con pipa 10 m ³	m ³	1.7700	0.52	0.92
Acarreo de cemento kms subsec. al 1o.	Ton/km	5.9800	0.40	2.39
Acarreo 1er. km material medido en banco volúmenes medidos en banco **1.28x1.2	m ³	1.5360	5.89	9.05
SUBTOTAL				160.35

EQUIPO Y HERRAMIENTAS				
CONCEPTO	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO (N\$)	IMPORTE (N\$)
Revoledora de trompo Mipsa MAX1-10				
1 saco (320 lt) de gasolina 8 HP				
** 2 m ³ /hr	hr	0.5000	17.81	8.91
Herramienta menor	% M.O.	3.0000	16.30	0.49
SUBTOTAL				9.39

COSTO DIRECTO				N\$ 186.05
INDIRECTOS		34%		N\$ 63.26
PRECIO UNITARIO				N\$ 249.30

MEZCLAS

Hoja 2 de 4

CONCEPTO

GRAVA TRITURADA 1 1/2" (TOT.) ACARREO
20 m, AGREGADOS PROD. POR EL CONTRATISTA

UNIDAD

m³

MATERIALES Y PROCESOS				
CONCEPTO	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO (N\$)	IMPORTE (N\$)
Regalias por explotación de banco	m ³	0.6000	4.38	2.83
Extracción de material 100-0-0 ("A") cuando se remueve con tractor D4H.				
**despalme de banco 1/40+10%	m ³	0.0275	2.71	0.07
Voladura de roca clase II (media) prof. 10 m sin afinar, barreno de 3" usando acero seccional, plan 2.5 m				
**media suelta 67% abundamiento	m ³	0.6000	9.42	5.65
Acarreo libre 20 m volteo fuera carretera (sin carga - medio suelo)				
**merma 5%	m ³	1.0500	2.19	2.30
Acarreo libre 20 m volteo fuera carretera (sin carga - medio suelo)				
**merma 5%	m ³	1.0500	0.05	0.05
SUBTOTAL				10.71

EQUIPO Y HERRAMIENTAS				
CONCEPTO	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO (N\$)	IMPORTE (N\$)
Tractor Komatsu D155A-1 de 320 hp con cuchilla recta de 8 m ² peso 33.7 ton.				
**rezaga 60 m: 380 m ³ /h x 0.75 x 0.83 x 0.8 x 0.85 = 155 m ³	hr	0.0065	233.26	1.52
Cargador sobre oruga CAT 963B 150 hp, 18 ton, cucharón 1.71 m ³ al ras.				
**dist. 8 m: 85 m ³ /h x 0.55	hr	0.0214	151.28	3.24
**f. carga roca tronada)				
Quebradora de quijadas Compacto TelSmith 30"x42" requiere 125-150 hp capacidad de 140-220 ton/h en 3 1/2"; y 300-400 ton/h en 8" incluye generador				
**rend. 195 m ³ (en 8")/h x 0.7(ef)=137 m ³	hr	0.0073	90.72	0.66
Trituradora de cono giroesfera compacto Telesmith 36S secundaria requiere 60-75 hp capacidad prom. 36 ton/h en 3/8" a 110 ton/h en 2" sin motor incluye generador.				
**rend. 48.3 m ³ (en 1 1/2")/h x 0.7=33.8 m ³ /h	hr	0.0296	90.72	2.69
Planta con generador eléctrico CAT A-10 325 hp/258 kw continua automática, motor 3408 B				
Cargador Komatsu sobre oruga D-57-S 1 de 137 hp cucharón 1.8 m ³ peso 15.4 ton. (producto nacional) con desgarrador.				
**carga material triturado 78 m ³ /h	hr	0.0128	107.07	1.37
SUBTOTAL				11.93

COSTO DIRECTO				N\$ 22.63
INDIRECTOS		34%		N\$ 7.70
PRECIO UNITARIO				N\$ 30.33

CONCEPTO ARENA DE BANCO CRIBADA (INCLUYE ACARREO 20 m), OBTENIDA POR EL CONTRATISTA

UNIDAD m³

MATERIALES Y PROCESOS				
CONCEPTO	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO (N\$)	IMPORTE (N\$)
Regalias por explotación de banco	m ³	1.0500	4.38	4.60
SUBTOTAL				4.60

EQUIPO Y HERRAMIENTAS				
CONCEPTO	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO (N\$)	IMPORTE (N\$)
Tractor CAT D4H 90 hp cuchilla 4S de 1.5 m ³ vel. max. 10 km/h **Acopio 120 m ³ (a 20 m)	hr	0.0083	86.73	0.72
Cargador retroexcavador CAT 918F motor 98 hp cucharón 1.5 m ³ al ras, 0.9 ton **En extracción **rend = 52.7 m ³ /h	hr	0.0190	70.51	1.34
Cargador CAT 931C sobre oruga 65 hp 2400 rpm cucharón 0.8 m ³ **Alimentación a planta **rend = 126.5 m ³ /h x 0.75 x 0.83 x 0.8 = 63.5 m ³ /h	hr	0.0158	50.62	0.80
Planta de cribado Telsmith Vibro King PT 6'x16' 3 pisos 25 hp allm. 30"x42' 10 hp tr inf. 25"x36' 10 hp tr lat. 25"x24' 7.5 hp (no incluye generador)	hr	0.0200	63.12	1.26
SUBTOTAL				4.12

COSTO DIRECTO				N\$ 8.72
INDIRECTOS		34%		N\$ 2.97
PRECIO UNITARIO				N\$ 11.69

CONCEPTO PIEDRA DE BANCO (INCLUYE ACARREO LIBRE)
UNIDAD m³

CUADRILLAS DE PERSONAL (M.O.)				
CONCEPTO	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO (N\$)	IMPORTE (N\$)
Peon	Jor	10.0000	42.79	427.90
Cabo	Jor	1.0000	93.68	93.68
SUBTOTAL				521.58
RENDIMIENTO (selección y acopio)		m ³ /Jor	100.0000	
SUBTOTAL				5.22

MATERIALES Y PROCESOS				
CONCEPTO	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO (N\$)	IMPORTE (N\$)
Regalias por explotación de banco	m ³	0.6000	4.38	2.63
Voladura de roca clase II (media) prof. 10 m sin afinar, barrenos de 3" usando acero seccional, plan 2.5 m				
**media suelta 67% abundamiento	m ³	0.6000	9.42	5.65
Acarreo libre 20 m volteo fuera carretera (sin carga - medio suelto)				
**merma 5%	m ³	1.0500	0.05	0.05
SUBTOTAL				8.33

EQUIPO Y HERRAMIENTAS				
CONCEPTO	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO (N\$)	IMPORTE (N\$)
Cargador retroexcavador CAT 918F motor 98 hp				
cucharón 1.5 m ³ al ras, 0.9 ton				
**52.7 m ³ /hx0.9 (f. carga) = 47.43 m ³ /h	hr	0.0211	70.51	1.49
Herramienta menor	% M.O.	3.0000	5.22	0.16
SUBTOTAL				1.64

COSTO DIRECTO				N\$ 15.19
INDIRECTOS		34%		N\$ 5.17
PRECIO UNITARIO				N\$ 20.38

CONCEPTO GRAVA CRIBADA (PEPENA ACARREO 20 m)
Y TRITURADA PARCIALMENTE (50%)

UNIDAD m³

MATERIALES Y PROCESOS				
CONCEPTO	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO (N\$)	IMPORTE (N\$)
Acarreo libre 20 m volteo fuera carretera (sin carga - medio suelto) **merma 5%	m ³	1.0500	0.05	0.05
SUBTOTAL				0.05

EQUIPO Y HERRAMIENTAS				
CONCEPTO	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO (N\$)	IMPORTE (N\$)
Cargador retroexcavador CAT 918F motor 98 hp cucharón 1.5 m ³ al ras, 0.9 ton **52.7 m ³ /h	hr	0.0180	70.51	1.34
Trituradora de cono giroesfera compacto Telesmith 36S secundaria requiere 60-75 hp capacidad prom. 38 ton/h en 3/8" a 110 ton/h en 2" sin motor incluye generador. **rend. 48.3 m ³ /h x 0.7 (efic) al 50%	hr	0.0148	90.72	1.34
Planta con generador eléctrico CAT A-10 325 hp/256 kw continua automática, motor 3406 B	hr	0.0148	82.96	1.23
SUBTOTAL				3.91

COSTO DIRECTO				N\$ 3.96
INDIRECTOS		34%		N\$ 1.35
PRECIO UNITARIO				N\$ 5.31

CONCEPTO PIEDRA PEPENA

UNIDAD m³

CUADRILLAS DE PERSONAL (M.O.)				
CONCEPTO	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO (N\$)	IMPORTE (N\$)
Peón	Jor	10.0000	42.79	427.90
Cabo	Jor	1.0000	93.68	93.68
SUBTOTAL				521.58
RENDIMIENTO (selección y acopio)	m ³ /Jor	100.0000		
SUBTOTAL				5.22

MATERIALES Y PROCESOS				
CONCEPTO	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO (N\$)	IMPORTE (N\$)
Acarreo libre 20 m volteo fuera carretera (sin carga - medio suelto)				
**merma 5%	m ³	1.0500	0.05	0.05
SUBTOTAL				0.05

EQUIPO Y HERRAMIENTAS				
CONCEPTO	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO (N\$)	IMPORTE (N\$)
Cargador retroexcavador CAT 918F motor 98 hp cucharón 1.5 m ³ al ras, 0.9 ton **52.7 m ³ /h x 0.9 (f. carga) = 47.43 m ³ /h	hr	0.0211	70.51	1.49
Herramienta menor	% M.O.	3.0000	5.22	0.16
SUBTOTAL				1.64

COSTO DIRECTO				N\$ 6.91
INDIRECTOS		34%		N\$ 2.35
PRECIO UNITARIO				N\$ 9.26

CONCEPTO EXCAVACION MANUAL MATERIAL "A" 0 a 2 m
EJECUTADO EN ZONA SIN OBSTRUCCIONES

UNIDAD m³

CUADRILLAS DE PERSONAL (M.O.)				
CONCEPTO	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO (N\$)	IMPORTE (N\$)
Peón	Jor	1.0000	42.79	42.79
Cabo	Jor	0.1000	93.68	9.37
SUBTOTAL				52.16
RENDIMIENTO	m ³ /Jor	4.6200		
SUBTOTAL				11.29

EQUIPO Y HERRAMIENTAS				
CONCEPTO	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO (N\$)	IMPORTE (N\$)
Herramienta menor	% M.O.	3.0000	11.29	0.34
SUBTOTAL				0.34

COSTO DIRECTO				N\$ 11.63
INDIRECTOS		34%		N\$ 3.95
PRECIO UNITARIO				N\$ 15.58

CONCEPTO

EXCAVACION MANUAL MATERIAL "C-III" 0 a 2 m
(ROCA DURA) EJECUTADO EN ZONA SIN OBST.
CON ROMPEDORA NEUMATICA

UNIDAD

m³

CUADRILLAS DE PERSONAL (M.O.)				
CONCEPTO	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO (N\$)	IMPORTE (N\$)
Peón	Jor	1.0000	42.79	42.79
Cabo	Jor	0.1000	93.68	9.37
SUBTOTAL				52.16
RENDIMIENTO	m ³ /Jor	3.5000		
SUBTOTAL				14.90

EQUIPO Y HERRAMIENTAS				
CONCEPTO	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO (N\$)	IMPORTE (N\$)
Rompedora de pavimento Ingersoll-Rand PB-85.5 de 71 PCM broquero 1 1/4"x6" de 38 kg				
** (inc. operad.) $3.5m \times 0.5/9.29m/m^3 = 0.19m^3/h$	hr	5.3086	16.88	89.61
Compresor Ingersoll Rand P-185(pcm) motor de 77 HP Perkins tipo tornillo	hr	2.6543	32.00	84.94
Pulseta 1 1/4"x6" cincel	Pza	0.1858	147.12	27.33
** vida útil 55 m/9.29 m/m ³ /1.1	% M.O.	3.0000	14.90	0.45
SUBTOTAL				202.33

COSTO DIRECTO				N\$ 217.23
INDIRECTOS		34%		N\$ 73.86
PRECIO UNITARIO				N\$ 291.09

CONCEPTO ACARREO EN CARRETILLA 20 m
UNIDAD m³

CUADRILLAS DE PERSONAL (M.O.)				
CONCEPTO	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO (N\$)	IMPORTE (N\$)
Peón	Jor	1.0000	42.79	42.79
Cabo	Jor	0.1000	93.68	9.37
SUBTOTAL				52.16
RENDIMIENTO	m ³ /Jor	10.0000		
SUBTOTAL				5.22

EQUIPO Y HERRAMIENTAS				
CONCEPTO	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO (N\$)	IMPORTE (N\$)
Herramienta menor	% M.O.	3.0000	5.22	0.16
SUBTOTAL				0.16

COSTO DIRECTO				N\$ 5.37
INDIRECTOS		34%		N\$ 1.83
PRECIO UNITARIO				N\$ 7.20

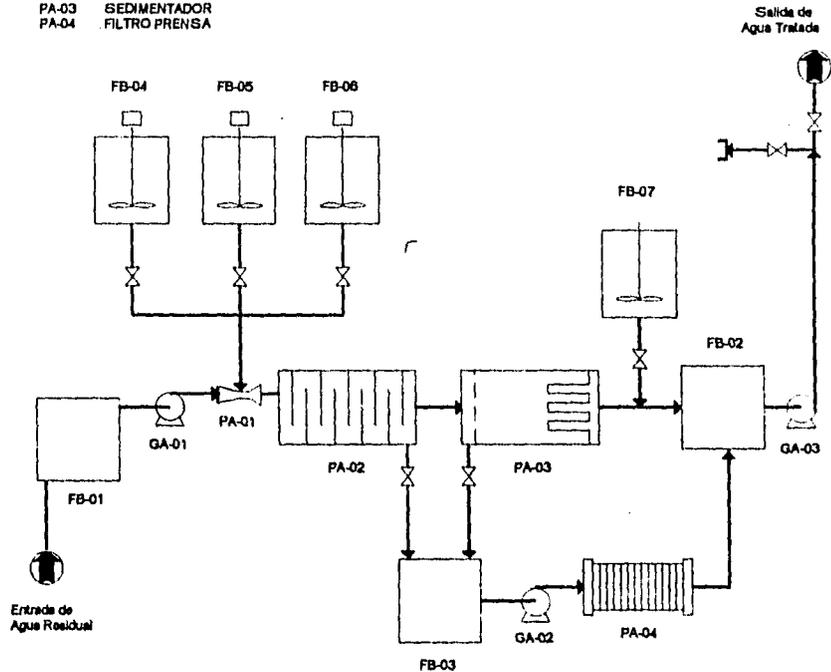
ANEXO 4. PLANOS Y DIAGRAMAS

A continuación se presentan los planos y los diagramas de los equipos con que cuenta la planta de tratamiento.

Dentro de los diagramas y planos se presenta el diagrama de flujo de proceso, el diagrama de localización de equipos, el diseño mecánico de los tanques de reactivos, el diseño del sedimentador y el diseño del floculador.

LISTA DE EQUIPO

- FB-01 TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE AGUA RESIDUAL
- FB-02 TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE AGUA TRATADA
- FB-03 FOSA DE LODOS
- FB-04 TANQUE DE LA SOLUCION DE CAL
- FB-05 TANQUE DE LA SOLUCION DE BENTONITA
- FB-06 TANQUE DE LA SOLUCION DE SODA
- FB-07 TANQUE DE LA SOLUCION DE ACIDO SULFURICO
- GA-01 BOMBA DE ABASTECIMIENTO
- GA-02 BOMBA DE LODOS
- GA-03 BOMBA DE DESCARGA DE AGUA TRATADA
- PA-01 CANAL PARSHALL
- PA-02 CLARIFLOCULADOR
- PA-03 SEDIMENTADOR
- PA-04 FILTRO PRENSA



Referencias

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
FACULTAD DE QUIMICA

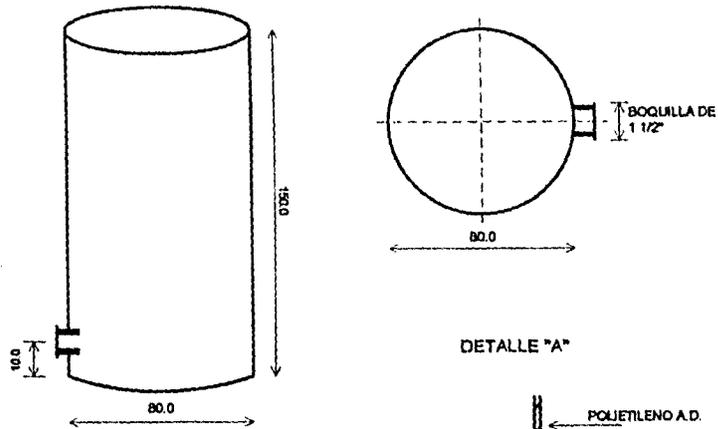
PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS POR
CLARIFLOCULACION QUIMICA

Fecha: 10-Nov-94

Plano: DFP-01

Escala:

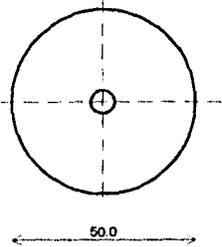
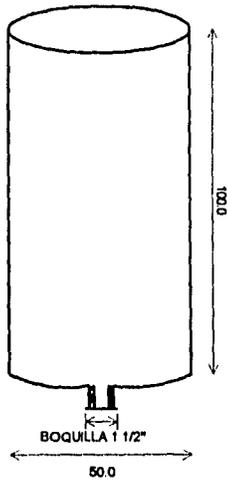
DIAGRAMA DE FLUJO DE PROCESO



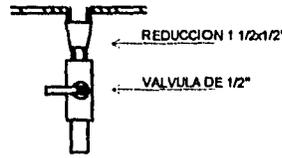
NOTAS:

- 1.-EL MATERIAL DE CONSTRUCCION ES POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD.
- 2.-LA CAPACIDAD MINIMA DEL TANQUE ES DE 750 LITROS.
- 3.-EN TANQUE NO REQUIERE DE AISLAMIENTO
- 4.-LA BRIDA DE SALIDA VA ENROSCADA.
- 5.-ESTE TANQUE SE CONSTRUIRA POR DUPLICADO, PUES UNO CONTENDRA LA SOLUCION DE CAL Y OTRO LA SOLUCION DE BENTONITA.

Referencias			UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO FACULTAD DE QUIMICA
			PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS POR CLARIFLOCULACION QUIMICA
Fecha: 14-Nov-94	Plano: D-FB-0405-1	Acot: cm	DISEÑO DE LOS TANQUES DE REACTIVOS



DETALLE "A"



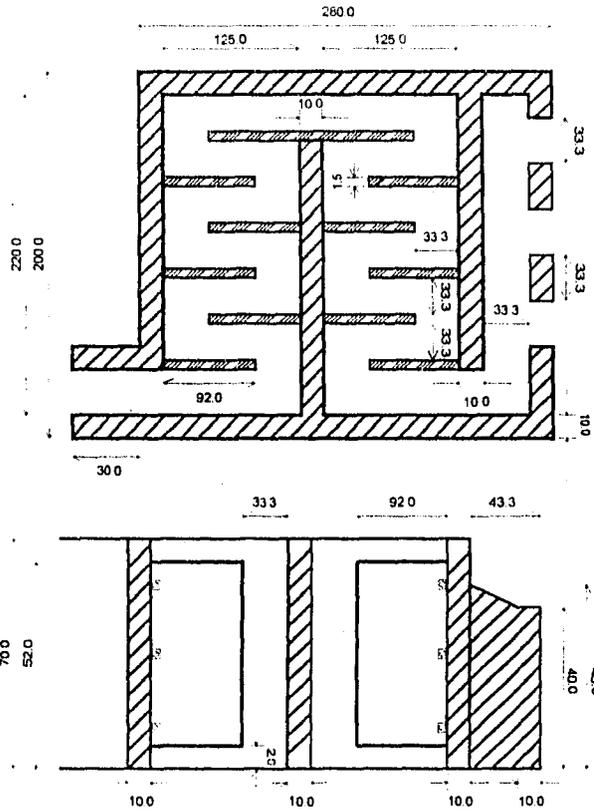
NOTAS:

- 1.-EL MATERIAL DE CONSTRUCCION DEL TANQUE ES ACERO INOXIDABLE 0.304
- 2.-PLACAS CALIBRE U.S.S. 5 (0.218") ACERO INOXIDABLE 0.304
- 3.-LAS TAPAS SON PLANAS.
- 4.-EL TANQUE NO REQUIERE DE AISLAMIENTO
- 5.-EL TANQUE DEBERA IR PINTADO CON ANTICORROSIVO.
- 6.-LA CAPACIDAD TOTAL DEL TANQUE ES DE 200 LITROS.
- 7.-EL TANQUE SE DEBE HACER POR DUPLICADO, UNO PARA LA SOLUCION DE SOSA Y OTRO PARA LA SOLUCION DE ACIDO SULFURICO.
- 8.-LAS BOQUILLAS VAN ENROSCADAS.

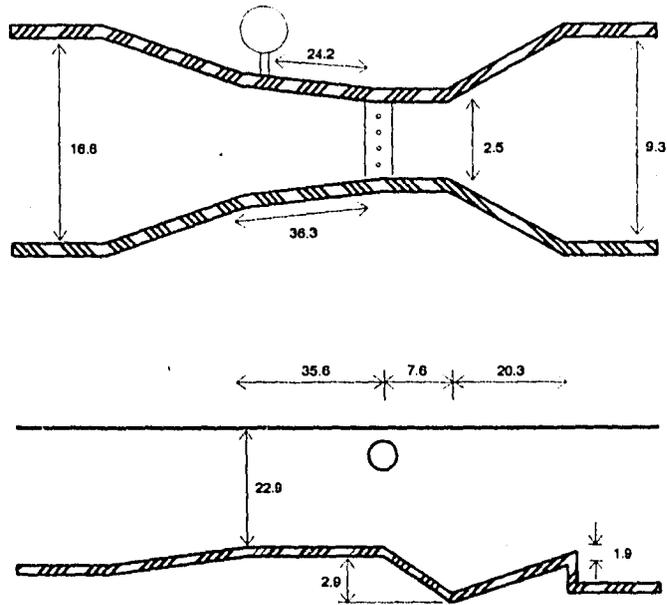
Referencias			UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
			FACULTAD DE QUIMICA
			PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS POR CLARIFLOCULACION QUIMICA
Fecha: 14-Nov-94	Plano: D-FB-06/07-2	Acot: cm	DISEÑO DE LOS TANQUES DE REACTIVOS

NOTAS:

- 1- EL MATERIAL DE CONSTRUCCION DEL TANQUE ES DE MAMPOSTERIA
- 2- EL MATERIAL DE CONSTRUCCION DE LAS MAMPARAS ES MADERA OYAMEL
- 3- EL TANQUE DEBERA PINTARSE CON ANTICORROSIVO
- 4- LAS MAMPARAS DEBEN SUMERGIRSE EN ACEITE QUEMADO ANTES DE INSTALARLAS



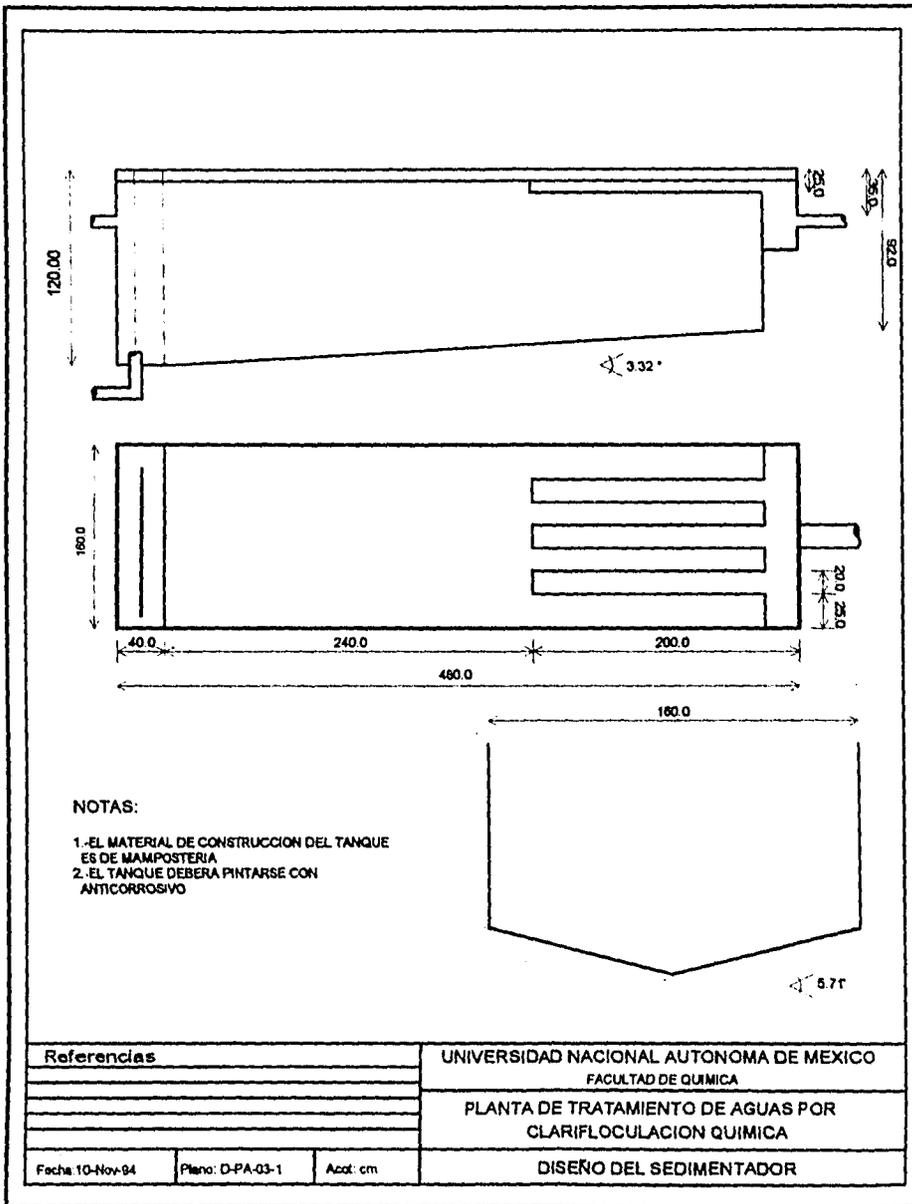
Referencias			UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
			FACULTAD DE QUIMICA
			PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS POR CLARIFLOCULACION QUIMICA
			DISEÑO DEL CLARIFLOCULADOR
Fecha 10-Nov-94	Plano D-PA-02-1	Acot cm	



NOTAS

- 1.-EL MATERIAL DE CONSTRUCCION ES DE FIBRA DE VIDRIO
- 2.-TODAS LAS DISTANCIAS SE ENCUENTRAN DADAS EN CM.
- 3.-LAS DIMENSIONES PUEDEN VARIAR DEPENDIENDO DEL FABRICANTE
- 4.-EL ANCHO DE LA GARGANTA ES DE 1"
- 5.-EL POZO DE CALMA Y EL DIFUSOR DE COAGULANTE DEBERAN SER DISEÑADOS POR EL FABRICANTE

Referencias			UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO FACULTAD DE QUIMICA
			PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS POR CLARIFLOCULACION QUIMICA
Fecha: 10-Nov-94	Plano: D-PA-01-01	Acat: cm	DISEÑO DEL CANAL PARSHALL



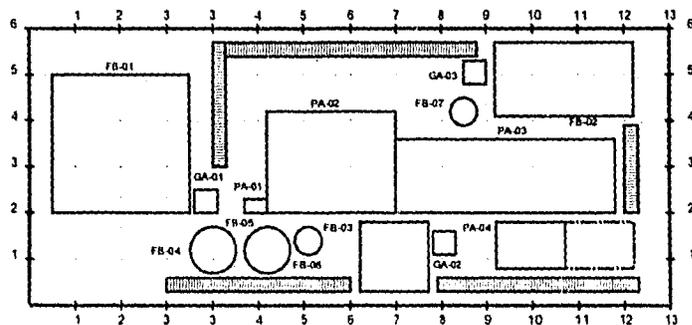
Referencias		

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
 FACULTAD DE QUIMICA
 PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS POR CLARIFLOCULACION QUIMICA
 DISEÑO DEL SEDIMENTADOR

Fecha: 10-Nov-94 Plano: D-PA-03-1 Azot: cm

LISTA DE EQUIPO

- | | | | |
|-------|---|-------|--------------------------------|
| FB-01 | TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE AGUA RESIDUAL | GA-01 | BOMBA DE ABASTECIMIENTO |
| FB-02 | TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE AGUA TRATADA | GA-02 | BOMBA DE LODOS |
| FB-03 | FOSEA DE LODOS | GA-03 | BOMBA DE DESCARGA DE A TRATADA |
| FB-04 | TANQUE DE SOLUCION DE CAL | PA-01 | CANAL PARSHALL |
| FB-05 | TANQUE DE SOLUCION DE BENTONITA | PA-02 | CLARIFLOCULADOR |
| FB-06 | TANQUE DE SOLUCION DE SOSA | PA-03 | SEDIMENTADOR |
| FB-07 | TANQUE DE SOLUCION DE ACIDO SULFURICO | PA-04 | FILTRO PRENSA |



Referencias			UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
			FACULTAD DE QUIMICA
			PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS POR CLARIFLOCULACION QUIMICA
			DIAGRAMA DE LOCALIZACION DE EQUIPOS
Fecha 14-Nov-94	Plano PP-01	Escala 1:100	

ANEXO 5. CRITERIOS DE LA CALIDAD DEL AGUA PARA REUTILIZARLA EN DIFERENTES SECTORES

REÚSO AGRÍCOLA

El uso de aguas residuales en la agricultura es sin lugar a dudas el más grande de los reúsos que se da al agua residual (tratada o cruda), tanto en México como en la mayoría de los países del mundo.

No obstante el peligro que para la salud pública representa, ha sido un patrón general en México, el riego en todo tipo de cultivos con aguas que no han sido sometidas a ningún tratamiento.

A la fecha, han sido múltiples las aplicaciones de agua renovada para riego agrícola en muchas partes del mundo; se puede decir que existe suficiente evidencia del comportamiento de los factores que intervienen en este proceso, como son: salinidad, tipo

de suelo, permeabilidad, toxicidad, pH, etc.; además de que se han hecho intentos serios para reglamentar los límites de calidad para estos fines.

Las aguas tratadas se pueden utilizar para dos fines agrícolas: en primer lugar, aguas de riego para aquellos productos agrícolas que siendo para consumo humano, se consumen crudos; en segundo lugar, aguas de riego para los productos alimenticios que se consumen cocidos o procesados. Los criterios de calidad que se aplican son:

Tabla A-5.1. Criterios de Calidad para Aguas de Riego Agrícola en Productos que se Consumen Cocidos

Parámetro	Criterio de Calidad
Aluminio	5.00
Arsénico	0.10
Coliformes Fecales	1000 NMP/100 ml
Berilio	0.10
Boro	1.00
Cadmio	0.01
Cromo	0.10
Cobalto	0.05
Cobre	0.20
Fluoruros	1.00
Fierro	5.00
Plomo	5.00
Litio	2.5 ⁽¹⁾
Manganeso	0.20
Molibdeno	0.01
Níquel	0.20
pH	6.0-9.0
Fenoles	50.00
Selenio	0.02
Sólidos Disueltos	(2)
Sulfatos	200
Vanadio	0.10
Zinc	2.00

Notas:

(1) 0.075 para el riego de cítricos

(2) Rangos de Sólidos disueltos

<700 Clase I, apta para la mayoría de cultivos

700-2100 Clase II, depende de suelos y cultivos

>2100 Inaceptable en casi todos los casos.

Unidades en mg/l salvo que se indique lo contrario

Tabla A-5.2. Criterios de Calidad para Aguas de Riego Agrícola. Productos que se Consumen Crudos

Parámetro	Criterio de Calidad	
	Uso Continuo	Uso Ocasional
Aluminio	5.00	20.00
En suelos ácidos reduce la productividad, en suelos con pH>5.5 se precipita y se elimina la toxicidad.		
Arsénico	0.10	2.00
Su toxicidad varía de 0.05 mg/l para el arroz hasta 12 mg/l para el pasto tipo Sudán.		
Coliformes fecales	10 NMP/100 ml	
DBO	20	
Sólidos Suspendidos Totales	20	
Turbiedad (UT)	10	
Berilio	0.10	0.50
Su toxicidad varía desde 0.5 mg/l para ciertos tipos de frijol hasta 5 mg/l para ciertas coles.		
Boro	1.00	2.00
Esencial para el crecimiento de las plantas, dosis óptimas en un rango de décimas de mg/l, tóxicas a niveles de 1 mg/l para ciertas plantas como los cítricos.		
Cadmio	0.01	0.05
Tóxico para nabos, betabels y frijoles en concentraciones hasta de 0.1 mg/l, se recomienda su control cuidadoso.		
Cromo	0.10	1.00
Generalmente no se considera como elemento esencial para el crecimiento de las plantas; poca información sobre su toxicidad.		
Cobalto	0.20	5.00
Tóxico para tomates en concentraciones de 0.1 mg/l. Tiende a ser inactivo en suelos neutros o alcalinos.		
Cobre	0.20	5.00
Tóxico para numerosas plantas en concentraciones de 0.1 a 1.0 mg/l.		
Fluoruros	2.00	15.00
Inactivo en suelos neutros o alcalinos		
Fierro	5.00	20.00
No tóxico en suelos aerados, pero puede contribuir a la acidificación de los suelos y a la pérdida de fósforo y molibdeno esenciales para las plantas.		
Plomo	5.00	10.00
En concentraciones arriba de las recomendadas inhibe el crecimiento de las plantas.		

(Continuación)

Parámetro	Criterio de Calidad	
	Uso Continuo	Uso Ocasional
Lítio	2.50	2.50
Tolerado por la mayor parte de los cultivos hasta 5 mg/l, excepto cítricos para los cuales se recomienda concentraciones máximas de 0.075 mg/l; alta movilidad en el suelo.		
Manganeso	0.20	10.00
Tóxico para muchos cultivos en suelos ácidos, en concentraciones de unas décimas a unos mg/l.		
Molibdeno	0.01	0.05
Sin ser tóxico a las plantas, en concentraciones excesivas puede ser tóxico para el ganado alimentado con forrajes con exceso de molibdeno.		
Níquel	0.20	2.00
Tóxico para numerosos cultivos en concentraciones de 0.5 a 1.00 mg/l; su toxicidad se atenúa en suelos neutros o alcalinos.		
pH	6.0-9.0	
Fenoles	50.00	
Selenio	0.02	0.02
Tóxico a las plantas y al ganado alimentado con forrajes con concentraciones altas de selenio.		
Sulfatos	200.00	
Vanadio	0.10	1.00
Tóxico para numerosos cultivos en bajas concentraciones.		
Zinc	2.00	10.00
Existe un amplio ámbito de concentraciones tóxicas para distintos cultivos; su toxicidad se atenúa en suelos neutros o alcalinos o en suelos orgánicos o de textura fina.		

Haciendo una comparación de los criterios de calidad de aguas para riego de productos que se consumen crudos y de productos que se consumen cocidos o procesados, se observa que, en general, son prácticamente los mismos en ambos casos. Con excepción de que en lo relativo a los criterios de DBO, coliformes fecales y turbiedad, resultan mucho más restrictivos en el primero que en segundo. Este hecho está sin lugar a dudas sustentado en la recomendación de la Organización Mundial de la Salud, la cual señala que para el riego de productos alimenticios necesariamente se suministre, al agua residual, un tratamiento secundario seguido de filtración y desinfección.

Tabla A-5.3. Clasificación de Aguas Para Riego

Clase de Agua	Parámetros				
	Sodio (%)	Conductividad ($\mu\text{mhos/cm}$)	Boro (mg/l)		
			Cultivos Sensibles	Cultivos Semitolerantes	Cultivos Tolerantes
Excelente	<20	<250	0.33	<0.67	<1.00
Buena	20-40	2501-750	0.33-0.67	0.67-1.33	1.00-2.00
Permisible	40-60	750-2000	0.67-1.00	1.33-2.00	2.00-3.00
Dudosa	60-80	2000-3000	1.00-1.25	2.00-2.50	3.00-3.75
Inaceptable	>80	>3000	>1.25	>2.50	>3.75

REÚSO INDUSTRIAL

Enfriamiento

Enfriamiento en un Solo Paso. El uso del agua renovada para fines de enfriamiento es el mayor de los usos industriales del agua renovada en México. El agua de enfriamiento es empleada, ya sea para la condensación de vapor de agua, o para enfriar agua caliente que es retornada al sistema que la aprovechó. En el caso del enfriamiento de un solo paso, el agua se utiliza una sola vez, para descargarse finalmente a su fuente de captación o al drenaje.

En vista de los grandes volúmenes de agua que se necesitan para este fin, se considera, por lo general, impráctico el modificar la calidad del agua de enfriamiento mediante tratamiento; aunado a esto, lo que debe evitarse en este tipo de sistemas, es el bloqueo del equipo con sólidos y la formación de películas bacterianas en el sistema de enfriamiento y fomentar la reducción del potencial corrosivo del agua sobre las superficies que integran el sistema.

De acuerdo con lo anterior, en la siguiente tabla se presentan los criterios de calidad recomendables para este tipo de uso, haciendo la observación de que, en algunos casos pudiera ser necesario agregar adicionalmente, productos inhibidores de corrosión y de crecimientos biológicos.

Tabla A-5.4. Criterios de Calidad del Agua para Uso Industrial. Enfriamiento de un Solo Paso

Parámetro	Criterio de Calidad
Alcalinidad	500
Aluminio	1.00
Bicarbonatos	600
Calcio	200
DQO	75
Cloruros	600
Cobre	(1)
Dureza	850
Fierro	0.50
Manganeso	0.50
Fierro + Manganeso	0.50
Grasas y Aceites	No flotante
Oxígeno Disuelto	Aeróbico
pH	5.0-8.3
Sílice	50
Sólidos Suspendidos	5000
Sólidos Disueltos	1000
Sulfatos	680
Temperatura	(1)
Zinc	(1)

(1) Aceptable como se reciba

Unidades en mg/l salvo que se indique lo contrario

Enfriamiento con Recirculación. El agua usada para enfriamiento con recirculación también representa un volumen considerable del agua total que se emplea en la industria; la extracción de agua en este caso se reduce a un 10-15% del agua en recirculación. Sin embargo, cuando el agua de enfriamiento es recirculada, los requerimientos de tratamiento de agua para este tipo de reuso son más críticos, además de que será indispensable el llevar a cabo prácticas de purgado del agua en recirculación para evitar la acumulación de contaminantes debido al proceso de evaporación que ocurre en el sistema.

El tratamiento del agua se aplica al agua que sustituye a las purgas indispensables del proceso, y requieren de mejor calidad que el agua de enfriamiento de un solo paso, debido a que el agua completa varios ciclos acumulativos de contaminantes antes de ser desechada como agua de purga.

En general las bases que rigen la determinación de los criterios de calidad del agua tratada para este tipo de reúso son las siguientes:

1. Que no forme depósitos en las superficies intercambiadoras de calor.
2. Que no sea corrosiva
3. Que no contenga nutrientes en cantidades tales que produzcan crecimientos bacterianos en el sistema.
4. Que minimice la formación de espumas.
5. Que no deteriore la madera que integra las torres de enfriamiento.

De acuerdo a lo precedente, en la siguiente tabla se muestran los criterios de calidad para este tipo de uso.

Tabla A-5.5. Criterios de Calidad del Agua para Uso Industrial. Enfriamiento con Recirculación

Parámetro	Criterio de Calidad
Alcalinidad	350
Aluminio	0.10
Bicarbonatos	24
Calcio	50
DQO	75
Cloruros	500
Dureza	650
Fierro	0.50
Manganeso	0.50
Fierro + Manganeso	0.50
Magnesio	(1)
Grasas y Aceites	No flotante
Oxígeno Disuelto	Aeróbico
pH	5.0-8.3
SAAM	1
Sílice	50
Sólidos Suspendidos	100
Sólidos Disueltos	800
Sulfatos	280
Temperatura	(1)
Zinc	(1)

(1) Aceptable como se reciba

Unidades en mg/l salvo que se indique lo contrario

Generación de Calor. En plantas generadoras de energía eléctrica que emplean combustibles fósiles, se emplea agua de sustitución para la alimentación de calderas con objeto de remplazar diferentes pérdidas que ocurren en el ciclo de vapor, derivadas de:

1. Purga de la caldera.
2. Utilización del vapor para limpieza de algunos elementos de la caldera.
3. Fugas en el sistema.
4. Utilización del vapor para otros fines.

Por lo general puede decirse que el agua para alimentación de todo tipo de calderas, debe estar libre de material suspendido y con bajo contenido de oxígeno disuelto. Asimismo, los requerimientos de calidad del agua se vuelven más estrictos en cuanto más alta sea la formación de depósitos y fallas en los componentes de las mismas. Entre los parámetros de calidad del agua para este tipo de uso, los que se consideran más importantes son: sólidos disueltos y suspendidos, dureza, fierro, cobre, sílice y aceites.

Tabla A-5.6. Criterios de Calidad del Agua para Uso Industrial. Alimentación a Calderas

Parámetro	Presión de Operación de la Caldera (psia)			
	0-150	150-700	700-1500	1500-5000
Alcalinidad	350	100	40	1
Aluminio	5.00	0.10	0.01	0.01
Bicarbonatos	170	120	48	0.50
Calcio	(1)	0.40	0.01	0.01
DQO	5	5	1	1
Cloruros	(1)	(1)	(1)	(1)
Cobre	0.50	0.05	0.05	0.01
Dureza	350	1	0.07	0.07
Fierro	1	0.30	0.05	0.01
Manganeso	0.30	0.10	0.01	0.01
Magnesio	(1)	0.25	0.01	0.01
Nitrógeno	0.10	0.10	0.10	0.07
Oxígeno Disuelto	2.50	0.007	0.007	0.007
pH	7.0-10.0	8.2-10.0	8.2-9.0	8.8-9.4
SAAM	1	1	0.50	0.10
Sílice	30	10	0.70	0.01

(Continuación)

Parámetro	Presión de Operación de la Caldera (psia)			
	0-150	150-700	700-1500	1500-5000
Sólidos Suspendidos	10	5	0.50	0.05
Sólidos Disueltos	700	500	200	0.50
Sulfatos	(1)	(1)	(1)	(2)
Temperatura	(1)	(1)	(1)	(1)
Zinc	(1)	0.01	0.01	0.01

(1) Aceptable como se recibe

(2) Controlada por el tratamiento de otros parámetros

Unidades en mg/l salvo que se indique lo contrario

Procesos Industriales

Industria Alimenticia. Dentro de esta categoría, existen una gran cantidad de productos que demandan grandes volúmenes de agua. Estas se encuentran: industria del azúcar, frutas y legumbres, enlatados y congelados, productos lácteos, empacadores de carne y procesamiento de aves; aunque no toda el agua tiene uso consuntivo o es incorporada en el producto final, en la mayoría de los casos, el agua se utiliza para lavado, blanqueado, pasteurización, limpieza de equipo, enfriamiento del producto final y para el transporte del producto dentro de la planta de procesamiento.

Los procedimientos de limpieza, aunque pueden ser variables, tienen como objetivo el librar a los productos crudos de tierra adherida, jugos secos, insectos y residuos químicos. Usualmente, se llevan a cabo mediante el empleo de aspersores de alta presión.

El agua en este tipo de proceso debe estar libre de cualquier materia que pudiera degradar la calidad o integridad del producto alimenticio; por lo que la calidad del agua empleada debe ser potable, salvo en aquellos casos en donde el agua no entra en contacto con el producto como es el caso de operaciones de enfriamiento. En algunos casos es inclusive necesaria agua de mejor calidad que la potable.

La cantidad de bacterias presentes en operaciones de procesamiento de alimentos es particularmente importante y limita la cantidad de agua recirculada que puede usarse en la planta, debido a que los conteos microbianos aumentan con cada uso del agua. Asimismo, la concentración de ciertos parámetros químicos debe ser particularmente baja cuando la

presencia causa sabor, olor, coloración, depósitos o deterioro de calidad o cantidad de vitaminas de los productos alimenticios.

Tabla A-5.7. Criterios de Calidad del Agua para Uso Industrial. Alimentos y Similares

Parámetro	Criterio de Calidad
Acidez	0
Alcalinidad	200
Arsénico	0.05
Bario	1.00
Cadmio	0.01
Coliformes Totales (NMP/100 ml)	2.20
Calcio	100
DQO	(1)
Cloruros	200
Cromo	0.05
Cobre	1.00
Color (unidades)	5
Cianuro	0.01
Dureza	200
Flúor	1.00
Fierro	0.20
Manganeso	0.10
Magnesio	50
Nitritos	10
Nitratos	0
Olor	0.00
pH	7.0-8.5
Fenoles	0.001
Selenio	0.01
Sílice	50
Planta	0.05
Sólidos Suspendidos	10
Sólidos Disueltos	500
Sulfatos	250
Sabor	0
Turbiedad	5
Zinc	5

(1) Aceptable como se reciba.

Unidades en mg/l salvo que se indique lo contrario.

Industria de Celulosa y Papel. La producción de papel y similares depende de grandes volúmenes de agua. El agua en este tipo de industrias es empleada para el cocimiento y molienda de la madera, con el objetivo de producir pulpa; para lavados sucesivos de la pulpa y para el transporte de la fibra de papel a través de los procesos de blanqueado, refinación y formación de celulosa y papel terminado. Asimismo, en este tipo de industrias, el agua se utiliza para la alimentación de calderas y para el enfriamiento, usos ya discutidos anteriormente.

Entre los parámetros de mayor relevancia a considerar para el empleo de agua renovada en este tipo de industrias, se encuentran, fundamentalmente: dureza, alcalinidad, turbiedad, color y fierro; aunque otros contaminantes como: sólidos suspendidos, manganeso, algas y bacterias pueden ser de importancia en ciertos casos.

La dureza en extremo interfiere con las operaciones de lavado, problemas en la formación de resinas y en los procesos de digestión, provocando además, precipitados de carbonato de calcio. El control de pH y gases disueltos es necesario para evitar problemas de corrosión en los equipos. El color puede producir efectos adversos en la brillantes del papel y es particularmente dañino cuando se produce papel blanco o teñido de alta calidad. Por otra parte, los sólidos suspendidos y la turbiedad afectan directamente el brillo y color del producto, interfieren con su textura y uniformidad, y propician el crecimiento de lana, la que provoca problemas de operación de la maquinaria empleada.

Los criterios de calidad presentados en la tabla siguiente son los aceptados por la mayoría de las plantas productoras de celulosa y papel en los Estados Unidos, y corresponden al rango de calidad necesarios para la producción de papel mediante los procesos de soda y sulfitos.

Tabla A-5.8. Criterios de Calidad del Agua para Uso Industrial. En productos de Papel y Similares

Parámetro	Criterio de Calidad
Alcalinidad	75
Dureza de Calcio	50
Dureza de Magnesio	5
Dureza total	100
Cloruros	75
CO ₂ libre	10

(Continuación)

Parámetro	Criterio de Calidad
Cloro Residual	2
Fierro	0.10
Manganeso	0.05
Sílice	20
Sólidos Disueltos	250
Turbiedad	25

Unidades en mg/l salvo que se indique lo contrario.

Industria Química. La industria química es el segundo mayor usuario de agua para fines industriales, empleando aproximadamente 60-70% en enfriamiento y el resto para fines productivos.

En el aspecto productivo, el agua se utiliza para separar productos químicos, como medio para reacciones químicas, como medio de transporte, para lavado y enjuague y como parte del producto final. Aunque a la fecha, en algunos casos, no se ha establecido una calidad mínima aceptable para el agua empleada en esta industria, ésto se ha debido principalmente a que ha existido disponibilidad de agua suficiente de buena calidad para la misma, pero no significa que esta buena calidad es la mínima que pudiera usarse en muchos casos.

En general, en la industria química la necesidad de usar agua de muy buena calidad es limitada, ya que sólo se demanda en aquellos casos en los que el uso del agua de menor calidad pudiera producir reacciones químicas desfavorables o cuando las características del producto final pudieran ser seriamente afectadas.

Debido a la creciente y cada vez más grande cantidad de productos químicos y procesos que componen a la industria química, los criterios de calidad que aquí se proponen son de tipo general, aunque de importancia en un programa de reúso que suministre agua de cierta calidad mínima a un grupo de industrias, de las cuales algunas requerirán proporcionarle tratamiento adicional dentro de sus plantas, por lo tanto, no se pretende recomendar valores de calidad para casos específicos.

Conforme a lo anterior, algunos parámetros coinciden con la mayoría de los requerimientos de calidad de la industria química, como es el caso de baja turbiedad, pues es

el parámetro de control más demandado por la mayoría de los procesos. Otros parámetros que se incluyen son: sólidos disueltos totales, dureza, alcalinidad, fierro y manganeso.

Tabla A-5.9. Criterios de Calidad del agua para Uso Industrial en Productos Químicos y Similares

Parámetro	Criterio de Calidad ⁽¹⁾
Alcalinidad	500
Bario	1
Bicarbonatos	600
Calcio	250
DBO	(2)
DQO	(2)
Cloruros	500
Color (unidades)	500
Dureza	1000
Fierro	10
Manganeso	2
Magnesio	100
Amoníaco	1
Olor	1
pH	5.9-9.0
Oxígeno Disuelto	1
Silice	(2)
Sólidos Suspendidos	10000
Sólidos Disueltos	25000
Sulfatos	850
Temperatura	(2)

(1) Excepto para rayón y plásticos

(2) Aceptable como se reciba

Unidades en mg/l salvo que se indique lo contrario.

Industria del Petróleo. El proceso de refinación, dentro de la industria del petróleo e industrias conexas es el que tiene el principal uso del agua, aunque más del 70% del agua que se utiliza para el refinamiento y del orden del 20% para procesos, otros usos del agua en esta industria son insignificantes en comparación con la refinación.

Tabla A-5.10. Criterios de Calidad del Agua para Uso Industrial. Productos del Petróleo

Parámetro	Criterio de Calidad
Alcalinidad	300
Bicarbonatos	480
Calcio	100
DQO	1000
Cloruros	300
Dureza	900
Fierro	0.30
Fierro + Manganeso	0.30
Magnesio	80
Amoniaco	10
Nitritos	8
Oxígeno Disuelto	0.01
pH	6.0-9.0
Sílice	20
Sólidos Suspendidos	30
Sólidos Disueltos	1000
Sulfatos	300
H ₂ S	0.50

Unidades en mg/l salvo que se indique lo contrario.

Industria Metal-Mecánica. La industria de los metales primarios incluye todos aquellos establecimientos dedicados a fundición y refinación de metales ferrosos y no ferrosos a partir del mineral, lingotes o chatarra; así como al vaciado y forjado y otros productos misceláneos de dichos metales. Dentro de los metales ferrosos, la producción de fierro y acero demanda la mayor cantidad del agua utilizada por este tipo de industria. Entre los metales no ferrosos que destacan por su importancia son: aluminio, cobre, zinc y plomo.

La calidad del agua requerida por este tipo de industria no es muy restrictiva. Los parámetros de calidad que se consideran importantes en esta industria son: sólidos sedimentables, suspendidos y disueltos; acidez y alcalinidad; dureza; pH; cloruros; oxígeno disuelto; temperatura; grasas y aceites; y materia flotante.

La producción de cobre, níquel, zinc y plomo demandan una mayor calidad. En estos casos el agua debe de estar baja en sólidos disueltos totales, calcio y cloruros.

Tabla A-5.11. Criterios de Calidad del Agua para Uso Industrial Metal-Mecánico

Parámetro	Criterio de Calidad
Alcalinidad	(2)
Dureza Total	100
Cloruros	100
Coliformes Totales (NMP/100 ml)	200
DBO	50
Fosfatos	15
Grasas y Aceites	1
Metales Pesados	Trazas
Orgánicos	Tan bajo como sea posible
Oxígeno Disuelto	Aeróbico
pH	6.0-9.0
Sodio	75
Sólidos Sedimentables (ml/l)	5
Sólidos Suspendidos	30
Sólidos Disueltos	(1)
Temperatura (°C)	25

(1) Aceptable como se Reciba

(2) Se controla mediante el tratamiento para otros
Unidades en mg/l salvo que se indique lo contrario.

Servicios Industriales. El agua renovada en servicios dentro de la industria, deberá cumplir con los mismos criterios de calidad que el agua para uso municipal, ya que dentro de esta categoría aquella se considera igual que el agua municipal. Si los servicios requieren de agua potable, el agua renovada deberá cumplir con los criterios de calidad para esta última. Por lo anterior, los criterios de calidad del agua para este tipo de uso se muestran posteriormente.

Reúso Recreativo

Uso recreativo con Contacto Directo. El agua para ser aceptable para este tipo de uso, tanto por el público como por el organismo regulador, deberá cumplir con las siguientes condiciones:

1. Deberá ser estéticamente agradable.
2. No deberá contener sustancias que pueden ser tóxicas mediante ingestión o producir irritación en la piel o los ojos de los seres humanos.

3. Deberá considerarse razonablemente libre de organismos.

Por lo anterior, existen varios parámetros de calidad que se han tomado en cuenta en la propuesta de criterios de calidad para este tipo de uso. Entre ellos sobresalen el número de coliformes y el pH.

Con respecto al contenido de coliformes, se han realizado un gran número de estudios que han mostrado un incremento estadísticamente significativo de enfermedades en nadadores que han utilizado aguas con concentraciones de coliformes mayores a 2,300 NMP/100 ml, aunque también se han presentado casos de enfermedades a concentraciones menores.

Con respecto al pH, la condición ideal del agua sería que éste fuera de 7.4 unidades, el cual corresponde al fluido lacrimal del ojo, sin embargo, por razones prácticas se ha recomendado un ámbito de 6.5-8.3 y 6.0-9.0, para aguas de baja y alta capacidad amortiguadora, respectivamente.

Otros parámetros de interés son la temperatura, la composición química y la claridad del agua. Con respecto a la temperatura, este parámetro es de gran importancia, ya que los valores fuera del ámbito de 15 a 35°C pueden producir graves problemas de tensión, inconsciencia e inclusive muerte de los nadadores.

Tabla A-5.12. Esperanza de Vida en el Agua

(Duración esperada en horas para adultos portando chalecos salvavidas e inmersos en agua a diferentes temperaturas)

Duración (horas)	Temperatura (°C)								
	0	5	10	15	20	25	30	35	40
0.5	M	M	S	S	S	S	S	S	M
1.0	L	M	M	S	S	S	S	S	L
2.0	L	L	M	M	S	S	S	S	L
3.0	L	L	L	M	S	S	S	S	L
4.0	L	L	L	L	M	S	S	S	L

L Letal, 100% de esperanza de muerte

M Marginal, 50% de esperanza de pérdida de conciencia y muerte por ahogo

S Segura, 100% de supervivencia

Las características químicas del agua para este tipo de uso deberán ser tales que ésta no sea tóxica y no produzca irritación de la piel, oídos o membranas mucosas del individuo. También, ya que se reconoce el hecho de que se ingiere pequeñas cantidades de agua cuando se práctica la natación, el agua no deberá contener compuestos tóxicos al ingerirse.

Por lo que respecta a la claridad del agua, es necesario que ésta permita distinguir profundidades y objetos en el fondo, además, que desde el punto de vista estético, entre más clara sea el agua más atractiva será para los usuarios. Por ello, la turbiedad del agua es un parámetro de control necesario en este tipo de uso, al igual que los nutrientes que podrían causar crecimiento de malezas acuáticas e interferir con la claridad del agua, especialmente fósforo y en algunos casos nitrógeno.

El olor y los sólidos sedimentables son otras consideraciones estéticas generales que pudieran formar depósitos en el fondo del cuerpo de agua empleado para este fin. Con respecto al olor, este puede ser minimizado al producir un efluente bien oxidado que contenga suficiente oxígeno disuelto para que se mantengan condiciones aeróbicas; tal es el caso de un efluente con una concentración de DBO menor de 20 mg/l. En el caso de los sólidos suspendidos, se puede considerar que éstos no afectan al tener un efluente que no exceda de 20 mg/l de sólidos suspendidos.

Tabla A-5.13. Criterios de Calidad del Agua para uso Recreativo con Contacto Directo

Parámetro	Criterio de Calidad
Crecimiento Acuático	Virtualmente libre
Coliformes Fecales (NMP/100 ml)	200
DQO	30
Color	Virtualmente libre
Materia Flotante	Virtualmente libre
Olor	Virtualmente libre
Grasas y Aceites	Virtualmente libre
Nitrógeno Total	10
pH	6.5-8.3
Fosfatos	0.20
Sólidos Sedimentables (ml/l)	Virtualmente libre
Sólidos Suspendidos	5
Temperatura (°C)	15-35

Unidades en mg/l salvo que se indique lo contrario.

Uso Recreativo sin Contacto Directo Prolongado. La diferencia entre este uso con el de contacto directo es exclusivamente el tiempo de contacto del individuo con el agua renovada. En este caso, no se espera que el individuo se sumerja en el agua más que por razones causísticas. Este tipo de uso incluye remo, pesca y contacto ocasional derivado de las primeras actividades.

En términos generales, las condiciones de calidad con, en el caso sin contacto directo prolongado, mucho menos restrictivas que en el caso de contacto directo; basando los criterios de calidad en que de las tres condiciones que deben cumplirse para la recreación con inmersión del individuo, en el caso de contacto secundario, solo la primera debe cumplirse, o sea la relativa a aspectos estéticos.

Considerando lo precedente, los factores que afectan la calidad estética del agua son: materia flotante; sólidos suspendidos y sedimentables; depósitos de lodos; formación de lama; crecimientos excesivos de maleza acuáticas; color, olor, sabor y turbiedad desagradables; grasas, aceites y natas visibles; agentes productores de espumas; excesiva acidez o alcalinidad que pudieran producir corrosión de botes y muelles. Asimismo, el contenido de bacterias es menos restrictivo, al permitirse valores hasta de 5,000 NMP/100 ml de coliformes totales.

Tabla A-5.14. Criterios de Calidad del Agua para uso Recreativo con Sin Contacto Directo

Parámetro	Criterio de Calidad
Crecimiento Acuático	Virtualmente libre
Coliformes Fecales (NMP/100 ml)	5000
DQO	60
Materia Flotante	Virtualmente libre
Olor	Virtualmente libre
Grasas y Aceites	Virtualmente libre
pH	6.5-8.3
Sólidos Sedimentables (ml/l)	Virtualmente libre

Unidades en mg/l salvo que se indique lo contrario.

Reúso Municipal

Riego de Áreas Verdes, Limpieza de Calles e Hidrantes. Entre los usos municipales no potables se encuentran el lavado de calles, lavado de coches y el riego de áreas verdes urbanas (parques y camellones). Aunque los céspedes y arbustos, son por lo general más resistentes a muchos contaminantes que los cultivos agrícolas, algunos parámetros de calidad del agua para el riego urbano son más restrictivos que para el uso agrícola. Esto se debe, principalmente, a consideraciones de peligro potencial a la salud pública, por la presencia de virus y bacterias en los aerosoles que se producen al emplear sistemas de aspersión para el riego urbano. También, parámetros como sólidos suspendidos, grasas y aceites se consideran restrictivos en este tipo de uso, ya que es importante prevenir bloqueo en los sistemas de riego.

Tabla A-5.15. Criterios de Calidad para Agua de uso Municipal

Parámetro	Criterio de Calidad
Aluminio	5
Arsénico	0.10
Coliformes Fecales (NMP/100 ml)	2.2
DBO	20
Sólidos Suspendidos Totales	15
Berilio	0.10
Boro	1
Cadmio	0.01
Cloruros	100
Cromo	0.10
Cobalto	0.05
Cobre	0.20
Fluoruros	2
Fierro	5
Plomo	5
Litio	2.5
Manganeso	0.20
Molibdeno	0.01
Níquel	0.20
pH	6.0-9.0
Fenoles	50
Grasas y Aceites	Libre de ellas

Parámetro	Criterio de Calidad
Selenio	0.02
RAS	<18
Sólidos Disueltos	<1200
Sulfatos	200-400
Vanadio	0.10
Zinc	2.00

Unidades en mg/l salvo que se indique lo contrario.