

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ciencias y Humanidades

Manual de operación para una planta de tratamiento de
aguas residuales en una fábrica de productos químicos
auxiliares para la industria textil

Trabajo de investigación presentado para optar al grado
académico de Licenciado en Ingeniería Química por
José Antonio Luarca Celis

BIBLIOTECA
DE LA
UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Guatemala
2004

Manual de operación para una planta de tratamiento de
aguas residuales en una fábrica de productos químicos
auxiliares para la industria textil

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ciencias y Humanidades

Manual de operación para una planta de tratamiento de
aguas residuales en una fábrica de productos químicos
auxiliares para la industria textil

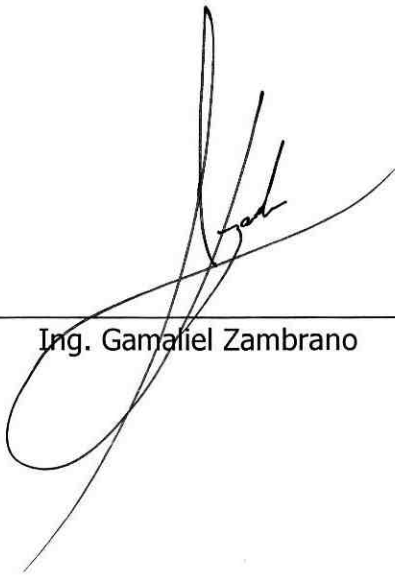
Trabajo de investigación presentado para optar al grado
académico de Licenciado en Ingeniería Química por
José Antonio Luarca Celis

BIBLIOTECA
DE LA
UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Guatemala
2004

Vo.Bo. :

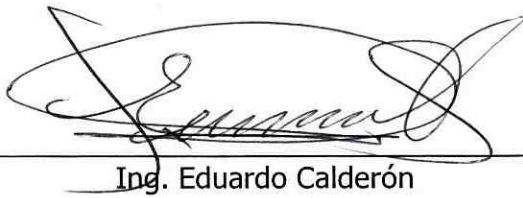
(f)



Ing. Gamaliel Zambrano

Tribunal:

(f)



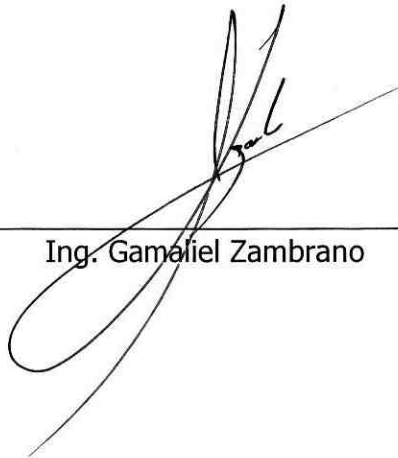
Ing. Eduardo Calderón

(f)



Ing. Julio Carrillo

(f)



Ing. Gamaliel Zambrano

ÍNDICE

	Página
LISTA DE TABLAS	vii
LISTA DE FIGURAS	ix
RESUMEN	x
Capítulos	
I. INTRODUCCIÓN	1
II. ANTECEDENTES	2
A. Aguas residuales	2
B. Impacto ambiental	3
C. Constituyentes de las aguas residuales	5
D. Contaminación de los cuerpos receptores	10
E. Tratamiento de aguas residuales	11
F. Tratamiento de efluentes para aguas residuales industriales	13
G. Procesos de tratamiento físico y químico	16
H. Procesos de tratamiento biológico	23
I. Manejo y disposición de residuos	25
III. JUSTIFICACIÓN	29
IV. OBJETIVOS	30
V. PROBLEMA	31
VI. METODOLOGÍA	32
A. Evaluación inicial	32

B.	Desarrollo de nuevos procedimientos	32
C.	Recapitulación y documentación	33
VII.	RESULTADOS	34
	Manual de operación y mantenimiento para la planta de tratamiento de aguas residuales	35
A.	Diagramas y procedimiento	37
B.	Guía para el mantenimiento del equipo en la planta de tratamiento de aguas	47
C.	Métodos de análisis para el control interno	49
VIII.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	57
A.	Evaluación inicial	57
B.	Desarrollo de nuevos procedimientos	65
IX.	CONCLUSIONES	68
X.	RECOMENDACIONES	70
XI.	BIBLIOGRAFÍA	71
XII.	APÉNDICES	72
A.	Datos originales y calculados	72
B.	Certificados de análisis	80
C.	Figuras de antecedentes	86
D.	Tablas de antecedentes	90

LISTA DE TABLAS

Tabla		Página
7.1	Descripción del equipo	39
7.2	Descripción de las válvulas	40
7.3	Descripción del procedimiento de operación de la planta de tratamiento de aguas	41
7.4	Descripción del procedimiento de preparación y limpieza de la planta de tratamiento de aguas	44
7.5	Estado de la planta de tratamiento de aguas residuales al inicio y al final de esta evaluación	53
7.6	Cumplimiento de límites permisibles según propuesta de ley de CONAMA sobre el Reglamento de Aguas Residuales de 1999	53
7.7	Rendimiento del filtro prensa	54
7.8	Rendimiento del tanque de tratamiento biológico	54
7.9	Rendimiento del filtro de carbón activado	54
7.10	Disposición de residuos	54
7.11	Ahorro en químicos debido a cambios en tratamiento primario	55
12.1	Determinación del flujo de entrada a la planta	72
12.2	Muestreo inicial del agua de entrada y salida de la planta	73
12.3	Flujo volumétrico a la salida del filtro prensa	74
12.4	Resultados primera evaluación de filtro prensa	74
12.5	Resultados segunda evaluación de filtro prensa	74
12.6	Segundo filtrado luego de tratamiento biológico	74
12.7	Flujo volumétrico de la recirculación de lodos activados en el tanque biológico	75

Tabla	Página
12.8 Oxígeno disuelto en tanque de tratamiento biológico	75
12.9 Remoción de DBO ₅ en el tanque de tratamiento biológico	75
12.10 Remoción de DQO en filtro de carbón activado	75
12.11 Parámetros de descarga después de cambios efectuados en la planta	76
12.12 Químicos evaluados para el tratamiento primario	77
12.13 Selección de la mejor combinación de coagulante y floculante basándose en prueba y error	78
12.14 Selección de dosis adecuada para coagulante y floculante seleccionados	79
12.16 Coeficientes de remoción de DBO	90
12.17 Composición típica del agua residual doméstica	90
12.18 Requerimientos de calidad de agua en distintos países	91
12.19 Concentraciones umbrales que inhiben los proceso de tratamiento biológico	91
12.20 Resumen de los procesos unitarios de tratamiento de aguas residuales..	92
12.21 Tipos principales de lagunas de estabilización	93
12.22 Resumen de tecnologías de neutralización	94
12.23 Residuos generados por diversos procesos de tratamiento de aguas	95
12.24 Efectos del pretratamiento y tratamiento de lodos sobre los lodos y las opciones de uso y disposición	96
12.25 Límites de contaminación para la aplicación de lodos en el suelo	97
12.26 Parámetros y límites requeridos para descargas a cuerpos receptores de agua de una industria de fabricación de productos de limpieza y auxiliares químicos, según propuesta de ley para Guatemala de 1999...	97

LISTA DE FIGURAS

Tabla		Página
7.1	Diagrama de flujo del proceso	37
7.2	Diagrama de flujo del filtro de carbón activado	38
7.3	Diagrama de flujo de las actividades del nuevo procedimiento de operación de la planta de tratamiento de aguas residuales	42
7.4	Diagrama de flujo de las actividades del nuevo procedimiento de preparación y limpieza de la planta de tratamiento de aguas residuales.	45
7.5	Diagrama de operaciones	46
7.6	Remoción de los parámetros de descarga al inicio y al final	56
12.1	Clasificación de los sólidos totales	86
12.2	Proceso de biodegradación de la materia orgánica	86
12.3	Variación de la DBO en función del tiempo	86
12.4	Componentes del sistema de tratamiento y disposición de aguas residuales	87
12.5	Planta de tratamiento de aguas residuales. Sistema convencional	88
12.6	Diseño de algunos sistemas de separación por gravedad	88
12.7	Sistema convencional de lodos activados de mezcla completa	88
12.8	Diagrama para el manejo de sólidos con los métodos de tratamiento y disposición usados con mayor frecuencia	89

RESUMEN

El presente trabajo consta de la evaluación de las condiciones iniciales de una planta de tratamiento de aguas residuales en una fábrica de químicos auxiliares para la industria textil, con el fin de corregir su forma de operar y crear nuevos procedimientos de modo que su operación y mantenimiento sean sencillos y de beneficio para la empresa. Todo esto quedó documentado en un manual de operación y mantenimiento que queda como referencia para nuevo personal que vaya a tener a su cargo el funcionamiento de la planta, así como para investigadores con proyectos similares. Después de este trabajo, se logró que dicha planta cumpla con los límites permisibles de descarga de aguas industriales, para su tipo de industria, según la última propuesta de ley sobre el tema hecha en Guatemala por CONAMA, en 1999. Las pruebas realizadas permitieron identificar problemas en el funcionamiento original de la planta, y luego corregirlos. Los cambios realizados lograron una mejoría en el rendimiento, en partes del proceso hasta en un 2,905%.

I. INTRODUCCIÓN

La industria textil es una de las industrias de mayor crecimiento en la región centroamericana. Esto ha provocado que con ésta, otras industrias complementarias crezcan también. Una de estas industrias es la de los aprestos, o químicos auxiliares de la industria textil. Y como la mayor parte de las industrias, ésta también genera residuos industriales que deben ser tratados y desechados de manera adecuada.

Por lo general, los residuos industriales contienen trazas o grandes cantidades de materias primas, productos intermedios, productos finales, coproductos, subproductos y residuos de compuestos químicos auxiliares o de procesamiento empleados en un proceso industrial particular. Las sustancias presentes en los residuos industriales en cualquier país incluyen detergentes, solventes, cianuros, metales pesados, ácidos orgánicos, sustancias nitrogenadas, grasas, sales, agentes de decoloración, colorantes, pigmentos, compuestos fenólicos, agentes de curtido, sulfuros y amoníaco. Los riesgos para la salud de estos residuos industriales incluyen la exposición a altas concentraciones de productos químicos que causan intoxicación y quemaduras, o la exposición a dosis menores durante períodos largos, lo que puede inducir a enfermedades crónicas, cáncer, esterilidad y problemas reproductivos (Hamza, 1991).

En Centroamérica, algunos de los países de la región, como Costa Rica, ya cuentan con leyes ambientales que regulan las descargas de aguas residuales al ambiente, por parte de las industrias. En Guatemala, sólo existen propuestas de ley que aún no han sido aprobadas, y que ya llevan algún tiempo tratando de que esto suceda. La más reciente es una de 1999 hecha por CONAMA, la cual fue tomada como referencia para este trabajo. De cualquier manera, ya sea por legislación local, políticas de la misma empresa, requerimientos de los clientes o de otros países a donde desean exportar, el minimizar el impacto que los residuos industriales tienen en el ambiente es una necesidad que las industrias centroamericanas deben cumplir. Para el tratamiento de las aguas residuales, una planta que ayude a separar los contaminantes de éstas se vuelve una necesidad en toda industria.

Este trabajo consiste en la elaboración del manual de operación y mantenimiento de una planta de tratamiento de aguas residuales. Éste contiene sugerencias de procedimientos a seguir para mejorar la operación y mantenimiento de dicha planta de tratamiento, y también servirá como posterior referencia para proyectos similares. Para elaborar el manual se evaluará la forma en que opera actualmente la planta de tratamiento de aguas residuales ya instalada en una fábrica de químicos auxiliares para la industria textil, la cual descarga posteriormente en un río que atraviesa una parte del terreno de la empresa. Dicho manual tiene como objetivo determinar el procedimiento adecuado de operación, medidas de seguridad para los operarios, rutinas de mantenimiento preventivo, el uso adecuado de químicos auxiliares en el proceso, la disposición de los desechos generados y el cumplimiento de los parámetros de descarga.

II. ANTECEDENTES

A. Aguas residuales

Se entiende por aguas residuales aquellas que han sido utilizadas con un fin consuntivo, incorporando a ellas sustancias que deterioran su calidad original (contaminación), disminuyendo su potencialidad de uso (AQC, 1992).

Existe una relación entre agua contaminada y enfermedades infecciosas o no infecciosas. Esta relación fue establecida por primera vez a partir de la epidemia de cólera de 1854 en Londres, Inglaterra. Antes de esa fecha ya existía la percepción de la relación entre calidad del agua y salud y con posterioridad a ella se ha demostrado en innumerables casos, la relación entre contaminación del agua y efectos producidos (AQC, 1992).

La protección de la salud pública, propósito original del control de la contaminación de aguas, continúa siendo el objetivo primario en muchos países; sin embargo, en la actualidad, la preservación de los recursos hídricos tiene otros fines: protección de áreas de pesca, manutención de áreas recreacionales entre otros, son preocupaciones adicionales. La globalización, también obliga a cumplir con requerimientos impuestos en otros países, por ejemplo, actualmente está en trámite en Estados Unidos una legislación que prohibirá importar en ese país productos regados con aguas servidas (AQC, 1992). Y debido a acuerdos internacionales como el Tratado de Libre Comercio (TLC), los países tercermundistas como Guatemala, se ven ahora obligados a controlar la contaminación de aguas.

La contaminación de aguas es un término que está relacionado con el uso específico del agua y su origen puede ser desde totalmente natural (aguas con contenido de arsénico proveniente del suelo) o producto de descarga de sistemas de alcantarillado doméstico o industrial. Hay muchas otras fuentes de contaminación de las aguas, tales como la contaminación del aire (lluvia ácida), determinadas prácticas agrícolas, aguas lluvia urbana, percolación de agua desde depósitos de residuos sólidos domésticos, industriales o mineros, etc (AQC, 1992).

Las aguas residuales más comunes corresponden a:

1. **Aguas residuales domésticas (aguas servidas):** Son las aguas de origen principalmente residencial (desechos humanos, baños, cocina) y otros usos similares que en general son recolectadas por sistemas de alcantarillado en conjunto con otras actividades (comercial, servicios, industria). Esta agua tienen un contenido de sólidos inferior al 1%. Si bien su caudal y composición son variables, pueden tipificarse ciertos rangos para sus parámetros más característicos (AQC, 1992).

2. **Aguas residuales industriales (residuos industriales líquidos):** Son aguas provenientes de los procesos industriales y la cantidad y composición de ella es bastante variable, dependiente de la actividad productiva y de muchos otros factores (tecnología empleada, calidad de la materia prima, etc.). Así estas aguas pueden variar desde aquellos con alto contenido de materia orgánica biodegradable (mataderos, industria de alimentos), otras con materia orgánica y compuestos químicos (curtiembre, industria de celulosa) y finalmente industrias cuyas aguas residuales contienen sustancias inorgánicas u orgánicas no degradables (metalúrgicas, textiles, químicas, minería) (AQC, 1992).

3. **Aguas lluvia urbanas:** La escorrentía generada por aguas lluvias es menos contaminada que las aguas residuales domésticas e industriales y su caudal mayor. La contaminación mayor se produce en las primeras aguas que lavan las áreas por donde escurre (AQC, 1992).

B. Impacto ambiental

1. **Contaminación del agua:** Uno de los efectos ambientales más evidentes de las empresas industriales es su contribución a la contaminación del agua. Las empresas que forman parte de la industria contaminan el agua al descargar sus efluentes en arroyos, ríos y sistemas de drenaje público (Hamza, 1991).

Las concentraciones de metales pesados y de otras sustancias tóxicas presentes en los efluentes industriales que se descargan en los cuerpos de agua representan riesgos para la salud humana y organismos acuáticos debido a las siguientes razones (Hamza, 1991):

i. Las sustancias tóxicas pueden tener efectos perjudiciales sobre la salud humana. Por ejemplo, los cianuros impiden las reacciones de oxidación fosforilativa que permiten la respiración celular; el mercurio y sus compuestos, en especial el metilmercurio, se asocian con casos que se caracterizan por el deterioro de la audición, de la vista y de la coordinación muscular y en algunos brotes, por la elevada tasa de mortalidad; y el plomo, considerado un contaminante mundial, puede producir una serie de efectos graves, incluidos los trastornos neurológicos (Hamza, 1991).

ii. La mortandad de peces a menudo se debe a la toxicidad aguda causada por la descarga de lodos o descargas accidentales de materia sumamente tóxica en la masa de agua. La toxicidad crónica causada por constantes descargas de contaminantes tóxicos de bajo nivel altera todo el equilibrio de la población acuática al destruir especies sensibles y promover que las especies menos deseables pero más tolerantes prosperen, disminuye la provisión de alimentos de algas e invertebrados y reduce el potencial reproductivo ya que los huevos y alevinos son más susceptibles que los adultos a las concentraciones subletales de tóxicos (Hamza, 1991).

iii. Muchos materiales orgánicos pueden degradarse biológicamente en los cursos de agua y producen demandas excesivas de oxígeno. El agotamiento completo del oxígeno disuelto en un arroyo contaminado impedirá la supervivencia de la vida acuática; debido a la ausencia del oxígeno disuelto, algunos de los microorganismos emplearían el oxígeno combinado en ciertos materiales como los sulfatos, creando de esta manera, pestilencia y molestia (Hamza, 1991).

iv. La materia colorante puede reducir sustancialmente la penetración de la luz y en consecuencia, afectar la producción de oxígeno fotosintético; la elevada turbiedad y las cargas bacterianas representan otros problemas estéticos que también afectan sustancialmente la calidad del agua (Hamza, 1991).

Las pequeñas empresas industriales también generan residuos sólidos y lodos que con frecuencia se eliminan indebidamente en terrenos públicos o rellenos no revestidos. Con el tiempo, los elementos tóxicos de estos residuos sólidos pueden lixiviar, lo que ocasionaría la contaminación de las aguas subterráneas. El agua subterránea es aquella que fluye naturalmente y se almacena en el suelo y cuerpos rocosos que se encuentran debajo de la tierra. Es la fuente principal de agua potable y del agua empleada en la industria. La contaminación de aguas subterráneas puede ocurrir cuando los líquidos (generalmente aguas pluviales) fluyen a través de vertederos de residuos hasta llegar a las aguas subterráneas, portando los contaminantes con ellos. Una vez contaminadas, las aguas subterráneas son costosas y difíciles y a veces hasta imposibles de limpiar. Por lo general, la escala de tiempo real del movimiento de los contaminantes fuera de un lugar de residuos es muy larga. Un contaminante puede demorar décadas para migrar de un vertedero hacia un pozo de agua potable cercano. Sin embargo, una vez que el producto químico aparece en el agua del pozo, puede permanecer allí en cantidades elevadas durante muchos años, aun si se toma una acción correctiva en el lugar de la disposición. Además, la llegada de un contaminante al agua bien puede significar la llegada de docenas de otros contaminantes en el curso de muchos años (Hamza, 1991).

2. Contaminación del suelo: La contaminación del suelo puede ocurrir por los siguientes motivos (Hamza, 1991):

- i. La disposición incontrolada de residuos industriales sólidos y peligrosos como lodos con contenido de metales, concentraciones de ácidos y álcalis agotados, residuos orgánicos y aceites residuales.
- ii. La quema incontrolada de residuos sólidos en los terrenos deja residuos de ceniza, goma quemada, productos tóxicos y otros detritos quemados.
- iii. El almacenamiento, temporal o permanente, de productos químicos desechados, residuos de la producción, desechos tóxicos, materia putrescible y material industrial desechado.
- iv. Las emisiones de chimeneas industriales que transfieren sustancias tóxicas de la atmósfera a la tierra .
- v. Efluentes industriales que fluyen de manera incontrolada sobre el terreno, incluyendo las causas accidentales.

Los residuos industriales depositados en el terreno pueden ser mezclas complejas de productos químicos peligrosos, tanto orgánicos como inorgánicos, combinados con otros residuos no peligrosos. Estos residuos pueden presentarse en forma de sólidos, lodos o líquidos o mezclas de los tres. Las prácticas incontroladas de disposición de residuos tienen diversos efectos sobre la salud y la seguridad, incluida la reproducción de vectores de enfermedades en lugares donde se descompone la sustancia orgánica. La descarga directa o el lixiviado de vertederos también produce contaminación de cultivos, de peces y del agua potable; y el almacenamiento indebido de residuos peligrosos puede ocasionar incendios y explosiones. También se producen efectos estéticos, incluida una vista desagradable debido a la acumulación de residuos cerca a áreas industriales y residenciales y a la emisión de olores desagradables producto de la quema o descomposición de la sustancia orgánica (Hamza, 1991).

C. Constituyentes de las aguas residuales

Un agua residual puede caracterizarse por medio de sus constituyentes más comunes, los que dependerán del origen de esas aguas. En general, el tipo de sólidos presentes en las aguas residuales es diferente del observado en aguas naturales. En los casos en que la composición de los sólidos es similar, la concentración es bastante superior en las aguas residuales que en aquellas de sistemas naturales (AQC, 1992).

A continuación se incluye algunos de los constituyentes más comunes de las aguas residuales expresados en la forma que se determinan por medio de ensayos de laboratorio estandarizados (AQC, 1992).

1. **Partículas sólidas:** Los sólidos totales (ST) presentes en el agua se clasificaron según su tamaño en suspendidos coloidales y disueltos. Por otra parte, estos sólidos pueden ser clasificados por su composición en orgánicos e inorgánicos (AQC, 1992).

En un agua residual, los ST (orgánicos e inorgánicos) son, por definición, los residuos después que la porción líquida se ha evaporado y el resto se ha secado a 103°C (AQC, 1992).

Los sólidos suspendidos totales (SST) pueden ser obtenidos como la diferencia en peso entre muestras de agua filtrada (en papel filtro normalizado) y no filtrada (AQC, 1992).

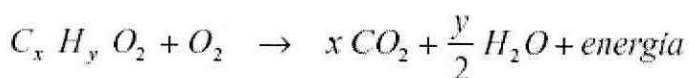
Para diferenciar su composición, los sólidos previamente secados a 103°C son calcinados a 550°C durante 15 minutos. Las cenizas resultantes corresponden a los sólidos inorgánicos (fijos) y la fracción perdida, que se gasifica y vaporiza, son los sólidos orgánicos (volátiles) (AQC, 1992).

2. **Materia orgánica:** El constituyente más importante de las aguas residuales es la materia orgánica, que está compuesta en un 90% por carbohidratos, proteínas y lípidos provenientes de excrementos y orina de seres humanos, restos de alimentos y detergentes. Estos contaminantes son biodegradables, es decir, pueden ser transformados en compuestos más simples por la acción de microorganismos naturales presentes en el agua, cuyo desarrollo se ve favorecido por las condiciones de temperatura y nutrientes de las aguas residuales (AQC, 1992).

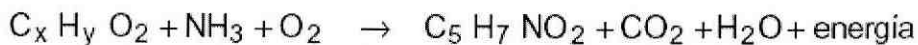
En la Figura No. 13.2 se muestra un esquema del proceso de biodegradación de la materia orgánica en presencia de oxígeno disuelto en las aguas (proceso aeróbico) (AQC, 1992).

A continuación, se presentan las ecuaciones básicas del proceso de descomposición aeróbica (oxidación biológica) de la materia orgánica, según lo indicado en la Figura No. 13.2. Cabe hacer notar que sólo se pretende mostrar esquemáticamente los procesos, por lo que las ecuaciones podrían no estar equilibradas estequiométricamente (AQC, 1992).

- Reacción No. 1: Oxidación de la materia orgánica carbonácea.



- Reacción No. 2: Síntesis de la materia celular.



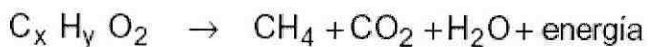
- Reacción No. 3: Oxidación de la materia celular.



donde $C_5 H_7 NO_2$ es una expresión empírica que representa un promedio estadístico de la proporción de los elementos constituyentes de la materia celular (AQC, 1992).

Por otra parte, la descomposición biológica de la materia orgánica en un ambiente sin oxígeno disuelto (proceso anaeróbico) tiene la siguiente reacción esquemática simplificada (AQC, 1992):

- Reacción No. 4:



En los procesos anaeróbicos la tasa de degradación es más lenta que en los aeróbicos. Además, la presencia de iones sulfato en las aguas es reducida por bacterias que liberan anhídrido sulfúrico (H_2S), un gas maloliente. Lo anterior, sumado a la descomposición de otros compuestos produce los olores característicos de la descomposición de la materia orgánica (AQC, 1992).

Para medir la carga orgánica del agua residual se pueden utilizar diversos parámetros. Una forma es partir del Carbono Orgánico Total (COT), que se basa en la medición del CO_2 liberado al oxidar la materia orgánica con un oxidante muy fuerte, comparándolo con un valor estándar conocido (AQC, 1992).

Además, existen métodos que se basan en la determinación de la cantidad de oxígeno requerido para oxidar la materia orgánica a productos estables. Estos métodos se basan en el hecho de que la cantidad de oxígeno utilizado es proporcional a la cantidad de materia orgánica degradada. Estos métodos son (AQC, 1992):

i. Demanda Química de Oxígeno (DQO): Es la cantidad de oxígeno requerida para oxidar químicamente los materiales orgánicos presentes en una muestra de agua. Esta oxidación degrada el material orgánico biodegradable y no biodegradable (AQC, 1992).

ii. Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO): Mide la cantidad de oxígeno requerida por microorganismos aclimatados para degradar la materia orgánica en forma biológica. Es un proceso que indica si la materia es biodegradable. El proceso de biodegradación ocurre en forma espontánea en la naturaleza lo que reviste gran importancia en estudios de calidad de aguas, ya que involucra la degradación natural de la materia orgánica y, a la vez, el consumo del oxígeno presente en los cauces (AQC, 1992).

Para medir la DBO se utiliza una prueba de laboratorio estandarizado que se realiza a 20°C y con un período de 5 días, obteniendo la denominada DBO₅. Debido a que la oxidación de la materia orgánica continúa en forma indefinida, el ensayo para determinar la DBO última ha sido limitado en forma arbitraria a 20 días, donde se supone que aproximadamente el 95% del oxígeno necesario ha sido utilizado. No obstante, debido a lo extenso de éste período, generalmente se utiliza del DBO₅ (AQC, 1992).

La tasa de reacción de la DBO depende del tipo de residuo y de la temperatura. Para el análisis se supone que la estabilización de la materia orgánica se comporta de acuerdo a una reacción de primer orden, y se puede escribir (4):

$$\frac{dL}{dt} = -k_1 \cdot L \quad \text{Ecuación No. 1}$$

donde:

L es la DBO carbonácea, mg/L

t es el tiempo, días

k₁ es la tasa constante o coeficiente de remoción de DBO, 1/día

Al integrar la ecuación anterior con respecto al tiempo, se obtiene:

$$L = L_0 e^{-k_1 t} \quad \text{Ecuación No. 2}$$

donde:

L₀ es la DBO carbonácea última, mg/L

La cantidad de materia orgánica degradada a través del tiempo se expresa como:

$$y = L_0 (1 - e^{-k_1 t}) \quad \text{Ecuación No. 3}$$

La Figura No. 13.3 presenta un gráfico de la DBO carbonácea (L) que aún no ha sido degradada (remanente), en función del tiempo t (AQC, 1992).

En el gráfico de la Figura No. 13.3 se observa que después de los 5 días se produce un incremento de la demanda total de oxígeno debido a que los compuestos de nitrógeno comienzan a ser

oxidados. Este proceso se denomina nitrificación y no es considerado en la expresión estandarizada de la DBO (AQC, 1992).

Valores típicos del coeficiente de remoción de la DBO, k_1 , para la temperatura estándar de 20°C se indican en la Tabla No. 13.16 en la sección de anexos (AQC, 1992).

El coeficiente k_1 , puede ser modificado para otras temperaturas de acuerdo a la relación de van't Hoff-Arrhenius:

$$k_T = k_{20} \cdot \theta^{(T-20)} \quad \text{Ecuación No. 4}$$

donde $\theta = 1,047$ (valor experimental, adimensional) y T temperatura en °C (AQC, 1992).

iii. Microorganismos: Cualquier sistema natural en el que hay suficientes nutrientes y una temperatura apropiada permitirá el desarrollo de microorganismos. Las aguas residuales domésticas proveen un ambiente adecuado para su desarrollo y manutención. Esos microorganismos y los propios del agua residual doméstica (contenidos en los excrementos humanos) son, en su gran mayoría, no patógenos y pueden ser utilizados en procesos biológicos para oxidar la materia orgánica. Sin embargo, el agua residual puede contener microorganismos patógenos (AQC, 1992).

Dado que es difícil y costoso identificar los diferentes microorganismos, se utiliza como indicador de la contaminación microbiológica el grupo denominado coliformes totales y una fracción importante de ellos: los coliformes fecales (contenidos en los excrementos humanos). Ambos tipos de microorganismos son no patógenos, pero sí muy abundantes (AQC, 1992).

Una forma estandarizada para la determinación de estos microorganismos, corresponde a la fermentación en múltiples tubos de ensayo y el resultado se expresa como NMP/100 mL, es decir, número más probable de microorganismos presentes en un volumen de 100 mL de dicha muestra (AQC, 1992).

iv. Otros constituyentes:

- Cloruros y sulfatos (inorgánicos) normalmente presentes en aguas y residuos humanos.
- Nitrógeno y fósforo en varias formas (orgánica e inorgánica) presentes en residuos humanos y detergentes (fósforo).
- Carbonatos y bicarbonatos principalmente como sales de Ca y Mg medidas como alcalinidad, presente en agua natural.

– Sustancias tóxicas (orgánicas e inorgánicas): arsénico, cianuros, pesticidas, metales pesados, Cd, Cr, Hg, Pb y otros. Estas sustancias son de origen industrial (AQC, 1992).

En la Tabla No. 13.17 en la sección de anexos se muestra la composición típica de un agua residual, incluyendo valores de microorganismos (AQC, 1992).

D. Contaminación de los cuerpos receptores

La contaminación de un cuerpo receptor (ríos, lagos, mares, etc.) ocurre cuando la descarga de residuos deteriora la calidad del recurso, medida en términos de algunos de los parámetros señalados anteriormente, afectando alguno de los usos. Los contaminantes que causan problemas son los microorganismos patógenos, la materia orgánica, sólidos suspendidos, nutrientes, sustancias tóxicas, color, espuma, aceites y grasas, temperatura y materiales radiactivos. La calidad del recurso también puede ser alterada por la ejecución de obras efectuadas sobre los cursos de agua: embalses y cambio de las condiciones de escurrimiento (AQC, 1992).

La situación del uso del agua ha cambiado sustancialmente en las últimas décadas respecto al pasado, cuando la demanda era menor y por ende la disponibilidad mayor, y los usos para riego y agua potable constituían prácticamente derechos naturales de aprovechamiento (AQC, 1992).

En la actualidad, el recurso es limitado y por lo tanto escaso, la demanda creciente y se ha incorporado nuevos usos que obligan a la preservación y, más aún, al mejoramiento de su calidad cuando está deteriorada (descontaminación). Asimismo, al ser el agua un recurso con valor económico, sobre el cual se adquieren derechos de uso, el costo de su deterioro o mejoramiento debe necesariamente ser asumido por el causante (principio «quien contamina paga»). La tendencia futura se orienta a reforzar esos principios (AQC, 1992).

La mayoría de los países desarrollados tienen normas de calidad para los efluentes descargados a los cuerpos de agua (Normas de Emisión), para los usos de ella y para los cuerpos de agua receptores (Normas de Calidad primaria y secundaria). En la Tabla No. 13.18 se presenta un resumen de la normativa existente en algunos países (AQC, 1992).

En Guatemala existe una propuesta de ley en cuanto a la regulación de descargas industriales a cuerpos receptores de agua. Esta data de 1999, de la desaparecida CONAMA, durante el gobierno de Álvaro Arzú. A la fecha, va por la revisión número 19 y se ve difícil su aprobación. En la Tabla No. 11 de la sección de anexos se puede ver los parámetros y sus límites requeridos por dicha propuesta para el tipo de industria que aplica a este trabajo, para una fábrica de productos de limpieza y auxiliares químicos (CONAMA, 1989).

En la Tabla No. 13.18 se observa que un parámetro muy importante para definir la calidad del agua es el OD (oxígeno disuelto), que tiene incidencia sobre las propiedades estéticas y condiciones ecológicas de la misma. Si el nivel de OD desciende bajo los 4 ó 5 mg/L, las formas de vida que pueden sobrevivir disminuyen o se alejan de esas zonas y, en una condición extrema, el OD tiende a desaparecer (condición anaeróbica). En este escenario la mayoría de las formas de vida presentes son eliminadas y reemplazadas principalmente por hongos produciéndose además gases mal olientes (AQC, 1992).

Para abordar el estudio de la contaminación de aguas de los cuerpos receptores se dispone de una serie de herramientas analíticas que permiten evaluar el comportamiento de los parámetros de calidad frente a cambios de las condiciones producidas por efectos externos (descargas) o modificaciones de las características de dichos cuerpos receptores (cambios naturales o inducidos) (AQC, 1992).

Estas herramientas se denominan comúnmente modelos de calidad de aguas y tienen como objetivo representar en forma aproximada el fenómeno que se desea estudiar, de modo de predecir la calidad del agua frente a cambios inducidos (AQC, 1992).

Hoy en día, la utilización de modelos de calidad de aguas es imprescindible en la preservación del recurso y, por lo tanto, para su planificación. Estos modelos son muy diversos dependiendo, entre otros, de los parámetros a estudiar, las características del cuerpo receptor y el nivel de información (disponible o requerida) para el análisis de los factores que influyen, por lo que su grado de complejidad es muy amplio pudiendo variar de muy simple a muy complejo (AQC, 1992).

En muchos modelos de calidad de aguas, el concepto de conservación o balance de masa puede aplicarse a casos simples de descargas o lagos o ríos, como el efecto de la dilución y degradación de las sustancias en esos cuerpos (AQC, 1992).

El modelo más simple para estudiar la variación de OD en un río se enfoca en los dos procesos más importantes: el consumo de oxígeno debido a la degradación de la materia orgánica por acción de microorganismos y la incorporación de oxígeno desde la atmósfera a través de la superficie del río, que se denomina reaeración. Además, contempla los factores físicos que modifican el OD (AWWA, 2002).

E. Tratamiento de aguas residuales

El objetivo principal del tratamiento de aguas residuales es remover o reducir el contenido de los contaminantes hasta niveles compatibles con la normativa vigente. Esta normativa, según lo señalado anteriormente está orientada a proteger la salud humana y a preservar el recurso para permitir el aprovechamiento en sus diversos usos (Sundstrom, 1979).

En la medida que los objetivos y normativa de calidad del agua están establecidos, el tratamiento de las aguas residuales se convierte en una necesidad y obligación ineludibles, así como también el manejo y control de los residuos sólidos y gaseosos producidos en el tratamiento de esas aguas. Lo anterior, de modo de proteger la totalidad de los componentes principales del medio ambiente (aire, agua, suelo) cada uno con sus objetivos de calidad y normativa específica (Sundstrom, 1979).

La Figura No. 13.4 muestra los componentes principales de un sistema de tratamiento y disposición de aguas residuales. Estos corresponden a la caracterización en términos de caudal y composición, selección de los procesos de tratamiento según el tipo de agua residual y el análisis del cuerpo receptor del afluente tratado, que generalmente corresponde a cauces superficiales, lagos o mar. La disposición de aguas residuales en medios como el suelo (infiltración) o la atmósfera (evaporación) es una opción factible para caudales pequeños o situaciones particulares y algunas igualmente requieren de tratamiento previo. Un caso interesante lo constituye la recarga artificial de acuíferos con aguas residuales, que aprovecha los procesos de atenuación natural de contaminantes en el suelo (Sundstrom, 1979).

El tratamiento de aguas residuales puede clasificarse en dos grandes grupos que de modo general, engloba la composición o contaminación de las aguas a tratar y el o los procesos más relevantes utilizados en la remoción de esas sustancias objetables. Estos grupos son tratamiento fisicoquímico y tratamiento biológico (AWWA, 2002).

El tratamiento fisicoquímico está orientado principalmente a la remoción de sustancias inorgánicas y por ello es utilizado en las aguas residuales industriales. Las características de los procesos son similares a los utilizados para agua potable. En este caso los sólidos extraídos desde el agua residual, que es una suspensión concentrada, al no ser componentes naturales del medio ambiente requieren de tratamiento o disposición especial que depende de su composición (AWWA, 2002).

En algunos casos cuando se requiere remover fósforo y nitrógeno del efluente de una planta de tratamiento biológico de aguas residuales se puede utilizar procesos fisicoquímicos. El fósforo se remueve agregando cal para elevar el pH a un valor del orden de 11 (formación de un precipitado), el nitrógeno se elimina por sedimentación mediante aireación y posteriormente se corrige el pH por recarbonatación (incorporación de CO_2). Si a continuación el agua es filtrada para remover los sólidos suspendidos no retenidos previamente y re-filtrada en un medio de carbón adsorbente para remover compuestos orgánicos disueltos que producen olor y sabor, se obtiene un agua de muy buena calidad. Los procesos descritos previamente corresponden a lo que comúnmente se denomina tratamiento terciario de aguas residuales (ver esquema Planta de Tratamiento de agua residual sistema convencional, Figura No. 13.5) (AWWA, 2002).

Hay muchos otros procesos químicos con fines específicos, por ejemplo: oxidación, reducción, neutralización, precipitación, de uso común para el tratamiento de aguas residuales de origen industrial (AWWA, 2002).

El tratamiento biológico es la práctica más común para las aguas residuales domésticas o asimilables a éstas (que contienen principalmente materia orgánica) (AWWA, 2002).

El tratamiento biológico tiene como principio básico la utilización de microorganismos aeróbicos naturales que reducen la materia orgánica (coloidal y disuelta) sintetizándola en nueva materia celular (desarrollo de microorganismos) y oxidándola a compuestos más simples (utilizada como alimento de los microorganismos denominado sustrato) (AWWA, 2002).

F. Tratamiento de efluentes para aguas residuales industriales

Las plantas convencionales de tratamiento de efluentes están diseñadas únicamente para tratar las aguas residuales industriales no peligrosas y deben centrarse en una tecnología sencilla que sea efectiva en función de los costos, que requiera poco mantenimiento y un mínimo de operadores. Estas plantas deben incluir procesos tales como ajuste de pH, tratamiento biológico por lagunas aireadas, tratamientos de sedimentación, tratamiento de lodos, entre otros. En la Figura No. 13.5 se puede ver el diagrama de una planta de tratamiento de aguas residuales convencional (AWWA, 2002).

1. **Características de las aguas residuales:** Las características claves de las aguas residuales que deben considerarse al momento de diseñar, evaluar o modificar una planta de tratamiento de aguas residuales incluyen el flujo y las características físicas, químicas y biológicas de las aguas residuales. El flujo de aguas residuales, comúnmente expresado en $m^3/día$, determina el tamaño de la planta. Las tasas mínimas y máximas de flujo deben calcularse de la manera más precisa posible ya que afectan a los cálculos hidráulicos y la medición de canales y tuberías de distribución. Los flujos del diseño también deben incluir futuros incrementos previstos. Las grandes variaciones temporales de los flujos pueden requerir el uso de lagunas o tanques de compensación a fin de permitir un nivel constante o casi constante de flujo para los procesos de tratamiento aguas abajo. Otro beneficio de los tanques de compensación es reducir el efecto del exceso de tóxicos sobre los procesos de tratamiento causado por descargas accidentales de sustancias tóxicas. Esta reducción se logra al mezclar aguas residuales con concentraciones inferiores en el estanque de compensación (Sundstrom, 1979). y (AWWA, 2002)

Las características físicas importantes incluyen sólidos, temperatura, color y olor. Los sólidos en forma de residuos flotantes y capas de grasa y aceite indican residuos altamente contaminados y son evidencia de residuos no tratados o en todo caso tratados de manera ineficiente. Los sólidos en suspensión contribuyen a la turbidez y a arrastres, y por lo general tienen que ser removidos mediante sedimentación o filtración. La temperatura de las aguas residuales es un parámetro importante, ya que afecta las reacciones químicas y biológicas y la solubilidad de gases, como el oxígeno. En general, las altas temperaturas elevan las tasas de reacción y solubilidad hasta el punto en que la temperatura se vuelve lo

bastante alta como para inhibir la actividad de la mayoría de microorganismos (aproximadamente 35°C). El color y olor sirven como indicadores del grado de contaminación de residuos, y su presencia en aguas residuales es signo de un pretratamiento inadecuado antes de la descarga (Sundstrom, 1979).

Las características químicas importantes de las aguas residuales incluyen sustancias orgánicas, sustancias inorgánicas en solución y gases. La demanda biológica de oxígeno (DBO) es un indicador de la cantidad de sustancias orgánicas de origen biológico (proteínas, carbohidratos, grasas y aceites) y de productos químicos orgánicos, sintéticos y biodegradables en las aguas residuales. La comparación entre la DBO de las aguas residuales afluentes y los efluentes tratados permite medir la efectividad de la planta para estabilizar la sustancia orgánica. La demanda química de oxígeno (DQO) es un indicador de las sustancias biodegradables y no biodegradables (Sundstrom, 1979).

La proporción entre la DBO₅ (demanda bioquímica de oxígeno en una prueba de 5 días) y la DQO es un indicador del tratamiento biológico. Generalmente, los procesos de descomposición biológica comienzan y ocurren de manera rápida con proporciones de DBO₅:DQO de 0.5 o mayor. Las proporciones entre 0.2 y 0.5 son susceptibles al tratamiento biológico; sin embargo, la descomposición puede ocurrir de manera más lenta debido a que los microorganismos degradantes necesitan aclimatarse a las aguas residuales. Una proporción de menos de 0.2 representa graves limitaciones para el tratamiento biológico. Normalmente, la proporción de DBO:DQO de las aguas residuales industriales es menor que 0.5, a excepción de las aguas residuales de las industrias de alimentos y bebidas, que a menudo son significativamente mayores que 0.5 (Fresenius, 1989).

Los elementos inorgánicos comunes en las aguas residuales incluyen cloruro, iones de hidrógeno (que influyen en el pH), compuestos que causan alcalinidad, nitrógeno, fósforo y azufre. El nitrógeno y fósforo son los nutrientes esenciales para el crecimiento de plantas y cuando se encuentran en exceso en los efluentes tratados y descargados a las aguas superficiales, pueden causar un crecimiento excesivo de algas. Las concentraciones de metales pesados y otros compuestos tóxicos, como cianuros, son consideraciones importantes en el diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales. Otro elemento importante para el diseño o mejoramiento de estas plantas es el establecimiento y el cumplimiento de los estándares de pretratamiento para evitar que los procesos de tratamiento sufran un exceso de tóxicos (Fresenius, 1989).

La acción microbiana asociada con métodos de tratamiento biológico de aguas residuales produce una variedad de gases, incluidos nitrógeno, dióxido de carbono, sulfuro de hidrógeno, amoníaco y metano. El tipo de gases en las aguas residuales tratadas indica si se está produciendo una degradación aerobia o anaerobia. La mayoría de procesos biológicos deben ser aerobios, por ello, el mantenimiento del oxígeno disuelto es un elemento básico de la planta. La degradación anaerobia, indicada por la presencia de gases tales como sulfuro de hidrógeno y metano, tiende a generar productos finales nocivos y representa un diseño inadecuado, a menos que se use un proceso específico de tratamiento anaerobio (Fresenius, 1989).

2. **Estándares para el pretratamiento:** Las aguas residuales de procesos industriales requieren un pretratamiento antes de su descarga al alcantarillado para minimizar la corrosión y obstrucción de los revestimientos del alcantarillado, y para evitar que los efectos tóxicos causados por la concentración tóxica de sustancias orgánicas e inorgánicas reduzcan la efectividad del tratamiento biológico. En los Estados Unidos, se han preparado estándares para el pretratamiento de aguas residuales para la mayoría de las principales categorías industriales basadas en las características de las aguas residuales y la efectividad de las tecnologías de tratamiento disponibles (Kreissl, 1987).

Los estándares de pretratamiento para sulfuros, sulfatos y pH se centran principalmente en la prevención de la corrosión de partes de concreto del alcantarillado. Los límites para la descarga de aceite y grasa, arenilla y sedimentos pesados evitan la obstrucción del alcantarillado. Sin embargo, los límites para metales pesados y sustancias orgánicas tóxicas aseguran principalmente el rendimiento adecuado de los procesos de tratamiento biológico y minimizan la acumulación de contaminantes en los lodos residuales (Kreissl, 1987).

Procesos de tratamiento que resistan mayores concentraciones de sustancias tóxicas que lo que normalmente permitirían las plantas convencionales de tratamiento de aguas residuales, como por ejemplo, un mayor énfasis en la filtración con medios granulares en lugar del tratamiento biológico podría permitir concentraciones altas de metales pesados. Si se reducen los estándares para el pretratamiento en la fuente industrial se incrementarán los niveles de sustancias tóxicas en los residuales de una planta de tratamiento de aguas residuales, especialmente en los lodos. No obstante, para el funcionamiento exitoso de la planta es esencial prevenir el exceso de tóxicos en los procesos de tratamiento. La Tabla No. 13.19 muestra los rangos de concentraciones en los cuales diversos componentes inorgánicos y fenoles pueden inhibir el tratamiento biológico (Kreissl, 1987).

3. **Procesos unitarios de tratamiento:** El tratamiento de aguas residuales puede dividirse en cuatro etapas principales.

ii. El tratamiento preliminar, o pretratamiento, puede incluir varios procesos unitarios para eliminar las características indeseables de las aguas residuales provenientes del sistema de recolección. Los procesos incluyen el uso de tamices, grillas y cámaras de rejillas para remover partículas grandes, trituradores para desintegrar sólidos gruesos, pre-aireación para el control de olores y remoción de grasa (Sundstrom, 1979).

iii. El *tratamiento primario*, también llamado clarificación primaria, incluye la remoción de sólidos fácilmente sedimentables antes del tratamiento biológico. Las cuencas o cámaras de sedimentación son la unidad principal, pero también pueden usarse diversos procesos auxiliares, tales como flotación, floculación y tamices de malla fina (Sundstrom, 1979).

iv. El *tratamiento secundario* incluye la purificación de aguas residuales principalmente mediante la descomposición de la materia orgánica suspendida y disuelta por la acción microbiana. Existen varios procesos unitarios de tratamiento biológico disponibles, pero la mayoría puede clasificarse como tratamiento en el terreno, estanques o lagunas, lodos activados o métodos de filtración biológica, como filtros biológicos rotatorios de disco (Sundstrom, 1979).

v. El *tratamiento auxiliar* abarca un gran número de procesos unitarios básicamente físicos y químicos que pueden usarse antes o después del tratamiento biológico secundario para cumplir con los objetivos específicos del tratamiento. El término clarificación secundaria o tratamiento terciario puede aplicarse a procesos unitarios que siguen al tratamiento secundario (Sundstrom, 1979).

La Tabla No. 13.20 brinda un resumen de los principales procesos unitarios de tratamiento, incluidos sus respectivas funciones y tipo de tratamiento (físico, químico, biológico) y señala la etapa de tratamiento durante la cual pueden usarse.

G. Procesos de Tratamiento Físico y Químico

El tratamiento físico de las aguas residuales separa principalmente los sólidos de manera mecánica, como ocurre con los tamices o usa diferencias de densidad, como sucede en la sedimentación y flotación. La mayor parte del tratamiento químico de aguas residuales incluye el uso de productos químicos para remover componentes específicos de las aguas residuales. En algunos procesos de tratamiento, tales como la floculación y adsorción, los procesos físicos y químicos están tan entrelazados, de modo que se usa el término tratamiento fisicoquímico. La Tabla No. 13.20 muestra que los procesos de tratamiento físico y químico se usan principalmente en las etapas preliminares, primarias y terciarias del tratamiento (AWWA, 2002).

1. **Pretratamiento:** Los procesos de tratamiento preliminar son principalmente físicos. Los más simples usan la gravedad para remover arena y partículas minerales antes del tratamiento biológico. Los tamices de malla ancha, generalmente de barras o mallas, filtran los sólidos de gran tamaño. Los trituradores se usan para reducir el tamaño de las partículas grandes de materia orgánica a fin de mejorar el tratamiento en las etapas posteriores. Los tanques de compensación mezclan las aguas residuales afluentes para reducir la variación de la concentración de los componentes de las aguas residuales y también se usan para aguas residuales potencialmente tóxicas a fin de: (a) descargar el efluente a los procesos de tratamiento con una tasa uniforme y nivelar el efecto de flujo máximo y mínimo; (b) mezclar volúmenes más pequeños de residuos concentrados con volúmenes más grandes y con menores concentraciones; y (c) controlar el pH para evitar fluctuaciones que pudieran alterar la efectividad de las unidades del sistema de tratamiento al mezclar residuos ácidos y alcalinos. La pre-aireación o precoloración puede requerirse para controlar olores cuando las aguas residuales se vuelven deficientes en

oxígeno mientras fluyen a través del sistema de recolección o para facilitar la remoción de grasa durante la clarificación primaria (Kreissl, 1987).

2. Tratamiento primario: Los procesos de tratamiento primario también son básicamente físicos. Generalmente, la remoción de sólidos inertes y orgánicos fácilmente sedimentables se realiza a través de las cámaras de sedimentación, pero los tamices de malla fina también pueden usarse como auxiliares en las diversas etapas del tratamiento. Las cámaras de sedimentación a menudo están diseñadas para remover grasa y sólidos flotantes mediante el uso de deflectores y removedores de aceite, y pueden incluir rastrillos mecánicos para la remoción de sólidos y lodos que se sedimentan en el fondo de la cámara. La Figura No. 13.6a muestra una unidad de sedimentación por gravedad diseñada especialmente para aguas residuales aceitosas. La separación de aceite y grasa libres y dispersos de los sólidos livianos resulta más fácil con la flotación de aire, un proceso netamente físico (véase la Figura No. 13.6b) o con la floculación, un proceso fisicoquímico que promueve la aglutinación de coloides coagulados y materia suspendida finamente dividida gracias a la mezcla física o a coagulantes. Existen tres tipos diferentes de floculantes: electrólitos inorgánicos, polímeros orgánicos naturales y polielectrolitos sintéticos. La flotación de aire y la floculación reducen los tiempos de sedimentación de los sólidos suspendidos que tienen una gravedad específica ligeramente mayor que 1.0 (AWWA, 2002).

Los sistemas de descomposición de la emulsión incluyen la adición de productos químicos o calor para que las gotas de aceite dispersas se fundan y se separen de las aguas residuales (véase la Figura No. 13.6c). Normalmente, los sistemas de emulsión no se usan en plantas convencionales de tratamiento de aguas residuales, sino en el pretratamiento de aguas residuales aceitosas (5 a 10% de aceite) antes de su descarga en el alcantarillado y en plantas comunes de tratamiento de residuos industriales. A menudo, la separación por gravedad (véase la Figura No. 13.6a) se usa como pretratamiento para remover los aceites libres antes de la emulsión y posteriormente se aplica la flotación de aire para mejorar el rendimiento del tratamiento y reducir el tiempo de retención. El término sistema de clarificación se aplica generalmente a las unidades de separación por gravedad que remueven partículas, impurezas floculadas y precipitadas, seguidamente, los procesos de precipitación química y tratamiento biológico generan sólidos suspendidos. La Figura No. 13.6d presenta un sistema de clarificación circular (WPCF-WEF, 1985).

3. Filtración con medios granulares: Muchos procesos unitarios específicos aplican la filtración y usan partículas minerales como medio de filtración. La filtración con medios granulares remueve sólidos suspendidos mediante filtración física, procesos de adsorción física y química, y descomposición biológica. Los filtros con medios granulares se distinguen de los biológicos principalmente porque filtran partículas más pequeñas (generalmente menos de 2 mm, si bien hay un medio graduado que varía entre arena y grava), lo que le da mayor importancia a la filtración y adsorción como parte del tratamiento (Perry, 1987).

Los filtros de arena que usan arena de sílice, un material que se encuentra con facilidad en muchas partes del mundo, son el tipo de unidad más común.

Los filtros duales y con medios múltiples constan de dos o más medios. Un filtro con medios múltiples funciona con medios más finos y densos en la parte inferior y medios más gruesos y menos densos en la parte superior. Generalmente se coloca granate en el fondo del lecho, arena en el medio y carbón de antracita en la parte superior. El patrón de flujo de los filtros con medios múltiples es de arriba hacia abajo con flujo por gravedad. También se usan filtros de flujo ascendente, horizontales y de doble flujo (Sundstrom, 1979).

Los filtros con medios múltiples requieren una contracorriente periódica para mantener su eficiencia. Cuando la obstrucción causada por los sólidos atrapados reduce la tasa de movimiento de aguas residuales a través del lecho del filtro, se llega al final de la carrera del filtro y se debe enjuagar para remover los sólidos suspendidos en el lecho. Durante el lavado por contracorriente, el flujo a través del filtro se revierte para que los sólidos retenidos en los medios se desprendan y puedan salir del filtro. Asimismo, el lecho puede agitarse con aire para ayudar a remover los sólidos. Luego, el agua del enjuague se recicla y vuelve a la corriente que alimenta las aguas residuales. El lavado por contracorriente también puede usarse con filtros de arena (Sundstrom, 1979).

La filtración con medios granulares se usa con mayor frecuencia para el tratamiento terciario en plantas municipales de tratamiento de aguas residuales y para la remoción complementaria de sólidos suspendidos del efluente de los procesos de tratamiento químico. Sin embargo, los sistemas de tratamiento biológico en suelos pueden considerarse como una forma de filtración natural con medios granulares. En los Estados Unidos, los filtros de arena se usan cada vez más para el tratamiento en el lugar de aguas residuales residenciales y para el tratamiento secundario en sistemas de tratamiento de aguas residuales de comunidades pequeñas (Sundstrom, 1979).

4. Clarificación: Sustancias en suspensión o en solución producen dos características indeseables en el agua, la turbidez y el color. El proceso mediante el cual se logra retirar estas sustancias se denomina clarificación (AQC, 1992).

Las impurezas se encuentran en el agua como materia en suspensión, materia coloidal y materia en solución. Mientras que la materia en suspensión siempre se separa por medios mecánicos por intervención o no de la gravedad, la materia coloidal requiere de un tratamiento físicoquímico preliminar y la materia en solución puede precipitarse mediante agentes químicos (AQC, 1992).

En tanto que partículas del orden de magnitud de una micra, se pueden considerar en suspensión, y las de una milésima de micra entran el dominio de moléculas en solución, los tamaños intermedios corresponden al tamaño coloidal. En estos tamaños las propiedades superficiales y las cargas eléctricas,

tienen efectos más importantes que el mismo peso relativo de la partícula en el agua. Las partículas coloidales presentan cargas superficiales, predominantemente negativas, que hacen que existan fuerzas de repulsión entre ellas, impidiéndoles aglomerarse para su sedimentación (AQC, 1992).

Para lograr la desestabilización de las partículas el proceso de clarificación involucra las siguientes etapas:

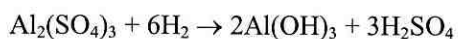
vi. Coagulación: La coagulación consiste en la neutralización de las cargas superficiales de las partículas coloidales, mediante la adición de electrolitos específicos, o coagulantes (AQC, 1992).

La reacción de coagulación ocurre muy rápidamente, del orden de segundos y para que se lleve a cabo requiere de muy buena agitación con el fin de lograr una mezcla rápida e íntima del coagulante con las partículas coloidales; normalmente se logra esto en la zona de entrada de agua cruda a la planta o al clarificador. En esta zona también se aplican otros productos químicos como floculantes (AQC, 1992).

La neutralización de un coloide se logra mediante la adición de un electrolito (coagulante) de carga opuesta a la de las partículas coloidales, y además el efecto aumenta marcadamente con el número de cargas que lleva el coagulante (AQC, 1992).

Uno de los coagulantes más comunes es el sulfato de aluminio. Cuando por ejemplo, se añade Al^{+3} como coagulante en forma de sulfato, parte de los iones trivalentes se dirigen a la neutralización de las cargas negativas del coloide, mientras que simultáneamente, la mayor parte reacciona con agua formando hidróxido insoluble, según la reacción:

▪ Reacción No. 5



Por un mecanismo independiente, el hidróxido insoluble formado atrapa los coloides neutralizados y facilita su sedimentación. El ácido sulfúrico formado en la reacción anterior reacciona a su vez con la alcalinidad bicarbonato, que normalmente estará presente, sin llegar a requerir una neutralización con cal o soda (AQC, 1992).

Otros coagulantes utilizados son el sulfato férrico, sulfato ferroso, cloruro férrico, cal, y polímeros (polielectrolitos) inorgánicos, como el policloruro de aluminio, y orgánicos como las poliaminas (AQC, 1992).

vii. Floculación: El proceso de floculación empieza cuando las cargas coloidales han sido neutralizadas y consiste en la aglomeración de las partículas hasta que adquieran un tamaño suficiente para iniciar su precipitación. Los aglomerados son denominados flóculos (AQC, 1992).

La reacción de floculación ocurre en forma natural por acción del mismo producto coagulante y se produce en zonas de moderada mezcla, con media y baja agitación (AQC, 1992).

Cuando las partículas formadas son muy pequeñas y de baja densidad, el tamaño y peso de los flóculos se puede aumentar con la adición de polielectrolitos (polímeros de alto peso molecular) que por disolución electrolítica en el agua, dan formas iónicas múltiples, capaces de actuar como puentes de unión entre partículas coaguladas (AQC, 1992).

Los polímeros pueden trabajar como coagulantes (sólo catiónicos), o como floculantes, y éstos se clasifican en catiónicos, aniónicos y no iónicos. Los polímeros coagulantes son de relativo bajo peso molecular y alta densidad de carga catiónica. Los floculantes son de mayor peso molecular que los coagulantes (AQC, 1992).

Para cada partícula dada existe un polímero de peso molecular y densidad de carga ideal. Puesto que las suspensiones normalmente no son uniformes, la realización de pruebas específicas son indispensables para encontrar el coagulante y floculante más apropiado (AQC, 1992).

El pH es un factor crítico en el proceso de coagulación-floculación, siempre hay un intervalo de pH en que un coagulante específico trabaja mejor. Con el sulfato de aluminio, la óptima coagulación y mínima solubilidad del flóculo, ocurre normalmente a pH entre 6 y 7. La coagulación para reducción de color es normalmente llevado a cabo a pH entre 4.5 y 5.5. Óptimo pH para la remoción de turbidez usualmente más alto que el usado en la reducción de color (AQC, 1992).

viii. Sedimentación: Por sedimentación se designa la operación por la cual se remueve las partículas sólidas de una suspensión mediante la fuerza de gravedad. Normalmente es la etapa siguiente a la coagulación-floculación y siempre se lleva a cabo en zonas de muy baja velocidad y agitación (AQC, 1992).

En general, los tanques de sedimentación son rectangulares o circulares, de varios metros de profundidad (AQC, 1992).

5. Tratamiento químico: Los métodos de tratamiento químico para el tratamiento convencional de aguas residuales pueden usarse en cada etapa del proceso de tratamiento, según convenga. Los métodos utilizados con mayor frecuencia son; neutralización para mantener un pH óptimo en los procesos

de tratamiento biológico; reacciones de precipitación para la remoción de sólidos disueltos y suspendidos; y oxidación (cloración, ozonización, radiación ultravioleta) para la desinfección y control de olores.

ix. Neutralización: Generalmente, los residuos corrosivos ácidos (pH menor que 2) y residuos corrosivos alcalinos (pH mayor que 12.5) requieren neutralización antes de usar los siguientes procesos de tratamiento para limitar la corrosión del equipo y mejorar la eficiencia del tratamiento. Con frecuencia, se requiere la neutralización o ajuste de pH para residuos no clasificados como corrosivos a fin de optimizar procesos químicos como la precipitación y el tratamiento biológico (AQC, 1992).

Los principales procesos de neutralización incluyen (1) mezcla de residuos ácidos y alcalinos, (2) uso de materiales alcalinos para neutralizar ácidos (piedra caliza, cal y soda cáustica) y (3) uso de reactivos ácidos para neutralizar residuos alcalinos (ácido sulfúrico, ácido clorhídrico, ácidos carbónicos y dióxido de carbono líquido). La Tabla No. 13.22 presenta un resumen sobre estos procesos que incluyen: los residuos aplicables, etapa de desarrollo, rendimiento, residuos generados, costo.

El método más simple y menos costoso consiste en mezclar residuos ácidos y alcalinos, siempre que sean compatibles. Generalmente, los residuos que contienen cianuro requieren tratamiento para destruirlo antes de la neutralización. Normalmente, existe una compensación entre el costo de los reactivos, el lapso requerido para la neutralización y el volumen de lodo generado por el proceso. Por lo general, los métodos menos costosos requieren mayor tiempo para la neutralización debido a concentraciones más diluidas de reactivos. Los reactivos menos costosos, tales como piedra caliza, cal y ácido sulfúrico también tienden a producir mayor volúmenes de lodos (AQC, 1992).

La selección del método de neutralización requiere evaluar la compatibilidad de los residuos y los reactivos disponibles. La selección también requiere balancear el costo de los reactivos frente a la velocidad de neutralización y el costo de disposición de lodos (AQC, 1992).

x. Precipitación química: La precipitación química se usa para remover compuestos metálicos de las aguas residuales. En el proceso de precipitación química, los iones metálicos solubles y ciertos aniones se convierten en formas insolubles que se precipitan de la solución. Los metales precipitados se remueven posteriormente de las aguas residuales mediante filtración líquida o clarificación. Las interacciones químicas, temperatura, pH, solubilidad y efectos de la mezcla afectan el rendimiento del proceso (AQC, 1992).

Se puede usar diversos productos químicos como precipitadores, incluido el hidróxido de sodio (NaOH), cal ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), ceniza de soda, sulfuro, sulfato ferroso, ácido, coagulantes orgánicos e inorgánicos. La precipitación del hidróxido es efectiva para la remoción de metales, tales como antimonio, arsénico, cromo, cobre, plomo, mercurio, níquel y cinc. La precipitación de sulfuro remueve principalmente mercurio, plomo y plata (EPA, 1992).

La precipitación química es un proceso de dos etapas que se realiza a través de operaciones discontinuas donde las aguas residuales se mezclan primero para el tratamiento químico en un tanque. Normalmente, la mezcla se logra por medios mecánicos con mezcladores o bombeo recirculante. Luego, las aguas residuales experimentan un proceso de separación y deshidratación, como la clarificación o filtración, donde los metales precipitados se remueven de la solución. Algunas veces, en un sistema de clarificación, se agrega un floculante para facilitar el proceso de sedimentación. El lodo resultante del clarificador o filtro debe tratarse, disponerse o reciclarse posteriormente (EPA, 1992).

6. Adsorción por carbón: La adsorción de carbón activado es una tecnología de tratamiento para la remoción de contaminantes orgánicos de aguas residuales. La mayoría de aplicaciones usa carbón activado granulado (CAG) en reactores de columna. Algunas veces, el carbón activado en polvo (CAP) se usa solo o con otro proceso, por ejemplo, con el tratamiento biológico (AWWA, 2002).

El mecanismo de adsorción es una combinación de interacciones físicas, químicas y electrostáticas entre el carbón activado y el adsorbido, aunque la atracción es básicamente física. El carbón activado puede obtenerse de muchas fuentes de carbono, incluidos el carbón, coque, turba, madera y cáscaras de coco (AWWA, 2002).

El parámetro clave del diseño es la capacidad de adsorción, es decir, una medición de la masa de contaminantes adsorbidos por masa unitaria de carbón, que depende del compuesto adsorbido, tipo de carbón usado, diseño del proceso y condiciones de operación. En general, la capacidad de adsorción es inversamente proporcional a la solubilidad adsorbida. Las sustancias orgánicas no polares, de alto peso molecular y baja solubilidad son adsorbidas fácilmente, mientras que las sustancias orgánicas de bajo peso molecular y alta solubilidad, son adsorbidas de manera más lenta. La adsorción se ve afectada por la competitividad entre los compuestos. El carbón puede preferir adsorber un compuesto en vez de otro y la competencia resulta en un compuesto adsorbido que a su vez es desorbido por el carbón (AWWA, 2002).

En un sistema de lecho fijo se remueven grandes cantidades de contaminantes a medida que las aguas residuales fluyen a través del lecho. En el área superior del lecho, los contaminantes se adsorben de manera más rápida. A medida que se eleva la cantidad de aguas residuales que fluye por el lecho, esta zona de rápida adsorción se incrementa hasta llegar al fondo del lecho. En ese punto, se llenan todos los sitios de adsorción disponibles y el carbón se agota. Esta condición puede detectarse por el aumento de la concentración de contaminantes del efluente del lecho, lo que se denomina ruptura (AWWA, 2002).

Generalmente, los sistemas de CAG comprenden varios lechos operados en serie. Ese diseño permite la extracción del primer lecho, mientras los otros aún tienen capacidad de tratar efluentes de calidad aceptable. El carbón en el primer lecho se reemplaza y el segundo lecho se convierte en el lecho principal. La tubería del sistema de CAG está diseñada para permitir el cambio de orden de los lechos (AWWA, 2002).

Una vez que se agota el carbón, puede removerse y regenerarse. Generalmente, se usa calor o vapor para revertir el proceso de adsorción. Los compuestos orgánicos ligeros se volatilizan mientras que los compuestos orgánicos pesados se pirolizan. El carbón agotado también puede regenerarse a través del contacto con un solvente que disuelva los contaminantes adsorbidos. Según el tamaño y economía del sistema, algunas plantas pueden optar por disponer el carbón agotado en lugar de regenerarlo. Para aplicaciones muy grandes, como en el caso de una planta de tratamiento de aguas residuales, se puede justificar la construcción de una planta de regeneración en el terreno. Para aplicaciones pequeñas resulta más eficiente en función de los costos usar un servicio de vendedores para entregar el carbón regenerado y remover el agotado. Estos vendedores transportan el carbón agotado a sus plantas centralizadas para regenerarlos (AWWA, 2002).

La adsorción de CAG es una tecnología ampliamente usada para tratar aguas residuales. Usualmente, la demanda química de oxígeno (DQO) de los residuos puede reducirse a menos de 10 mg/L y la demanda biológica de oxígeno (DBO) a menos de 2 mg/L. La eficiencia de remoción está en un rango de 30 a 90% (AWWA, 2002).

Algunas veces, el bajo rendimiento de los sistemas de CAG es el resultado de la adsorción competitiva entre compuestos residuales. El cloruro de metileno contaminante se usa con frecuencia para medir la competencia de adsorción en un sistema de CAG, ya que es fácilmente adsorbido y desorbido por los compuestos competitivos. Por consiguiente, las tasas bajas de remoción de cloruro de metileno muestran los efectos de la adsorción competitiva. El aceite y grasa pueden perjudicar el rendimiento del CAG al revestir las partículas de carbón, lo que inhibe el proceso de adsorción. Un límite comúnmente aplicado para cargas de aceite y grasa en un sistema de CAG es 10 mg/L. Los sólidos suspendidos también afectan el rendimiento del CAG porque obstruyen el lecho, lo que produce una pérdida excesiva de carga. Un límite de carga comúnmente usado para sólidos suspendidos totales (SST) en un sistema de CAG es de 50 mg/L. En los Estados Unidos, se observó un bajo rendimiento de las unidades de CAG en las plantas centralizadas de tratamiento de residuos, posiblemente debido a la dificultad inherente de las unidades operativas de adsorción de carbón para diferentes residuos (AQC, 1992).

H. Procesos de tratamiento biológico

Los procesos de tratamiento biológico se usan principalmente para el tratamiento secundario y se valen de la acción microbiana para descomponer materia orgánica suspendida y disuelta en aguas residuales. La mayoría de los procesos de tratamiento biológico son aerobios, ya que el carbono brinda la fuente de energía para la respiración aerobia y tiene al dióxido de carbono y agua como sus principales subproductos. La nitrificación y la conversión microbiana de amoníaco a nitrato, también pueden ser procesos importantes en plantas de tratamiento de aguas residuales. Generalmente, la descomposición anaerobia de la materia orgánica es mucho más lenta que la aerobia, pero puede ser una alternativa apropiada en algunas situaciones, en particular para los residuos con alta DBO (AWWA, 2002).

Existen diversas maneras de clasificar los procesos de tratamiento biológico, pero la mayoría puede clasificarse en dos grandes categorías: (1) métodos naturales con gran requerimiento de espacio, o (2) métodos de ingeniería con poco requerimiento de espacio. Los métodos de tratamiento en el terreno y las lagunas de estabilización se encuentran dentro de la primera categoría. Los métodos compactos y de ingeniería pueden clasificarse como: procesos de lodos activados, filtros biológicos, sistemas de tratamiento dual que combinan los lodos activados con los filtros biológicos, sistemas de tratamiento anaerobio.

1. **Proceso de lodos activados:** Un gran número de procesos unitarios combina los lodos activados con la suspensión de partículas de flóculos microbianos y aereadores para crear condiciones óptimas para la descomposición aerobia de la materia orgánica en las aguas residuales. Los sistemas convencionales de lodos activados incluyen un reactor individual (sistema de lodos activados de mezcla completa) o diversos reactores (sistemas de flujo a pistón y en serie). La Figura No. 13.7, presenta el diagrama de un sistema de lodos activados convencional. Una ventaja de estos sistemas sobre los de flujo a pistón y en serie es que la mezcla puede reducir los efectos de corto plazo de las altas concentraciones de componentes indeseables en las aguas residuales (WPCF-WEF, 1987).

Otros sistemas de lodos activados tienen diseños que varían en mayor o menor grado de los convencionales. La configuración para la estabilización por contacto es similar a la de la Figura No. 13.7 excepto que el lodo del contenedor de clarificación secundaria entra al estanque de estabilización de lodos en lugar de reciclarse directamente en el estanque de aeración. El estanque (aeración) tiene un tiempo de residencia relativamente corto, mientras que el estanque de estabilización de lodos por lo general tiene el doble de tiempo de retención del estanque de contacto. Este método es más adecuado para flujos menores donde se busca un mayor tiempo de residencia del lodo y es menos vulnerable a los excesos de sustancias orgánicas o cargas tóxicas, que los sistemas convencionales de lodos activados (WPCF-WEF, 1987).

La aeración prolongada modifica los sistemas convencionales de lodos activados, ya que incrementa los tiempos de retención hidráulica y de sólidos y a menudo incorpora las unidades de digestión aerobia de lodos. Estos sistemas se usan a menudo cuando los flujos de aguas residuales son menores de 2 L/s (50.000 gpd). Entre las ventajas principales se encuentran (WPCF-WEF, 1987):

- menor producción de lodo de cualquier proceso de lodos activados;
- capacidad para obtener un efluente de alta calidad;
- el sitio no requiere mucha preparación para la instalación de plantas compactas;
- confiabilidad con la atención necesaria del operador;
- la nitrificación ocurre probablemente cuando las aguas residuales tienen temperaturas superiores a 15 °C;
- requiere poco espacio;
- costo inicial relativamente bajo, y
- maneja con facilidad cargas hidráulicas de impacto moderado.

Las principales desventajas incluyen:

- alto consumo y costo de energía comparado con sistemas en el terreno o naturales;
- operadores calificados y altos requisitos de operación y mantenimiento;
- las altas variaciones de flujo puede reducir la efectividad de remoción de los sólidos suspendidos (SS) y DBO;
- problemas potenciales de congelamiento en climas fríos;
- potencial para la generación de lodos debido a la desnitrificación en el clarificador final durante los meses más cálidos;
- posibles ruidos del ventilador y olores provenientes del lodo; y
- las plantas compactas pueden requerir componentes o modificaciones adicionales para compensar las limitaciones específicas del efluente.

2. **Tratamiento, uso y disposición de los lodos:** Los procesos de tratamiento concentran sólidos de aguas residuales industriales en un lodo que debe ser tratado (es decir, estabilizado y deshidratado) antes de su disposición final. Debido a las altas concentraciones de metales pesados y sustancias tóxicas, las opciones para el uso beneficioso del lodo de las plantas de tratamiento de aguas industriales son más limitadas que para las plantas de tratamiento de aguas residuales municipales. El tratamiento, uso y disposición de lodos debe ser una consideración importante al momento de evaluar alternativas de tratamiento y diseño de ingeniería para una planta de éstas (WPCF-WEF, 1987).

I. Manejo y disposición de residuos

Los procesos de tratamiento empleados en las plantas de tratamiento de aguas residuales generan varios tipos de residuos, incluidos los lodos, sólidos, ceniza de incineradores, emisiones al aire y efluentes concentrados (AWWA, 2002).

La Tabla No. 13.23 es un resumen de los principales residuos relacionados con los procesos de tratamiento de aguas residuales.

La Figura No. 13.8 muestra un diagrama general del manejo de lodos en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales. La mayoría de los procesos de la figura están destinados a la remoción de agua, reducción de volumen o masa de sólidos en el lodo inicial, que generalmente contiene un bajo porcentaje de sólidos y el resto es agua. Muchos de estos procesos, tales como la digestión aerobia y anaerobia, estabilización con cal y compostificación, también reducen los agentes patógenos de los lodos de aguas residuales municipales. La Tabla No. 13.24 describe el efecto de los principales procesos de tratamiento de lodos y la importancia del uso y disposición de lodos. Si las plantas de tratamiento reciben aguas residuales domésticas e industriales, la reducción de agentes patógenos debe ser un factor importante del diseño, especialmente si se considera la aplicación en el terreno con fines agrícolas.

Generalmente, la reducción de agentes patógenos en las plantas de tratamiento no es una preocupación, a menos que la planta procese residuos médicos (WPCF-WEF, 1980).

Por lo general, los métodos de espesamiento de lodos aumentan los sólidos del lodo desde un porcentaje mínimo de sólidos hasta 10%. Los lodos primarios crudos que no han recibido tratamiento biológico también requieren estabilización para controlar los olores y agentes patógenos (WPCF-WEF, 1980).

La estabilización de lodos incluye la digestión u oxidación de lodos para reducir la masa de sólidos y agentes patógenos. La estabilización con cal, mediante la adición de cal (cal hidratada, $\text{Ca}(\text{OH})_2$; cal viva, CaO ; o residuos de hornos o cenizas muy finas que contienen cal) en cantidades suficientes para elevar el pH por encima de 12, es un método de reducción de agentes patógenos (EPA, 1992).

El acondicionamiento de lodos incluye el tratamiento físico (calor, congelamiento, descongelamiento) o químico para reducir el contenido de humedad y modificar las características del lodo y aumentar así la efectividad de procesos posteriores de deshidratación (WPCF-WEF, 1987).

La deshidratación de lodos aumenta el contenido de sólidos hasta el punto en que el lodo puede ser manejado como un sólido para determinado uso o disposición. El contenido de sólidos en los lodos deshidratados varía ampliamente según las características del lodo y el método de deshidratación usado, pero comúnmente está entre 20 y 50% (WPCF-WEF, 1987).

1. **Deshidratación de lodos:** Los procesos de tratamiento de residuos tales como sedimentación, neutralización, precipitación y oxidación/reducción producen lodos que generalmente deben deshidratarse antes de su tratamiento o disposición. Algunas opciones de deshidratación que comúnmente se usan en plantas de tratamiento de residuos industriales son: filtración a presión de placa y estructura, filtración al vacío, filtración a presión en banda (WPCF-WEF, 1987).

2. **Filtración a presión de placa:** El filtrado en filtro-prensa es uno de los métodos para deshidratación de lodos más común. Una filtro-prensa de placa y estructura consta de varias placas de filtro conectadas a una estructura y presionadas entre un extremo fijo y uno móvil. La tela de filtrar se coloca en la parte delantera de cada placa. El lodo se bombea en la unidad bajo presión mientras se presionan las placas. Los sólidos se retienen en las cavidades del filtro-prensa y empiezan a adherirse a la tela hasta formar una torta. El agua o filtrado pasa por la tela de filtrar y drena al fondo de la prensa. El afluente del lodo se bombea al sistema hasta llenar las cavidades. Se aplica presión a las placas hasta detener el flujo o filtrado. Al final del ciclo se libera la presión y se separan las placas. La torta de filtro cae en una tolva ubicada debajo de la prensa. Luego, puede disponerse en un relleno sanitario. La tela de filtrar se lava antes de iniciar el próximo ciclo. La ventaja clave de la filtración a presión de placa y estructura es que puede producir una torta más seca que otros métodos de deshidratación de lodos y el

hecho de ser un proceso discontinuo es una ventaja cuando se deben manejar lodos de diferentes residuos por separado. Sin embargo, debido a la operación discontinua, un filtro-prensa de placa y estructura requiere más mano de obra (Perry, 1987).

Las placas de un filtro prensa pueden ser cuadradas o circulares, verticales u horizontales. Lo más frecuente es que los compartimentos para sólidos estén formados por huecos en las caras de placas de polipropileno moldeado. Las placas y los marcos se sitúan de forma vertical en un bastidor metálico, con telas que cubren las caras de cada placa, y se acoplan estrechamente entre sí por medio de un tornillo o una prensa hidráulica. La suspensión entra por un extremo del conjunto de placas y marcos, y pasa a través de una esquina, hacia el canal que recorre el equipo de modo longitudinal. Los canales auxiliares llevan la suspensión desde el canal de entrada hasta cada uno de los marcos. Aquí los sólidos se depositan en las caras cubiertas de tela de las placas. El líquido pasa a través de las telas, desciende por las canaladuras de las caras de las placas y sale del filtro prensa (McCabe, 2001).

Una vez instalado el filtro prensa, se introduce la suspensión por medio de una bomba o tanque presurizado generalmente a una presión de 3 a 10 atm. La filtración continúa hasta que ya no sale líquido por el tubo de descarga o bien aumenta bruscamente la presión de filtración. Esto ocurre cuando las placas se llenan de sólido y ya no puede entrar más suspensión. Esto indica que la suspensión ha sido *bloqueada*. Entonces es posible pasar líquido de lavado para eliminar las impurezas solubles contenidas en los sólidos, y a continuación soplar con aire o vapor de agua para desplazar la mayor parte de líquido residual. Entonces, se abre la prensa y se retira la torta de sólidos del medio filtrante, pasándola a un transportador o un depósito de almacenamiento. En muchos filtros prensa estas operaciones se realizan en forma automática (McCabe, 2001).

El lavado completo en un filtro prensa requiere de varias horas, ya que el líquido de lavado tiende a seguir caminos preferenciales formando circuitos sin acceso a determinadas partes de la torta. Si la torta es menos densa en algunas partes que en otras, como ocurre habitualmente, la mayor parte del líquido de lavado no será efectivo. Si el lavado tiene que ser excepcionalmente bueno, resulta conveniente volver a mezclar con un gran volumen del líquido de lavado la torta parcialmente lavada y filtrar de nuevo o bien utilizar un filtro de carcasa y hojas que permite un lavado más efectivo que el filtro de placas y marcos (McCabe, 2001).

3. Opciones de uso final y disposición de lodos: Los lodos residuales que quedan luego de la remoción de todos los componentes reciclables se deshidratan tanto como sea posible antes de su disposición final. Para producir un lodo cuya consistencia sea más fácil de manejar y transportar al lugar de disposición final, se puede requerir una estabilización adicional mediante la adición de un agente aglomerante como un floculante. Las opciones de disposición final de lodos incluyen usos beneficiosos tales como (1) aplicación en el terreno y (2) distribución y comercialización del lodo compostificado o

usos no beneficiosos tales como (1) disposición en un relleno, (2) incineración, y (3) disposición en el mar. Si los programas de pretratamiento son exitosos para una planta de tratamiento, el lodo puede ser beneficioso, por ejemplo, para la producción agrícola, silvicultura o recuperación de suelos. Otro enfoque del manejo de residuos es tratarlos en la planta para minimizar su volumen y toxicidad, y disponer el resto en un relleno sanitario seguro (WPCF-WEF, 1987).

Asimismo, los sólidos que generan los procesos de solidificación y las cenizas de incineradores también requieren disposición final. Las principales opciones de disposición para estos residuos son los rellenos sanitarios y la disposición en el mar (WPCF-WEF, 1987).

xi. Aplicación en el terreno de lodos no contaminados: En algunos casos se puede elegir la aplicación en el suelo cuando hay terrenos disponibles y los lodos no están contaminados o la concentración de contaminantes está dentro de los límites aceptables. El tiempo y la tasa de aplicación pueden variar según el uso del terreno (cultivos agrícolas, pastoreo o silvicultura). El lodo es particularmente valioso para la recuperación de terrenos seriamente dañados o deteriorados. La Tabla No. 13.25 señala los límites de la concentración de contaminantes para la aplicación de lodos en el suelo (WPCF-WEF, 1987).

xii. Distribución y comercialización: La compostificación de lodo orgánico no contaminado genera un producto estable que puede empacarse y comercializarse. La compostificación requiere la mezcla del lodo deshidratado con un agente aglomerante y una fuente de carbón, como viruta de madera, corteza, cáscaras de arroz, paja y otros materiales similares, y descomposición húmedo-aerobia adicional (EPA, 1992).

xiii. Disposición en el relleno: Los rellenos sanitarios modernos están sujetos a reglamentos que se están volviendo más estrictos y como consecuencia, brindarán mejor protección ambiental en el futuro. Existen tecnologías específicas relacionadas con los rellenos, que incluyen los sistemas de revestimiento, de recolección y tratamiento de lixiviado, control y recuperación de gases en el relleno, técnicas mejoradas de clausura, el cuidado posclausura y el monitoreo. Si los rellenos se planifican y operan adecuadamente, pueden usarse a la larga con fines recreativos y como espacios abiertos (EPA, 1992).

III. JUSTIFICACIÓN

La necesidad de una conciencia ecológica para las empresas industriales se ha incrementado en gran medida en los últimos tiempos, obligando a éstas a invertir en procesos que no precisamente representan una operación productiva que resulte en beneficios económicos.

La gran mayoría de industrias poseen efluentes de agua provenientes de su proceso, los cuales acarrearán una serie de químicos y contaminantes que por lo general están por encima de los límites que estipulan las leyes correspondientes, como lo es el reglamento de aguas residuales de CONAMA para Guatemala, propuesto en 1999. Si no son separados estos químicos y contaminantes del agua, éstos llegan a las corrientes de agua naturales, donde tienen efectos dañinos para el ecosistema.

Las industrias están implementando plantas de tratamiento de aguas residuales provenientes de su proceso, con el fin de separar los contaminantes sólidos disueltos y dispersos en el agua, de modo que ésta tenga los parámetros adecuados para su descarga al ambiente.

Por su impacto ecológico y económico, la correcta operación de este tipo de plantas es necesaria. Se debe contar entonces, con documentación como lo es un manual, para que sirva de guía para los operarios que tengan a su cargo una planta de éstas.

La operación adecuada del equipo y un mantenimiento rutinario apropiado serán entonces beneficios para la empresa que los emplee; y no sólo en un proceso de tratamiento de aguas residuales, sino que en cualquier proceso de la fábrica.

IV. OBJETIVOS

A. General

Elaborar el manual de operación de los equipos que componen el proceso de tratamiento de aguas residuales de una fábrica de productos químicos auxiliares para la industria textil, de modo que esté disponible para cualquier operario que tenga a su cargo su funcionamiento y mantenimiento.

B. Específicos

1. Evaluar el funcionamiento actual de la planta de tratamiento de aguas residuales existente en la empresa y emitir un diagnóstico.
2. Identificar el modo de operación del equipo que mejor se ajuste a las necesidades de la empresa y del medio ambiente en cuanto a costo, beneficios y resultados.
3. Identificar riesgos potenciales para los operarios y proponer medidas preventivas de seguridad durante la operación para reducirlos o incluso eliminarlos.
4. Proponer alternativas al diseño y funcionamiento actual de la planta de tratamiento de aguas residuales que mejoren su desempeño.
5. Establecer rutinas de mantenimiento preventivo del equipo de la planta de tratamiento de aguas residuales.
6. Proponer uso de productos auxiliares (ej. floculantes, coagulantes, etc.) alternativos a los ya utilizados o identificar puntos nuevos del proceso donde puedan ser utilizados.
7. Evaluar el destino de residuos del proceso de tratamiento de aguas residuales.
8. Determinar si se cumple con los parámetros establecidos para la descarga de aguas residuales provenientes de la industria a ríos según las leyes o regulaciones competentes.

V. PROBLEMA

En la fábrica de químicos auxiliares para la industria textil en que se trabajará, existe una planta de tratamiento de aguas residuales que funciona actualmente sin un manual de operación y sin conocer si el desempeño de ésta es el adecuado.

VI. METODOLOGÍA

A. Evaluación inicial

1. Descripción del proceso y del equipo que conforma la planta de tratamiento de aguas: En esta etapa se determinará el diagrama de flujo del funcionamiento actual del proceso, y se identificará y describirá cada uno de los equipos que lo conforman.

2. Muestreo y análisis del afluente y efluente de la planta de tratamiento de aguas en sus condiciones actuales: En esta etapa se analizará el agua de entrada y salida de la planta para determinar su estado actual en cuanto al cumplimiento con los parámetros que exigen las propuestas de ley pertinentes.

3. Evaluación del desempeño del equipo: En esta etapa se evaluará el funcionamiento de cada equipo y se identificará fallas y puntos de mejora para cada uno.

4. Evaluación del uso de químicos en el proceso: En esta etapa se evaluará el uso de los químicos actuales, dosificación, puntos de aplicación y químicos alternativos.

B. Desarrollo de nuevos procedimientos

1. Identificación y caracterización de residuos y selección de su disposición: En esta etapa se identificará y caracterizará cada uno de los residuos que genera el proceso, y se hará las evaluaciones necesarias para seleccionar la mejor opción de disposición de cada uno de ellos.

2. Establecimiento de procedimientos de mantenimiento: En esta etapa se establecerá rutinas de mantenimiento preventivo para cada equipo, según su evaluación de estado y desempeño.

3. **Establecimiento de muestreos y análisis de parámetros en la entrada y salida de la planta:** En esta etapa se elegirá la recurrencia y volumen con que se deba obtener las muestras para analizar. También se determinará los análisis a realizar a dichas muestras, utilizando el laboratorio interno de la empresa y/o un laboratorio externo.

4. **Establecimiento de un proceso de operación de la planta y elaboración del diagrama de flujo de las actividades:** En esta etapa se establecerán los pasos a seguir para la operación de la planta de modo que se cumpla con los objetivos del proceso y los parámetros de descarga establecidos. También incluye identificación de riesgos para los operadores.

C. Recapitulación y documentación

1. **Elaboración del manual de operación y mantenimiento de la planta de tratamiento:** En esta etapa se reunirá la información obtenida durante este trabajo y se elaborará el documento «Manual de Operación y Mantenimiento».

2. **Recomendaciones:** En esta etapa se sugerirá alternativas al proceso o cambios necesarios si los hubiera.

VII. RESULTADOS

El resultado final de este trabajo es el manual de operación y mantenimiento en sí de la planta de tratamiento de aguas residuales evaluada. Dicho documento se presenta continuación.

Manual de Operación y Mantenimiento para la
Planta de Tratamiento de Aguas Residuales

JUSTIFICACIÓN

La planta de tratamiento de aguas residuales existente en esta empresa recibe el agua de lavado de reactores y barriles del área de producción. Esta agua acarrea una diversidad de químicos que si no son tratados y removidos antes de su descarga en el río que atraviesa el terreno de esta empresa, afectarían la calidad del agua del mismo y por ende a los organismos que dependen de ésta.

Por su impacto ecológico y económico, la correcta operación de este tipo de plantas es necesaria, así como su mantenimiento. Se debe contar entonces, con documentación como lo es un manual, para que sirva de guía para los operarios que tengan a su cargo una planta de este tipo.

La operación adecuada del equipo y un mantenimiento rutinario apropiado serán entonces beneficios para la empresa y para el ambiente.

OBJETIVO

Establecer el procedimiento adecuado de operación del la planta de tratamiento de aguas residuales, medidas de seguridad para los operarios, rutinas de mantenimiento preventivo, el uso adecuado de químicos auxiliares en el proceso y la disposición de los desechos generados.

A. Diagramas y procedimiento

Figura No. 7.1: Diagrama de flujo del proceso.

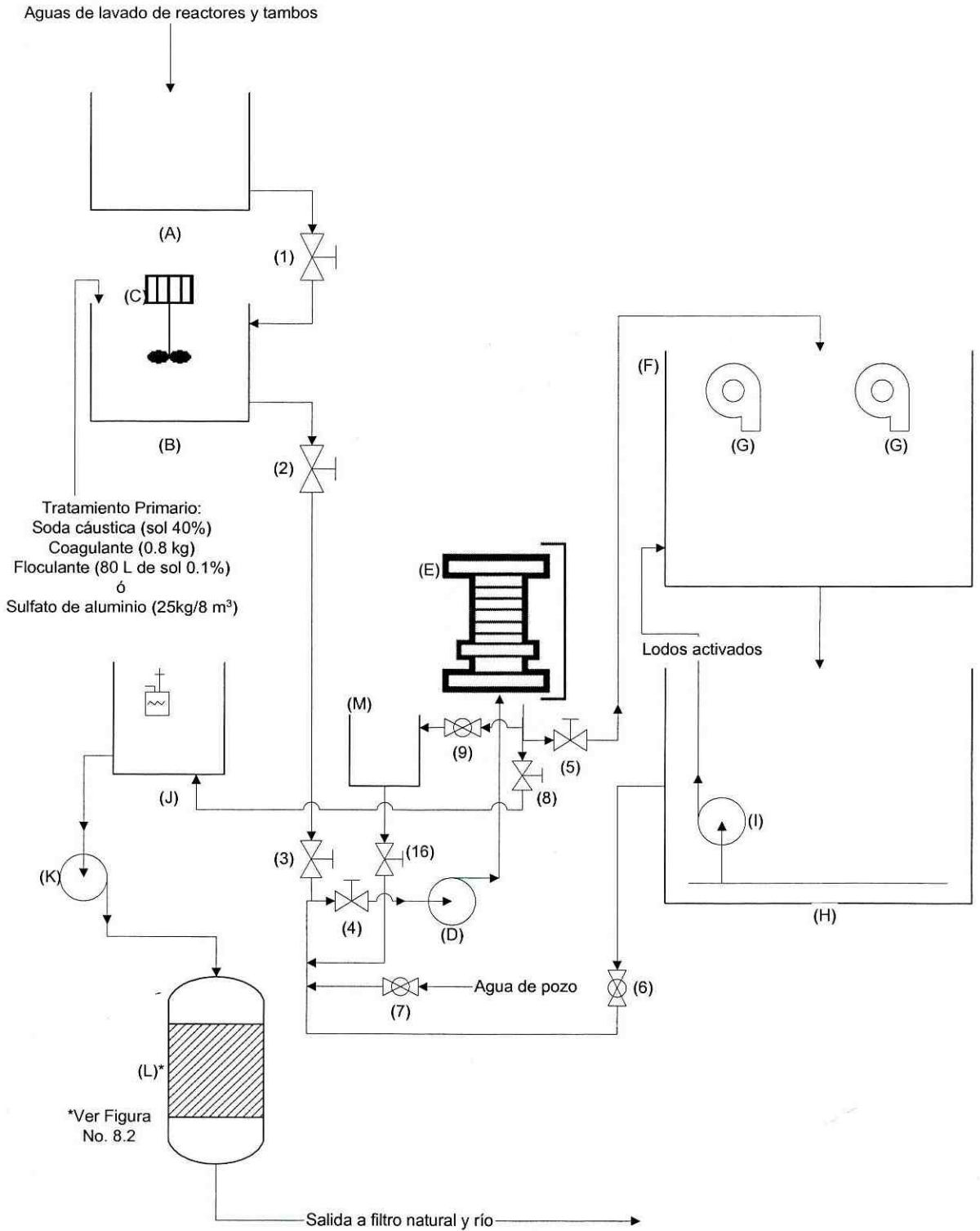


Figura No. 7.2: Diagrama de flujo del filtro de carbón activado.

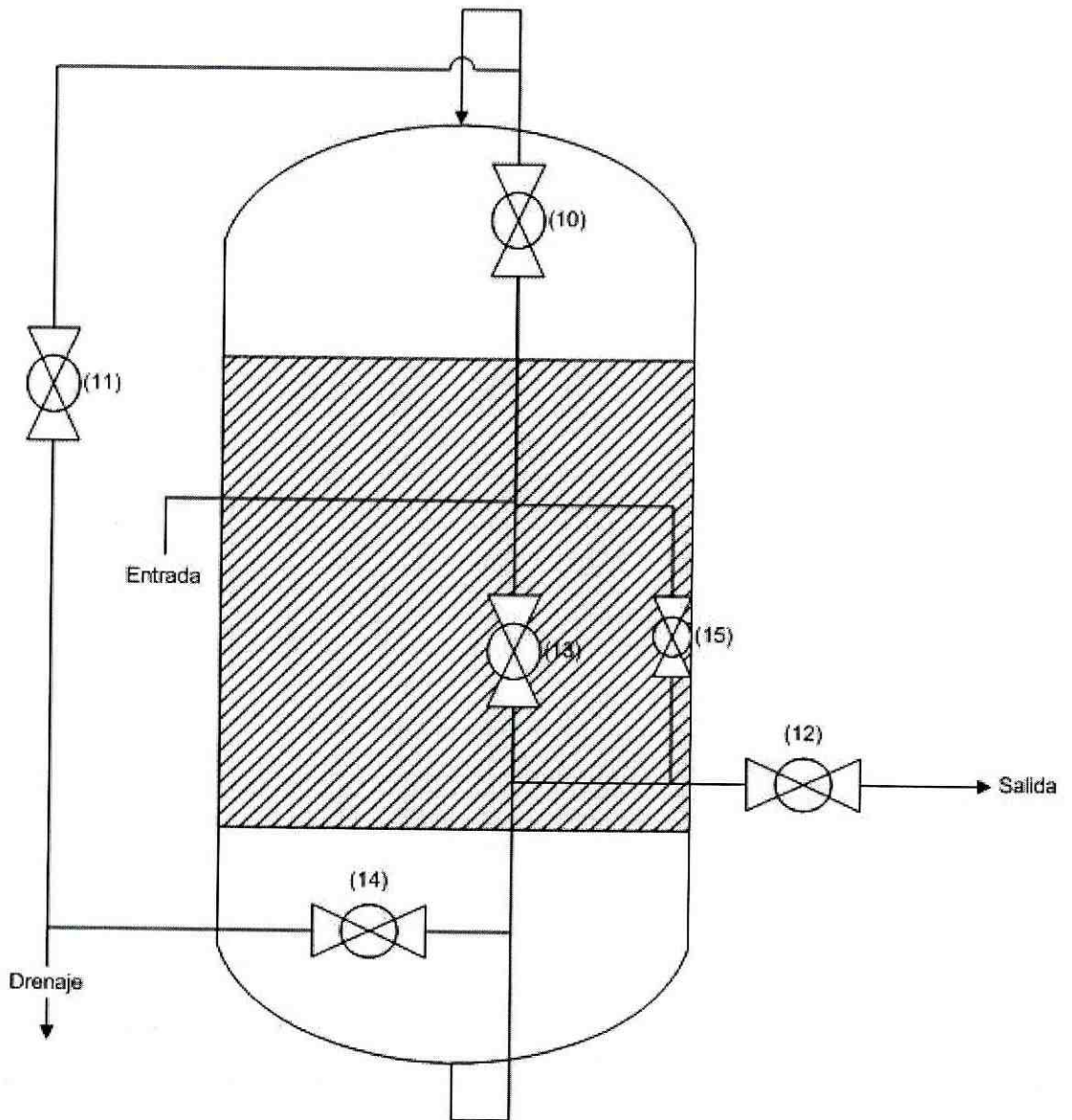


Tabla No. 7.1: Descripción del equipo. Ver código del equipo en diagrama de flujo.

Código	Nombre	Descripción
Equipo		
(A)	Tanque de ecuación	Tanque de concreto liso 3 m x 2 m x 1.5 m (9 m ³)
(B)	Tanque de tratamiento primario	Tanque de concreto liso 3 m x 2 m x 1.5 m (9 m ³)
(C)	Agitador mecánico	Motor de 2.24 kW (3 hp) Fase 3, Voltios 230 Amperios 10 Eje de 1 m de largo Rodete en forma de turbina de palas inclinadas de acero inoxidable
(D)	Bomba centrífuga	Marca "Baldor"; 3.73 kW (5 hp) Cat. No. M36131 Spec. 36A001X874H1 Voltios 230/460 Amperios 12/6 RPM 3450 Hz 60 Fase 3
(E)	Filtro prensa	11 placas cuadradas de polipropileno 0.65 m x 0.65 m x 0.06 m Medio filtrante de fibra sintética Prensa hidráulica de hasta 68.9 kPa (10,000 psi)
(F)	Tanque de tratamiento biológico	Tanque de concreto liso 8 m x 7 m x 1.5 m (84 m ³)
(G)	Aereador flotante (2)	Marca AIRE-O ₂ , Modelo 510-800 Motor de 0.75 kW (1 hp), 230/460 voltios, fase 3, 60 Hz Propela de tres paletas de acero inoxidable Flotador de PET de baja densidad
(H)	Tanque sedimentador	Tanque de concreto liso 8 m x 7 m x 1.5 m (84 m ³)
(I)	Bomba sumergible para lodos activados	Marca Pentax Italy, 1.11 kW (1 ½ hp) Tipo DG 100G Voltios 220 Amperios 6.2 ,Hz 60 Fase 1 Profundidad máxima 10.4 m
(J)	Tanque de filtrado por carbón activado	Tanque de PET de 1 m ³ Cuenta con sensor de nivel
(K)	Bomba centrífuga	Marca "Sta-Rite"; 0.37 kW (½ hp) Modelo JHCX-61 Spec. 548H2EC15B1 Voltios 115/230 Amperios 9.4/4.7 RPM 3450 Hz 60 Fase 1
(L)	Filtro de carbón activado	Columna de carbón activado granular 0.6 m x 1.6 m 1.9 – 2.5 L/s
(M)	Tanque de arena difusora	Tanque de PET de 0.2 m ³ Medidor de nivel

Tabla No. 7.2: Descripción de las válvulas. Ver código en diagrama de flujo.

Código	Nombre	Descripción
(1)	Válvula de compuerta	3 pulgadas
(2)	Válvula de compuerta	3 pulgadas
(3)	Válvula de compuerta	2 pulgadas
(4)	Válvula de compuerta	1 ½ pulgadas
(5)	Válvula de compuerta	1 ½ pulgadas
(6)	Válvula de bola	1 pulgada
(7)	Válvula de bola	½ pulgada
(8)	Válvula de compuerta	1 ½ pulgada
(9)	Válvula de bola	1 pulgada
(10)	Válvula de bola	1 ½ pulgada DN40
(11)	Válvula de bola	1 ½ pulgada DN40
(12)	Válvula de bola	1 ½ pulgada DN40
(13)	Válvula de bola	1 ½ pulgada DN40
(14)	Válvula de bola	1 ½ pulgada DN40
(15)	Válvula de bola	¾ pulgada DN20
(16)	Válvula de compuerta	1 ½ pulgada

Tabla No. 7.3: Descripción del nuevo procedimiento de operación de la planta de tratamiento de aguas.

Paso	Descripción
1	Dejar llenar el tanque equalizador A durante 2 días <ul style="list-style-type: none"> - Asegurar que la válvula 1 esté cerrada - Asegurar que el tanque de tratamiento B este vacío.
2	Abrir Válvula 1 para dejar pasar el contenido al tanque de tratamiento B <ul style="list-style-type: none"> - Asegurar que la válvula 2 esté cerrada
3	Poner a funcionar el agitador C
4	Cerrar válvula 1 al terminar de pasar el contenido
5	Medir el pH después de que haya pasado todo el contenido Medir después de ½ hora
6	pH entre rango 7-8 Si Sí: Paso 6.1 Si No. Pasos 7.1 y 7.2
6.1	pH entre 7 y 8, no es necesario el ajuste
7.1	pH bajo 7 ajustar con solución de soda cáustica
7.2	pH mayor a 8 ajustar a rango 7-8 con solución de ácido sulfúrico
8	Agregar 800 g de coagulante y dejar ½ hora agitando
9	Agregar 80 L de solución al 0.1% de floculante y dejar agitar por 10 min
10	Abrir válvulas 9 y 16 <ul style="list-style-type: none"> - Asegurar que las válvulas 5, 6, 7 y 8 estén cerradas - Asegurar que la válvula 4 esté abierta - Asegurar que el filtro prensa esté listo para funcionar
11	Encender bomba D para recircular solución de arena difusora por 10 min
12	Abrir válvulas 2 y 3 para que llegue el contenido de tanque B a bomba D
13	Cerrar válvulas 9 y 16
14	Abrir válvula 5 para iniciar el primer proceso de filtrado
15	Al estar vacío tanque B, apagar agitador C y cerrar válvula no 2
16	Cerrar válvulas 3 y 5
17	abrir válvulas 6 y 8
18	Comienza el segundo filtrado y el contenido llega al tanque J por medio automático se acciona la bomba que lleva al filtro de carbón activado
19	Contenido en tanque J para pasar a filtrado por carbón activado <ul style="list-style-type: none"> - Asegurar que las válvulas 10 y 12 estén abiertas - Asegurar que las válvulas 11, 13, 14 y 15 estén cerradas
20	Filtrado por carbón activado
21	Después de 2 horas y cuarto de abierta la válvula 6, cerrarla.
22	Abrir la válvula 7 y dejar circular durante 30 minutos agua de pozo. Después de la media hora apagar la bomba D y cerrar la válvula 7
23	Asegurar que la bomba D este apagada y que las válvulas 1,2,3,5,6,7,8 y 9 estén cerradas

Figura No. 7.3: Diagrama de bloque de las actividades del nuevo procedimiento de operación de la planta de tratamiento de aguas residuales.

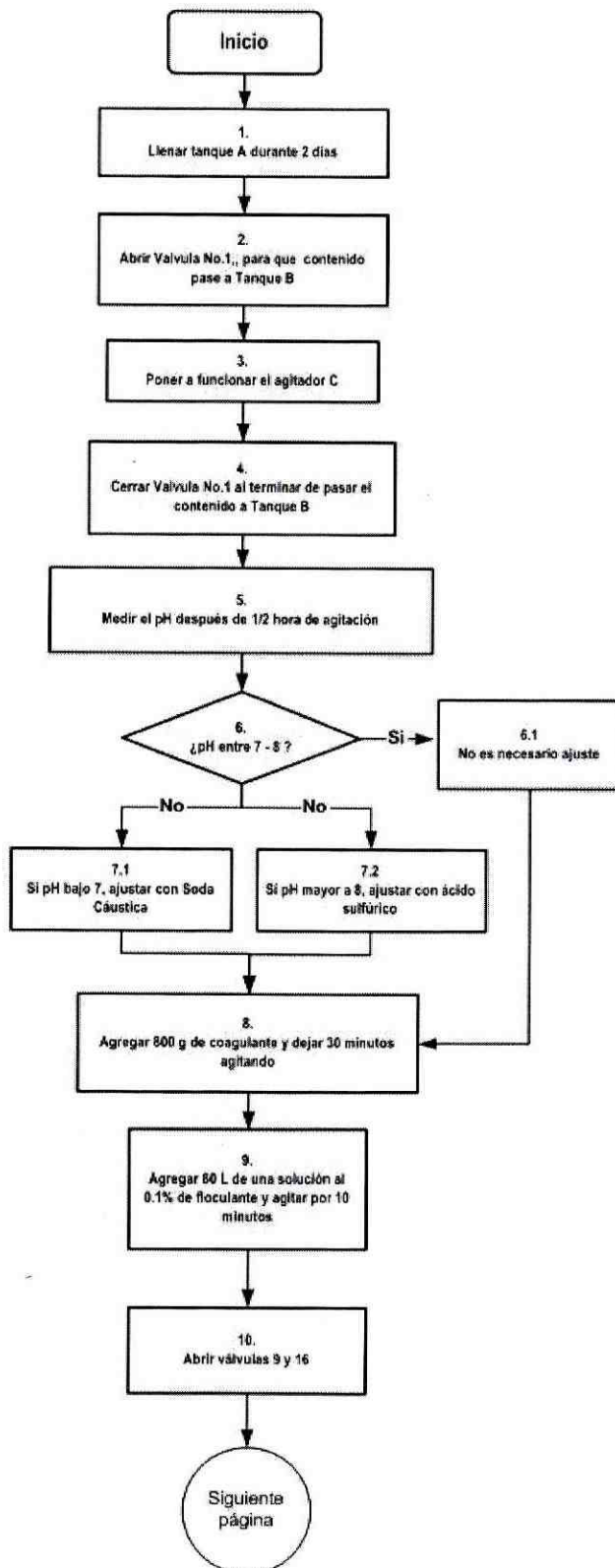




Tabla No. 7.4: Descripción del procedimiento de preparación y limpieza de la planta de tratamiento de aguas.

Paso	Descripción
1	Preparar solución de floculante al 0.1%. <ul style="list-style-type: none"> - Medir 80 L de agua en recipiente de 100 L. - Medir 80 g de floculante en polvo con medida estandarizada. - Agitar manualmente agua mientras se agrega floculante lentamente - Dejar la solución en reposo y tapada hasta el día siguiente.
2	Verificar si hay al menos 10 L de solución de soda cáustica <ul style="list-style-type: none"> - Si no: pasar a paso 3. - Si sí: pasar a paso 4.
3	Preparar solución de soda cáustica. <ul style="list-style-type: none"> - Colocarse equipo de seguridad (guantes, gabacha, mascarilla). - Medir 50 L de agua en recipiente de 60 L. - Medir 20 kg de soda cáustica con medida estandarizada. - Agitar manualmente agua mientras se agrega soda lentamente. - Dejar tapada la solución para uso futuro en sitio seguro.
4	Verificar si hay al menos 10 L de solución de ácido sulfúrico <ul style="list-style-type: none"> - Si no: pasar a paso 5. - Si sí: pasar a paso 6.
5	Preparar solución de ácido sulfúrico. <ul style="list-style-type: none"> - Colocarse equipo de seguridad (guantes, gabacha, mascarilla). - Medir 50 L de agua en recipiente de 60 L. - Medir 10 L de ácido sulfúrico con medida estandarizada. - Agitar manualmente agua mientras se agrega ácido lentamente. - Dejar tapada la solución para uso futuro en sitio seguro.
6	Desarmar placas de filtro prensa y recolectar tortas de sólido del filtro prensa en recipiente designado.
7	Lavar placas y telas de filtro prensa.
8	Armar placas y telas de filtro prensa para próximo uso.

Figura No. 7.4: Diagrama de bloque de las actividades del nuevo procedimiento de preparación y limpieza de la planta de tratamiento de aguas residuales.

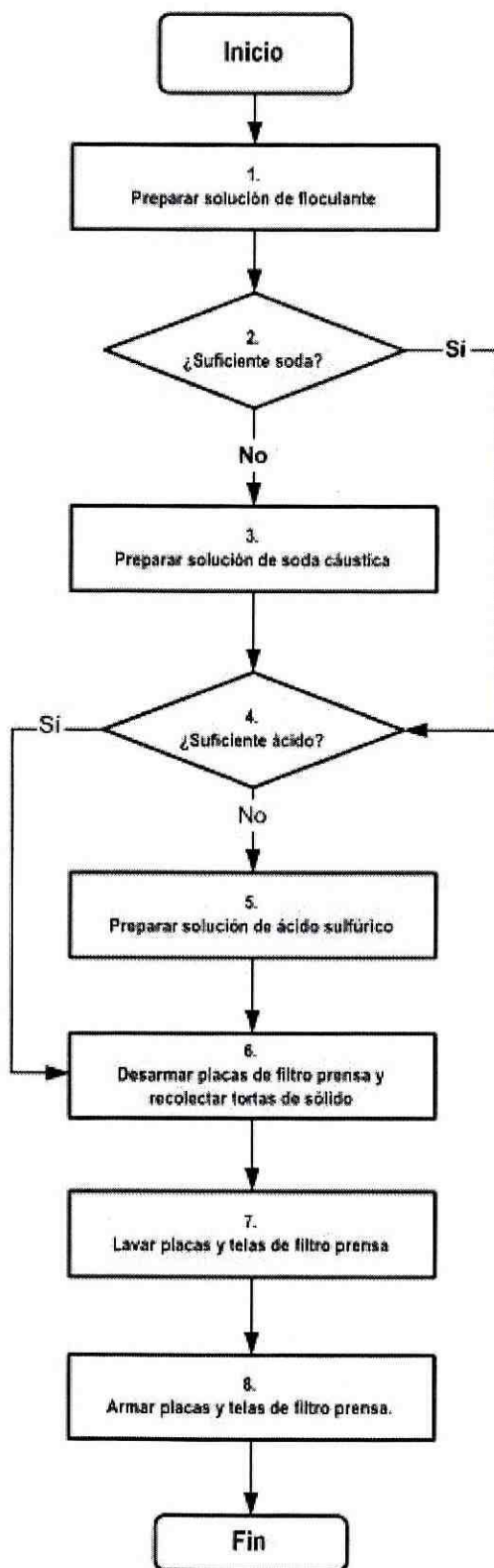
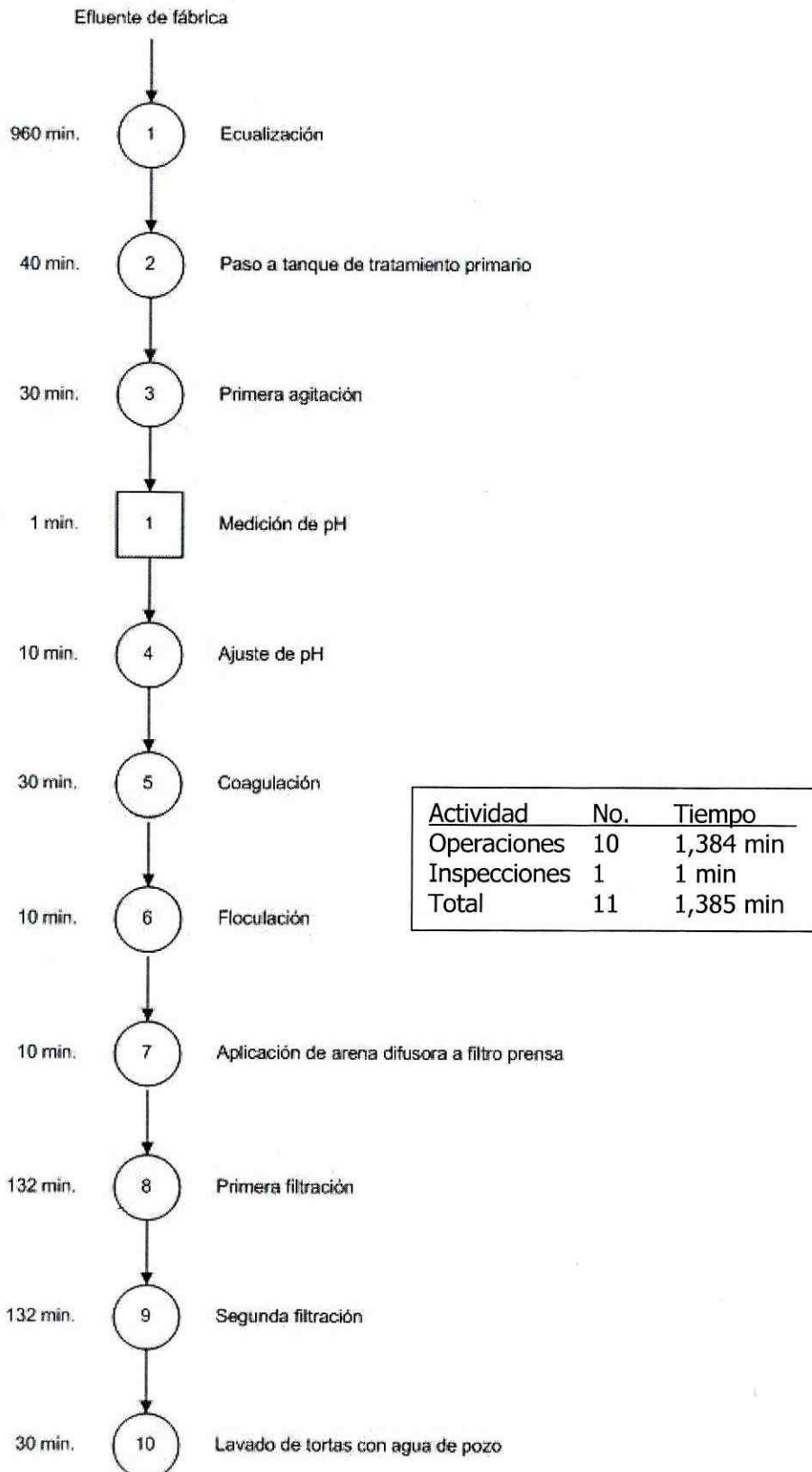


Figura No. 7.5: Diagrama de operaciones.

B. Guía para el mantenimiento del equipo en la planta de tratamiento de aguas



Antes de instalar o llevar a cabo rutinas de mantenimiento o reparaciones al equipo, lea las siguientes instrucciones para evitar poner en peligro a las personas presentes u ocasionar daños al equipo.

- Aísle todas las fuentes de energía antes de iniciar el trabajo.
- Evite llevar a cabo rutinas de mantenimiento o reparaciones mientras el equipo está en operación.
- Utilice equipo protector adecuado durante las rutinas de mantenimiento o reparación.

El equipo debe ser mantenido en una frecuencia regular y rutinaria. Lea este manual para recomendaciones de mantenimiento.

a. Agitador mecánico

Inicio

1. Revisar el nivel de aceite con el agitador apagado: el aceite debe estar nivelado con la parte inferior del agujero del nivel de aceite. No sobrellenar.
2. Rotación del impulsor: el impulsor debe rotar según las manecillas del reloj cuando es visto desde la parte superior del agitador.
3. Orificios de ventilación: deben estar libres de cualquier obstrucción para prevenir acumulación de presión, sobrecalentamiento y daño a sellos.
4. El agitador debe operar sin vibración.

Diario

1. Inspeccionar fugas de aceite.
2. Mantener el motor limpio y orificios de ventilación libres de acumulación de lodos u otros residuos.

Periódico

1. Revisar el nivel de aceite cada mes.
2. Engrasar el cojinete superior de la caja de engranaje con la grasa para cojinetes apropiada cada 100 horas de operación.

3. Cambiar aceite cada 100 horas de operación.
4. Lubricar motor cada tres meses.

b. Filtro prensa

Diario

1. Remover las tortas obtenidas del filtrado de cada placa. Raspar de las fibras filtrantes todo residuo de sólido filtrado que se haya adherido.
2. Retirar las placas y fibras para ser lavadas a profundidad con agua. Después de lavadas montarlas de nuevo.

Periódico

1. Engrasar partes móviles de la prensa hidráulica cada 3 meses.

c. Aereadores

Diario

1. Observar cada unidad y verificar que el aereador trabaje sin ruido excesivo, sin vibración, con flujo de agua y aire uniforme.

Periódico

1. Revisar que estén ajustadas las piezas de unión en la caja de motor cada 2 meses
2. Revisar si hay señales de corrosión cada 2 meses.
3. Revisar que los cables eléctricos estén en buena condición y aseguradas adecuadamente cada 2 meses.
4. Engrasar el empalme universal cada 2 meses.
5. Revisar que el propulsor y difusor estén libres de residuos, y que no tengan desgaste cada 6 meses.
6. Revisar partes móviles del motor, eje, rotor, difusor, empaques, etc. que no estén atascados o sucios. Limpiar de posible crecimiento de algas u hongos. Realizar esto cada 6 meses.

d. Bombas

Diario

1. Mantener el motor limpio y orificios de ventilación libres de acumulación de lodos u otros residuos.

Periódico

1. Revisar la lubricación del motor cada mes.
2. Cambiar empaques de motor cada 6 meses.
3. Revisar partes móviles cada 6 meses.

e. Filtro de carbón activado

Periódico

1. Realizar la operación de retrolavado del filtro una vez cada semana.
 - 1.1 Retrolavado: válvulas # 11 y 13 abiertas, válvulas # 10, 12, 14 y 15 cerradas, durante 15 minutos. Después de retrolavado abrir válvulas # 10 y 14, cerrar válvulas # 11, 12, 13 y 15, por 5 minutos. Luego retornar a posición de servicio, con válvulas # 10 y 12 abiertas, y válvulas # 11, 13, 14 y 15 cerradas.
Ver Figura No. 8.2, página 54.
2. Cambiar carbón de la unidad cada 2 años.

f. Válvulas y tubería

Diario

1. Observar válvulas y tuberías para detectar fugas, corrosión u otra anomalía.

C. Métodos de análisis para control interno

1. Sólidos totales secos a 103-105°C

Una muestra bien mezclada es evaporada en un plato de peso conocido y secada a peso constante en un horno a una temperatura entre 103 y 105°C. El aumento de peso respecto al peso del plato vacío representa el total de sólidos. Los resultados pueden no representar el peso de los sólidos disueltos y suspendidos reales en la muestras de aguas residuales.

a. Equipo

- Platos evaporadores: platos de 100 mL de capacidad hechos de porcelana, platino, o vidrio (pirex).
- Desecador
- Horno secador
- Balanza analítica

b. Procedimiento

Limpiar los platos evaporadores a 103-105°C durante una hora. Guardar los platos dentro del desecador cuando no estén en uso. Pesarlos inmediatamente después de ser usados.

Seleccionar una muestra de agua residual, y transferir un volumen de ésta bien mezclado a un plato evaporador para ser pesado. Plato deber ser previamente pesado. Evaporar hasta estar seca la muestra en un horno secador. Se debe bajar la temperatura por 2°C por debajo del punto de ebullición para evitar salpicaduras. Se debe secar la muestra en el horno a 103-105°C por al menos 1 hora. Enfríe en desecador para balancear la temperatura, y luego se debe pesar el plato con muestra seca. Realice el procedimiento hasta que el peso sea constante, o hasta que el peso sea menor al 4% del peso anterior.

c. Cálculos

$$mg_ST / L = \frac{(A - B) \times 1000}{volumen_muestra_mL} \quad \text{Ecuación No. 5}$$

donde:

A = peso de residuo seco + plato, mg

B = peso de plato, mg

2. Sólidos totales suspendidos secos a 103-105°C

Una mezcla bien mezclada de agua residual es filtrada a través de un papel filtro estándar, previamente pesado, y el residuo retenido en el filtro es secado a un peso constante a 103-105°C. El aumento de peso del filtro representa el total de sólidos suspendidos.

a. Equipo

- Papel filtro estándar
- Embudo buchner
- Quitasato de 100 mL
- Horno secador
- Balanza analítica

b. Procedimiento

Colocar papel filtro previamente pesado en embudo, y luego éste en el quitasato. Aplicar vacío y lavar el filtro con tres sucesivas porciones de 20 mL de agua destilada.

Se debe filtrar un volumen conocido de la muestra de agua residual. Lavar con tres porciones sucesivas de 10 mL de agua destilada, permitiendo completo colado entre porciones y continuar la succión por 3 minutos después de acabado el filtrado.

Cuidadosamente, remover el papel filtro del embudo y transferir al horno secador. Se debe secar la muestra en el horno a 103-105°C por al menos 1 hora. Enfríe en desecador para balancear la temperatura, y luego se debe pesar el filtro con muestra seca. Realice el procedimiento hasta que el peso sea constante, o hasta que el peso sea menor al 4% del peso anterior.

c. Cálculos

$$mg \text{ _SST} / L = \frac{(A - B) \times 1000}{\text{volumen _ muestra _ mL}}$$

Ecuación No. 6

donde:

A = peso de residuo seco + filtro, mg

B = peso de plato, mg

3. Sólidos sedimentables

Los sólidos sedimentables, SS, en aguas residuales puede ser determinado y reportado tanto en una base volumétrica (mL/L) o gravimétrica (mg/L). Se describirá a continuación la forma volumétrica.

a. Equipo

- Cono Imhoff

b. Procedimiento

Llenar el cono Imhoff hasta la marca de 1 L con una muestra bien mezclada del agua residual. Dejar por 45 minutos sedimentar, agitando muy levemente los lados del cono con una varilla. Luego dejar sedimentar por otros 15 minutos. Reportar el volumen de sólidos sedimentables en el cono, según la escala, como mL/L. Si el sedimento contiene burbujas o bolsas de líquido atrapadas entre las partículas sedimentadas, se debe estimar su volumen y restarlo del volumen de SST. Donde exista una separación de sedimento y haya materia flotando, no debe considerarse como sólido sedimentable.

Tabla No. 7.5: Estado de la planta de tratamiento de aguas residuales al inicio y al final de esta evaluación.

Parámetro	Condiciones Iniciales			Condiciones Finales		% Mejoría
	Entrada	Salida	% Remoción	Salida	% Remoción	
pH	5.9	7.6	-	7.4	-	-
Sólidos Totales (mg/L)	5649.7	3324.3	41.2%	181.0	96.8%	135.2%
Sólidos Sedimentables (mL/L)	22.7	8.7	61.8%	0.6	97.4%	57.5%
Sólidos Suspendidos Totales (mg/L)	3463.3	2252.3	35.0%	37.7	98.9%	182.9%
DBO ₅ (mg/L)	427.7	39.0	90.9%	16.7	96.1%	5.7%
DQO (mg/L)	2459.0	1665.0	32.3%	38.3	98.4%	204.9%
Cloro residual (mg/L)	3.3	0.0	100.0%	0.0	100.0%	0.0%
Grasas y aceites (mg/L)	114.7	16.0	86.1%	8.3	92.8%	7.8%
Color químico (unidades Pt-Co)	72.0	48.7	32.4%	20.0	72.2%	122.9%

Tabla No. 7.6: Cumplimiento de los límites permisibles según propuesta de ley de CONAMA sobre el "Reglamento de Aguas Residuales" de 1999.

Parámetro	Límites Permisibles			Condiciones de Descarga en la Planta	
	A 3 años	A 6 años	A 9 años	Iniciales	Finales
pH	6 a 9	6.5 a 8.5	6.5 a 8.5	7.6	7.4
Sólidos Sedimentables (mL/L)	2	1.5	1	8.7	0.6
Sólidos Suspendidos Totales (mg/L)	1500	1000	400	2252.3	37.7
DBO ₅ (mg/L)	500	300	150	39.0	16.7
DQO (mg/L)	750	500	300	1665.0	38.3
Cloro residual (mg/L)	15	5	3	0.0	0.0
Grasas y aceites (mg/L)	150	100	80	16.0	8.3
Color químico (unidades Pt-Co)	150	100	50	48.7	20.0
Hidrocarburos (mg/L)	40	30	20	-	-

Tabla No. 7.7: Rendimiento del filtro prensa.

Parámetro	Filtrado del tanque de tratamiento primario antes de cambio de químicos	Filtrado del tanque de tratamiento primario después de cambio de químicos	Filtrado del tanque sedimentador después de cambio de químicos
Masa de torta (mg torta/L)	367.5	3077.9	400.7
Contenido de humedad en torta (%)	79.4	24.1	18.5
Rendimiento (mg sólido/L)	77.7	2334.9	326.7

Tabla No. 7.8: Rendimiento del tanque de tratamiento biológico.

DBO₅ Entrada (mg/L)	DBO₅ Salida (mg/L)	% de remoción
384	39	90.0%

Tabla No. 7.9: Rendimiento del filtro de carbón activado.

DQO Entrada (mg/L)	DQO Salida (mg/L)	% de remoción
203.7	32.7	84.0%

Tabla No. 7.10: Disposición de residuos.

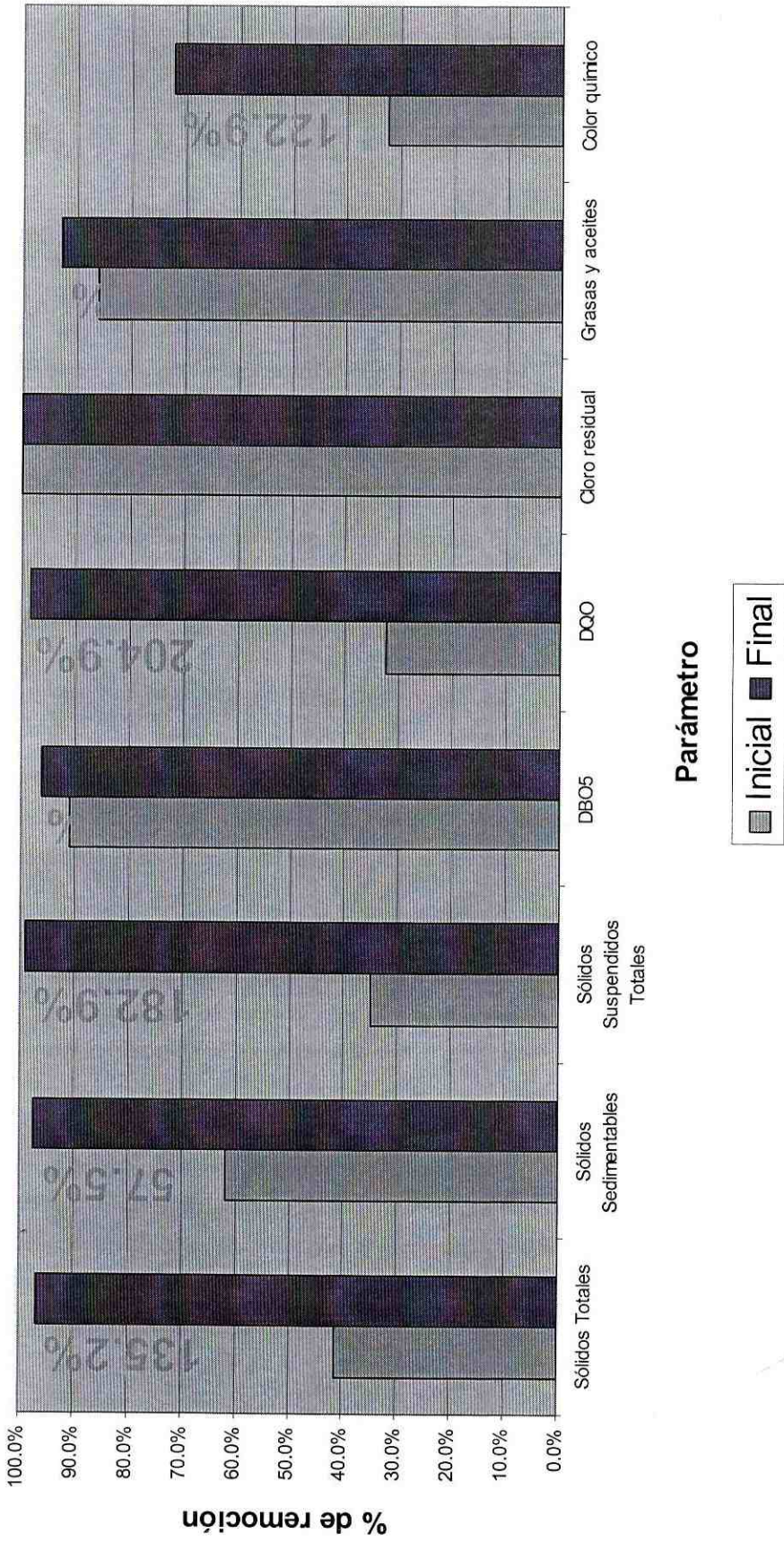
Residuo	Cantidad	Disposición
Sólidos de filtro prensa	400.4 kg/mes	Incineración
Carbón gastado de filtro	-	Venta al proveedor cada 2 años

Tabla No. 7.11: Ahorros en químicos debido a cambios en tratamiento primario

Químico	Consumo (kg/mes)	Precio (Q/kg)	Costo mensual (Q)
Sulfato de aluminio	275	2.11	579.15
Coagulante	8.8	12.15	106.92
Floculante	0.88	25.50	22.45
AHORRO MENSUAL		Q 449.78 (77.7%)	

Figura No. 7.6: Remoción de los parámetros de descarga al inicio y al final.

Remoción de los parámetros de descarga al inicio y al final de este trabajo



VIII. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

A. Evaluación inicial

1. Descripción del proceso y del equipo que conforma la planta de tratamiento de aguas: La planta de tratamiento de aguas residuales donde se realizó este trabajo tiene una capacidad de tratar 8 m^3 de agua por día en un turno de 8 horas, o incluso hasta 16 m^3 por día si se trabaja con dos turnos de personal, también de 8 horas cada uno. La Figura No. 8.5 indica que las operaciones se llevan 1,385 minutos en total; pero de éstos se puede no tomar en cuenta el tiempo de equalización de 960 minutos (32 horas, que equivalen a dos días de trabajo con 2 turnos de 8 horas), ya que durante este tiempo el operario realiza el resto de tareas, y puede contarse como un tiempo muerto, el cual transcurre durante todo el día de operación. Así, el tiempo real de operación es de 435 minutos, lo que corresponde a 7 horas de trabajo, poco menos de un turno de trabajo al día.

Este tiempo de operación sólo sirve para darse una idea de la capacidad de la planta, aunque la determinación de las operaciones y la cuantificación del tiempo de las actividades no se realizó durante esta evaluación inicial, sino hasta la parte del establecimiento del procedimiento de operación de la planta.

Así, la capacidad la determina el tanque equalizador en la entrada del proceso, el cual es de 9 m^3 , así como el tiempo que tarda todo el proceso respecto a las labores del operario, lo cual dura 7 horas. Por esto, se dijo anteriormente que la capacidad de la planta es de $8 \text{ m}^3/\text{día}$, en un turno de 8 horas.

Actualmente la planta trabaja a $3.9 \text{ m}^3/\text{día}$, según la Tabla No. 13.1. La planta recibe aguas de lavado de reactores y barriles, de la producción de químicos auxiliares para la industria textil. Entre estos químicos se encuentran surfactantes, fijadores, lubricantes, búferes ácidos, estabilizadores de peróxido y cloro, suavizantes, en su mayoría productos ácidos, y en menor cantidad dispersantes y búferes alcalinos. Todos estos productos llegan bastante diluidos, ya que para el lavado de reactores y barriles únicamente se utiliza agua caliente y vapor en grandes cantidades. Los parámetros con que estas aguas de entrada ingresan a la planta aparecen en la Tabla No. 13.2.

El tanque de ecualización recibe el agua de entrada donde se acumula para después ser pasada al tanque de tratamiento primario, también de 9 m^3 de capacidad. En este tanque el pH es ajustado entre 7 y 8. Por lo general, el pH es ácido, alrededor de 6, por lo que se utiliza soda cáustica para ajustarlo. Ver Tabla No. 13.2.

Después de ajustado el pH se aplica sulfato de aluminio como coagulante para ayudar desestabilizar sólidos disueltos y así permitir un mejor filtrado. El rango de pH al que se ajusta se debe a que es el rango de mayor desempeño del sulfato de aluminio. Se agrega alrededor de 25 kg de sulfato por cada 8 m^3 aproximadamente para el tratamiento del agua residual. No existe un tiempo definido de tratamiento, por lo que a veces se deja actuar más o menos tiempo al sulfato. El tratamiento primario se realiza alrededor de cada dos días, aunque muchas veces por no existir un procedimiento de trabajo se deja pasar el agua residual sin tratamiento hacia el próximo paso.

Luego de tratada, el agua residual se hace pasar por gravedad hacia una bomba centrífuga de 3.73 kW que a su vez bombea dicha agua a través de un filtro prensa. En este filtro prensa se debe remover la mayor cantidad de sólido suspendido posible, pero inicialmente no se lograba remover nada. No se lograba la formación de tortas de sólidos en las placas, sólo se obtenía una pasta con contenido de humedad muy alto. Ver Tabla No. 13.4. La bomba de 3.73 kW también está conectada a un tanque donde se prepara una solución de arena difusora, la cual se hace circular por el filtro prensa antes del filtrado, de modo que la arena quede impregnada en las fibras filtrantes entre cada placa y ayude a la mejor difusión del líquido a filtrar, y por ende la filtración sea más fácil.

El filtrado, al salir del filtro prensa, llega al tanque de tratamiento biológico, de 84 m^3 de capacidad. En dicho tanque hay dos aereadores flotantes que inyectan el aire necesario para que las bacterias presentes en el tanque biodegraden la mayor parte de DBO_5 posible. Dicho tanque tiene alrededor de 21 días de tiempo de retención, ya que cada dos días ingresan a éste 8 m^3 , y para llenar 84 m^3 se necesitarían 21 días.

El tanque biológico tiene a su lado otro tanque de igual capacidad, situado medio metro más abajo. Cuando el tanque biológico se rebalsa, cae a este segundo tanque el cual funciona como un sedimentador. Sin embargo, por no tener un desnivel en el fondo para ayudar a eliminar los lodos sedimentados, es necesario hacerlos recircular. Este sedimentador posee un arreglo de tuberías en el fondo conectadas a una bomba sumergible, la cual hace recircular los lodos activados hacia el tanque biológico a un flujo aproximado de 1.25 L/s. Ver Tabla No. 13.7. Debido a la turbulencia formada, no se favorece la sedimentación.

El sobrenadante del tanque de sedimentación es bombeado con la misma bomba centrífuga de 3.73 kW para ser filtrado de nuevo con el filtro prensa. El filtro prensa remueve otra porción de los sólidos suspendidos en el agua. Luego ésta se hace pasar a otro tanque de 1 m^3 , donde se acumula para luego ser filtrada con carbón activado granular.

Una bomba centrífuga de 0.37 kW, con un medidor de nivel, bombea automáticamente el agua de este tanque hacia la columna de carbón activado, de donde sale el agua ya tratada para ser depositada en una fosa natural, la cual se encuentra a la orilla de un río que atraviesa la propiedad. Esta fosa sirve como un filtro natural, antes de que el agua llegue a dicho río.

El diagrama de flujo del proceso puede verse en la Figura No. 8.1. La descripción de cada equipo puede verse en la Tabla No. 8.7, y las válvulas en la Tabla No. 8.8.

2. Muestreo y análisis del afluente y efluente de la planta de tratamiento de aguas en sus condiciones actuales: Se tomó tres muestras del agua de entrada y tres muestras del agua de salida durante una semana. Las muestras del agua de entrada se tomó del tanque de equalización, y las de salida se tomaron a la salida del filtro de carbón activado. Los análisis de DBO₅, DQO, cloro residual, grasas y aceites residuales, y color químico, fueron realizados por un laboratorio externo. De las mismas muestras se tomó una fracción para llevar a cabo en el laboratorio de la empresa los análisis de pH, sólidos totales, sólidos sedimentables totales, y sólidos en suspensión.

En la Tabla No. 8.2 se puede observar cómo se encontraba funcionando inicialmente la planta en relación con los parámetros de descarga. Dichos parámetros se comparan en dicha tabla con los límites establecidos por la propuesta de ley de CONAMA de 1999. En dicha propuesta de ley existen tres límites para cada parámetro, donde se exige su cumplimiento a 3, 6 y 9 años.

Se puede observar en la Tabla No. 8.2 que inicialmente la planta no cumplía con los límites establecidos para 3 años en cuanto a sólidos sedimentables (SS), sólidos suspendidos totales (SST) y demanda química de oxígeno (DQO).

La demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), cloro residual, grasas y aceites, y color químico cumplen con los límites establecidos incluso a 9 años.

3. Evaluación del desempeño del equipo: Se evaluó el desempeño de los siguientes equipos dentro de la planta: el filtro prensa, el tanque de tratamiento biológico, y el filtro de carbón activado. Para cada uno se evaluó los parámetros pertinentes antes y después de que el agua tratada pasara por cada uno de ellos.

i. Filtro prensa: El filtro prensa cuenta con una serie de once placas de polipropileno de 0.65 m de largo y alto, y 0.06 m de ancho. Cada placa utiliza una tela sintética como medio filtrante, donde se acumula la torta de sólido filtrado. Dichas telas son las originales con las que el fabricante entregó el filtro prensa. Cada una de estas telas se compone por una parte posterior y otra anterior a cada placa, conectadas por un cilindro formado por la misma tela en medio de ambas caras, el cual atraviesa cada placa por un orificio en cada una de ellas. Por este orificio es por donde ingresa el líquido a filtrar al filtro prensa.

Como primera evaluación, se determinó el flujo volumétrico promedio que atraviesa al filtro. Para ello se hizo circular por éste agua proveniente del pozo de la empresa, la cual se obtiene abriendo la válvula No. 7 según el diagrama de flujo, e incrementando su presión a través del filtro con la bomba D. Esta agua, por no tener una concentración de sólidos perceptible, puede suponerse que fluirá a su máximo por las placas y telas del filtro prensa. Se midió el volumen de agua de salida del filtro hacia el tanque de tratamiento biológico recolectada en 1 segundo. Se hizo cinco repeticiones, y los valores obtenidos pueden verse en la Tabla No. 13.3. El flujo volumétrico promedio a través del filtro se estimó entonces alrededor de 1.08 L/s.

Para evaluar el desempeño del filtro prensa dentro del proceso, se procedió a hacer pasar por éste el contenido total del tanque de tratamiento, siendo esto alrededor de 8 m³. El agua que proviene de este tanque ha sido ajustada a un pH de entre 7 y 8, y ha sido tratada con sulfato de aluminio, que funciona como coagulante, para ocasionar mayor presencia de sólidos en suspensión de modo que puedan filtrarse después.

Se tomó el tiempo que tardó los 8 m³ del tanque de tratamiento en pasar por medio del filtro prensa, con ayuda de la bomba de 3.73 kW. También, al finalizar el filtrado, se retiró los sólidos acumulados en las placas y se cuantificó por medio de su peso. Por último se les calculó el porcentaje de humedad. Se realizó esta operación 3 veces. Los resultados pueden ser observados en la Tabla No. 13.2.

Basándose en esta primera evaluación, se puede ver que el rendimiento del filtro prensa es muy bajo. De las placas se obtuvo poco sólido, y éste no fue una torta seca como debería esperarse, sino una pasta muy húmeda y difícil de retirar de las telas. Se puede suponer que éste es el primer causante de los niveles de los parámetros con que se está descargando el agua a la salida de la planta, los cuales no cumplen con los límites de la propuesta de ley de CONAMA. Ya que el contenido de humedad obtenido en las tortas removidas es alto, se puede suponer que la cantidad de sólidos totales en el agua de salida del filtro es bastante alta. Esto influye directamente en los SS, SST y DQO, los cuales son los parámetros que están por encima de los límites permisibles.

Además, el tiempo de filtrado fue de más de 4 horas, lo cual retrasa el proceso. El paso de los 8 m³ en 4.4 horas promedio, equivale a un flujo volumétrico de 0.5 L/s. Este flujo es menos de la mitad del

flujo estimado en la evaluación previa utilizando agua sin contenido de sólidos considerable, el cual fue de 1.08 L/s.

De estas pruebas se puede suponer que el medio filtrante no es el adecuado para el tipo de sólido que trae el agua a filtrar; o visto desde otro punto de vista, el tipo de sólido no es el adecuado para el medio filtrante con que se cuenta.

En un principio, se pensó evaluar otros medios filtrantes como lona de algodón en el filtro prensa, pero pruebas sencillas en el laboratorio de la empresa demostraron que aún la fibra sintética original dejaba filtrar más rápido el líquido y retuvo más sólido que una lona de algodón, aún sólo con la ayuda de la gravedad.

Ya que esta evaluación también contempla evaluar el uso de los químicos utilizados en la planta normalmente, es decir el sulfato de aluminio, su dosificación y la opción de químicos alternativos, se decidió hacerla antes de proseguir con la medición del desempeño del resto del equipo. Se esperaba así mejorar la calidad del sólido que acarrea el agua al filtrar para mejorar este proceso. Como se explicará después, se logró sustituir el sulfato de aluminio por otro coagulante más eficiente, un polímero orgánico que funcionó mejor a una dosis mucho menor. En conjunto con este coagulante, también se empleó un floculante aniónico a una dosis muy pequeña, el cual ayuda a compactar más los sólidos en suspensión, formando un flóculo relativamente grande, más fácil de filtrar.

Con el agua del tanque de tratamiento primario habiendo sido tratada de esta nueva forma, se volvió a correr evaluaciones de filtrado en el filtro prensa, de la misma forma en que se hicieron con anterioridad. Los resultados de esta segunda evaluación se pueden observar en la Tabla No. 13.5.

Los resultados fueron satisfactorios, ya que con el cambio de tratamiento al agua de entrada al filtro prensa, la eficiencia aumentó en un 2,905.0%, según los valores de la Tabla No. 8.3. La cantidad de sólido real retenido en las placas, es decir sin tomar en cuenta la masa de agua en la torta según los porcentajes de humedad obtenidos, aumentó de 77.7 mg/L promedio en la primera evaluación, a 2,334.9 mg/L promedio en la segunda evaluación.

El tiempo de filtrado también se disminuyó considerablemente, al realizarse ahora en la mitad del tiempo. Se bajó de 4.4 horas promedio en la primera evaluación, a 2.2 horas promedio en la segunda. Tomando en cuenta el volumen de control que es de 8 m³, en 2.2 horas, corresponde a un flujo volumétrico de 1.01 L/s, el cual es sólo 6% por debajo del flujo calculado con el agua de pozo, libre de sólidos.

Este gran salto en la eficiencia del filtro prensa tendrá una incidencia muy grande en el rendimiento del resto del equipo, posterior a esta operación unitaria. También, afectará de una manera

muy positiva a las condiciones del agua de salida de la planta, para así lograr cumplir con los límites de los parámetros establecidos.

El proceso requiere que se haga un segundo filtrado, con agua proveniente del tanque de sedimentación después del tratamiento biológico. Se realizó de igual manera pruebas para verificar la cantidad de sólidos removida en esta segunda filtración, como en las pruebas anteriores. Los resultados aparecen en la Tabla No. 13.6.

ii. **Tanque de tratamiento biológico:** Para evaluar el desempeño del tanque de tratamiento biológico, se realizó dos análisis: la cantidad de oxígeno disuelto (OD) en el tanque y la cantidad de DBO_5 removido en el proceso biológico. Ambos análisis se hicieron en un laboratorio externo.

Se encontró en Carlini (2003) que la distribución de aire en un tanque de tratamiento biológico determina si el sistema de aireación está funcionando adecuadamente. El licor mezclado debe ser aireado de modo que los microorganismos aeróbicos reciban suficiente oxígeno como para permanecer vivos y saludables. También es necesario verificar que se cuente con un mezclado adecuado para mantener a los microorganismos en contacto con toda la materia orgánica y el oxígeno. Para verificar que la distribución de aire en el sistema sea la adecuada, se debe analizar el OD en el tanque, el cual no debe estar a menos de 0.5 mg/L, y preferentemente de 1.5 a 4 mg/L en todo el tanque. Si se tiene el OD en este rango significa que los aereadores, y en especial sus difusores de aire, están trabajando adecuadamente.

Se tomó entonces, durante una semana, tres muestras del agua a tratar en puntos distintos del tanque biológico. Se analizó su contenido de OD, y se presenta los resultados en la Tabla No. 13.8.

El tanque biológico de esta planta se encuentra dentro del rango recomendado de OD, al estar en 2.2 mg/L promedio. Esto indica que los aereadores están funcionando eficientemente para distribuir oxígeno suficiente a los microorganismos aeróbicos del proceso.

El otro parámetro evaluado para determinar el desempeño del tanque biológico es la cantidad de DBO_5 removido a la salida respecto a la entrada del tanque. Al igual que en los otros análisis, se trabajó en triplicado. Las muestras fueron tomadas a la salida del filtro prensa, y del rebalse hacia el tanque de sedimentación.

Los resultados obtenidos del análisis de DBO_5 a la entrada y salida del tanque aparecen en la Tabla No. 13.9. Se calculó el porcentaje de remoción de DBO_5 , aunque no puede considerarse realmente esta información, ya que las muestras tomadas no son del mismo volumen de control. Sin embargo, se obtiene una idea de cuánta DBO_5 es removida porcentualmente.

Se obtiene así una remoción de alrededor del 90% de la demanda biológica en el agua tratada gracias a la aireación en el sistema. Esto confirma que la cantidad de OD en el tanque es la adecuada, y que los microorganismos aerobios están trabajando satisfactoriamente. Las pruebas fueron realizadas después del cambio de químicos hecho en el tanque de tratamiento primario.

El tratamiento biológico también ayuda a separar los sólidos que aún acarrea el agua, por lo que se hace pasar en un segundo filtrado por el filtro prensa. La evaluación de este filtrado se puede ver en la evaluación de desempeño del filtro, en la sección anterior.

Un último indicador del funcionamiento del tanque biológico es la presencia de espuma en su superficie. Según Carlini (2003), la presencia de algo de espuma en el tanque de aireación es normal en el proceso de lodos activados. Normalmente, en una planta bien operada, del 10% al 25% de la superficie del tanque de aireación se encuentra cubierta por una capa de espuma liviana, con una altura de 5 a 8 cm.

En todo el tiempo de esta evaluación no se observó una espuma anormal. Siempre estuvo bastante moderada, a no más de 5 cm de altura, y cubriendo muy poca de la superficie del tanque. Esto vuelve a indicar que las condiciones de operación en el tanque biológico son bastante buenas. Aún así, se debe estar pendiente de observar alguna formación de espuma excesiva, espuma blanca y consistente, espuma café, o espuma muy oscura o negra. Estos son indicadores de que algo no anda bien, según Carlini (2003).

iii. Filtro de carbón activado: El agua filtrada proveniente del filtro prensa llega a un tanque recolector para luego pasar a un último filtrado en el filtro de carbón activado. Para medir su desempeño, se tomó muestras en triplicado a la entrada y salida del filtro. El parámetro utilizado para medir el desempeño fue el DQO, ya que se consideró como el parámetro que aún podía bajarse más para la descarga. El análisis fue hecho en un laboratorio externo. Los resultados aparecen en la Tabla No. 13.10.

El DQO de entrada al filtro ya está en valores por debajo de los requeridos por la propuesta de ley de CONAMA. Por esto, se podría pensar que el filtro de carbón activado es un lujo para la planta, ya que el DBO₅ también ya se obtenía a la salida del tratamiento biológico en valores por debajo del permisible. En la evaluación inicial, fueron el DBO₅, DQO y SS, los parámetros que no cumplían. Los SS, también debieron bajar considerablemente con el aumento de eficiencia en el primer filtrado.

El filtro evaluado en estas pruebas es distinto al que se utilizaba al momento de hacer la evaluación inicial de la planta a la entrada y salida. La empresa decidió cambiar el filtro de carbón antiguo por uno nuevo mientras se hacía esta evaluación.

En la Tabla No. 13.11 aparecen los parámetros de descarga evaluados en triplicado a la salida de la planta después de los cambios hechos en ésta, comparados con los promedios de entrada de la

evaluación inicial. Se aprecia que todos los parámetros se disminuyeron por encima del 90%, excepto el color químico el cual fue en un 70%.

4. Evaluación del uso de químicos en el proceso: Como se mencionó anteriormente, en la sección que habla de la evaluación del desempeño del filtro prensa en el primer filtrado, la calidad de los sólidos que entraban al filtro prensa no era la adecuada para un filtrado eficiente. Fue por eso necesario realizar una evaluación de los químicos utilizados en el tratamiento primario del proceso.

Inicialmente, la planta utiliza soda cáustica en el tratamiento primario para neutralizar las aguas residuales. Luego utiliza sulfato de aluminio como coagulante para favorecer la presencia de sólidos en suspensión para facilitar el filtrado. Sin embargo, basándose en la evaluación inicial del filtro prensa, se observó que el sulfato de aluminio no cumple con su función, dando un flóculo pobre, es decir pequeño y de difícil filtrado. El sulfato de aluminio también es utilizado para neutralizar las aguas cuando éstas llegan alcalinas a la planta de tratamiento, ya que el sulfato tiene carácter ácido.

Se evaluó entonces una serie de polímeros, tres de ellos coagulantes y otros cuatro floculantes, y las distintas combinaciones entre ellos para sustituir al sulfato de aluminio. En la Tabla No. 13.12 se describe los químicos evaluados.

Para evaluarlos, se realizó varias pruebas de jarras, tomando muestras de 5 L del tanque de equalización para luego evaluarlas en el laboratorio. Se evaluó la combinación de cada coagulante con cada floculante, ajustando o no el pH. El pH de las muestras tal cual estaba por debajo de 7, es decir ácido, y se llevó a 7.5 con una solución de soda cáustica. Se escogió trabajar con pH ligeramente ácidos y ligeramente básicos, porque son estos rangos donde los coagulantes y floculantes mejor trabajan.

Dado la cantidad de pruebas, lo más conveniente fue calificar las muestras tratadas basándose en la turbidez del sobrenadante, cantidad de sedimento o flóculo, y calidad de éste último. Se utilizó la comparación entre muestras, a criterio del evaluador para asignar una calificación a cada prueba. El método de prueba y error siempre se ha utilizado para determinar los químicos necesarios para el tratamiento primario en plantas de tratamiento de aguas residuales.

De inicio, se evaluó los cuatro coagulantes, utilizando sólo dos floculantes, uno catiónico y otro aniónico, para identificar al coagulante que mejor desempeño tuvo. Las dosis se dejaron fijas en 200 ppm para coagulantes y 10 ppm para floculantes. Luego de identificado el mejor coagulante, se utilizó los otros dos floculantes para seleccionar al floculante que mejor trabajó con el coagulante seleccionado. En todas estas pruebas se varió el pH entre ácido y ligeramente alcalino, para identificar a que pH se obtuvo mejores resultados. Los resultados de estas pruebas aparecen en la Tabla No. 13.13.

Luego de identificada la mejor combinación de pH, coagulante y floculante, se procedió a evaluarlos a distintas concentraciones de aplicación. Estas pruebas aparecen en la Tabla No. 13.14.

Se seleccionó entonces, trabajar a un pH de 7.5, lo cual se puede expandir a un rango de 7-8; los floculantes aniónicos trabajan mejor en este rango de pH. El coagulante seleccionado fue el polímero orgánico a partir de poliDADMAC a 100 ppm, en conjunto con el floculante aniónico D a 10 ppm. Dicha combinación dio los mejores resultados en cuanto a turbidez y flóculo formado. Dichas condiciones fueron implementadas en la planta, y luego se procedió a la evaluación del primer filtrado y el desempeño del resto del equipo, donde se obtuvo resultados muy satisfactorios los cuales ya se mencionaron.

En la Tabla No. 13.15 se muestra una idea del ahorro que significó el cambio de químicos en el tratamiento primario. Los polímeros son productos más caros por kg que el sulfato de aluminio; sin embargo su desempeño es mucho mayor al utilizarse cantidades bastante menores a la utilizada con la sal. Se puede ver que el ahorro mensual es de Q449.78 al mes, lo que significa un ahorro del 77.7% respecto a lo que se gastaba en sulfato de aluminio.

B. Desarrollo de nuevos procedimientos

1. **Identificación y disposición de residuos:** Esta planta cuenta con dos tipos de desechos únicamente. Los sólidos retirados del filtro prensa, y el carbón gastado del filtro de carbón activado.

El cambio de químicos realizado en el tratamiento primario ha mejorado en mucho la remoción de sólidos del proceso. Esto incidió directamente en la cantidad de sólidos que se genera en el filtrado por filtro prensa. Ver Tablas No. 13.4, 13.5 y 13.6. De inicialmente recolectar sólo 14.3 kg de torta por filtrado, con 79.4% de humedad, se llegó a 36.4 kg por filtrado, con sólo 23% de humedad aproximadamente.

Ya que la planta trabaja sólo en días hábiles, y se hace tratamiento cada dos días, se obtiene sólido del filtrado durante 11 días por mes. Esto significa 400.4 kg de sólido proveniente del filtro prensa al mes.

Las opciones que propone la literatura para disponer de este tipo de desechos son: su utilización en suelos, su disposición en un relleno sanitario, o su incineración. Ya que no existe un relleno sanitario adecuado en Guatemala, las únicas dos opciones que quedan son las otras.

En la Tabla No. 13.25 aparecen límites encontrados en la literatura sobre la cantidad permisible de varios metales en sólidos a ser utilizados en suelos. Sin embargo, no se pudo verificar que los sólidos que se obtienen de esta planta de tratamiento cumplan con dichos límites. No se logró realizar un análisis al

respecto. Dado la naturaleza de los productos que elabora esta fábrica, es muy probable que se acarree una buena parte de metales. Pero en base a este trabajo, no se puede recomendar su utilización en suelos hasta no comprobar su contenido de los metales indicados.

Así, queda como única opción su incineración. Se cotizó en una empresa especializada en incineración de desechos, y se obtuvo un precio de Q8/kg de desecho. Dados los 400 kg generados al mes, esto equivale a Q3,200 al mes por motivo de incineración de desechos de la planta de tratamiento de aguas residuales. Es un gasto relativamente caro, pero por ahora es la única opción.

2. **Establecimiento de procedimientos de mantenimiento:** Para establecer las rutinas de mantenimiento simplemente se siguió las recomendaciones del fabricante para cada equipo. En el apéndice B se recopila las recomendaciones para el agitador, filtro prensa, aereadores, bombas, filtro de carbón activado y, válvulas y tuberías.

La mayoría de rutinas son sencillas, de simple observación, para facilitar al operador su realización. El cumplimiento de estas rutinas ayudará a prolongar la vida del equipo, y por ende de la planta.

3. **Establecimiento de muestreos y análisis de parámetros en la entrada y salida de la planta:** El reglamento de aguas residuales que CONAMA propuso sugiere que los análisis de los parámetros de descarga se obtendrán de muestras compuestas que resulten de la mezcla de las muestras simples, tomadas en el sitio y momento (CONAMA, 1999)

Para una fábrica generadora de aguas residuales que opera entre 12 y 18 horas al día, sugiere CONAMA tomar 6 muestras al día, de no menos de 2 horas de diferencia entre éstas, ni más de 3 horas. Esto será difícil de implementar ya que, a pesar que la fábrica trabaja 16 horas diarias en dos turnos, el operador de la planta de tratamiento de aguas residuales sólo trabaja un turno de 8 horas. Además, la descarga final no se inicia hasta ya pasado buena parte del turno de trabajo, quedándose descargando después de que el operador se ha ido.

Así, se dispone que el operador tomará muestras de la descarga, a la salida del filtro de carbón activado, dos veces por semana. Se tomará una muestra de 1 L, volumen suficiente para llevar a cabo en el laboratorio interno los análisis de los parámetros exigidos por la propuesta de ley, para los cuales se cuenta con el equipo necesario.

El laboratorio interno cuenta con el equipo necesario para realizar los análisis de sólidos totales (ST), sólidos sedimentables (SS), sólidos suspendidos totales (SST), y pH. Estos métodos se describen en el apéndice C.

El resto de análisis que exige la propuesta de ley de CONAMA, es decir la DBO₅, DQO, cloro residual, grasas y aceites totales, y color químico, serán realizados en un laboratorio externo. La frecuencia de estos análisis se deberá hacer al menos una vez por mes. Hasta que no exista una ley aprobada en Guatemala que obligue a realizar estas pruebas con distinta frecuencia, se harán como se sugiere aquí estrictamente para control interno de la empresa.

4. Establecimiento de un procedimiento de operación de la planta: Según la evaluación realizada a esta planta, se determinó que la capacidad de la planta, con un solo turno de trabajo de 8 horas, es de 8 m³ al día. Actualmente, la planta trabaja a la mitad de su capacidad, alrededor de 4 m³ al día. Ver Tabla No. 13.1. Debido a esto, se dispone que el operario deberá realizar labores de tratamiento de aguas residuales en la planta una vez cada dos días. Así, podrá utilizar el día entre cada tratamiento para preparar soluciones y realizar limpieza del equipo.

De este modo, la planta contará con un procedimiento de operación, y un procedimiento de preparación y limpieza. Ambos procedimientos se describen en las Tablas No. 8.9 y 8.10, y se ilustran con las Figuras No. 8.3 y 8.4.

En la Figura No. 8.5 aparecen los tiempos que toma realizar las actividades del procedimiento de operación. Basándose en las evaluaciones de rendimiento del equipo, se observó que los filtrados en el filtro prensa llevan cada uno alrededor de 2 horas, más el tiempo del tratamiento primario y traslado del agua entre los tanques, el tiempo total está alrededor de las 7 horas. Por esta razón, actualmente se necesita sólo de un turno de 8 horas para operar la planta.

El procedimiento de preparación y limpieza se hace necesario, ya que no se tendría el tiempo de preparar soluciones y limpiar el filtro prensa en un día de operación. Además, la preparación previa de las soluciones, ayudará a estar preparado al operador para la operación de la planta al día siguiente sin tener que perder tiempo debido a éstas. Es importante hacer notar que la preparación de la solución de floculante debe llevar al menos 4 horas de maduración con agitación. Ya que no se cuenta con agitación para preparar dicha solución, se deberá dejar madurar de un día para el otro a modo de asegurar una hidratación completa del polímero.

En cuanto a seguridad del operador de la planta, deberá trabajar siempre con guantes de hule, gabacha sobre su uniforme, y lentes protectores. Cuando prepare las soluciones, sobre todo la de ácido y soda, deberá utilizar mascarilla protectora.

IX. CONCLUSIONES

– La planta inicialmente no cumplía con todos los límites de los parámetros de descarga de aguas residuales según la propuesta de CONAMA de 1999, siendo éstos los sólidos sedimentables (SS), sólidos suspendidos totales (SST), y demanda química de oxígeno (DQO).

– Según la evaluación del desempeño del equipo, se determinó que el tratamiento primario inicial de la planta con sulfato de aluminio no era el adecuado, y esto incidía directamente en un pobre desempeño del filtro prensa y en los parámetros de descarga de la planta.

– El desempeño del filtro prensa se mejoró en un 2,905%, con incidencia directa en el funcionamiento general de la planta. Dicho incremento se debió al empleo de un coagulante polimérico a partir de poliDADMAC (dialil-dimetil cloruro de amonio) a una dosis de 100 ppm, y de un floculante aniónico en polvo basado en poliamina, con una dosificación de 10 ppm.

– El cambio de químicos en el tratamiento primario significa un ahorro de Q449.78 mensuales con respecto al tratamiento anterior con sulfato de aluminio (reducción de un 77.7% del costo).

– Los residuos producidos por la planta son las tortas de sólidos removidas del filtro prensa, y el carbón agotado del filtro de carbón, el cual será vendido después de 2 años de uso al mismo proveedor.

– Las tortas de sólido del filtro prensa serán acumuladas y llevadas a incinerar una vez al mes, a un costo de Q3,200 al mes (400 kg/mes de sólido a Q8/kg por incineración).

– La planta remueve el 96.8% de los sólidos totales en la salida respecto a la entrada.

– La planta remueve el 97.5% de los sólidos sedimentables en la salida respecto a la entrada, y cumple con los requisitos de la propuesta de ley.

– La planta remueve el 98.9% de los sólidos suspendidos totales en la salida respecto a la entrada, y cumple con los requisitos de la propuesta de ley.

– La planta remueve el 96.1% de la DBO₅ en la salida respecto a la entrada, y cumple con los requisitos de la propuesta de ley.

- La planta remueve el 98.4% de la DQO en la salida respecto a la entrada, y cumple con los requisitos de la propuesta de ley.

- La planta remueve el 100% del cloro residual en la salida respecto a la entrada, y cumple con los requisitos de la propuesta de ley.

- La planta remueve el 92.7% de las grasas y aceites totales en la salida respecto a la entrada, y cumple con los requisitos de la propuesta de ley.

- La planta remueve el 72.2% del color químico en la salida respecto a la entrada, y cumple con los requisitos de la propuesta de ley.

X. RECOMENDACIONES

- Actualmente, sólo el tanque biológico y el tanque de sedimentación cuentan con protección de la intemperie con una galera que les provee techo. Se recomienda extender la galera de modo que cubra todo el equipo, ya que las bombas se encuentran expuestas a los efectos atmosféricos.
- Varias de las tuberías se encuentran bajo tierra. Esto dificulta detectar si alguna se encuentra dañada. Se recomienda sacar todas las tuberías a la superficie para facilitar su mantenimiento y control.
- En el tanque de equalización, la descarga de proveniente de la fábrica trae consigo partículas grandes del lavado, y basura. Se recomienda colocar un cedazo o tipo de filtro que detenga todas estas partículas grandes, a modo de un pretratamiento. Estas partículas llegan a los tanques y si no son removidas podrían dañar alguno de los equipos.
- Se recomienda la revisión de este manual periódicamente para siempre tenerlo actualizado, según cambios físicos en la planta, las descargas o las normativas.
- Es importante la capacitación de las personas involucradas con el manejo de la planta de tratamiento de aguas residuales para evitar que el equipo, con el paso de los años, se deteriore y termine en mal estado.

XI. BIBLIOGRAFÍA

- Activated Sludge* 1987. Water Pollution Control Federation; Water Environment Federation (WPCF-WEF). Virginia. WPCF-WEF. MOP OM-9.
- Calidad y tratamiento del agua. Manual de suministros de agua comunitaria.* 2002. American Water Works Association (AWWA). 5a. ed. Madrid, McGraw-Hill. 1231 págs.
- Carlini, M. 2003. «Problemas operacionales en plantas de tratamiento». Tesis Pontificia Universidad Católica Argentina. 36 págs.
- Clarifier design.* 1985. Water Pollution Control Federation; Water Environment Federation (WPCF-WEF). Virginia. WPCF-WEF. MOP FD-8.
- Curso de aguas industriales.* 1992. Asociación Química Colombiana (AQC). Santa Fé de Bogotá.
- Fresenius, W., et al. 1989. *Waste water technology: origin, collection, treatment and analysis of waste water.* Nueva York, Springer-Verlag.
- Hamza, A. 1991. *Impacts of industrial and small-scale manufacturing wastes on urban environment in developing countries.* Nairobi, HABITAT: Urban Management Programme.
- Kreissl, J.F. y W.G. Gilbert. 1987. "Preliminary treatment facilities: design and operational considerations". EPA. 430 (09-87-007).
- Manual: tratamiento y disposición de aguas residuales para pequeñas comunidades.* 1992. Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA). Washington. EPA/625/R92/005.
- McCabe, W., Smith, J. y P. Harriot. 2001. *Operaciones Unitarias en Ingeniería Química.* México, McGraw-Hill.
- Patterson, J.W. 1978. *Tecnología para tratamiento de aguas residuales.* 3ª. Ed. Miami, Prentice Hall.
- Perry, R. y C. Chilton. 1987. *Manual del Ingeniero Químico.* Vol II. 5ª.ed. McGraw-Hill. México.
- Preliminary treatment for wastewater facilities.* 1980. Water Pollution Control Federation; Water Environment Federation (WPCF-WEF). Virginia. WPCF-WEF. MOP OM-2.
- Reglamento de aguas residuales.* 1999. Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA). Guatemala.
- Sundstrom, K.W. y H.E. Klei. 1979. *Tratamiento de aguas residuales.* Nueva Jersey, Prentice-Hall.

XII. APÉNDICES

A. Datos originales y calculados

Tabla No. 12.1: Determinación del flujo de entrada de la planta.
Se determinó por método volumétrico con cinco repeticiones por día, durante dos días.
El tiempo de referencia fue de 1 minuto.

Muestra	Volumen (L)	Flujo volumétrico (L/día)	Flujo volumétrico (m ³ /día)
1	4.1	3936	3.9
2	3.9	3744	3.7
3	3.9	3744	3.7
4	3.8	3648	3.6
5	4.2	4032	4.0
6	4.1	3936	3.9
7	3.9	3744	3.7
8	4.0	3840	3.8
9	4.1	3936	3.9
10	4.2	4032	4.0
Media	4.0	3859.2	3.9

Tabla No. 12.2: Muestreo inicial del agua de entrada y salida a la planta.

Muestra	pH	Sólidos Totales (mg/L)	Sólidos Sedimentables (mL/L)	Sólidos Suspendedos Totales (mg/L)	DBO ₅ (mg/L)	DQO (mg/L)	Cloro residual (mg/L)	Grasas y aceites (mg/L)	Color químico (unidades)
Entrada									
1	6.1	5864	23	3398	468	2876	3	102	93
2	5.9	5398	19	3564	401	2399	3	119	56
3	5.7	5687	26	3428	414	2102	4	123	67
Media	5.9	5649.7	22.7	3463.3	427.7	2459.0	3.3	114.7	72.0
Salida									
1	7.6	3221	7	2081	45	1777	0	16	45
2	7.4	2982	10	2309	32	1540	0	10	52
3	7.7	3770	9	2367	40	1678	0	22	49
Media	7.6	3324.3	8.7	2252.3	39.0	1665.0	0.0	16.0	48.7

Tabla No. 12.3: Flujo volumétrico a la salida del filtro prensa.
Tiempo de referencia es 1 segundo.

Muestra	Volumen (L)	Flujo volumétrico (L/min)
1	1.1	66
2	1.2	72
3	1.0	60
4	1.1	66
5	1.0	60
Media	1.08	64.8

Tabla No. 12.4: Resultados primera evaluación de filtro prensa.

Corrida	Tiempo del ciclo (hh:mm)	Masa total de tortas recolectada (kg)	Contenido de humedad en torta (%)	Rendimiento de filtro prensa (mg sólido/L)	Sólido real retenido (mg sólido/L)
1	4:30	14.6	84.3%	286.5	45.0
2	4:18	13.2	77.2%	376.2	85.8
3	4:15	15.1	76.7%	439.8	102.5
Media	4:24	14.3	79.4%	367.5	77.7

Tabla No. 12.5: Resultados segunda evaluación del filtro prensa.

Corrida	Tiempo del ciclo (hh:mm)	Masa total de tortas recolectada (kg)	Contenido de humedad en torta (%)	Rendimiento de filtro prensa (mg sólido/L)	Sólido real retenido (mg sólido/L)
1	2:24	32.7	22.7%	3159.6	2442.4
2	2:09	30.1	24.2%	2852.0	2161.8
3	2:09	34.6	25.5%	3222.1	2400.5
Media	2:12	32.5	24.1%	3077.9	2334.9

Tabla No. 12.6: Segundo filtrado luego de tratamiento biológico.

Corrida	Tiempo del ciclo (hh:mm)	Masa total de tortas recolectada (kg)	Contenido de humedad en torta (%)	Rendimiento de filtro prensa (mg sólido/L)	Sólido real retenido (mg sólido/L)
1	1:48	3.4	18.9%	344.7	279.5
2	1:54	4.1	19.2%	414.1	334.6
3	2:00	4.3	17.5%	443.4	365.8
Media	1:54	3.9	18.5%	400.7	326.7

Tabla No. 12.7: Flujo volumétrico de la recirculación del lodo activado en el tanque biológico. Tiempo de referencia es 1 segundo.

Muestra	Volumen (L)	Flujo volumétrico (L/min)
1	1.3	78
2	1.2	72
3	1.2	72
4	1.2	72
5	1.3	78
Media	1.24	74.4

Tabla No. 12.8: Oxígeno disuelto en tanque de tratamiento biológico.

Muestra	OD (mg/L)
1	2.1
2	2.3
3	2.3
Media	2.2

Tabla No. 12.9: Remoción de DBO₅ en el tanque de tratamiento biológico.

Muestra	DBO ₅ Entrada (mg/L)	DBO ₅ Salida (mg/L)	% de remoción
1	366	32	91.3%
2	412	56	86.4%
3	374	29	92.2%
Media	384	39	90.0%

Tabla No. 12.10: Remoción de DQO en filtro de carbón activado.

Muestra	DQO Entrada (mg/L)	DQO Salida (mg/L)	% de remoción
1	201	33	83.6%
2	222	36	83.8%
3	188	29	84.6%
Media	203.7	32.7	84.0%

Tabla No. 12.1.11: Parámetros de descarga después de cambios efectuados en la planta.

Muestra	pH	Sólidos Totales (mg/L)	Sólidos Sedimentables (mL/L)	Sólidos Suspendedos Totales (mg/L)	DBO ₅ (mg/L)	DQO (mg/L)	Cloro residual (mg/L)	Grasas y aceites (mg/L)	Color químico (unidades Pt-Co)
Entrada									
1	6.1	5864	23	3398	468	2876	3	102	93
2	5.9	5398	19	3564	401	2399	3	119	56
3	5.7	5687	26	3428	414	2102	4	123	67
Media	5.9	5649.7	22.7	3463.3	427.7	2459.0	3.3	114.7	72.0
Salida									
1	7.4	168	0.6	31	12	33	0	8	20
2	7.6	222	0.4	47	22	42	0	10	23
3	7.2	153	0.7	35	16	40	0	7	17
Media	7.4	181.0	0.6	37.7	16.7	38.3	0.0	8.3	20.0
% remoción		96.8%	97.5%	98.9%	96.1%	98.4%	100.0%	92.7%	72.2%
Límites permisibles, según propuesta de Ley de CONAMA en 1999, para Fabricación de Productos de Limpieza y Auxiliares Químicos									
A 3 años	6.5 – 8.5		2	1500	500	750	15	150	150
A 9 años	6.5 – 8.5		1	400	150	300	3	80	50

Tabla No. 12.12: Químicos evaluados para el tratamiento primario.

Químico	Descripción
Coagulante 1	Sulfato de aluminio, sal, inorgánico
Coagulante 2	Copolímero a base de poliamina, orgánico
Coagulante 3	Copolímero a base de poliDADMAC*, orgánico
Coagulante 4	Mezcla de clorohidrato de aluminio, inorgánico
Floculante A	Polímero en polvo, catiónico, peso molecular mediano
Floculante B	Polímero en emulsión, catiónico, alto peso molecular
Floculante C	Polímero en polvo, aniónico, alto peso molecular
Floculante D	Polímero en polvo, aniónico, alto peso molecular

*DADMAC, siglas en inglés para Dialildimetilcloruro de amonio

Tabla No. 12.13: Selección de la mejor combinación de coagulante y floculante basándose en prueba y error.

Muestra	pH inicial	pH ajustado	Coagulante		1	2	3	4	Floculante Dosis (ppm)	A	B	C	D	Turbidez de sobrenadante	Cantidad de floculo sedimentado	Calidad de floculo sedimentado
			Dosis (ppm)	Sulfato de Al												
1	6.6	-	200	X				-						Muy alta	Muy poco	Muy ligero
2	6.6	7.5	200	X				-						Muy alta	Muy poco	Muy ligero
3	6.6	-	200	X				20	X					Alta	Poco	Muy ligero
4	6.6	7.5	200	X				20				X		Muy alta	Poco	Muy ligero
5	6.6	-	200		X			-						Media	Poco	Ligero
6	6.6	7.5	200		X			-						Media	Poco	Ligero
7	6.6	-	200		X			20	X					Media	Media	Medio
8	6.6	7.5	200		X			20			X			Baja	Media	Medio
9	6.6	-	200			X		-						Muy baja	Media	Medio
10	6.6	7.5	200			X		-						Muy baja	Media	Medio
11	6.8	-	200			X		20	X					Muy baja	Media	Compacto
12	6.8	7.5	200			X		20				X		Muy baja	Alta	Compacto
13	6.8	-	200				X	-						Alta	Poco	Ligero
14	6.8	7.5	200				X	-						Alta	Poco	Ligero
15	6.8	-	200				X	20	X					Alta	Poco	Ligero
16	6.8	7.5	200				X	20				X		Alta	Poco	Ligero
17	6.8	7.5	200					20			X			Baja	Alta	Compacto
18	6.8	7.5	200					20					X	Muy baja	Muy alta	Compacto

Tabla No. 12.14: Selección de dosis adecuada para coagulante y floculante seleccionados

Muestra	Coagulante Dosis (ppm)	Floculante Dosis (ppm)	Turbidez de sobrenadante	Cantidad de flóculo sedimentado	Calidad de flóculo sedimentado
18	200	10	Muy baja	Muy alta	Compacto
19	100	10	Muy baja	Muy alta	Compacto
20	50	10	Media	Media	Compacto
21	75	10	Baja	Media	Compacto
22	100	5	Baja	Media	Compacto

B. Certificados de análisis



Guatemala, 18 de marzo de 2004

TL-ACTS

Sr. José Luarda
Universidad del Valle de Guatemala
Asunto: Resultados de sus análisis

Estimado Sr. Luarda:

Por este medio se le informa de los resultados correspondientes a los análisis de Demanda Biológica de Oxígeno (DBO₅), Demanda Química de Oxígeno (DQO), Cloro Residual, Grasas y Aceites Totales, y Color Químico, realizados según su solicitud a las muestras que usted entregó a este laboratorio el día 9 de marzo de 2004.

Los resultados son los siguientes:

Método de Análisis	SM5210	SM5220 D	SM4500G	E1664	E110.1
Muestra	DBO ₅ (mg/L) ±0.005	DQO (mg/L) ±0.005	Cl Residual (mg/L) ±0.0005	Grasas y Aceites Totales (mg/L) ±0.005	Color Químico (unidades Pt- Co) ±0.05
E1	468.23	2876.22	3.103	102.42	93.0
E2	400.87	2398.75	3.277	119.16	56.3
E3	414.36	2101.88	4.003	122.77	66.9
S1	45.10	1776.88	0.029	16.11	45.1
S2	32.03	1540.33	0.038	10.02	52.2
S3	40.23	1677.92	0.031	21.84	49.1

Certifica,

Ana Dueñas
Bureau Veritas Consumer Products Services

AADD.



Guatemala, 13 de abril de 2004

TL-ACTS

Sr. José Luarda
Universidad del Valle de Guatemala
Asunto: Resultados de sus análisis

Estimado Sr. Luarda:

Por este medio se le informa de los resultados correspondientes a los análisis de Oxígeno Disuelto, realizados según su solicitud a las muestras que usted entregó a este laboratorio el día 1 de abril de 2004.

Los resultados son los siguientes:

Método de Análisis	E360.1
Muestra	Oxígeno Disuelto, OD (mg/L) ± 0.005
B1	2.13
B2	2.32
B3	2.27

Certifica,

Ana Dueñas
Bureau Veritas Consumer Products Services

AADD.



Guatemala, 13 de abril de 2004

TL-ACTS

Sr. José Luarca
Universidad del Valle de Guatemala
Asunto: Resultados de sus análisis

Estimado Sr. Luarca:

Por este medio se le informa de los resultados correspondientes a los análisis de Demanda Biológica de Oxígeno (DBO₅), realizados según su solicitud a las muestras que usted entregó a este laboratorio el día 1 de abril de 2004.

Los resultados son los siguientes:

Método de Análisis	SM5210
Muestra	DBO ₅ (mg/L) ±0.005
EB1	366.31
EB2	412.37
EB3	373.87
SB1	32.05
SB2	56.20
SB3	29.36

Certifica,

Ana Dueñas
Bureau Veritas Consumer Products Services

AADD.

Bureau Veritas Consumer Products Services.- Guatemala S A
15th. floor. Tower IV Europlaza Complex
5a. Avenida 5-55. zona 14. CP. 01014
Guatemala City, Guatemala



Guatemala, 13 de abril de 2004

TL-ACTS

Sr. José Luarca
Universidad del Valle de Guatemala
Asunto: Resultados de sus análisis

Estimado Sr. Luarca:

Por este medio se le informa de los resultados correspondientes a los análisis de Demanda Química de Oxígeno (DQO), realizados según su solicitud a las muestras que usted entregó a este laboratorio el día 1 de abril de 2004.

Los resultados son los siguientes:

Método de Análisis	SM5220 D
Muestra	DQO (mg/L) ± 0.005
EC1	201.05
EC2	222.17
EC3	187.92
SC1	33.31
SC2	36.28
SC3	28.81

Certifica,

Ana Dueñas
Bureau Veritas Consumer Products Services

AADD.



Guatemala, 22 de abril de 2004

L-ACTS

Sr. José Luarca
Universidad del Valle de Guatemala
Asunto: Resultados de sus análisis

Estimado Sr. Luarca:

Por este medio se le informa de los resultados correspondientes a los análisis de Demanda Biológica de Oxígeno (DBO₅), Demanda Química de Oxígeno (DQO), Cloro Residual, Grasas y Aceites Totales, y Color Químico, realizados según su solicitud a las muestras que usted entregó a este laboratorio el día 13 de abril de 2004.

Los resultados son los siguientes:

Método de Análisis	SM5210	SM5220 D	SM4500G	E1664	E110.1
Muestra	DBO ₅ (mg/L) ±0.005	DQO (mg/L) ±0.005	Cl Residual (mg/L) ±0.0005	Grasas y Aceites Totales (mg/L) ±0.005	Color Químico (unidades Pt- Co) ±0.05
S4	12.11	33.38	0.028	8.22	20.1
S5	22.07	42.25	0.044	10.04	23.3
S6	15.95	40.14	0.061	7.33	16.9

Certifica,

Ana Dueñas
Bureau Veritas Consumer Products Services

AADD.

Bureau Veritas Consumer Products Services.- Guatemala S A
15th floor, Tower IV Europlaza Complex
5a. Avenida 5-55, zona 14, C.P. 01014
Guatemala City, Guatemala

C. Figuras de antecedentes

Figura No. 12.1: Clasificación de los sólidos totales (AQC, 1992).

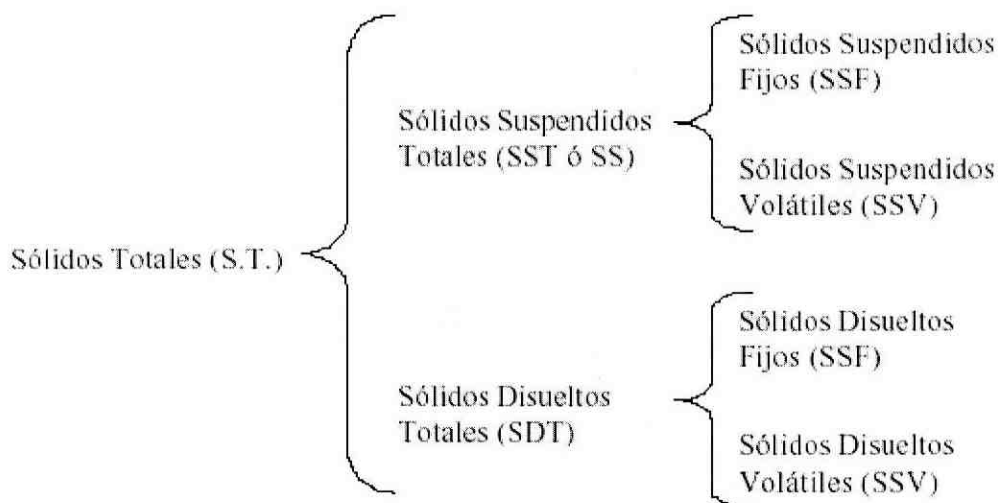


Figura No. 12.2: Proceso de biodegradación de la materia orgánica (AQC, 1992).

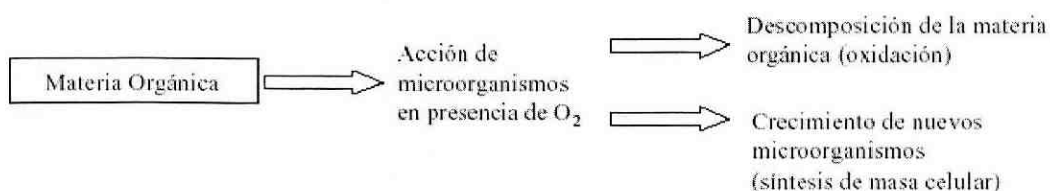


Figura No. 12.3: Variación de la DBO en función del tiempo (AQC, 1992).

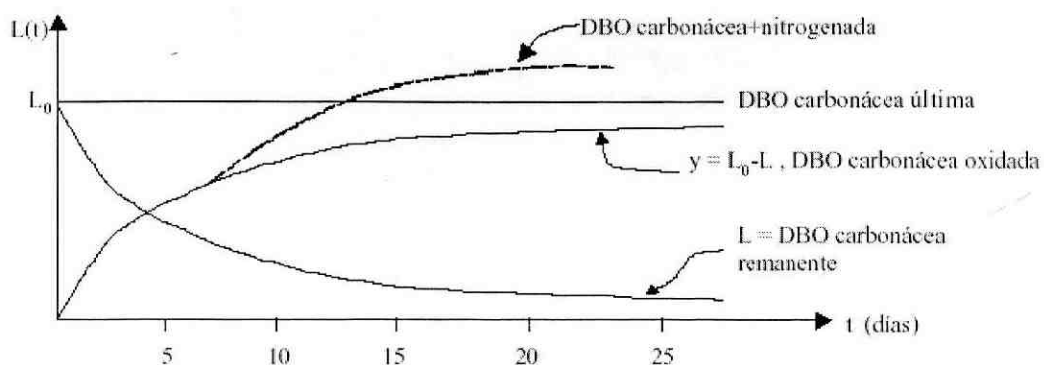


Figura No. 12.4: Componentes del sistema de tratamiento y disposición de aguas residuales (Sundstrom, 1979).

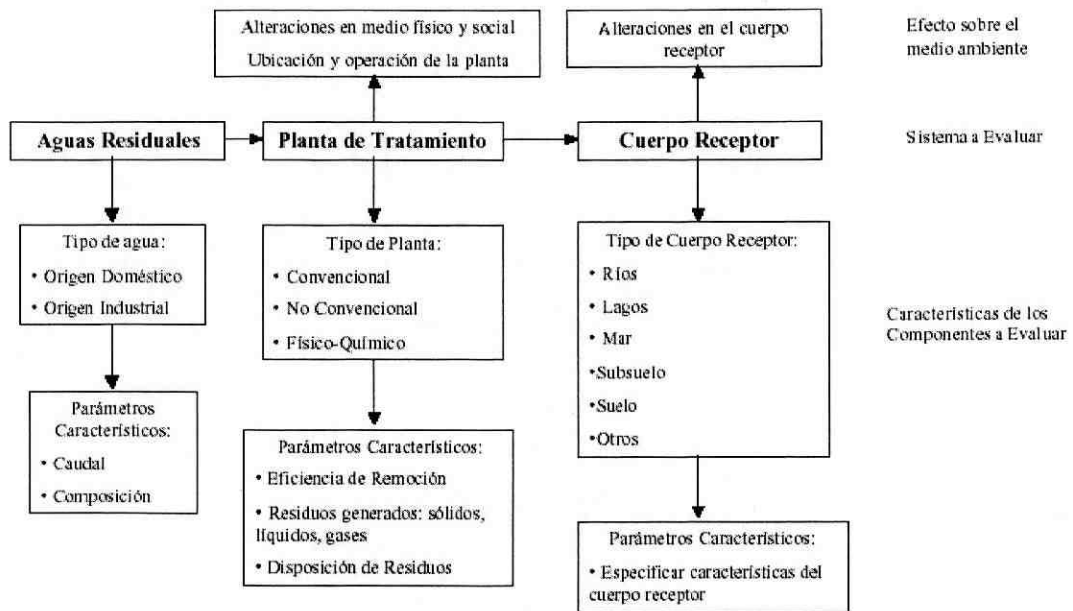


Figura No. 12.5: Planta de tratamiento de aguas residuales. Sistema convencional (AWWA, 2002).

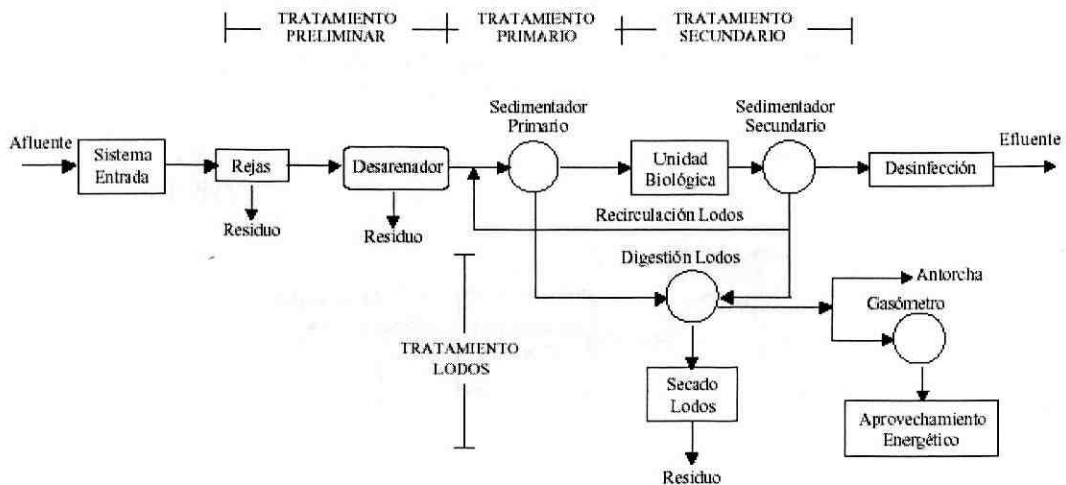
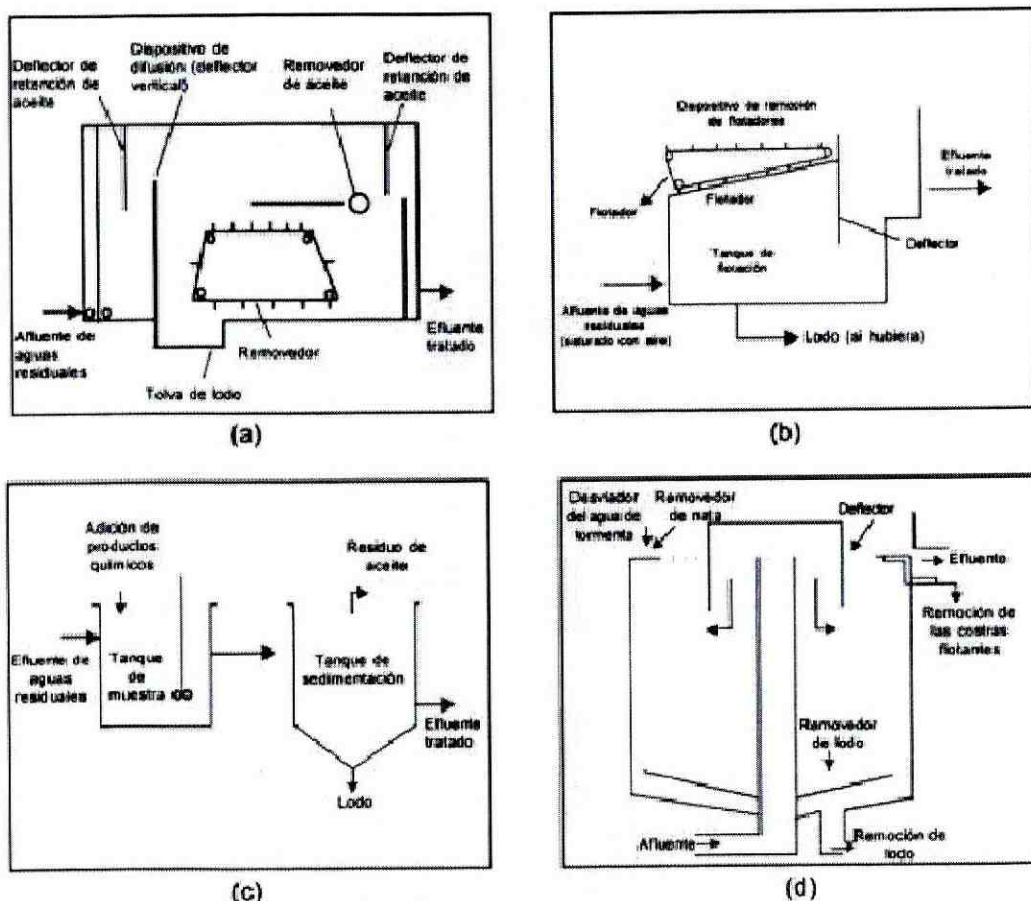


Figura No. 12.6: Diseño de algunos sistemas de separación por gravedad (AWWA, 2002).



- (a) separador API, (American Petroleum Industry)
 (b) flotación de aire disuelto, DAF (Disolved Air Flotation)
 (c) sistema de descomposición de la emulsión
 (d) sistema de clarificación

Figura No. 12.7: Sistema convencional de lodos activados de mezcla completa (WPCF-WEF, 1987).

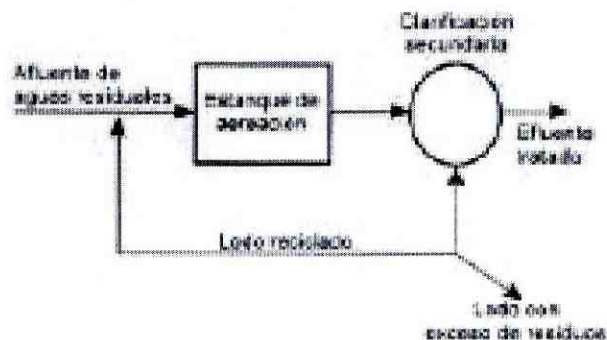
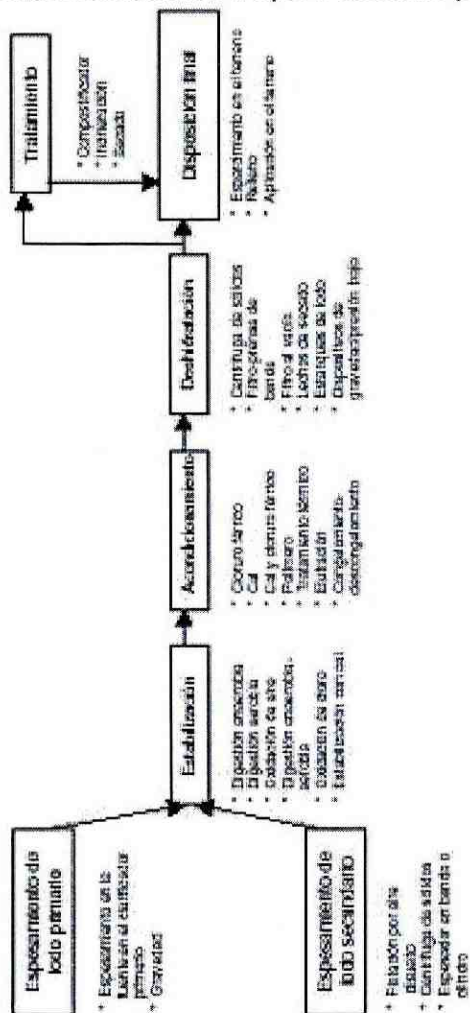


Figura No. 12.8: Diagrama para el manejo de sólidos con los métodos de tratamiento y disposición usados con mayor frecuencia (WPCF-WEF, 1980).



D. Tablas de antecedentes

Tabla No. 12.16: Coeficientes de Remoción de DBO (AQC, 1992).

Tipo de Agua	k_1 (1/día)
Agua de río	0.23
Agua residual doméstica	0.39
Solución de glucosa	0.58

Tabla No. 12.17: Composición Típica del Agua Residual Doméstica (AQC, 1992).

CONTAMINANTE O INDICADOR	CONCENTRACIÓN	Unidades
Sólidos Totales	350-1200	mg/L
Disueltos Totales (*)	250-850	mg/L
Fijos	145-525	mg/L
Volátiles	105-325	mg/L
Suspendidos Totales	100-350	mg/L
Fijos	20-75	mg/L
Volátiles	80-275	mg/L
Sólidos Sedimentables	5-20	ml/L
DBO ₅ (a 20°C)	110-400	Mg/L
Carbono Orgánico Total (COT)	80-290	mg/L
DQO	250-1000	mg/L
Nitrógeno Total (como N)	20-85	mg/L
Orgánico	8-35	mg/L
Amonio Libre	12-50	mg/L
Nitritos	0	mg/L
Nitratos	0	mg/L
Fósforo Total (como P)	4-15	mg/L
Orgánico	1-5	mg/L
Inorgánico	3-10	mg/L
Aceites y grasas	50-150	mg/L
Cloruros (*)	30-100	mg/L
Alcalinidad (como CaCO ₃) (*)	50-200	mg/L
Coliformes Totales	106-108	NMP/100 ml
Coliformes Fecales	105-106	NMP/100 ml

(*): Valores pueden ser mayores dependiendo de la concentración en el agua potable.

Tabla No. 12.18: Requerimientos de calidad de agua en distintos países (AQC, 1992).

Parámetro	Efluente agua servida (Norma de Emisión)	Calidad curso de agua (Norma de Calidad)
Estándares Norteamericanos		
DBO5	30 mg/l	4 mg/l
SS	30 mg/l	
OD		4 mg/l (Mínimo)
Coliformes Totales		5000 NMP/100 ml (Potable) 1000 NMP/100 ml (Recreación)
Coliformes Fecales	200 NMP/100 ml	100 NMP/100 ml
Estándares Japoneses		
DBO5	20 mg/l	2 mg/l
SS	70 mg/l	25 mg/l
OD		7.5 mg/l
Coliformes Totales		5000 NMP/100 ml (Potable) 1000 NMP/100 ml (Recreación)
Coliformes Fecales	30 NMP/100 ml	
Anteproyecto de Estándares Chilenos		
DBO5	25 mg/l	
SS	20 mg/l	
OD		5 mg/l
Coliformes Totales		
Coliformes Fecales	1000 NMP/100 ml	1000 NMP/100 ml (Recreación)

Tabla No. 12.19: Concentraciones umbrales que inhiben los procesos de tratamiento biológico (Kreissl, 1987).

Parámetros	General (mg/L)	Lodo activado	
		Remoción de compuestos de carbono ^a (mg/L)	Nitrificación ^b (mg/L)
Aluminio	-	15-26	-
Amoníaco	-	480	-
Arsénico	-	0,1	-
Borato (boro)	-	0,05-100	-
Cadmio	3-10	10-100	-
Calcio	-	2500	-
Cromo ⁶⁺	3-10	1-10	0,25
Cromo ³⁺	10-20	50	-
Cobalto	2-15	-	-
Cobre	1-3	1	0,005-0,5
Cianuro	0,3-2	0,1-5	0,34
Sulfuro de hidrógeno	5-30	-	-
Hierro	-	1000	-
Plomo	-	0,1	0,5
Manganeso	-	10	-
Magnesio	-	-	50
Mercurio	-	0,1-5	-
Níquel	2-10	1-2,5	0,25
Plata	-	5	-
Sulfato	-	-	500
Cinc	3-20	0,08-10	0,08-0,5
Fenoles:			
Fenol	-	200	4-10
Cresol	-	-	4-16
2-4 Dinitrofenol	-	-	150

^aGeneralmente equivalente a DBO₅ (degradación de la materia orgánica a falta de nitrificación).

^bOxidación de amoníaco a nitrato.

Fuentes: Generales: Fresenius y otros (1989); lodo activado: WPCF/ASCE (1977).

Tabla No. 12.20: Resumen de los procesos unitarios de tratamiento de aguas residuales (AWWA, 2002).

Nombre/descripción del proceso unitario	Tipo de tratamiento	Etapa del tratamiento			
		P	I	II	III
TRATAMIENTO PRELIMINAR PRIMARIO					
El estanque de compensación mezcla las aguas residuales para reducir las variaciones en las concentraciones y evitar "picos"	Físico	x			
El desarenador remueve la arena y polvo	Físico	x			
El tamiz de malla ancha (barra, malla) remueve sólidos de gran tamaño	Físico	x			
El triturador pulveriza los sólidos para reducir su tamaño	Físico	x			
El separador de aceite y grasa remueve los materiales aceitosos	Físico	x			
TRATAMIENTO PRIMARIO PRINCIPAL					
La sedimentación remueve fácilmente sólidos inertes y orgánicos sedimentales	Físico		x	x	x
Los tamices de malla fina remueven sólidos inertes y orgánicos	Físico		x		x
La flotación de aire remueve grasa y sólidos ligeros	Físico	x	x		
La floculación (aérea y mecánica) mejora la remoción de sólidos suspendidos	Físicoquímico	x	x	x	x
El sistema de descomposición de la emulsión remueve el aceite y grasa dispersos	Físicoquímico	x	x		
TRATAMIENTO SECUNDARIO PRINCIPAL					
El tratamiento en el terreno se basa en la filtración y tratamiento aerobio de aguas residuales. Los métodos incluyen: (1) infiltración rápida, (2) aspersión, (3) flujo superficial, (4) absorción subterránea del suelo	Biológico Físicoquímico			x	
Las lagunas o estanques de estabilización tratan las aguas residuales mediante procesos naturales. Estos incluyen (1) lagunas aerobias y facultativas, (2) lagunas facultativas y aerobias aeradas, (3) contención total (4) descarga hidrográfica controlada (5) lagunas de pulimento	Biológico Físico			x	x
El lodo activado convencional, brinda tratamiento aerobio mediante el uso de partículas microbianas suspendidas de floculo y aeradores en una o varias series únicas de cuencas del reactor	Biológico			x	
Otros métodos de lodos activados con diseños variados incluyen: (1) estabilización por contacto, (2) aeración prolongada, (3) zanjas de oxidación y (4) reactores por lotes secuenciales	Biológico			x	
Los filtros biológicos usan el crecimiento microbiano en medios filtrantes para brindar un tratamiento aerobio a las aguas residuales. Los principales tipos incluyen: (1) filtros con medios fijos (clasificados según el tipo de medio, tasa de flujo y frecuencia de dosificación), y (2) contactores biológicos rotatorios	Biológico			x	
Los sistemas de tratamiento dual o de doble etapa combinan los lodos activados y los procesos de filtro biológico	Biológico			x	
Los procesos de tratamiento anaerobio usan bacterias facultativas y anaerobias para degradar los sólidos disueltos y orgánicos. Incluyen unidades de flotación y sedimentación. Los principales tipos incluyen: (1) tanques séptico/Inhoff, (2) tanques biológicos (biomasa suspendida), (3) filtros y discos sumergidos (biomasa fija)	Biológico Físico		x	x	
El tratamiento con humedales o "wetlands" construidos, aprovechan la capacidad natural que poseen ciertas especies vegetales y ecosistemas acuáticos para depurar agentes contaminantes.	Biológico			x	x
TRATAMIENTO AUXILIAR O TERCIARIO					
La filtración con medios granulares remueve los sólidos suspendidos mediante el tamizado, sorción y descomposición biológica. Existen varios tipos: (1) filtros de arena (lento, rápido, intermitente, recirculante), (2) filtros ascendentes, de presión y de tasa alta con limpieza mecánica, (3) los filtros duales o de medios múltiples	Físico Biológico Químico			x	x
La precipitación y coagulación química se usan principalmente para la remoción de sólidos disueltos y fósforo en combinación con la floculación y sedimentación. Los productos químicos comunes usados para promover la coagulación incluyen: cal, cloruro férrico, polímero, carbonato de sodio, cloruro de bario, hidróxido de sodio y alumbre	Químico	x	x		x
La oxidación química se usa principalmente para la desinfección y control de olor. Los métodos principales incluyen (1) cloración, (2) ozonización y (3) radiación	Químico	x	x		x
Otros métodos de tratamiento químico que pueden usarse para el tratamiento de aguas residuales incluyen: (1) adición de nutrientes para mejorar los procesos de tratamiento biológico, (2) recarbonación para reducir el pH y (3) otros métodos de neutralización	Químico			x	x
La adsorción de carbono activado remueve sólidos y material orgánico	Físico- Químico		x		x

Etapas de tratamiento: P = preliminar, I = primario, II = secundario, III = terciario

Tabla No. 12.21: Tipos principales de lagunas de estabilización (EPA, 1992).

Tipo	Aerobias aereadas (h: 0,4 a 7,5 m)	Facultativas aereadas	Facultativas aerobias (h: 0,6 a 1,5 m)	Aerobias
Descripción	La aereación de la laguna se logra a través de difusores mecánicos de oxígeno; se requiere plantas de sedimentación	Usa solo aereadores superficiales; parte de la descomposición anaerobia ocurre en los sedimentos del fondo de la laguna	El oxígeno es suministrado en la superficie a través de algas y mezcla del viento; ocurre cierta actividad anaerobia en los sedimentos del fondo	Lagunas poco profundas donde el oxígeno llega a través de las algas para mantener las condiciones aerobias en la laguna
Ventajas	-Requiere un área de tamaño y volumen relativamente pequeño -Libre de olores -Alto grado de tratamiento	- Requiere un area de tamaño y volumen relativamente pequeño -Relativamente libre de olores -Alto grado de tratamiento	-Bajos costos de O&M -Alto grado de tratamiento	-Bajos costos de O&M
Desventajas	-Costo más elevado de O&M que cualquier otro sistema	-Costos sustanciales de O&M	-Requiere un área de gran tamaño y volumen -Posibles olores	- Requiere un área de gran tamaño y volumen -Posibles olores
Mano de obra	Mantenimiento de aereadores; remoción de lodo	Mínimo	Mínimo	Mínimo
Energía	Moderada	Poca (para los aereadores)	Ninguna	Ninguna
Grado de complejidad	Moderado; se requiere poca destreza para mantener el equipo	Simple; no requiere personal calificado	Simple; no requiere personal calificado	Simple; no requiere personal calificado
Residuos	Lodo	Remoción de lodo cada 10 a 20 años	Remoción de lodo cada 10 a 20 años	Células de algas

h: profundidad promedio

Tabla No. 12.22: Resumen de las tecnologías de neutralización (AQC, 1992).

Proceso	Residuos aplicables	Etapas de desarrollo	Rendimiento	Residuos generados	Costo
Neutralización mutua de ácidos/alcalis	Todos los residuos ácidos alcalinos compatibles salvo cianuro	Bien desarrollada	Generalmente más lento que las tecnologías comparables debido a las concentraciones diluidas de reactivos. La mezcla de residuos incompatibles puede generar residuos peligrosos	Variable, depende de la cantidad de insolubles y productos contenidos en los residuos	Menos costoso que las otras tecnologías de neutralización
Piedra caliza	Los residuos ácidos diluidos con menos de 5,000 mg/L de ácidos minerales fuertes con bajas concentraciones de sales ácidas	Bien desarrollada	Requiere piedras de 0.074 mm o menos. Requiere 45 minutos o más de tiempo de retención. Solo puede neutralizar residuos ácidos a pH 6.0. Debe aerarse para remover el CO ₂ producido	Generará grandes cantidades de lodo cuando reaccione con residuos que contienen sulfato. Las piedras que pasan por una malla de 200 se sulfatarán, se volverán inactivas y se agregarán al lodo	Más eficiente en función de los costos para el tratamiento de residuos concentrados. Puede ser eficiente en función de los costos para el tratamiento de residuos ácidos diluidos
Cal	Todos los residuos ácidos	Bien desarrollada	Requiere entre 15 y 30 minutos de tiempo de retención. Debe aguarse a una concentración de 10 a 35% de sólidos antes de su uso. Puede sub (por debajo de pH 7) o sobre (por encima de pH 7) neutralizarse	Generará grandes cantidades de lodo similar a la piedra caliza	Más costoso que la piedra caliza triturada (malla de 200)
Soda cáustica	Todos los residuos ácidos	Bien desarrollada	Requiere entre 3 y 15 minutos de tiempo de retención. En forma líquida, es fácil de manejar y aplicar. Puede sub o sobre neutralizarse incluso a pH 13 o superior	Los productos reactivos generalmente son solubles, sin embargo, los lodos no se deshidratan tan fácilmente como la cal o piedra caliza	Más costoso que todos los reactivos alcalinos usados (cinco veces el costo de la cal)
Ácido sulfúrico	Todos los residuos alcalinos salvo cianuro	Bien desarrollada	Requiere entre 15 y 30 minutos de tiempo de retención. De forma líquida, pero presenta riesgo de quemaduras. Altamente reactivo y ampliamente disponible	Generará grandes cantidades de lodo de yeso cuando reaccione con residuos alcalinos que contienen calcio	Menos costoso que todos los reactivos ácidos usados
Ácido clorhídrico	Todos los residuos alcalinos	Bien desarrollada, pero pocas veces aplicadas debido al alto costo del residuo	Requiere entre 5 y 20 minutos de tiempo de retención. En forma líquida presenta riesgos de quemadura y humos. Más reactivo que el sulfuro	Los productos reactivos generalmente son solubles	Aproximadamente el doble de costoso que el sulfuro sobre una base equivalente de neutralización
Ácidos carbónicos, dióxido de carbono líquido	Todos los residuos, salvo cianuro	Tecnología incipiente	Tiempo de retención de 1 a 1 1/2 minutos. En forma líquida, debe vaporizarse antes de su uso. Solo puede neutralizar residuos alcalinos a un pH final de 8.3	Formará precipitado de carbonato de calcio cuando reaccione con residuos alcalinos que contienen calcio	Entre 3 a 4 veces más costoso que el sulfuro. Por ello se limita a aplicaciones que sean más de 200 toneladas de reactivos al año o con una tasa de flujo mayor a 100,000 gpd

Tabla No. 12.23: Residuos generados por diversos procesos de tratamiento de aguas residuales. (WCPF-WEF, 1980).

Residuos				
Proceso de tratamiento	Lodos	Emisiones al aire	Efluentes concentrados	Carbón pasado
Operaciones de pretratamiento				
Sedimentación	X			
Filtración de medios granulares			X	
Separación del aceite y agua			X	
Operaciones de tratamiento físico y químico				
Neutralización	X			
Precipitación/floculación/sedimentación	X			
Oxidación/reducción	X			
Adsorción de carbón			X	X
Separación por aire		X		
Separación por vapor			X	
Ósmosis inversa			X	
Ultrafiltración			X	
Intercambio de iones			X	
Oxidación húmeda de aire		X		
Operaciones del tratamiento biológico				
Lodo activado	X	X		
Reactor discontinuo	X	X		
Tratamiento de carbón activado en polvo (TCAP)	X			X
Contactador biológico rotatorio	X	X		
Filtro percolador	X			

Tabla No. 12.24: Efectos del pretratamiento y tratamiento de lodos sobre los lodos y las opciones de uso y disposición. (WPCF-WEF, 1980).

Definición del proceso de tratamiento	Efecto sobre los lodos	Efecto sobre las opciones de uso y disposición de lodos
Pretratamiento: Reducción de los niveles de contaminantes en la descarga de aguas residuales industriales	Reduce el nivel de metales pesados y sustancias orgánicas en la descarga de aguas residuales industriales, lo que disminuye la concentración de estos componentes en el lodo	Incrementa la viabilidad de la aplicación en el terreno, distribución, comercialización y disposición en el mar. Reduce la necesidad de dispositivos para controlar la contaminación durante la incineración y evita problemas de disposición de cenizas de incineradores
Espejamiento: Separación de lodos por fuerza centrífuga de agua y sólidos por gravedad o flotación	Incrementa la concentración de sólidos en el lodo mediante la remoción de agua, lo que disminuye el volumen del lodo	Reduce los costos de transporte de lodos en todas las opciones
Digestión (aerobia y anaerobia): Estabilización biológica del lodo mediante la conversión de algunas materias orgánicas en agua, dióxido de carbono y metano	Reduce el contenido de sustancias orgánicas volátiles y biodegradables del lodo al convertirlos en material soluble y gas. Reduce los niveles de agentes patógenos y controla la putrefacción	Reduce la cantidad de lodos. Es el método preferible de estabilización antes de su disposición en un relleno sanitario o aplicación en el terreno. Reduce el poder calorífico para la incineración, pero la digestión anaerobia produce metano recuperable
Estabilización con cal: Estabilización de lodos mediante la adición de cal	Eleva el pH del lodo. Reduce temporalmente la actividad biológica. Disminuye los niveles de patógenos y controla la putrefacción. Incrementa la masa de sólidos secos del lodo	Puede usarse antes de su aplicación en el terreno y disposición en un relleno sanitario. El alto pH del lodo estabilizado con cal tiende a inmovilizar los metales pesados en el lodo siempre que se mantengan altos niveles de pH
Acondicionamiento: Alteración de las propiedades del lodo para facilitar la separación del agua. El acondicionamiento puede realizarse de diversas maneras, por ejemplo, mediante la adición de productos químicos inorgánicos tales como cal y cloruro férrico; de productos químicos orgánicos como polímeros; o un ligero incremento de la temperatura y presión del lodo. El acondicionamiento térmico también produce desinfección	Mejora las características de la deshidratación de lodos. El acondicionamiento puede incrementar la masa de sólidos secos que se maneja y dispone sin aumentar el contenido orgánico del lodo	Incrementa la cantidad de combustible adicional requerido en la incineración cuando se eleva la cantidad de material inerte en el lodo
Deshidratación: Separación de alta fuerza centrífuga de agua y sólidos	Incrementa la concentración de sólidos en el lodo al remover gran parte del agua retenida, lo que disminuye el volumen de lodo. El agua remueve algo de nitrógeno y otros materiales solubles	Reduce los costos de combustible para la incineración y los requerimientos de terreno y de grandes cantidades de suelo para el relleno. Disminuye los costos de transporte en todas las opciones. La deshidratación puede ser indeseable para la aplicación en el terreno en regiones donde el agua es un recurso agrícola costoso. La reducción de los niveles de nitrógeno puede o no ser ventajosa
Compostificación: Procesos aerobios que incluyen la estabilización biológica de lodo en un camellón, una pila estática aerada o recipiente	Reduce la actividad biológica. Puede destruir todas las agentes patógenos. Degrada el lodo a un material similar al humus. Incrementa la masa de lodo debido a la adición de un aglomerante	Útil antes de la aplicación en el terreno, distribución y comercialización. Generalmente, no es apropiada para otras opciones de uso o disposición debido al costo
Secado por calor: Aplicación de calor para matar agentes patógenos y eliminar la mayor cantidad de agua	Desinfecta el lodo. Reduce ligeramente los olores y la actividad biológica.	Generalmente se usa antes de la distribución y comercialización

Tabla No. 12.25: Límites de contaminación para la aplicación de lodos en el suelo (WPCF-WEF, 1987).

Contaminante	Descripción (*)			
	Límite de concentración máxima (**) (mg/kg)	Tasa de acumulación del contaminante (kg/ha)	Límite de concentración permitidos (***) (mg/kg)	Tasa de acumulación anual del contaminante (kg/ha/año)
Arsénico	75	41	41	2.0
Cadmio	85	39	39	1.9
Cromo	3000	3000	1200	150
Cobre	4300	1500	1500	75
Plomo	840	300	300	15
Mercurio	57	17	17	0.85
Molibdeno	75	18	18	0.90
Níquel	420	420	420	21
Selenio	100	100	36	5.0
Cinc	7500	2800	2800	140

(*) Todos los límites en base seca; (**) valores absolutos; (***) promedios mensuales.
USEPA. 40 CFR Part 503, Standards for the use or disposal of sewage sludge. 1993.

Tabla No. 12.26: Parámetros y límites requeridos para descargas a cuerpos receptores de agua de una industria de fabricación de productos de limpieza y auxiliares químicos, según propuesta de ley para Guatemala de 1999 (CONAMA, 1999).

Parámetro	A 3 años	A 6 años	A 9 años
Sólidos sedimentables (mL/L)	2	1.5	1
Sólidos en suspensión (mg/L)	1500	1000	400
DBO (mg/L)	500	300	150
DQO (mg/L)	750	500	300
Cloro residual (mg/L)	15	5	3
Grasas y aceites (mg/L)	150	100	80
Color químico (unidades)	150	100	50
Hidrocarburos (mg/L)	40	30	20