

## I. RESUMEN

En este estudio se presentan los resultados obtenidos de la evaluación de la utilización de biofiltros para reducir la carga contaminante de las aguas residuales provenientes de la planta de tratamiento de Ciudad San Cristóbal.

La información se generó por medio del análisis fisicoquímico y microbiológico de diferentes muestras tomadas en la planta de tratamiento, en los cinco puntos de muestreo seleccionados, durante las épocas seca y lluviosa durante el año 2005; obteniéndose un total de 40 muestras. Posteriormente se establecieron las variables fisicoquímicas y el análisis microbiológico, como indicadores de la calidad del agua.

Se consideró importante llevar a cabo esta investigación, ya que las aguas residuales de esta colonia van a desembocar al río Villalobos, y este al lago de Amatitlán. Es por eso que la Autoridad para el Manejo Sustentable del lago de Amatitlán (AMSA) decidió construir una planta de tratamiento para estas aguas residuales como una medida correctiva para disminuir la carga contaminante. Se evaluó la reducción de la carga contaminante de las aguas residuales en base a nutrientes, pH, conductividad, sólidos, alcalinidad, demanda química de oxígeno (DQO), demanda bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>), recuento de coliformes totales, fecales y de *E. coli*. El pH, temperatura, conductividad, salinidad, O<sub>2</sub> disuelto, O<sub>2</sub> disperso, POR y la hora fueron variables de campo y el resto del laboratorio.

Los resultados se analizaron estadísticamente con la prueba de los intervalos de Duncan y el método de ANDEVA encontrando diferencia significativa dentro de los cinco puntos de muestreo en la demanda química de oxígeno (DQO), demanda bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>), sólidos sedimentables, sólidos suspendidos y níquel. También se encontró diferencia significativa en las épocas para la DQO, DBO<sub>5</sub>, POR, pH, turbiedad y color. No se encontró diferencia estadísticamente significativa en el análisis microbiológico.

Con los resultados obtenidos se encontró que hubo una reducción estadísticamente significativa en la contaminación en base a la demanda química de oxígeno (DQO) y demanda bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>), la cual fue evidente entre los cinco puntos de muestreo y épocas del año evaluadas. Se concluye que estas variables fueron determinantes para la reducción de la contaminación de las aguas residuales.

## II. INTRODUCCIÓN

En los últimos años el país ha tenido un aumento poblacional e industrial, es por ello que la ciudad capital se ha tenido que expandir a áreas aledañas dando como resultado la deforestación de las cuencas y la contaminación de cuerpos de agua, tal es el caso del lago de Amatitlán. Esta contaminación se debe a que alrededor de la cuenca del lago se encuentran aproximadamente 900 industrias y la población cada vez va en aumento, vertiendo sus aguas residuales a los ríos que posteriormente desembocan al río Villalobos y éste finalmente al lago de Amatitlán, siendo el mayor contaminante el agua de uso doméstico no tratada, como la utilizada en el lavado de ropa, la higiene personal y uso de servicios sanitarios (1).

En la actualidad, el agua del lago de Amatitlán es utilizada para fines de consumo humano (lavado de ropa), irrigación, recreación, hidroelectricidad, navegación comercial en pequeña escala y pesca con fines nutricionales y comerciales (1).

Los sistemas naturales tienen una importancia económica, social, turística, cultural o destinada a la conservación. Son recursos muy utilizados por las comunidades que viven a su alrededor y por la falta de educación, el uso que se les da no es el adecuado y pudiendo causar la contaminación de lagos. Tal es el caso del lago de Amatitlán que se convirtió como destino final de la depuración de aguas residuales, por lo que está frente a la amenaza de convertirse en un pantano, provocando que las personas que viven a su alrededor pierdan el recurso de pesca y alimentación que les provee el lago (2).

De manera general, el 40% de las aguas residuales de la ciudad de Guatemala, se vierten a la cuenca del lago de Amatitlán. Por ejemplo, las aguas residuales desechadas por la comunidad de ciudad San Cristóbal y por las industrias aledañas a esta colonia constituyen parte de la contaminación del lago de Amatitlán. Siendo esta agua de composición variada, debido a que ha sufrido alteraciones o degradaciones en su calidad original, según su uso.

Debido a esta problemática, la Autoridad para el Manejo Sustentable del Lago de Amatitlán (AMSA) introdujo un sistema piloto en una planta de tratamiento convencional constituido por filtros verdes, construyendo este sistema en ciudad San Cristóbal, el cual fue diseñado y construido en la década de los setentas. En dicha planta se sembró la planta acuática Tul (*Typha* sp.), la que se encuentra ampliamente difundida en las riberas del lago (3) ya que sus raíces tienen la capacidad de atrapar nutrientes disminuyendo así los niveles de contaminación provocados por nitrógeno, metales, entre otros y la DBO<sub>5</sub>.

El propósito de este estudio fue determinar y comparar los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del agua residual de dicha colonia antes de ser vertida a la planta de tratamiento de aguas residuales (Planta de tratamiento de ciudad San Cristóbal) y después de pasar por dicho tratamiento, para luego ser descargada al río Villalobos. El muestreo se realizó tanto en época seca como en época lluviosa.

### III. ANTECEDENTES

#### A. CUENCA

Es un área geográfica cuyas aguas superficiales drenan hacia un mismo punto que puede ser un río, un lago, un canal o el mar. Las cuencas generalmente empiezan en la parte alta de las montañas o volcanes y rodean el cauce de los ríos principales. Por lo tanto, la cuenca del lago de Amatitlán es un área geográfica cuyas aguas desembocan en el lago a través del río Villalobos y sus afluentes (1,4).

##### 1. La cuenca del lago de Amatitlán

Se encuentra ubicada en el valle de las Vacas o de la Ermita, departamento de Guatemala, situada entre tres sistemas de fallas; Mixco, Pinula y Jalpatagua, formando el “Graben” en donde se encuentran asentados la mayor parte de los municipios del departamento (1,4).

Tiene una extensión de 381.31 Km<sup>2</sup>, y se ubica en la zona de la provincia fisiográfica de la Sierra Madre. Esta Cuenca es una subcuenca del río María Linda, o sea que forma parte de la cuenca de dicho río. Se ubica dentro de las coordenadas 14°42'00” a 14°22'75” latitud Norte y 90°42'00” a 90°16'86” longitud Oeste del Meridiano Greenwich. Los límites de la cuenca son los siguientes: al norte con la divisoria continental de aguas (Calzada Roosevelt y Boulevard Liberación hasta los Arcos en la Ciudad de Guatemala) y la cuenca del río Motagua de la vertiente del Océano Atlántico; al oeste con la cuenca del río Achiguate; al este con la cuenca del río Los Esclavos; al sur con el río Michatoya y parte media del río María Linda, que constituye una de las cuencas de la vertiente del Pacífico. La altitud varía entre 1,186 y 2,500 msnm. La parte alta de la cuenca del lago de Amatitlán es escarpada con mesetas planas; la parte media es de escarpada a ondulada y la parte baja es de ondulada a plan (1,4).

La cuenca esta formada por catorce municipios, algunos del departamento de Guatemala y otros de Sacatequénez. De éstos, siete tienen influencia directa en el lago debido al impacto producido por la degradación de los recursos naturales, siendo Villa Nueva, Villa Canales, Santa Catarina Pinula, San Miguel Petapa, Mixco, Amatitlán y Guatemala (parte sur de la Ciudad Capital zonas 7, 11, 12, 13 y 21). La población de la cuenca es, aproximadamente, 2,000,000 de habitantes; siendo Villa Nueva el municipio más poblado (1,5).

En la cuenca se ubican diversos accidentes geográficos tales como el lago propiamente dicho, ríos, cerros, quebradas y montañas. En esta cuenca también se encuentra ubicada la mayor parte de la industria nacional y numerosas áreas de vivienda (1,6).

Los suelos que conforman la cuenca del lago son básicamente formaciones de origen volcánico de diferentes épocas, las que a través del tiempo han ido consolidándose hasta llegar a formaciones de roca. Éstos son de color café, de textura franca a franca arcillosa, para los suelos superficiales, siendo ligeramente ácidos y de un espesor que varía entre 25 a 50 cms. Los subsuelos por lo general son de una textura franco arcillosa, un potencial de hidrógeno (pH) ligeramente ácido, de color café rojizo y con una profundidad en algunos casos de más de un metro (1).

La cuenca del río Villalobos está compuesta por aluvión; siendo la parte norte del lago compuesta por sedimentos eólicos, flujo de ceniza, sedimentos fluviales y lacustres sufriendo los riesgos de licuefacción, suflucción e inundaciones. Superficialmente, los suelos están formados por una capa orgánica que varía entre 20 a 75 cms, de profundidad, formaciones de arena blanca, materiales de relleno, roca y disposiciones volcánicas (1).

## **2. El lago de Amatitlán**

El lago de Amatitlán tiene su origen en la Era Cuaternaria y su formación se debe a los movimientos tectovolcánicos ocurridos en el área y provocados por los volcanes de Pacaya, Agua, Fuego y Acatenango. Durante esa época su extensión era de aproximadamente 80 Km<sup>2</sup> ocupando la superficie de los municipios de Amatitlán, Villa Nueva y Villa Canales ya que se han encontrado fósiles de caracoles y pequeños esqueletos de peces, durante excavaciones realizadas en esos lugares a principios del siglo XX. Durante la época precolombina, el lago fue la fuente principal de abastecimiento de agua y de alimento para la tribu Pocomam asentada a su alrededor (1,4).

En la actualidad, el agua del lago es utilizada con fines de consumo doméstico, irrigación, recreación, hidroelectricidad, navegación comercial en pequeña escala y pesca con fines nutricionales y comerciales (1).

El lago de Amatitlán se encuentra ubicado a 28 Kilómetros de la ciudad capital, a una altura de 1,186 msnm, con una longitud máxima de 11 Km, y un ancho máximo de 3,4 Km. Se estima que el volumen de agua es de 225 millones de metros cúbicos; su profundidad promedio es de 15 metros y la máxima es de 32 metros. Actualmente tiene una extensión de

15 Km<sup>2</sup>. Los municipios que comparten las riberas del lago son: Amatlán, Villa Canales, San Miguel Petapa y Villa Nueva (1).

**Flora:** en el lago existen varias clases de plantas. En sus orillas se encuentran plantas como *Jussiaea peruviana*, o hierba de clavo, la *Typha scirpas* o tul. Otras plantas flotan, como la *Eichhornia crassipes* conocida como lechuguilla o ninfa. Entre las algas esta la *Microcystis eruginosa* (nata verde flotante) que produce un olor similar al gamezán, provoca irritación en la piel y al ser ingerida produce vómitos pudiendo ocasionar la muerte (1).

Las algas se han reproducido en exceso debido a las grandes cantidades de Fósforo y Nitrógeno que llegan al lago provenientes de las aguas residuales domésticas, industriales y agroindustriales sin ningún tipo de tratamiento, las cuales son trasportadas por el río Villalobos (1,4).

**Fauna:** a la llegada de los españoles, en el lago existía una especie de pez pequeño llamado mojarra azul (*Cichlasoma guttulatum*), especie endémica del lugar. Su alimentación era herbívora ya que se alimentaba de algas y plantas acuáticas. Posteriormente, se introdujo otra especie de pez, también herbívora: la pepesca (*Astianax fasciatus*) (1).

Alrededor de 1940, nuevamente fue sembrada otra especie en el lago de Amatlán. Este nuevo pez, el guapote o pez tigre (*Cichlasoma managüense*) que vive en la actualidad, es carnívoro. Pronto se alimentó de las especies herbívoras y omnívoras, provocando un desequilibrio en el ecosistema del lago. Este hecho ocasionó también la proliferación de algas (fitoplacton) y plantas acuáticas flotantes como la lechuguilla. Según estudios realizados por la Autoridad para el Manejó Sustentable del Lago –AMSA-, el *Cichlasoma managüense* presenta en promedio 16 partes por millón (ppm) de plomo, o sea, ocho veces más de lo que un ser humano puede soportar en toda su vida (2 ppm). Se han detectado, en el lomo del pez, elevadas concentraciones de coliformes fecales y totales, entre otras (1,4).

Otro de los especímenes que se encuentran en gran proporción es el *Cichlasoma macracanthum* o mojarra negra, que es un pez omnívoro de carne muy nutritiva y pocas espinas. Además en el lago se encuentran otras especies como la *Tilapia spp.* que es un pez herbívoro y de coloración gris oscuro, la carpa, pupos, caracol, almeja, camarón y cangrejo (1,4).

Las descargas de residuos sólidos al lago afectan negativamente a la reproducción de peces, ya que ésta se precipita al fondo y cubre los huevecillos de los peces y los organismos que son alimento para éstos, impidiendo que se desarrollen (1,4).

## B. FACTORES QUE INFLUYEN EN EL DETERIORO DEL LAGO

**1. Producción industrial:** En la actualidad, Guatemala cuenta con más de 3,193 industrias reportadas por el INE, en 1996; de éstas **900 se encuentran ubicadas en la Cuenca del lago de Amatitlán** distribuidas en varias ramas como: textiles, alimenticias (que ocupan el 29.8% de la mano de obra de habitantes), metalúrgicas, galvanoplásticas, químicas, agroquímicas, curtiembres, jabones y cosméticos, yeso y cerámica entre otras. Estas se distribuyen principalmente en las zonas 11 y 12 de la ciudad capital y en el municipio de Villa Nueva (1).

El principal problema radica en la falta de tratamiento de sus residuos líquidos, sólidos y gaseosos. Por tal razón en Guatemala el sector industrial, hasta el momento, no funciona de acuerdo a las características del ecodesarrollo. Es importante considerar la modernización en el sector, mejorando su eficiencia, reduciendo o eliminando la producción de dichos residuos.

Los parámetros de contaminación necesarios para detectar la contaminación de los residuos líquidos provocados por el sector industrial son los siguientes (1):

- a) **DBO:** Demanda Bioquímica de Oxígeno. Es la cantidad de oxígeno necesaria para la degradación bioquímica de los componentes orgánicos presentes en las aguas residuales, por la acción de los microorganismos a los cinco días.
- b) **DQO:** Demanda Química de Oxígeno. Es la cantidad de oxígeno necesaria para la oxidación de los componentes orgánicos e inorgánicos solubles y presentes en aguas residuales, excepto los componentes nitrogenados e hidrocarburos.
- c) **Sólidos Sedimentables:** Son aquellos sólidos en solución que se precipitan a causa de la acción de la gravedad siempre y cuando la velocidad del fluido en el cual se transportan así lo permita. Para lograr esta acción a nivel de laboratorio esta prueba se realiza utilizando un cono sedimentador llamado Cono Imhoff, en un tiempo de una hora.
- d) **Metales:** Entre los metales a analizar están los metales pesados (Plomo, Cromo, Cadmio, Arsénico, Cobre, Níquel, entre los principales). Las concentraciones de estos metales se acumulan en la vida marina y aves, a través de la cadena trófica que al final afecta al hombre.
- e) **Potencial de Hidrógeno:** El potencial de Hidrógeno o pH es un parámetro indicativo de la presencia de ácidos o bases en aguas residuales.

**2. Residuos sólidos:** Debido a la concentración poblacional en la cuenca del lago, los residuos sólidos o basura se constituyen en uno de los más graves problemas de deterioro ambiental dentro del área. Se estima que una persona produce 1.5 lb/día de basura, que multiplicado por los 2 millones de habitantes en el área de la cuenca producen 3 millones de libras diarias de residuos, por lo tanto, su producción desmedida es uno de los mayores problemas. Hace aproximadamente 50 años no existían productos de nylon o plástico, que son productos que se utilizan por poco tiempo, se acumulan rápido y no son biodegradables, constituyéndose en un gran problema para el ambiente (1).

Otro problema es la mala disposición de los residuos sólidos. Los botaderos clandestinos que se crean en cualquier parte a través de la basura acumulada en las calles, quebradas, cunetas, entre otros, son un medio ideal para el cultivo de bacterias y virus; siendo, además, el hábitat para roedores y moscas (1).

Dentro de cada una de las clasificaciones pueden establecerse varias categorías, por ejemplo, los residuos tóxicos, peligrosos y no tóxicos. Los residuos tóxicos y peligrosos son aquellos que contienen sustancias que exigen un manejo especial (1).

Si se considera que todo este tipo de basura llega al lago de Amatitlán a través del río Villalobos, por fuertes vientos y lluvia, se puede medir la magnitud del problema que ésta ocasiona. Se estima que en un año llegan al lago aproximadamente 75 mil toneladas de basura proveniente de los barrancos, zanjones, cunetas y sitios baldíos; siendo depositada en esos lugares por los habitantes del área (1).

**3. Residuos líquidos:** El crecimiento acelerado de las áreas urbana e industrial de la ciudad de Guatemala y las cabeceras municipales de Mixco, Villa Nueva, San Miguel Petapa, Villa Canales, Amatitlán y parte de Santa Catarina Pinula, ha provocado la eutrofización del lago de Amatitlán, enriqueciendo éste cuerpo de agua con contaminantes como fosfatos, nitritos y materia orgánica; dichas poblaciones no cuentan con el tratamiento mínimo de aguas residuales ni de desechos sólidos domésticos (1).

Por lo tanto, las aguas residuales domésticas, que constituyen un 86% de las aguas superficiales que ingresan al lago, y las aguas industriales, que constituyen un 14%, son vertidas inicialmente a los barrancos, ríos, riachuelos y al suelo sin ningún tratamiento, teniendo como consecuencia la contaminación de las aguas subterráneas y superficiales, en niveles tan elevados que el lago de Amatitlán presenta un estado hipertrófico, así como una elevada producción de



microfitas y macrofitas. Así también, las descargas de aguas residuales y agroquímicas aceleran el proceso de crecimiento de las algas que al estar depositadas sobre la superficie del lago impiden la penetración de los rayos solares y la circulación del agua para su oxigenación (1).

El principal problema que sufre el lago al recibir diariamente descargas de aguas residuales se traduce en tres impactos considerables de diferente naturaleza (1):

- **La acumulación de compuestos tóxicos a través de una contaminación química.** Ésta provoca una perturbación al ecosistema por medio de una sustancia que no es incorporada por la evolución propia de un lago siendo consecuencia de la actividad humana. Los principales contaminantes químicos lo constituyen nutrientes como nitrógeno, fósforo, metales pesados (plomo, mercurio, cobre, zinc, cadmio y otros) y biocidas (herbicidas y pesticidas).
- **La proliferación de agentes patógenos para el hombre y otras especies.** Como virus, bacterias, hongos y parásitos que podrían ocasionar infecciones intestinales en la población que consume el agua del lago.
- **La eutrofización de sus aguas.** Es un proceso por el cual se llega a un estado biofísico-químico resultante del aumento de nitrógeno y fósforo en un cuerpo de agua. Esto trae como consecuencia una tensión o alteración al equilibrio propio de los ciclos de estos elementos en el ecosistema

Estos factores han provocado que la vida animal y el ecosistema del lago disminuyan, que la cantidad de oxígeno disuelto baje en forma alarmante y que se aumente la cantidad de fitoplancton en forma negativa

#### 4. Aguas residuales domésticas

Debido a que una fuente grande de contaminación de la cuenca y del lago de Amatlán la constituye el agua de uso doméstico no tratada (como la utilizada en el lavado de ropa, la higiene personal y uso de sanitarios), es necesario construir y/o rehabilitar plantas de tratamiento para evitar que ésta llegue en precarias condiciones al cuerpo hídrico (1).

Generalmente, el tratamiento ideal para las aguas residuales requiere de dos pasos:

- a) **Tratamiento primario:** Éste remueve entre el 40% y 50% de los residuos sólidos acumulados, realizándose a través de (1,8):
  - **Alcantarilla Sanitaria,** recolectan y conducen el agua residual de casas y empresas a la planta de tratamiento (1,8).

- **Canal de rejas**, dejan pasar el agua pero detienen la basura y desechos grandes que son recolectados y llevados al basurero (1,8).
  - **Desarenadores**, son grandes estanques que reducen la velocidad del flujo de agua y permiten que el arena, gravilla y otros sólidos se depositen en el fondo para que después sean removidos (1,8).
  - **Tanque de sedimentación**, permite que las pequeñas partículas en suspensión que aún quedan se vayan al fondo, donde son barridas y recogidas junto con la grasa que flota en la superficie del tanque (1,8).
- b) **Tratamiento secundario**: Llamado también tratamiento biológico debido a la presencia de microorganismos que degradan la materia orgánica. Este tratamiento remueve entre un 85% y 90% de los sólidos restante, complementando el proceso, a través de (1,8):
- Tanque de sedimentación (tanque imhoff)
  - Filtros biológicos (percoladores)
  - Reactor anaerobio de flujo ascendente (RAFA)
  - Lagunas de estabilización
  - Zanjas de oxido-reducción
  - Tanques anaerobios (de agua o digestión de lodos) (1,8).

## 5. Uso del suelo

El área metropolitana de Guatemala, ubicada a 25 Km, del lago de Amatitlán tiene, aproximadamente, 100 Km<sup>2</sup> de extensión. Por ser el punto de mayor concentración poblacional y el lugar donde se genera la mayor actividad de intercambio, gestión y consumo, su crecimiento es cada vez más acelerado. Sin embargo, las limitantes físicas que tiene el valle son muy grandes debido a las características geomorfológicas de la región, por lo que ésta se ha extendido en forma espontánea y desordenada bajo un control poco eficiente, principalmente hacia el sur y nororiente (1).

## 6. Desestabilización de los ríos

La deforestación en las cabeceras de cuenca y en las riberas de ríos, la explotación descontrolada de materiales para la construcción, el crecimiento urbano desordenado y no

planificado han provocado un desequilibrio ecológico que ha incidido en el deterioro de los ríos de la cuenca y por tanto del lago de Amatitlán. Los ríos San Lucas, El Molino, El Frutal, Platanitos, Pinula y Las Minas se ven diariamente explotados por empresas que se dedican a la comercialización de arena y piedra; esta actividad ha venido a alterar la pendiente de los ríos provocando la formación de cárcavas en época de verano y alterando el cauce hasta en cuatro metros de profundidad. En época de lluvia los ríos acarrearán grandes cantidades de sedimentos provenientes de las partes altas de sus cuencas y de las áreas explotadas. Estos sedimentos son depositados en las zonas bajas y planas de los ríos incrementando su altura en el lecho, del río, y derramando el agua por los laterales. Dichos desbordamientos han provocado inundaciones principalmente en los centros poblados que se ubican en los márgenes de éstos (1).

Los factores anteriores han incidido de manera radical en el río Villalobos, ya que éste acarrea 1.5 millones de toneladas de sedimentos al año, teniendo como efecto el asolvamiento del lago de Amatitlán provocando una pérdida en el área de 10,000 m<sup>2</sup>/año y pérdida en volumen de 0.75 m<sup>3</sup>/año, reduciendo con esto su capacidad y extensión (1).

## **7. Ausencia de educación ambiental**

El papel del docente es fundamental para lograr la conceptualización de la problemática y provocar los cambios de conducta en la niñez y juventud de la cuenca del lago y proyectarse hacia los padres de familia. A través de la educación es posible lograr que las futuras generaciones aprendan a vivir en comunión entre sí y con la naturaleza, para asegurar una calidad de vida acorde a la dignidad y supervivencia del hombre, enmarcados dentro de los Acuerdos de Paz (1).

AMSA cuenta con personal que se dedica a ir las escuelas e instituciones para orientarlos en el manejo de la basura y les da clases acerca de la fauna y flora que se encuentra en el lago.

## **C. COMPOSICIÓN DE LOS CAUDALES DE AGUAS RESIDUALES**

Los componentes que configuran el agua residual que genera una comunidad dependen del tipo de red de alcantarillado empleado y pueden incluir (9):

- ✓ Agua residual doméstica (también llamada sanitaria): es el agua residual procedente de residencias, instalaciones comerciales, públicas y similares.

- ✓ Agua residual industrial: agua residual en la cual predominan vertidos industriales
- ✓ Infiltración y conexiones incontroladas: agua que penetra de forma no controlada en la red de alcantarillado procedente del subsuelo y agua pluvial.
- ✓ Agua pluvial: agua resultante de la escorrentía superficial (9).

## **D. ORIGEN Y CAUDALES DE LAS AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS**

Las principales fuentes de agua residual doméstica de una comunidad las constituyen las zonas residenciales e industriales (9).

### **1. Zonas residenciales**

En el caso de pequeñas zonas residenciales es corriente determinar los caudales de aguas residuales a partir de la densidad de la población y de la contribución media per capita (9).

## **E. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS**

### **1. Turbiedad**

La turbiedad es una expresión de la propiedad o efecto óptico causado por la dispersión e interferencia de los rayos luminosos que pasan a través de unas muestras de aguas; en otras palabras, la turbiedad es la propiedad óptica de una suspensión que hace que la luz sea reemitida y no transmitida a través de la suspensión. Es otro parámetro usado para indicar la calidad de las aguas naturales y las aguas residuales tratadas con relación al material residual en suspensión coloidal. Puede ser causada por una gran variedad de materiales en suspensión, que varían en tamaño, desde dispersiones coloidales hasta partículas gruesas, entre otros, arcillas, limo, materia orgánica e inorgánica finamente dividida, organismos planctónicos, microorganismos, etc. (10).

La medición de la turbiedad se realiza por comparación entre la intensidad de luz dispersa por una suspensión de referencia bajo las mismas condiciones (11,12). En general, no hay relación entre la turbiedad y la concentración de sólidos suspendidos en aguas residuales no tratadas (13). El método más utilizado para determinar la turbiedad es el método

nefelométrico, en el cual se mide la turbiedad mediante un nefelómetro y los resultados son expresados en unidades de turbiedad nefelométrica, UTN (10).

El método nefelométrico es el método instrumental preferido para medir turbiedad, por ser más sensible que el método visual del turbidímetro de Jackson y que el método instrumental de medida de comparación de la intensidad del rayo de luz transmitido con la intensidad del rayo de luz incidente (10).

Los valores de turbiedad sirven para determinar el grado de tratamiento requerido por una fuente cruda, su filtrabilidad y consecuentemente, la tasa de filtración más adecuada, la efectividad de los procesos de coagulación, sedimentación filtración, así como para determinar la potabilidad del agua (10).

La turbiedad debe analizarse de inmediato, de lo contrario se puede almacenar la muestra a 4°C. Al momento de analizar después de refrigerada la muestra debe llevarse a temperatura ambiente (24°C) (10).

Pueden emplearse cinco métodos para la medición de la turbiedad del agua, pero solo dos de ellos, el de nefelometría y el de turbidimetría, forman la base de los presentes métodos estándar. Siendo el método nefelométrico que se emplea actualmente para medir la turbiedad, el cual mide la intensidad de la luz que se esparce a 90° del haz de la luz incidente (14).

## 2. Color

El color en aguas residuales es causado por sólidos suspendidos, material coloidal y sustancias en solución (11,12). El color causado por sólidos suspendidos se llama *color aparente* mientras que el color causado por sustancias disueltas y coloidales se denomina *color verdadero*. El color aparente se determina sobre la muestra original sin filtración o centrifugación previa. Una vez centrifugada la muestra, se determina su color por comparación con una serie de estándares de color preparados a partir de una solución patrón de  $K_2PtCl_6$ , la cual contiene 500 mg/L de Pt y 250 mg/L de cobalto para darle una tonalidad adecuada (10).

Las fuentes de color en aguas residuales incluyen la infiltración y aportes de conexiones erradas en sistemas de recolección, descargas industriales y la descomposición de compuestos orgánicos. Dependiendo de la época del año, los aportes por infiltración y conexiones erradas en sistemas de recolección contendrán una concentración variada de sustancias húmicas (p.ej. taninos, ácidos húmicos y humatos). Provenientes de la descomposición de la lignina

encontrada en las hojas y otros materiales orgánicos de las plantas, las sustancias húmicas generalmente imparten un color amarillo al agua (11).

La condición referente al tiempo del agua residual se determina cualitativamente por su color y olor. El agua residual es usualmente un color ligeramente café-grisáceo. Sin embargo, con el tiempo de transcurrido se incrementa en el sistema de recolección y se desarrolla más las condiciones anaeróbicas, el color del agua residual cambia secuencialmente de gris a gris oscuro y finalmente a negro (13). Si el color es café claro, el agua residual lleva aproximadamente 6 horas después de su descarga. Un color gris claro es característico de las aguas que han sufrido algún grado de descomposición o que han permanecido un tiempo corto en los sistemas de recolección. Si el color es gris oscuro o negro, se trata en general de aguas sépticas que han sufrido una fuerte descomposición bacterial bajo condiciones anaerobias (en ausencia de oxígeno). El oscurecimiento de las aguas residuales se da con frecuencia debido a la formación de varios sulfuros, en particular sulfuro ferroso (FeS). La formación de sulfuros ocurre cuando el ácido sulfhídrico, producido a partir de la reducción de sulfato bajo condiciones anaerobias, se combina con metales divalentes que pueden estar presentes en las aguas residuales, como el hierro (11). La importancia principal del color en el agua es de orden estético (14).

### **3. Temperatura**

La temperatura del agua residual es por lo general mayor que la temperatura del agua para abastecimiento como consecuencia de la incorporación de agua caliente proveniente del uso doméstico e industrial. La medición de la temperatura es importante, ya que muchos de los sistemas de tratamiento de aguas residuales incluyen procesos biológicos que dependen de la temperatura. La temperatura de un agua residual varía de estación en estación y también con la posición geográfica. En regiones frías, la temperatura varía de 45 a 65°F (7 a 18°C) mientras que en regiones cálidas la variación será de 55 a 86°F (13 a 30°C) (11).

La temperatura del agua es un parámetro muy importante porque afecta directamente las reacciones químicas y las velocidades de reacción, la vida acuática y la adecuación del agua para fines benéficos (11). La velocidad de las reacciones químicas disminuye al disminuir la temperatura. La temperatura puede afectar todos los aspectos del tratamiento y suministro de agua potable. A medida que disminuye la temperatura, aumenta la viscosidad del agua y disminuyen las velocidades de sedimentación y de filtración (14).

Para obtener buenos resultados, la temperatura debe tomarse en el sitio de muestreo. Normalmente, la determinación de la temperatura puede hacerse con un termómetro que debe sumergirse en el agua, preferiblemente con el agua en movimiento, y la lectura debe hacerse después de un período de tiempo suficiente que permita la estabilización del nivel de mercurio (10).

#### **4. Salinidad**

La definen como los sólidos totales en el agua cuando todos los carbonatos han sido convertidos en óxidos. Todos los bromuros y yoduros han sido reemplazados por una cantidad equivalente de cloruros y toda la materia orgánica ha sido oxidada (12).

#### **5. Conductividad**

La conductividad del agua es una expresión numérica de su habilidad para transportar una corriente eléctrica. La conductividad del agua depende de la concentración total de sustancias disueltas ionizadas en el agua y de la temperatura a la cual se haga la determinación (12).

#### **6. Sólidos totales**

Analíticamente, el contenido de sólidos totales de un agua residual se define como toda materia orgánica que permanece como residuo sobre la evaporación de 103 a 105°C. Los sólidos suspendidos son los sólidos que se asientan en la parte de abajo de un contenedor llamado Imhoff en un período de 60 minutos. Los sólidos suspendidos se expresan como ml/L y son una medida aproximada de la cantidad de materia removida por una sedimentación primaria (13).

#### **7. Sólidos en suspensión (mg/L)**

Se definen como sólidos, la materia que permanece como residuo después de evaporación y secado a 103°C. El valor de los sólidos totales incluye material disuelto y no disuelto (sólidos suspendidos) (12).

Comprende sales inorgánicas y pequeñas cantidades de materia orgánica. Es la expresión que se aplica a los residuos de material que quedan en recipiente después de la evaporación de una muestra y su consecutivo secado en estufa a temperatura definida. Los

sólidos totales incluyen los sólidos totales suspendidos o porción de sólidos totales retenida por un filtro y los sólidos disueltos totales o porción que atraviesa el filtro (12).

Los sólidos pueden afectar negativamente la calidad del agua o su suministro de varias maneras. Las aguas con abundantes sólidos disueltos suelen ser de inferior potabilidad y pueden inducir una reacción fisiológica desfavorable en el consumidor ocasional (10).

### **8. Sólidos sedimentables**

Se aplica a los sólidos en suspensión que se sedimentarán, bajo condiciones tranquilas, por acción de la gravedad (12).

## **F. CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS INORGÁNICAS**

Los constituyentes químicos de las aguas residuales son con frecuencia clasificados en inorgánicos y orgánicos. Los inorgánicos incluyen 1) elementos individuales como calcio (Ca), cloruro (Cl), hierro (Fe), cromo (Cr), y zinc (Zn) y 2) una amplia variedad de compuestos como nitratos ( $\text{NO}_3$ ) y sulfatos ( $\text{SO}_4$ ). Los constituyentes orgánicos de mayor interés en las aguas residuales se clasifican como agregados e individuales (11).

Los constituyentes químicos inorgánicos de interés comprenden nutrientes constituyentes no metálicos, metales y gases. Entre los nutrientes inorgánicos están amoníaco libre, nitritos, nitratos, fósforo orgánico, y fósforo inorgánico. El nitrógeno y el fósforo son de gran importancia, ya que han sido identificados como nutrientes causantes principales del crecimiento indeseable de plantas acuáticas. El pH, alcalinidad, cloruros y sulfatos son realizadas para estimar la capacidad de reutilización de aguas residuales tratadas y también como pruebas para el control de varios procesos de tratamiento (11).

### **1. pH**

El pH de una solución es el logaritmo común negativo de la actividad del ión hidrógeno. El pH de un sistema acuoso es una medida del equilibrio ácido-base alcanzado por diversos compuestos disueltos y en la mayor parte de aguas naturales, está controlado por el sistema de equilibrio bióxido de carbono /anhídrido carbónico)-bicarbonato-carbonato (14).

El intervalo adecuado de pH para la existencia de la mayor parte de la vida biológica es relativamente estrecho, en general entre pH 5 y 9. Las aguas residuales con valores de pH



menores a 5 y superiores a 9 son de difícil tratamiento mediante procesos biológicos. Si el pH del agua residual tratada no es ajustado antes de ser vertido, el pH de la fuente receptora puede ser alterado; por ello, la mayoría de los efluentes de las plantas de tratamiento de aguas residuales deben ser descargados dentro de límites específicos de pH (11).

## 2. Nitrógeno

Dado que el nitrógeno y el fósforo son esenciales para el crecimiento biológico, reciben el nombre de nutrientes o bioestimulantes. Cantidades traza de otros elementos, como el hierro, también son necesarios para el crecimiento biológico, pero el nitrógeno y el fósforo son en la mayoría de los casos los nutrientes más importantes (11). Porque el nitrógeno es un esencial constructor de bloques en la síntesis de proteínas, el nitrógeno se requiere para evaluar la tratabilidad del agua residual por procesos biológicos (13). En casos en los que la concentración de nitrógeno sea insuficiente será necesario adicionarlo para lograr que el agua residual sea tratable. El contenido total de nitrógeno está compuesto por nitrógeno amoniacal, nitritos, nitratos y nitrógeno orgánico (11).

A pesar de estar presente en concentraciones tan bajas, los nitritos son de gran importancia en estudios de aguas residuales o aguas poluidas porque son altamente tóxicos para muchos peces y otras especies acuáticas. Los nitritos presentes en aguas residuales tratadas son oxidados por adición de cloro, el cual ocasionan un aumento en la demanda de cloro y en los costos de desinfección (11).

## 3. Nitritos

El nitrógeno de nitritos raras veces aparece en concentraciones mayores de 1mg/L, aun en efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales.

En la determinación se emplean dos reactivos orgánicos, ácido sulfanílico y  $\alpha$ -naftilamina. En condiciones ácidas, el ion nitrito, como ácido nitroso, reacciona con el grupo amino del ácido sulfanílico para formar una sal diazonea que se combina con el reactivo de  $\alpha$ -naftilamina constituyendo un colorante azoico de color púrpura-rojizo. El color producido es directamente proporcional a la cantidad de nitrógeno de nitritos presentes en la muestra (10).

#### **4. Nitratos**

Los nitratos se hallan ampliamente difundidos en grandes cantidades en el suelo, en la mayoría de las aguas y en las plantas, incluyendo las verduras. Los nitratos son producto de la oxidación del nitrógeno orgánico por las bacterias presentes en los suelos y en el agua, cuando el oxígeno presente es suficiente (14).

#### **5. Fósforo**

El fósforo se encuentra en las aguas naturales y residuales casi exclusivamente en forma de fosfatos clasificados en ortofosfatos, fosfatos condensados, piro, meta y otros polifosfatos y los ligados orgánicamente. Cantidades pequeñas de algunos fosfatos se añaden a algunos suministros de agua durante el tratamiento y se pueden añadir cantidades mayores de los mismos compuestos cuando el agua se utiliza para lavar ropa u otras limpiezas, ya que son los componentes principales de muchos preparados comerciales para la limpieza. Los fosfatos se utilizan ampliamente en el tratamiento de aguas de calderas. Los ortofosfatos aplicados como fertilizantes a la tierra cultivada agrícola o residencial son arrastrados a las aguas superficiales como las lluvias. Los fosfatos orgánicos se forman principalmente en procesos biológicos. Son aportados al alcantarillado por los residuos corporales de alimentos y también se pueden formar a partir de los ortofosfatos durante los procesos de tratamiento biológico o por recibir la carga biológica del agua. (10) El fósforo también es importante en el crecimiento de algas y otros organismos biológicos. Debido al nocivo crecimiento incontrolado de algas en aguas superficiales. Las aguas residuales municipales, por ejemplo, pueden contener entre 4 y 12 mg/L de fósforo expresado como P (11).

El uso de detergentes. Los cuales contienen grandes cantidades de fósforo, ha aumentado el contenido de fosfato en el agua residual doméstica y contribuida al problema de incremento del mismo en las fuentes receptoras (12).

#### **6. Alcalinidad**

Se define como la capacidad para neutralizar ácidos, como su capacidad para reaccionar con iones hidrógeno, como su capacidad para aceptar protones o como la medida de su contenido total de sustancias alcalinas (OH). La determinación de la alcalinidad total y de las distintas formas de alcalinidad es importante en los procesos de coagulación química, ablandamiento, control de corrosión y evaluación de la capacidad tampón de un agua (14). En

aguas residuales, la alcalinidad se debe a la presencia de hidróxidos  $[\text{OH}^-]$ , carbonatos  $[\text{CO}_3^{2-}]$  y bicarbonatos  $[\text{HCO}_3^-]$  de elementos como calcio, magnesio son los más comunes. La alcalinidad en las aguas residuales ayuda a regular los cambios de pH causados por la adición de ácidos. Normalmente, el agua residual es alcalina, propiedad adquirida de las aguas de abastecimiento, aguas subterráneas y los materiales adicionados durante los usos domésticos (11,12).

## 7. Otros constituyentes inorgánicos no metálicos

**a) Metales:** Todos los organismos vivos requieren para su adecuado crecimiento elementos como hierro, cromo, cobre, cinc, cobalto en cantidades diferentes (cantidades macro y micro). Aunque las cantidades macro y micro de metales son esenciales para un normal desarrollo de la vida biológica, estos elementos pueden llegar a ser tóxicos cuando se presentan en cantidades elevadas (11). Muchos de estos metales son también clasificados como contaminantes prioritarios. Algunos de estos metales son necesarios para el crecimiento de la vida acuática, y la ausencia en cantidades suficientes de ellos podría limitar el crecimiento de algas. La presencia de cualquiera de estos metales en cantidades excesivas puede interferir con muchos usos benéficos del agua por su toxicidad (13).

**i) Plomo:** El plomo es un componente natural de la corteza terrestre y se encuentra en una concentración promedio de alrededor de 16 mg/kg. El plomo se ha usado ampliamente durante muchos siglos, y en múltiples lugares se ha producido algún tipo de contaminación del ambiente como resultado de su uso en los trabajos de minería y de fundición o del empleo de productos elaborados con plomo (14).

Se ha calculado que el contenido de plomo natural en el agua de ríos y lagos de todo el mundo es de 1-10  $\mu\text{g}/\text{litro}$ . Las concentraciones en el agua tratada, antes de su distribución, son generalmente más bajas que en las aguas de las fuentes, ya que el plomo se remueve parcialmente en la mayor parte de las plantas de tratamiento de agua (14).

**ii) Cadmio:** Los minerales que contienen cadmio se encuentran en partes específicas del mundo, si bien se hallan trazas de este metal uniformemente distribuidas en la corteza terrestre. El cadmio ha comenzado a contaminar el ambiente y se ha encontrado en el aire, los alimentos, el suelo, las plantas y el agua. Se utilizan principalmente en la fabricación de

aleaciones y soldaduras, en revestimiento metálicos, como pigmentos, como estabilizadores en los materiales plásticos y en baterías (14).

Es probable que las aguas superficiales que contienen más de unos pocos microgramos de cadmio por litro se hayan contaminado por descargas de desechos industriales o por lixiviación de áreas de relleno, o de suelos en los que se han agregado lodos cloacales (14).

**iii) Manganeso:** Cuando el manganeso está presente en las aguas superficiales naturales, ocurre tanto en forma disuelta como suspendida. El agua subterránea anaeróbica suele contener niveles elevados de manganeso disuelto (14).

Cuando las concentraciones exceden los 0.15 mg/ litro, el manganeso imparte un sabor desagradable a las bebidas y mancha la ropa de lavado, los artefactos sanitarios y la fontanería (14).

**iv) Hierro:** Es el cuarto elemento que más abunda por peso en la corteza terrestre. En el agua, se presenta principalmente en los estados divalentes y trivalentes (ferroso y férrico). La concentración de hierro en agua bien aireada rara vez es alta, pero bajo condiciones reductoras las que pueden existir en algunas aguas subterráneas, lago o estanques, y en ausencia de sulfuro y carbonato, pueden encontrarse concentraciones altas de hierro ferroso soluble.

Bajo las condiciones de pH que existen en los abastecimientos de agua potable, las sales ferrosas son inestables y precipitan como hidróxido férrico insoluble, que se deposita formando un sedimento de color óxido rojizo (14).

**v) Níquel:** Los suelos típicos contienen entre 10 y 100 mg de níquel por kg. Los minerales principales de níquel son fundamentalmente arseniuros y sulfuros (14).

Muchas sales de níquel son solubles en el agua, lo que puede dar origen a la contaminación de este recurso. Por lo general, los niveles suelen ser mucho más bajos, es decir, 5-20µg-litro (14).

**b) Oxígeno disuelto:** El oxígeno disuelto se requiere para la respiración de microorganismos aeróbicos como también para otras formas de vida aeróbica. Sin embargo el oxígeno es levemente soluble en agua (13).

Las reacciones bioquímicas que utilizan oxígeno incrementan al incrementar la temperatura, los niveles de oxígeno tienden a ser más críticos en los meses de verano. El problema está compuesto en los meses de verano porque la corriente está usualmente baja y así pues la cantidad total disponible de oxígeno es baja. La presencia de oxígeno disuelto en aguas residuales es deseable porque previene la formación de olores nocivos (13).

El oxígeno es menos soluble en agua tibia que en agua fría. El incremento en el tipo de reacciones bioquímicas que acompañen un incremento en la temperatura, combinado con la disminución en la cantidad de oxígeno presente en la superficie del agua, puede regularmente causar serias depleciones en la concentración de oxígeno disuelto en los meses de verano (13). Es la medida de la cantidad de oxígeno disuelto que puede estar presente en un determinado cuerpo de agua (14).

La importancia que reviste la determinación de este parámetro, es que proporciona una medida de la calidad del agua a través de las distintas unidades de tratamiento (15).

## **G. CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DE COMPUESTOS ORGÁNICOS AGREGADOS**

Compuestos orgánicos son normalmente compuestos de una combinación de carbono, hidrógeno, y oxígeno, junto con el nitrógeno en algunos casos. Otros importantes elementos, como el sulfuro, fósforo y hierro pueden también estar presente (13). La materia orgánica en aguas residuales se constituye básicamente de proteínas (40 a 60 por ciento), carbohidratos (25 a 50 por ciento), y grasas y aceites (8 a 12 por ciento). La urea, el mayor constituyente de la orina, es otro componente orgánico importante que hace parte de las aguas residuales frescas. Dada su rápida descomposición no es usual encontrarla en otro tipo de aguas (11).

### **1. Caracterización de la materia orgánica agregada en aguas residuales**

Los análisis de compuestos orgánicos agregados se hacen para caracterizar aguas residuales tratadas y no tratadas, para estimar el desempeño de los procesos de tratamiento y estudiar su comportamiento en las fuentes receptoras. En la actualidad, los métodos de laboratorio comúnmente usados para medir cantidades de materia orgánica (en general mayores a 1 mg/L) en aguas residuales incluyen: 1) la demanda bioquímica de oxígeno a los cinco días ( $DBO_5$ ), 2) la demanda química de oxígeno (DQO) (11).

## 2. Demanda bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>)

La DBO<sub>5</sub> tiene su aplicación más extendida en la determinación de las cargas residuales en las instalaciones de tratamiento y en la evaluación de la eficacia de extracción de la DBO<sub>5</sub> de tales sistemas de tratamiento. La prueba mide el oxígeno utilizado, durante un período de incubación especificado, para la degradación bioquímica de materia orgánica y el oxígeno utilizado para oxidar materia orgánica como los sulfuros y el ion ferroso (10).

Si existe suficiente oxígeno disponible, la descomposición biológica aerobia de un desecho orgánico continuará hasta que el desecho se haya consumido. Tres actividades más o menos diferenciadas pueden ocurrir. Primero, una parte del desecho se oxida a productos finales y con ellos los microorganismos obtienen energía para el mantenimiento de las células y la síntesis de nuevo tejido celular. Simultáneamente, otra fracción del desecho se convierte en tejido celular nuevo empleando la energía liberada durante la oxidación. Por último, cuando se consume la materia orgánica, las nuevas células empiezan a consumir su propio tejido celular con el fin de obtener energía para el mantenimiento celular; este tercer proceso es llamado respiración endógena (11).

En la prueba estándar de DBO<sub>5</sub>, una pequeña muestra de agua residual se coloca en una botella de DBO<sub>5</sub> (volumen de 300 ml). La botella se completa a volumen usando agua saturada con oxígeno y con los nutrientes requeridos para crecimiento biológico. Antes de tapar la botella se mide la concentración de oxígeno. Después de incubar la botella por cinco días a 20°C, la concentración de oxígeno disuelto se mide de nuevo. La DBO<sub>5</sub> de la muestra es la diferencia entre los valores de concentración de oxígeno disuelto, expresado en miligramos por litro, dividido por la fracción decimal del volumen de muestra usada. El valor calculado de DBO<sub>5</sub> se conoce como la demanda bioquímica de oxígeno a cinco días y 20°C (11).

**a) Limitaciones de la prueba de DBO<sub>5</sub>:** Aunque la DBO<sub>5</sub> es una prueba comúnmente usada, tiene varias deficiencias serias. Una de ellas es que la prueba no tiene validez estequiométrica. Es decir, el periodo arbitrario de cinco días no corresponde al momento en que se haya consumido todo el residuo. Además, se desconoce el punto al que corresponde el valor de la DBO<sub>5</sub> a cinco días dentro de la curva de demanda. Un periodo de incubación de cinco días se usa porque la prueba fue desarrollada en Inglaterra donde el tiempo máximo de transporte para muchos ríos desde su nacimiento hasta su desembocadura en el océano, es en promedio de 4.8 días (11).

La prueba de la  $DBO_5$  tiene baja reproducibilidad y valores menores a 2mg/L o con más de dos cifras significativas son sospechosos.

Desde el punto de vista analítico, la  $DBO_5$  es un parámetro pobre porque, al igual que la prueba de SST, es un parámetro que agrupa un conjunto de constituyentes de las aguas residuales pero no da información individual acerca de ellos. A pesar de sus limitaciones, el uso de la  $DBO_5$  como parámetro de regulación es aceptable porque la prueba representa el consumo potencial de oxígeno que las aguas residuales pueden demandar en las fuentes receptoras y el grado de tratamiento al que ha sido sometida determinada agua residual (11).

### **3. Demanda química de oxígeno (DQO)**

La prueba de la DQO es usada para medir el material orgánico presente en las aguas residuales, susceptible de ser oxidado químicamente con una solución de dicromato en medio ácido (11). Esta prueba se debe realizar a elevadas temperaturas. La DQO en aguas residuales es en general elevado más que en la DBO porque más componentes pueden ser oxidados químicamente que oxidados biológicamente. Para muchos tipos de desechos, es posible correlacionar la DQO con la DBO. Este puede ser muy utilizado porque se puede determinar en 3 horas, comparado con los 5 días de la DBO. Una vez estabilizada la correlación, la medida de DQO puede ser usado como una buena ventaja para el control y operación en las plantas de tratamiento (13).

## **H. ASPECTOS MICROBIOLÓGICOS**

Idealmente, el agua potable no debe contener ningún microorganismo considerado patógeno. El primer indicador bacteriano que se recomienda para este propósito es el grupo de organismos coliformes en su conjunto (o grupo coliformes). Aunque considerados como grupo, estos organismos no son exclusivamente de origen fecal, ellos están siempre presentes en gran número en las heces del hombre y de otros animales de sangre caliente, por lo que pueden ser detectados aún después de considerable dilución. La detección de organismos coliformes fecales (termoresistentes), en particular de *Escherichia coli*, brinda una evidencia definitiva de contaminación fecal (16).

## 1. Fluorocult Caldo LMX

El Fluorocult Caldo LMX modificado por Manafi y Ossmer es un caldo de enriquecimiento selectivo para la detención simultanea de coliformes totales y *E. coli* en análisis bacteriológico de agua y alimentos (17).

La alta calidad nutricional del caldo y el buffer fosfato incorporado garantizan un alto porcentaje de crecimiento de los coliformes presente, donde el Lauril Sulfato contenido inhibe el crecimiento de una amplia flora gram-positiva (17).

La detección simultanea de coliformes totales y *E. coli* es posible por la adición de un sustrato cromogénico: 5-Bromo-4-cloro-3-indolyl Beta-D- Galactopiranosido (X-GAL) el cual es decolorado por coliformes, produciendo un color azul-verdoso en el caldo. La coloración azul-verdosa indica la presencia de bacterias coliformes totales (17).

El 1-isopropil-Beta-D-1-tiogalactopiranosido (IPTG) tiene un efecto de ampliación en la enzima de síntesis e incrementa la actividad de la Beta-D-galactoxidasa (17).

La enzima Beta-D-glucoronidasa divide el sustrato fluorogénico 4-metilumbeliferil-Beta-D-glucoronido (MUG). Esta enzima es muy específica para el *E. coli* al utilizarse, produce una fluorescencia con luz U.V. por la formación de 4-metilumbeliferona. Dicha fluorescencia indica la presencia del *E. coli* (17).

El triptofano contenido como sustrato, permite la conformación adicional de *E. coli* con el reactivo del indol, lo cual nos da mayor seguridad en el diagnóstico (17).

### Ventajas

**Resultado rápido:** Reducción del tiempo de detención para coliformes incluyendo *E. coli* a 24 horas.

**Interpretación simple de los resultados:** El color azul característico de los coliformes resulta más fácil de observar que la formación de gas.

**Alta seguridad en resolución:** Alta sensibilidad de la reacción Galactoxidasa versus formación de gas (95% vs 90%)

**Economía:** Reducción de la carga de trabajo y tiempo

- Simultanea detección de coliformes y *E. coli* en un tubo
- No requiere tubos de Durham
- Ausencia de resultados falsos-negativos (17).



## 2. Análisis microbiológico de aguas

Bajo “Número de Gérmenes” se entiende el número de unidades formadoras de colonias (UFC) o número total de gérmenes de una determinada especie, que se pueden determinar en una cantidad específica de muestra, generalmente 1gr, 1ml ó 100ml, bajo condiciones de cultivo definidas y en un medio de cultivos determinado (17).

Para determinación del número de gérmenes en agua existen a disposición los siguientes procedimientos:

- Método del vertido en placa
- Método del título
- Método del NMP (Número más probable)
- Método de filtración por membrana (17).

## 3. Número más probable (NMP/100cc):

**a) Determinación de bacterias coliformes:** El recuento en medio sólidos proporciona conteos más exactos pero generalmente resulta negativo con aguas de baja carga microbiana. Con los medios líquidos, el número de coliformes presente puede ser estimado mediante la técnica de tubos múltiples del NMP (número más probable) (17).

El grupo de los coliformes comprende varios géneros de la familia enterobacteriaceae que están ampliamente distribuidos en la naturaleza; agua y suelo, pero también es habitante normal del tracto intestinal del hombre y de animales de sangre caliente (coliformes fecales).

Su presencia en el agua es signo de mala sanitización de las aguas potables, falta de higiene y aún de contaminación fecal (17).

**i) Técnica de tubos múltiples o número más probable:** En el procedimiento de tubos múltiples para la determinación de la densidad de coliformes se tienen dos metodologías (17).

La primera es la tradicional o antigua de tubos múltiples de fermentación, el cual considera tres etapas: prueba presuntiva, prueba confirmativa y prueba complementaria.

Requiere tubos Durhan, varios medios de cultivo y lo que es más importante, en el reporte microbiológico se requiere un resultado lo más rápido posible con el fin de evitar contaminación y enfermedades en una población y no lo hace debido a que se obtiene resultados entre 4 y 5 días (17).

La segunda es una metodología moderna que combina los avances microbiológicos de técnicas comogénicas y fluorogénicas. Se requiere un solo medio de cultivo, Fluorocult Caldo LMX y no requiere tubos Durhan, el resultado se obtiene en 24 horas y al mismo tiempo, en el mismo tubo identifica coliformes totales y *E. coli* (17).

## **I. SISTEMAS DE TRATAMIENTO CON LAGUNAS**

Las lagunas no son más que excavaciones realizadas en un terreno para el tratamiento de aguas residuales. Los trabajos de investigación realizados sobre lagunas en la década de 1940 permitieron el desarrollo de estos sistemas como una alternativa de bajo costo para el tratamiento de aguas residuales (18).

### **1. Clases de lagunas**

Las lagunas usadas en el tratamiento de aguas residuales poseen una profundidad variable, pueden ser poco profundas o bastante hondas. Las lagunas se clasifican teniendo en cuenta la concentración de oxígeno disuelto (nivel de aerobividad), y la fuente que suministra el oxígeno necesario para la asimilación bacteriana de compuestos orgánicos presentes en las aguas residuales. En la tabla 1 se pueden observar los cuatro tipos de lagunas más importantes, clasificadas de acuerdo con la concentración y fuente de oxígeno (18).

Otro método de clasificación que incluye todos los tipos de lagunas se basa en la frecuencia y duración de la descarga del efluente. De acuerdo con este enfoque las lagunas se clasifican en:

- Lagunas de retención total
- Lagunas con descarga controlada
- Lagunas con descarga de control hidrológico
- Lagunas con descarga continua

Las lagunas de retención total, o lagunas de evaporación, se deben considerar sólo en lugares donde la tasa de evaporación supera la de precipitación anual. Las lagunas con descarga controlada vierten su efluente periódicamente, cuando la fuente receptora presenta condiciones óptimas para recibir la descarga del efluente tratado. Las lagunas con descarga de control hidrológico (DCH) son una variación de aquellas de descarga controlada; bajo este

concepto, la laguna se diseña en forma tal que permite la descarga del efluente tratado cuando la fuente receptora presenta un caudal por encima de un mínimo aceptado (18).

**Tabla 1. Clasificación de las lagunas con base en la presencia y fuente de oxígeno**

Clase de laguna	Presencia de oxígeno
Aerobia	La fotosíntesis suministra el oxígeno necesario para mantener condiciones aerobias en toda la columna de agua
Facultativa	La zona superficial es aeróbica La zona subsuperficial puede ser anóxica o anaeróbica
Aireada con mezcla parcial	La aireación superficial produce una zona aerobia que puede alcanzar la totalidad de la profundidad, dependiendo de la laguna
Anaerobia	La totalidad de su profundidad es anaeróbica

Fuente: Crites R. Tchobanoglous, G. Sistemas de Manejo de Aguas Residuales para Núcleos y Descentralizados. Camargo M, Pardo L, Mejía G, trad. Bogotá, Colombia: Editorial McGraw-Hill. Tomo 2. 2000. 600p.

Muchas de las lagunas con descarga controlada o con descarga de control hidrológico son facultativas. Todas las clases de lagunas pueden funcionar con descarga continua (18).

**a) Aplicaciones:** Las ventajas de un sistema con lagunas son:

- Los costos de capital resultan bajos
- Requiere mínima capacitación del personal encargado de su operación
- La evacuación y disposición de lodos se realiza sólo en intervalos de 10 a 20 años
- Es compatible con sistemas de tratamiento acuáticos o sobre el suelo

Las desventajas de un sistema con lagunas son:

- Requiere grandes extensiones de terreno.
- En el efluente se da una concentración elevada de algas que puede ocasionar problemas en fuentes receptora superficiales
- Las lagunas sin aireación a menudo no cumplen las normas exigentes de vertimiento
- Las lagunas pueden causar impactos negativos sobre las aguas subterráneas si no se impermeabilizan, o si el recubrimiento se daña

- Un diseño inapropiado o incorrecto pueden generar malos olores (18).

**b) Lagunas aerobias:** Las lagunas aerobias son bastante profundas para permitir la penetración de la luz del sol en toda la columna de agua. Como resultado, este tipo de lagunas tiene una gran actividad fotosintética durante las horas de luz solar en toda la columna de agua; su profundidad varía entre 1 y 2 pies (0.3 y 0.6 m). Las lagunas diseñadas para aumentar la actividad fotosintética de las algas se denominan también *lagunas de alta tasa*. El término *alta tasa* se refiere a la velocidad de producción fotosintética de oxígeno por parte de las algas presentes, y no a la velocidad de asimilación metabólica de compuestos orgánicos, la aerobia los compuestos orgánicos presentes en el agua residual. Durante las horas de luz solar, el oxígeno y el pH aumentan alcanzando valores máximos; mientras que en las horas de oscuridad dichos parámetros disminuyen en forma considerable respecto del valor máximo. Las lagunas aerobias se utilizan en combinación con otras lagunas y su aplicación se limita a zonas con climas cálidos y soleados (18).

**c) Lagunas facultativas:** Las lagunas facultativas son las más usadas y versátiles entre las diferentes clases de lagunas. En general, su profundidad oscila entre 5 y 8 pies (1.5 a 2.5 m) y se conocen también como *lagunas de estabilización*. El tratamiento se desarrolla por acción de bacterias aerobias en la capa superior y de bacterias anaerobias o anóxicas en la capa inferior, dependiendo de la mezcla que se induce por acción del viento. Los sólidos sedimentables se depositan en el fondo de la laguna. El aporte de oxígeno se logra por fotosíntesis y por reaeración natural superficial. Las lagunas facultativas pueden funcionar como lagunas con descarga controlada, lagunas de retención total, o como unidades de almacenamiento para un tratamiento posterior sobre el suelo (18).

**d) Lagunas aerobias con mezcla parcial:** Las lagunas aireadas con mezcla parcial son más profundas y pueden recibir mayor carga orgánica que una laguna facultativa. El suministro de oxígeno se realiza por medio de aireadores mecánicos flotantes o difusores de aire sumergidos. Las lagunas aireadas tienen una profundidad que varía entre 6 y 20 pies (2 y 6 m), y se diseñan con un bajo tiempo de retención bajo (3 a 20 d). La principal ventaja de una laguna aireada radica en que necesita menor área que otros sistemas de lagunas (18).

e) **Lagunas anaerobias:** Las lagunas anaerobias se diseñan para el tratamiento de residuos líquidos con alto contenido de materia orgánica, generalmente aguas residuales de industrias ubicadas en zonas rurales apartadas. Estas lagunas no cuentan con zonas aerobias, su profundidad oscila entre 15 y 30 pies (5 y 10 m) y su tiempo de retención va de 20 a 50 d (18).

## J. TRASFORMACIÓN DE LOS CONSTITUYENTES DE LAS AGUAS RESIDUALES

A continuación se presentan los mecanismos para la remoción de DBO, SST, nitrógeno, fósforo y organismos patógenos (18).

### 1. Remoción de la DBO<sub>5</sub>

Las lagunas son reactores que funcionan con una baja concentración de microorganismos. En todas las lagunas, excepto en las anaerobias, la DBO<sub>5</sub> soluble se reduce mediante oxidación bacterial, mientras que la DBO<sub>5</sub> particulada se remueve por sedimentación. La remoción de DBO<sub>5</sub> en una laguna depende del tiempo de retención y de la temperatura del agua (18).

### 2. Remoción de sólidos suspendidos totales

Los sólidos suspendidos en el afluente se remueven en las lagunas por sedimentación. La mayoría de los sólidos suspendidos encontrados en el efluente de estos sistemas están conformados por las propias algas que se desarrollan en la laguna. La concentración de sólidos suspendidos en el efluente puede alcanzar valores de 140mg/L en lagunas aerobias (18).

Algunos procesos que se pueden emplear para mejorar la calidad del efluente de una laguna, con respecto a la concentración elevada de SST son:

- Filtros de arena intermitentes
- Microtamices
- Filtros de grava
- Flotación con aire disuelto (FAD)
- Plantas acuáticas flotantes

- Humedales artificiales (18).

### **3. Remoción de nitrógeno**

La remoción de nitrógeno en los sistemas con lagunas se obtiene como resultado de la combinación de mecanismos que incluyen volatilización de amoníaco (la cual depende del pH), captura de algas, nitrificación/disnitrificación, acumulación de lodos, y adsorción sobre los sólidos del fondo (18).

### **4. Remoción de fósforo**

La remoción de fósforo en los sistemas con lagunas es mínima, a menos que se adicionen reactivos químicos para promover su precipitación. La adición de reactivos químicos como alumbre o cloruro férrico se ha empleado con gran éxito para remover el fósforo hasta valores por debajo de 1mg/L (18).

### **5. Remoción de organismos patógenos**

Los sistemas con varias lagunas y tiempos de retención altos presentan buenas remociones de bacterias, parásitos y virus. La remoción de organismos patógenos en sistemas con lagunas se presenta como consecuencia de la muerte natural de estos organismos, por sedimentación y por adsorción; los helmintos y los quistes y huevos de parásitos se sedimentan en el fondo de la laguna (18).

## **K. HUMEDALES Y SISTEMAS ACUÁTICOS DE TRATAMIENTO**

Los humedales y los sistemas acuáticos de tratamiento son aquellos que utilizan plantas acuáticas y animales para el tratamiento de aguas residuales municipales e industriales. Los sistemas de tratamiento acuático cubren un rango amplio de tipos de sistemas dentro de los que se incluyen una variedad de sistemas humedales artificiales, sistemas de plantas acuáticas flotantes y la combinación de éstos (18). Los humedales son áreas que se encuentran saturadas por aguas superficiales o subterráneas con una frecuencia y duración tales, que sean suficientes para mantener condiciones saturadas. La vegetación proporciona superficies para la formación de películas bacterianas, facilita la filtración y la adsorción de los constituyentes del agua

residual, permite la transferencia de oxígeno a la columna de agua y controla el crecimiento de algas al limitar la penetración de luz solar (figura 1) (2).

Los humedales tienen tres funciones básicas que los hacen tener un atractivo potencial para el tratamiento de aguas residuales; son estas:

- Fijar físicamente los contaminantes en la superficie del suelo y la materia orgánica.
- Utilizar y transformar los elementos por intermedio de los microorganismos.
- Lograr niveles de tratamiento consistentes con un bajo consumo de energía y bajo mantenimiento (2).

## 1. Tipos y aplicación de sistemas acuáticos y de humedales

✓ **Tipos de sistemas:** Los principales tipos de sistemas de humedales y sistemas acuáticos de tratamiento incluyen:

- Sistemas acuáticos de plantas flotantes
- Humedales artificiales de flujo libre –HAFI-
- Humedales artificiales de flujo subsuperficial –HAFS-
- Sistemas combinados (18).

**a) Sistemas acuáticos de plantas flotantes:** Los dos sistemas principales de plantas flotantes son el jacinto de agua y la lenteja de agua. El sistema de jacintos de agua (o de plantas similares) involucra plantas flotantes o suspendidas con raíces relativamente largas ubicadas en lagunas de 2 a 4 pies (0.6 a 1.2 m) de profundidad. La estructura de las raíces sirve como medio para el crecimiento en película de las bacterias. Por otro lado, la lenteja de agua tiene raíces muy cortas [en general de menos de 0.4 pulgadas (10 mm)] y, por consiguiente, actúa como un sistema de sombreado superficial (18,19).

**b) Humedales artificiales de flujo libre:** En un humedal artificial de flujo libre (pantano o ciénaga), la vegetación está parcialmente sumergida en el agua, cuya profundidad varía de 4 a 18 pulg (100 a 450 mm). La vegetación común para los sistemas HAFI incluye eneas, carrizos, juncias y juncos. Este tipo de sistema consta en general de canales o tanques con una barrera natural o artificial para prevenir la precolación del agua. Algunos sistemas FAL se diseñan de manera que haya retención completa del agua residual que se aplica a través

de precolación y la evapotranspiración. Las bacterias adheridas a las plantas tratan el agua residual a medida que ésta fluye a través de la vegetación y por medio de procesos físicos y químicos (18,19).

**c) Humedales artificiales de flujo subsuperficial:** En un humedal artificial de flujo subsuperficial el agua residual se trata a medida que fluye lateralmente a través de un medio poroso. La vegetación emergente se planta en el medio, que puede ser desde grava gruesa hasta arena. La profundidad del lecho va desde 1.5 a 3.3 pies (0.45 a 1 m) y tiene una pendiente característica de 0 a 0.5% (18,19).

**d) Sistemas combinados:** Los humedales y los sistemas acuáticos se pueden usar en combinación, generalmente en serie, para lograr objetivos específicos en relación con la calidad del agua (figura 2) (18,19).

## 2. Sistemas de humedales artificiales de flujo libre

El alcance del uso de humedales artificiales con niveles de agua por encima de la superficie de la tierra va desde lograr el tratamiento secundario, pasando por mejorar el efluente secundario hasta proveer un hábitat para la vida salvaje y reutilizar el agua (18).

**a) Descripción del proceso:** El sistema de flujo libre (FL) consta en general de canales o tanques con una barrera natural o construida para prevenir la infiltración. Las plantas presentes en los humedales artificiales de flujo libre cumplen con varios propósitos. Los tallos, las hojas sumergidas y los desechos sirven como medio de soporte para el crecimiento de las bacterias en película adherida. Las hojas que están por encima de la superficie del agua le dan sombra a ésta y reducen el crecimiento potencial de las algas. El oxígeno es transportado por las hojas hacia la zona radicular, la cual es el soporte para el crecimiento de la planta. El pretratamiento de los humedales de flujo libre comprende generalmente la sedimentación (tanques sépticos o tanques imhoff), lagunas de estabilización; dado que la fuente principal de oxígeno es la aireación superficial en aguas expuestas a la atmósfera y el crecimiento de aguas adheridas, la carga de DBO debe permanecer por debajo de 100 lb/ac.d (18).



### 3. Sistemas de humedales artificiales de flujo subsuperficial (HAFS)

Un humedal artificial con flujo por debajo de la superficie y medio de grava o arena se conoce como sistema de flujo subsuperficial (FS) (18).

**a) Descripción del proceso:** Los sistemas de flujo subsuperficial tienen la ventaja de que necesitan áreas de tierra menores y evitan los problemas de olores y mosquitos, en comparación con los sistemas de flujo libre. Las desventajas de los sistemas de flujo subsuperficial son el incremento del costo debido al medio de grava y la obstrucción potencial del medio. El tratamiento preliminar necesario para los sistemas de este tipo de humedales consiste en tratamiento primario (18).

## L. VEGETACIÓN

Las plantas macrofíticas son usadas normalmente para el tratamiento terciario, ellas también pueden ser usadas para tratamiento secundario. Estas plantas proveen de oxígeno en el proceso de purificación que toma lugar en el sistema radicular. Estas plantas degradan, absorben y asimilan en sus tejidos la contaminación. Pero también ellas son una extensión donde el crecimiento bacteriano pueden tomar en lugar y los sólidos suspendidos pueden ser filtrados (2).

Las plantas emergentes contribuyen al tratamiento del agua residual y escurrentía de varias maneras:

- Estabilizan el substrato y limitan la canalización del flujo.
- Bajan la velocidad del agua y permiten que los materiales suspendidos se depositen.
- Toman el carbono, nutrientes y elementos traza y los incorporan a los tejidos de la planta.
- Transfieren gases entre la atmósfera y los sedimentos.
- El escape de oxígeno desde las estructuras subsuperficiales de las plantas, oxigena otros espacios dentro del substrato.
- El tallo y los sistemas de la raíz dan lugar a sitios para la fijación de microorganismos.
- Cuando se mueren y se deterioran dan lugar a restos de vegetación (figura 3) (2).

## 1. *Typha*

La espadaña es ubicua en distribución, robusta, capaz de crecer bajo diversas condiciones medioambientales y se propaga fácilmente, por lo que representa una especie de planta ideal para un humedal artificial. También es capaz de producir una biomasa anual grande y tiene un potencial pequeño de remoción de N y P por la vía de la poda y cosecha. Los rizomas de Espadaña plantados a intervalos de aproximadamente 0.6m pueden producir una cubierta densa en menos de un año (2).

Las espadañas tienen un rizoma que puede ser muy largo y crece horizontalmente. De él surgen en primavera unas hojas largas y estrechas y los tallos en cuyo extremo están las flores femeninas y, sobre éstas las masculinas. Más estrechas que las anteriores (figura 4) (20).

### a) *Typha domingensis*:

**Reino:** *Plantae*

**Subreino:** *Trachobionta*

**División:** *Magnoliophyta*

**Clase:** *Liliopsida*

**Subclase:** *Commelinidae*

**Orden:** *Typhales*

**Familia:** *Typhaceae*

**Género:** *Typha*

**Especie:** *Typha dominguensis* (21).

Hierbas perennes 2-4 m con tallos erectos simples, rizomatosos. Hojas lineares, planas, (5-)6-20mm de ancho, igual o ligeramente más largas que la inflorescencia, envainadoras y esponjosas en la base, donde son paralelo-nervadas, más o menos dísticas, enteras. Plantas monoicas, la inflorescencia es una espiga cilíndrica más o menos actinomorfas, densamente apiñadas, diminutas; espigas con una bráctea subyacente, decidua. Porción basal pistilada, 10-46 cm, a veces dividida por el raquis desnudo, café pálido a café oscuro, usualmente separado de la porción estaminada por una sección corta de raquis desnudo. Porción apical estaminada, 7-22 cm, café rojizo, fls.estaminadas aparentemente sin perianto, pero entremezcladas con bractéolas parecidas a pelos de diversas formas, pistilodio ausente, estambres 1-7, los filamentos cortos o largos, libres o connados, anteras lineares u oblongas, Fls. pistiladas con

bractéolas cilíndricas claviformes o espatuladas, el perianto consiste de numerosos pelos claviformes o simples; ovario suero, levantado en un ginóforo cilíndrico, elipsoide (en fls. estériles más o menos turbinadas y con un mucrón corto), 1-ocular; óvulo 1, péndulo; estilo solitario elongado, estigma linear. Fr. Diminuto, fusiforme o elipsoide con un pericarpo longitudinalmente partido (figura 5) (25).

**b) *Typha latifolia*:**

**Reino:** *Plantae*

**Subreino:** *Trachobionta*

**División:** *Magnoliophyta*

**Clase:** *Liliopsida*

**Subclase:** *Commelinidae*

**Orden:** *Typhales*

**Familia:** *Typhaceae*

**Género:** *Typha*

**Especie:** *Typha latifolia* (21).

La familia de la *Typhaceae* (orden de la *Typhales*) son hierbas perennes, palustres. Hojas alternas o basales, alargadas, envainadoras. Flores unisexuales, aclamídeas, rodeadas de pelos o de escamas; las masculinas con 2 a 5 estambres; las femeninas con el ovario unicelular. Inflorescencias cilíndricas compactas; en cada tallo florífero hay dos: la superior con flores masculinas y la inferior con flores femeninas. Frutos aqueniformes. Abarcan unas 15 especies, extendidas por una gran parte del mundo (figura 6) (23).

## **M. DESCRIPCION TÉCNICA**

### **1. TRATAMIENTO**

Las aguas servidas de diferentes orígenes, doméstico, industrial, hospitalario, agrícola, etc., que son conducidos por el río Villalobos, serán sometidos a un tratamiento integrado por varias etapas, esto por razones de volumen, calidad, área, disponibilidad económica, etc (24).

El sistema tiene también como finalidad constituir un campo experimental, que permita evaluar la eficiencia de los diferentes procesos unitarios de tratamiento, para las aguas que

conduce el río Villalobos, de acuerdo a las características propias de Guatemala en general y de ciudad San Cristóbal en particular (24).

a) **Sistema de Tratamiento:** Estará integrado por los siguientes procesos unitarios:

- i) Acondicionamiento Previo
- ii) Tratamiento Primario y Secundario
- iii) Tratamiento Terciario (25).

**i) Acondicionamiento Previo:** Comprende la separación de sólidos gruesos flotantes, en suspensión y arrastrados, se inicia en el sistema de captación y se completa en el desarenador (25).

**ii) Tratamiento Primario y Secundario:** Estará formado por los procesos unitarios que se realicen en cinco lagunas de estabilización, de las cuales tres tendrán un proceso Anaeróbico y las dos restantes un proceso Facultativo (25).

**iii) Tratamiento Terciario:** Se llevara acabo en tres módulos integrados por Biofiltros, cada uno con una longitud de doscientos veintiséis metros que hacen un total de 678 metros, los módulos funcionan en serie y se integran de la siguiente forma:

**Tabla 2. Integración de los módulos**

Módulo	Primera Etapa	Segunda Etapa	Total 1ª y 2ª Etapa
Primero	4 Unidades		4 Unidades
Segundo	4 Unidades	4 Unidades	8 Unidades
Tercero	4 Unidades	8 Unidades	12 Unidades
<b>Total</b>	<b>12 Unidades</b>	<b>12 Unidades</b>	<b>24 Unidades</b>

Fuente: Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca y del Lago de Amatitlán. Memoria Técnica. Guatemala: Doc. Tec. 2005.16p.

El funcionamiento será en serie para cada uno de los módulos, es decir que las aguas servidas sufrirán tratamiento terciario al pasar en orden sucesivo por los Módulos I, II y III.

Para los estanques de cada modulo, el funcionamiento será en paralelo. La dosificación y distribución de la carga a tratar por cada unidad, la decidirá el director de la Planta (25).

## 2. Desarenador

Consiste en un canal diseñado para atrapar partículas pesadas que se encuentra dentro de las aguas negras (25).

El diseño se hizo en forma tal que las partículas sólidas existentes (arenas), con un diámetro mayor de 0.2 mm., se precipiten a fondo de la tolva de almacenamiento, y permanezcan en ella hasta ser removidas físicamente, cuando su volumen llegue a 0.20 m (25).

Zona o sectores que lo integran:

## 3. Ubicación

Tomando en consideración lo siguiente:

- Debe situarse en el Canal distribuidor antes de la entrada a las lagunas de estabilización.
- Existe una gran posibilidad de que en la planicie paralela al río, situada entre la zona de captación y el área de lagunas, se construya en el futuro otro campo de tratamiento basado en lagunas de estabilización.
- Que las condiciones topográficas sean las más adecuadas, para la construcción de las estructuras necesarias (25).

Basándose en lo anterior se ubicó en el tramo de canal comprendido entre su inicio y su extremo colindante con el inicio de las lagunas (25).

## 4. Descomposición Aeróbica y Anaeróbica

**a) Procesos de Tratamiento:** Básicamente existen dos métodos para descomponer el contenido orgánico de las aguas negras. En el cual las bacterias son capaces de utilizar el oxígeno libre en los procesos de su vida, se llama descomposición Aeróbica. Donde las bacterias deben extraer el oxígeno de los compuestos, pues no hay oxígeno libre, se llama descomposición Anaeróbica. En un ambiente favorable dado puede aprovecharse a voluntad uno u otro método, y ambos son útiles, en este caso el tratamiento se denomina facultativo (25).

**i) Clasificación de los métodos de tratamiento:**

- **Tratamiento Previo:** Bajo el título de tratamiento previo se designan los procedimientos que, por lo común, se emplean para la remoción de aquellos desechos que impidan o entorpezcan la actuación de procesos y mecanismos mayores (25).

El tratamiento previo, comprende la separación de sólidos suspendidos en forma de lodos, espumas o nata, las rejillas de separación, las cuales retienen materia voluminosa, como animales muertos, latas, basuras, trapos, grandes fragmentos de baflo, etc (25).

- **Tratamiento Primario:** Se da el nombre de tratamiento primario a todos los dispositivos diseñados para la remoción de materia sobrenadante o sedimentable por medios físicos o mecánicos.

Un tratamiento primario es el resultado incidente de la clarificación del líquido tratando sólo por sedimentación, sin ninguna acción bioquímica, pudiendo ser un tratamiento suficiente por sí mismo en algunos sitios o la primera etapa económica en tratamiento total (25).

- **Tratamiento Parcial:** El término tratamiento parcial ha sido adoptado para aquellos procesos primarios en los cuales se mejoran sus resultados por medio de la utilización de coagulantes químicos, tales como las sales de aluminio o hierro y cal (25).

- **Tratamiento Secundario:** Consta de unidades de tratamiento en las cuales se efectúa la acción bioquímica, de modo que sea satisfecha, en alto grado, la DBO de la materia orgánica restante después de haberse clasificado el líquido en los procesos primarios. Los sólidos así tratados, son a la vez coagulados, haciendo sedimentable de este modo mucha materia que no lo era en el tratamiento primario. El procedimiento final es una nueva sedimentación.

Las unidades más conocidas para el tratamiento secundario son: los filtros percoladores y fangos activados.

- **Tratamiento Completo:** Es el tratamiento mediante procesos biológicos primarios y secundarios.

- **Desinfección y Potabilización de los efluentes de un Tratamiento Completo:** Con el tratamiento completo se obtienen efluentes bastante clarificados y estabilizados, pero aun cargados con algunos sólidos, y de muchas bacterias, por lo que con frecuencia y dependiendo de su uso, puede ser necesaria su desinfección.

## 5. Lagunas de estabilización

Los factores primordiales que gobiernan el diseño de las lagunas de estabilización son:

- La prevalencia, intensidad, duración y extensión de la penetración de la luz solar en el agua.
- La profundidad del estanque.
- La precipitación y la evaporación de la región.
- Los vientos.
- La permeabilidad del suelo.
- La naturaleza y fructificación de las algas.

## 6. Biofiltros

El sistema de Biofiltros será el encargado de dar el tratamiento terciario a las aguas del río Villalobos y del afluente captado de parte de la población de Ciudad San Cristóbal (25).

**a) Caudal:** El caudal al que se le dará tratamiento terciario en los biofiltros es de 333 litros por segundo, provenientes del sistema de tratamiento primario y secundario (lagunaje) (24).

**b) Calidad del Agua:** La calidad del agua que llegará a los biofiltros es variable, de acuerdo con la época y la hora del día en que se tome la muestra. Las aguas tomadas del río, se les dará un tratamiento secundario en las lagunas anaeróbicas y facultativas, mientras que los biofiltros están diseñados para dar un tratamiento terciario especializado para remover nitrógeno y fósforo (24).

**c) Dimensiones:** Para los mejores resultados, desde el punto de vista técnico, financiero y funcional, se adoptó un canal con sección trapezoidal con una base de 3 m de ancho, taludes con pendiente 1:1, un ancho superior de 6 m y una profundidad total de 1.5 m. La pendiente longitudinal de los canales es de 0% y su longitud de 226 m (24).

En la primera batería de 4 canales, se dejará una pendiente longitudinal de 1.07 por mil, lo que proveerá una profundidad variable del nivel de agua de entre 0.75 y 1.2 m. Y en la última batería de biofiltros la longitud será de 220 m, debido a la disponibilidad de terreno (24).

**d) Integración:** Se integrarán 3 baterías o módulos de 4 canales con las dimensiones citadas anteriormente, las cuales funcionarán en serie y de manera lineal, entre cada batería de canales se colocará una tubería de interconexión, a manera de desvío en caso de necesidad (24).

En la cabecera de la primera batería de biofiltros se encontrará un canal trapezoidal que distribuirá los caudales a los biofiltros, el cual tendrá un sistema de compuertas para desviar aguas en caso necesario. Al final de la tercera batería se encontrará otro canal trapezoidal para coleccionar los efluentes de los biofiltros y conducirlos hacia el río Villa Lobos nuevamente (24).

**e) Abastecimiento:** De los 333 litros por segundo que ingresarán a los biofiltros, 246 tendrán un tratamiento previo en las lagunas anaeróbicas y luego conducidos por un canal trapezoidal de 510 m de longitud, hasta el canal distribuidor. Los 87 litros por segundo restantes serán pasados por 2 lagunas facultativas y posteriormente ingresados al canal distribuidor de los biofiltros (24).

**f) Capacidad:** La capacidad total de los 12 canales de biofiltro es de 12,179 m<sup>3</sup> con un área superficial o espejo de agua de 14,151 m<sup>2</sup>. De acuerdo con lo anterior se tendrá un tiempo de residencia total en los biofiltros de 10 horas con una velocidad de avance de 0.075 m/s (24).

**g) Recubrimiento:** Para la impermeabilización de los canales de biofiltros se optó por el uso de geomembrana de 40 milésimas de pulgada, lo que equivale a cerca de 1 mm de espesor. El material de la geomembrana es polietileno de alta densidad (HDPE), las uniones serán termosoldadas con doble costura. La tubería que interconectará los biofiltros, será de



ADS de 12 pulgadas, ya que es el único material que puede ser termosoldado con la geomembrana (figura 7) (24).

## **N. FOTOMETRIA**

### **1. Fotómetro SQ118**

El sistema analítico del Spectroquant tiene alta sensibilidad y exactitud con un radio razonable de costo/ejecución. Está diseñado para examinar superficies, suelo, agua potable, agua llovida, agua en ebullición y aguas residuales. Sin embargo también se utiliza para análisis de muestras más complejas como lo son sustancias sólidas y materia orgánica (36).

El elemento central del sistema operativo del Spectroquant SQ118 está universalmente adaptado a los fotómetros estándar SQ118. Posee una alta tecnología, esta adaptado ópticamente a los exámenes químicos del Spectroquant, debido a que todos los parámetros son pre-programados (36).

Los resultados son archivados por inclusión de la tecnología microprocesada tardía en conexión con la alta calidad electrónica y componentes ópticos (36).

**a) Principios de determinación:** El principio de la determinación fotométrica tiene que ver con el debilitamiento de la luz que un rayo de luz monocromática de experiencias cuando pasa directamente una solución coloreada. La concentración de la sustancia diluida puede darse por la intensidad de luz absorbida (36).

El enfoque de los haces de luz permite que la luz sea estabilizada por la lámpara de halógeno al pasar directamente por la apertura de los lentes y alcanzar las celdas con la solución a examinar. Una parte de los haces de luz dependen de la naturaleza de la sustancia. La luz pasa directamente y es recibida por un filtro de interferencia, que permite solamente pasar una parte de la luz, que es capturada por la muestra que será determinada fotométricamente. Esta luz es transformada por los fotoiones de silicón en una corriente eléctrica. Esto se intensifica y convierte a una medida por un convertidor digital y un microprocesador (36).

El coeficiente de absorbancia es una constante específica para la muestra y depende de la longitud de onda a utilizar, el cual depende del filtro de interferencia

La concentración de la sustancia contenida en el agua es obtenida por la multiplicación de la absorbancia por el factor F. El factor F depende de la longitud de la celda y el filtro de interferencia. La representación grafica de esta relación produce una línea recta (36).

En el Spectroquant SQ118 almacena todos los factores F. La relación entre la absorbancia y la concentración pueden estar representadas por una curva, la cual puede ser programada en el SQ 118 (36).

#### IV. JUSTIFICACIÓN

Debido al crecimiento poblacional e industrial en los alrededores de la cuenca del lago de Amatitlán, sus aguas se han contaminado con nutrientes y otros contaminantes, ya que su cuenca recoge aproximadamente el 40% de las aguas residuales domésticas e industriales de la ciudad de Guatemala, que son descargadas al río Villalobos y es el causante de la mayor contaminación del lago. Frente a esta problemática, el lago será convertido en pantano en unos pocos años, perdiendo la utilidad que le dan los lugareños, ya que ellos los utilizan para pesca, lavado de ropa, etc. Por tal razón, la Autoridad para el Manejo Sustentable del lago de Amatitlán (AMSA), ha rehabilitado una planta piloto para el tratamiento de sus aguas residuales ubicada en ciudad San Cristóbal. Esta planta piloto consta de varios segmentos por donde pasa el agua residual antes de llegar al último proceso que son los filtros verdes, los cuales están constituidos por la planta acuática Tul (*Typha dominguensis* y *Typha latifolia*), con el objetivo de disminuir los niveles de contaminación (3).

Este tipo de planta acuática fue utilizada ya que sus raíces son muy densas y retienen los residuos físicamente y así clarifican el agua. También, por medio de sus raíces se absorben los metales que se encuentran en dicha agua. Todas las plantas acuáticas establecen una simbiosis perfecta con los microorganismos reductores (3).

Esta planta acuática sirvió como una nueva estrategia, que se utiliza para la recuperación del lago de Amatitlán, como parte del Megaproyecto propuesto por el congreso de la República. Si los resultados son positivos, es posible acceder a mayores fuentes de financiamiento y lograr con ello en el menor tiempo posible la recuperación del lago.

El análisis se efectuó en las dos épocas del año 2005, debido a que el afluente del agua aumenta en la época lluviosa y conlleva restos de materia orgánica (hojas, arena, etc) y durante la época seca se ve disminuida por lo que sus contaminantes estarán en una menor proporción a la de la época lluviosa., lo cual es crucial para la comparación del parámetro fisicoquímico y microbiológico

## V. OBJETIVOS

### A. Generales

Evaluar la reducción de la carga contaminante de las aguas residuales mediante los filtros verdes (*Typha domingensis* y *Typha latifolia*), durante la época seca y época lluviosa.

### B. Específicos

1. Evaluar la calidad del agua antes de ingresar a la planta de tratamiento y después de pasar a través de los filtros verdes mediante análisis fisicoquímico y microbiológico.
2. Comparar los análisis de contaminación fisicoquímicos (DQO, DBO<sub>5</sub>, nitritos, fósforo, metales, amonio, alcalinidad y nitratos) y microbiológicos (NMP), para determinar los niveles de contaminación en los distintos puntos de muestreo de la planta, durante la época seca y la época lluviosa.

## **VI. HIPÓTESIS**

Los biofiltros disminuyen la carga contaminante de las aguas residuales proveniente de la planta de tratamiento ubicada en ciudad San Cristóbal.

## VII. MATERIALES Y MÉTODOS

### A. Universo:

Se evaluó la eficacia del tul o *Typha* sp en el tratamiento de aguas residuales provenientes de ciudad San Cristóbal. Se utilizó como muestra el agua residual de dicha colonia, la cual se obtuvo de cinco puntos de la planta, realizando un muestreo por mes tanto en la época seca y época lluviosa durante 8 meses.

### B. Recursos:

#### 1. Humanos:

a. **Tesista:** María José Aguilar

b. **Asesores:** M.Sc. Karin Herrera

M. Sc. Hayro García

c. **Revisores:** Licda. Vivian Matta

Lic. Osberth Morales

d. **Colaboradores:** Licda. Elsa Jáuregui (Jefe de Laboratorio de AMSA)

Analistas de Laboratorio de AMSA

Técnicos de muestreo de AMSA

#### 2. Institucionales:

Autoridad para el Manejo Sustentable del lago de Amatitlán (AMSA)

#### 3. Equipo y Materiales:

- Fotómetro SQ118
- Termoreactor
- Espectrofotómetro Perkin Elmer Lambda 20 uV/Vis
- Agua destilada
- Potenciómetro Orion
- Incubadora OXITOP WTW
- Balanza analítica Sartorius
- Refrigerador

- Incubadora
- Campana bacteriológica
- Campana de gases
- Autoclave
- Computador e impresora
- Secador
- Equipo de campo (potenciómetro, conductímetro y oxímetro)
- Papel absorbente
- Puntas azules
- Pipeta automática 100-1000 ul
- Espátula
- Papel filtro
- Pissetas
- Digestor micro-Kjeldahl
- Dispensador
- Gradilla
- Varillas agitadoras magnéticas
- Detergente, cloro y Extran

### **Reactivos**

- Un kit para la detección de Níquel
- Un kit para la detección de Cadmio
- Un kit para la detección de Hierro
- Un kit para la detección de Manganeso
- Un kit para la detección de Amonio
- Un kit para la detección de Plomo
- Un kit para la detección de Nitratos
- Un kit para medir la alcalinidad
- Un kit para la DQO
- Ácido sulfúrico concentrado

- Ácido nítrico concentrado
- Fenoftaleína
- KOVAX
- Hidróxido de sodio 6N
- Ácido sulfúrico 5N
- Molibdato de Amonio
- Tartrato Antimonílico Potásico
- Hidróxido de sodio
- agua de dilución (tampón fosfato, solución de sulfato de magnesio, solución de cloruro de calcio y solución de cloruro férrico)
- Ácido fosfórico
- Sulfonamida
- Diclorhidrato de N-(1-naftil)-etilendiamina
- Un frasco de caldo tripticasa soya de 500 gr.
- Un frasco de caldo Fluorocult de 500 gr.

### **Cristalería**

- Balones aforados de 1000, 100 y 25 ml
- Embudos
- Erlenmeyer de 250 ml
- Conos Imhoff y soporte para los conos Imhoff de 1 litro
- Frascos color ámbar de 450 ml
- Pipetas volumétricas de 3 ml
- Pipetas graduadas de 10, 5 y 2 ml
- Frascos plásticos estériles de 100 ml
- Cubetas de 10 y 50 mm
- Probeta de 500 ml
- Beacker de 25 y 100 ml
- Tubos de ensayo
- Termómetros



- Agitadores magnéticos
- Cabezas medidoras para  $\text{DBO}_{5^*}$  (\* a cinco días y  $20^{\circ}\text{C}$ )

### **C. Captación y preservación de muestras de agua, generalidades**

Para efectuar cada muestreo se obtuvo una porción de agua, más o menos de 1 litro, la que se transportó en cadena de frío hasta que se efectuó su análisis. En el proceso se garantizó la adecuada preservación y manipulación de la muestra para evitar las alteraciones significativas en su composición (26).

Las muestras se mantuvieron lo más frío que fuera posible, pero sin congelarlas; idealmente a  $4^{\circ}\text{C}$  (26).

### **D. Métodos Físicos:**

#### **1. Oxígeno Disuelto (mg/L)**

##### **PROCEDIMIENTO**

1. La medición de este parámetro se hizo en el momento en que se toma la muestra de agua
2. Se introdujo el electrodo en la porción de agua que se toma.
3. Se lavó el electrodo con agua destilada (10).

#### **2. pH (U)**

##### **PROCEDIMIENTO**

1. Este parámetro se midió igual al oxígeno disuelto (10).

#### **3. Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )**

##### **PROCEDIMIENTO**

1. Mismo procedimiento como los anteriores (10).

#### **4. Salinidad (%)**

##### **PROCEDIMIENTO**

1. Mismo procedimiento como los anteriores (10).

### **5. Conductividad (Umhos/cm)**

#### PROCEDIMIENTO

1. Mismo procedimiento como los anteriores (10).

### **6. Potencial Oxido Reducción (mV)**

#### PROCEDIMIENTO

2. Mismo procedimiento como los anteriores (10).

### **7. Color (UC)**

#### PROCEDIMIENTO

1. Se analizó la muestra inmediatamente después de la toma de muestras.
2. Se homogenizaron bien las muestras.
3. Se utilizó la cubeta de 50mm, se introdujo en el fotómetro con una longitud de onda de 400-450 nm.
4. Se leyó el resultado del color en  $m^{-1}$  en el fotómetro SQ118. Por ser un método simple solo se obtuvo la absorbancia y se reportó.
5. Se lavó la cubeta con agua destilada (10).

### **8. Turbiedad (UTN)**

#### PROCEDIMIENTO

1. Se analizó la muestra inmediatamente después de la toma de muestras.
2. Se homogenizaron bien las muestras.
3. Se utilizó la cubeta de 50mm y se introdujo en el fotómetro
4. Se leyó el resultado de la turbiedad en NTU en el fotómetro SQ118 a 550 nm. No se escogió ningún método por la simplicidad del mismo obteniéndose solamente la absorbancia y se reportó este valor.
5. Se lavó la cubeta con agua destilada (10).

### **9. Sólidos sedimentables (ml-H/L)**

#### PROCEDIMIENTO

1. Se colocó dentro del cono 1 litro de la muestra y se dejó reposar durante 1 hora.

2. Pasado la hora se midió el volumen de los sólidos sedimentables en el fondo del cono en ml.
3. El resultado se reportó en ml-H/L (10).

### 10. Sólidos en suspensión (mg/L)

#### PROCEDIMIENTO

1. En un embudo se colocó el papel filtro previamente pesado en balanza analítica.
2. Se midió 50 ml de la muestra y se filtró, luego toda la muestra se colocó en el horno a 105°C por 50 minutos. Después de colocó en la desecadora por 2 horas.
3. Se pesó nuevamente el papel filtro en una balanza analítica y por diferencia de los dos pesos se obtuvo el resultado (10).

$$\text{Sólidos suspendidos} = \frac{P_f - P_0 \times 1 \times 10^6}{\text{ml de muestra}} = \text{mg/L}$$

$P_f$  = punto final

$P_0$  = punto inicial

### E. Métodos Físicoquímicos

#### 1. Demanda química de oxígeno (mg/L)

##### MÉTODO:

Oxidación de la muestra de agua con solución caliente de dicromato potásico y sulfato de plata como catalizador. El cloruro es enmascarado por el sulfato de mercurio. Determinación fotométrica de los iones  $\text{Cr}_2\text{O}_7^{-2}$  amarillos no consumidos (10).

##### PROCEDIMIENTO:

1. Se analizó la muestra inmediatamente después de la toma de muestras.
2. Se homogenizaron bien las muestras.
3. Se agitó por balanceo el contenido de la cubeta con reactivo.
4. Se midió con la pipeta volumétrica 3ml de la muestra de agua bien mezclada, se agregó con cuidado en la pared interna de la cubeta con el reactivo, porque se calienta mucho.
5. Se cerró firmemente la cubeta con su tapadera de rosca, se mezcló vigorosamente el contenido. En las siguientes etapas del trabajo se agarró la cubeta solamente por la tapa roscada.

6. Se calentó la cubeta 120 minutos a 148°C en el termorreactor precalentado.
7. Se sacó del termorreactor la cubeta caliente y se colocó en la gradilla para que se enfríe. No enfriar con agua fría.
8. Al cabo de 10 minutos se agitó la cubeta por balanceo y se enfrió a temperatura ambiente en la gradilla (tiempo aproximado de enfriamiento 30 minutos).
9. Para la medición fotométrica las cubetas tuvieron que estar limpias. Si es necesario se limpió con un paño seco y limpio.
10. Se leyó la concentración de DQO en mg/L en el fotómetro SQ118 a una longitud de onda de 420 nm (27).

## **2. Demanda bioquímica de oxígeno (mg/L)**

### **Consideraciones preliminares**

Es importante antes de realizar el análisis tener en cuenta aspectos generales a cerca de la muestra, la dilución, los controles y la siembra. Estas consideraciones han sido extraídas del Standard Methods edición 17 y se han resumido para facilitar su manejo de operación de la técnica de la DBO<sub>5</sub> (10).

#### **MUESTRA:**

Dependiendo del tipo de muestra que se deba trabajar es necesario eliminar algunas interferencias que puedan afectar el desarrollo del análisis e inducir a resultados erróneos. Se deben tener en cuenta según el caso las siguientes recomendaciones:

1. La muestra se tomó en un recipiente limpio y su volumen debió ser de 1 litro o más
2. El pH de la muestra se ajustó a un valor neutro entre 6.8 y 7.2 con una solución de NaOH 6N ó H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 5N.
3. Si no se conoce el valor aproximado de la DBO se tomó como guía el valor de DQO correspondiente. Normalmente y en términos muy generales la DBO= DQO x 0.5; pero si el efluente tiene una carga orgánica muy alta el factor puede ascender a 0.7, 0.8 ó 0.9 según el caso.
4. Con el valor de DBO<sub>5</sub> estimado se definió el volumen de muestra a tomar según la tabla:

**Tabla 3. Demanda Bioquímica de Oxígeno**

DBO mg/L	volumen ml	factor
0-400	432	1
0-800	365	2
0-200	250	5
0-400	164	10
0-800	97.0	20
0-200	43.5	50

**Fuente:** La Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca y del lago de Amatitlán. Guatemala: Doc. Tec. 2004. 31p.

- Si el valor de  $DBO_5$  no está dentro de los rangos citados en la tabla, o si se desea trabajar con un volumen significativo para disminuir errores, se debió diluir convenientemente la muestra con el agua de dilución adecuada, e incluyó el factor de dilución en los cálculos finales.
- Se evitó tomar muestras que contengan cloro y otro agente bactericida. Si la muestra contiene estos productos en niveles bajos se le dejó en reposo durante 1-2 horas antes de iniciar el análisis.
- Cuando la muestra contiene otras sustancias tóxicas como fenoles, metales pesados y cianuros en concentraciones altas estos debieron ser eliminados. Su efecto puede neutralizarse mediante la dilución de la muestra. Cuando dos diluciones sucesivas dan el mismo valor de  $DBO_5$ , el efecto del agente tóxico se eliminó (27).

#### DILUCIÓN:

El agua de dilución se preparó de la siguiente forma:

- Tampón fosfato: 8.68 g de potasio dihidrógeno fosfato; 21.75 g de dipotasio hidrógeno fosfato; 22.30 g de di-sodio dihidrógeno fosfato 2-hidrato y 1.7 g de cloruro de amonio. Se llevaron las tres sales a solución enrasando a 1 litro de agua destilada.
- Solución de sulfato de magnesio: 22.50 g de magnesio sulfato 7-hidrato en 1 litro de agua destilada.
- Solución de cloruro de calcio: 27.50 g de cloruro de calcio en 1 litro de agua destilada.
- Solución de cloruro férrico 0.25 g de cloruro 6 hidrato de hierro (III) en 1 litro de agua destilada.

5. Se tomó 1ml de cada una de las cuatro soluciones anteriores y se completó a 1 litro con agua destilada. Esta agua de dilución debió ser tapada cuidadosamente y agitada antes de usarla.
6. Se eliminó el cloro y se preparó la siguiente solución: 1.575 g de sodio disulfito en un litro de agua destilada. La solución se adicionó al agua de dilución en cantidad suficiente para neutralizar el cloro existente en la muestra.
7. Todas las soluciones anteriores se pueden almacenar en la refrigeradora durante varios días (27).

#### CONTROLES:

Para detectar interferencias que produjeran resultados erróneos, se realizó una solución control con cierta regularidad, que permitió evaluar si las condiciones en que se está desarrollando el análisis son correctas.

**a) Solución patrón:** Se diluyó 0.150 g de ácido glutámico y 0.150 de glucosa en 1 litro de agua destilada. Se midió 164ml de esta solución patrón y se colocó en la botella para determinar la  $DBO_5$ . El resultado tuvo que estar entre  $200 \pm 30$  mg/L de no ser así la prueba se repitió (27).

**b) Agua de dilución:** El agua de dilución no debió aportar carga orgánica alguna; para controlar esto se tomó una muestra de la misma 432 ml y se corrió la  $DBO_5$ . El resultado no debió superar los 2mg/L (27).

#### SIEMBRA:

La siembra fue necesaria para garantizar una población microbiana suficiente, que produjera un resultado adecuado en los cinco días. Cuando la muestra tiene una carga microbiana alta el sembrado no es necesario.

La siembra más corriente y fácil de obtener es con un agua de la que se sabe contiene una alta carga microbiana. También se inoculó con cepas comerciales (10).

**PROCEDIMIENTO:**

1. Se midió 125ml de agua residual y luego se adicionó el agua de dilución hasta llegar a 250ml. (**nota:** cambia el procedimiento por ser aguas residuales y no necesitan de la siembra)
2. Se tomó el pH que debía estar en un rango 6.8-7.2 y se trasvasó a la botella.
3. A la botella se le colocó una barra agitadora magnética
4. Se colocó de 2 a 5 lentejas de hidróxido de sodio en el vaso de caucho.
5. Se colocó el vaso cuidadosamente en la boca de la botella (sí se cae alguna lenteja dentro de la muestra se descartó y lavó la botella).
6. Se tapa la botella con el OXITOP verificando el correcto cierre de las mismas y se colocó sobre el sistema de agitación.
7. Se conectó el instrumento y se accionó simultáneamente las teclas S y M para activar el registro que se inició automáticamente a las tres horas.
8. El sensor registró los valores obtenidos cada 24 horas en forma automática (27).

**CÁLCULO Y REPORTE DE RESULTADOS:**

El resultado se leyó directamente de la pantalla del OXITOP. Dicho valor se multiplicó por el factor de la escala de la tabla y por el factor de dilución si la hubo. El resultado se reportó como mg/L de O<sub>2</sub>.

**3. Fósforo (mg/L)****MÉTODO DEL ÁCIDO ASCÓRBICO****1. DISCUSIÓN GENERAL****PRINCIPIO:**

El molibdato amónico y el tartrato antimonílico potásico reaccionan en medio ácido con ortofosfato para formar ácido heteropoliácido fosfomolibdico que se reduce a azul de molibdeno, de color intenso por el ácido ascórbico.

**Interferencias:**

Los arseniatos reaccionan con el reactivo de molibdato y producen un color azul similar al formado por el fosfato. Concentraciones de arseniato tan bajas como 0.1 mg As/L interfieren en la determinación del fosfato. El cromo hexavalente y NO<sub>2</sub> interfieren y dan resultados un 3 por 100 más bajos a concentraciones de 1 mg/L y del 10 al 15% más bajos a la de 10 mg/L.

Concentración mínima detectable: aproximadamente 10µg P/L. Los rangos de P son los siguientes:

Rango aprox de P mg/L	Rango de luz
0.30-2.0	0.5
0.15-1.30	1.0
0.01-0.25	

#### REACTIVOS:

1. Ácido sulfúrico  $H_2SO_4$  5N se diluyó 70 ml de  $H_2SO_4$  concentrado en 500ml de agua destilada.
2. Solución de tartrato antimonílico potásico se disolvió 1.3715 g de  $K(Sb)C_4H_4O_6 \cdot 1H_2O$  en 400 ml de agua destilada en un balón de fondo plano aforado clase A de 500 ml y diluyó a este volumen. Se conservó en un frasco con tapón de vidrio.
3. Solución de molibdato amónico se disolvió 20 g de  $(NH_4)_6Mo_7O_{24} \cdot 4H_2O$  en 500 ml de agua destilada. Se conservó en un frasco con tapón de vidrio.
4. Ácido ascórbico 1M se disolvió 1.76 g de ácido ascórbico en 100 ml de agua destilada. La solución fue estable durante 1 semana aproximadamente a 4°C.
5. Reactivo combinado: Se mezcló los reactivos anteriores en las siguientes proporciones para 100 ml de reactivo combinado: 50 ml de  $H_2SO_4$  5 N, 5 ml de solución de tartrato antimonílico potásico, 15 ml de solución de molibdato amónico y 30 ml de solución de ácido ascórbico. Se mezcló tras la adición de ambiente antes de mezclarlos y se siguió el orden citado. Si apareció turbidez en el reactivo combinado, se agitó y dejó reposar unos minutos hasta que desaparezca, antes de continuar. El reactivo fue estable durante 4 horas.
6. Solución madre de fosfato: se disolvió 4.393 de  $KH_2PO_4$  anhidro en agua destilada y diluyó a 1000 ml en balón aforado clase A 1.0 ml = 1 mg P.
7. Solución patrón de fosfato: Se diluyó 10 ml de la solución madre de fosfato en 100 ml de agua destilada en un balón aforado clase A. De esta solución se midió 5 ml y diluyó en 50 ml de agua destilada en donde se obtuvo una concentración de 10 mg/L de fósforo (27).



## PROCEDIMIENTO

1. Se midió en un tubo micro-Kjeldahl de 250 ml y midió 50 ml de la muestra. Se añadió 1 ml de  $H_2SO_4$  y 5 ml de  $HNO_3$  y colocó en la gradilla de digestión a  $350\text{ }^\circ\text{C}$  por 45 minutos en la campana de gases hasta tener aproximadamente 1 ml de muestra.
2. Se enfrió y añadió aproximadamente 20 ml de agua destilada, 0.05ml (una gota) de indicador fenoftaleína y la cantidad necesaria de solución de NaOH 6N para producir un ligero tinte rosa. Se transfirió la solución neutralizada a un balón aforado de 100ml, filtrado si fuera necesario se eliminó partículas o la turbidez. Se añadió los lavados del filtro al matraz y ajustó el volumen de muestra a 100ml con agua destilada.
3. Se midió 2.5 ml de la muestra digerida en un balón aforado de 25 ml, agregó 4 ml del reactivo combinado, aforó a 25 ml con agua destilada, se preparó el blanco con agua destilada y reactivo combinado y dejó reaccionar 10 minutos, pero no más de 30 minutos.
4. Se leyó la concentración de fosfatos en mg/L a 880 nm (27).

## 4. Nitritos (mg/L)

### MÉTODO:

El  $NO_2^-$  se determina por la formación de un colorante azo púrpura rojizo producido a pH 2.0 a 2.5 por acoplamiento de sulfanilamida diazotizada con diclorhidrato de N-(1-naftil)-etilendiamina(diclorhidrato de NED). El rango de aplicación del método para medidas espectrofotométricas es de 10 a  $1000\mu\text{g}$  de  $NO_2^-$ -N/L y se pueden aplicar al de 5 a  $50\mu\text{g}$  de N/L si se usan un recorrido de luz de 5 cm y filtro de color verde. El sistema de color obedece a la ley de Beer hasta  $180\mu\text{g}$  N/L con 1 cm de recorrido de luz a 543 nm de las muestras se pueden determinar concentraciones más altas de  $NO_2^-$  (27).

### REACTIVO DE COLOR:

Se añadió a 800 ml de agua 100ml de ácido fosfórico 85% y 10 gr de sulfanilamida. Tras disolver completamente la sulfanilamida, se añadió 1 gr de diclorhidrato de N-(1-naftil)-etilendiamina, mezcló para disolver y diluyó con agua hasta 1 litro. La solución fue estable durante cerca de 1 mes cuando se conservó en frío en frasco oscuro (27).

### PROCEDIMIENTO:

1. Si la muestra contenía sólidos suspendidos se filtró a través de un filtro de membrana de 0.45  $\mu\text{m}$  de diámetro de poro.

2. Si el pH de la muestra no estuviera comprendida entre 5 y 9 se ajustó a ese valor con HCl 1 N o  $\text{NH}_4\text{OH}$  según convenga. Se añadió 2 ml de reactivo de color a un balón al 50 ml aforar con la muestra. Se preparó un blanco con agua destilada.
3. Se midió a 543 nm la concentración de nitritos en mg/L (27).

### 5. Nitratros (mg/L)

#### MÉTODO:

En ácido sulfúrico concentrado los iones nitrato forman con un derivado del ácido benzoico un nitrocompuesto rojo, cuya concentración se determina fotométricamente (28).

#### PROCEDIMIENTO:

1. Se introdujo en un tubo de ensayo seco 1 microcucharada azul rasa del reactivo  $\text{NO}_3^-$ -1A.
2. Se añadió con pipeta 5.0 ml y agitó vigorosamente durante 1 minuto hasta que el reactivo  $\text{NO}_3^-$ -1A se haya disuelto completamente.
3. Se vertió cuidadosamente 1.5 ml mediante la pipeta sobre el reactivo en la pared interna del tubo de ensayo mantenido inclinado, se agitó inmediata y vigorosamente agarrando el tubo sólo por la parte superior. Se preparó un blanco con agua destilada.
4. Se dejó en reposo la solución de reacción caliente durante 10 minutos (tiempo de reacción).
5. Se seleccionó el método en el Fotómetro SQ118 se midió el blanco y la muestra en mg/L a una longitud de onda de 517 nm (28).

### 6. Amonio (mg/L)

#### MÉTODO:

El nitrógeno amónico ( $\text{NH}_4\text{-N}$ ) se presenta en parte en forma de iones amonio y en parte en forma de amoníaco. Entre ambas formas de aparición existe un equilibrio dependiente del pH. En solución fuertemente alcalina, en la que prácticamente sólo existe amoníaco, tiene lugar con un agente clorante una transformación en monocloramina. Esta forma con timol un derivado azul de indofenol que se determina fotométricamente (28).

#### PROCEDIMIENTO:

1. Se realizó una dilución 1:25 con 200  $\mu\text{l}$  de muestra y 4.8 ml de agua destilada y para el blanco sólo se adicionó 5 ml de agua destilada.

2. Luego se adicionó 600  $\mu\text{l}$  del reactivo  $\text{NH}_4\text{-1B}$  al blanco y las muestras.
3. Se añadió 1 microcucharada del reactivo  $\text{NH}_4\text{-2B}$  y mezcló.
4. Se dejó en reposo durante 5 minutos.
5. Se añadió 4 gotas del reactivo  $\text{NH}_4\text{-3B}$  y mezcló.
6. Se dejó 5 minutos en reposo
7. Se eligió el método en el Fotómetro SQ118 a 690 nm, se leyó el blanco y las muestras, se obtuvieron todos los resultados en mg/L se multiplicó por la dilución (28).

## 7. Alcalinidad (mg/L $\text{CaCO}_3$ )

### MÉTODO:

La alcalinidad se determina por valoración directa de la muestra de agua con ácido clorhídrico (22).

### PROCEDIMIENTO:

1. Se lavó el recipiente de ensayo con el agua a analizar y se llenó hasta la señal de enrase de 5 ml.
2. Se añadió 2 gotas de la solución indicadora M y agitó. La solución debió colorearse de AZUL. (si la solución se colorea de color rojo naranja, indica que el agua no fue alcalina y que debió determinarse en cambio la acidez).
3. Se colocó la pipeta de valoración sin enroscar sobre el frasco con reactivo 3 y llenó con la solución valorante tirando lentamente de la jeringa, hasta que el borde inferior de la junta negra del émbolo coincida con la señal de 0mmol/L en la escala.
4. Se sacó la pipeta de valoración rozar brevemente la punta del tubo cuentagotas contra el borde del recipiente. Se añadió luego la solución valorante gota a gota a la muestra de agua preparada, hasta que el color de la muestra vire de AZUL a ROJO (28).

## 8. Metales

### a) Plomo (mg/L):

#### MÉTODO:

En solución los iones plomo (II) reaccionan con 4-(2-pirilidazo)-resorcina (PAR) formando un complejo rojo que se determina fotométricamente (28).

#### PROCEDIMIENTO:

1. Se verificó el valor del pH que se encontraba en el intervalo 3-6

2. Se introdujo en la cubeta de reacción 5 gotas del reactivo Pb-1K, se cerró firmemente la cubeta y mezcló.
3. Con pipeta de 5 ml la muestra, se cerró la cubeta y se mezcló
4. Se midió la muestra de medición en el fotómetro a 515 nm y este fue el valor de A
5. Se abrió cuidadosamente la cubeta de reacción y añadió 1 microcucharada del reactivo Pb-2K cerrar la cubeta y se mezcló hasta que se disolvió el reactivo.
6. Se midió la muestra de medición nuevamente y este fue el valor de B
7. Este procedimiento se debe a que las muestras trabajadas de aguas residuales tienen una concentración de calcio entre 0 a 500 mg/L por lo tanto debe realizarse las dos mediciones, valor A y restar el valor B y así obtener la concentración de plomo en mg/L (28).

#### **b) Cadmio (mg/L):**

##### **MÉTODO:**

En solución alcalina los iones cadmio forman con un derivado de cadión (cadión= nombre usual de 1-(4-nitrofenil)-3-(4-fenilazofenil)triazeno) un complejo rojo que se determina fotométricamente (28).

##### **PROCEDIMIENTO:**

1. Se pipeteó 5 ml de la muestra en una cubeta de reacción y se mezcló.
2. Se añadió 3 gotas del reactivo Cd-1K y se mezcló. Luego se añadió 1 microcucharada del reactivo Cd-2K y agitó vigorosamente la cubeta firmemente cerrada hasta que el reactivo fue disuelto completamente.
3. Se dejó en reposo 2 minutos (tiempo de reacción), luego se midió la muestra de medición en el fotómetro a 525 nm y se obtuvo el resultado en mg/L (28).

#### **c) Manganeso (mg/L):**

##### **PROCEDIMIENTO:**

1. Se tomó una serie de tubos igual a la cantidad de muestras a analizar y a estos se les adicionó 5 ml de la muestra y uno con agua destilada para el blanco.
2. En la otra serie de tubos también se le adicionó 5 ml de cada muestra y se le añadió 4 gotas del reactivo Mn-1A y se mezcló.
3. Luego se le añadió 2 gotas a cada tubo el reactivo Mn-2A y se mezcló.

4. Se dejó en reposo por 2 minutos
5. Se añadió 2 gotas del reactivo Mn-3A., se mezcló.
6. Se dejó en reposo por 5 minutos.
7. Se hizo la medición en el fotómetro SQ118 a 445 nm en mg/L, siendo primero los tubos con reactivo y luego los tubos sin reactivo (esto se debió a que las muestras son muy turbias). Luego se hizo la diferencia para obtener el resultado final en mg/L (28).

**d) Hierro (mg/L):**

**MÉTODO:**

Todos los iones hierro se reducen a iones hierro (II). Estos en medio amortiguado con tioglicolato, forman con un derivado de triazina un complejo violeta rojizo que se determina fotométricamente (28).

**PROCEDIMIENTO:**

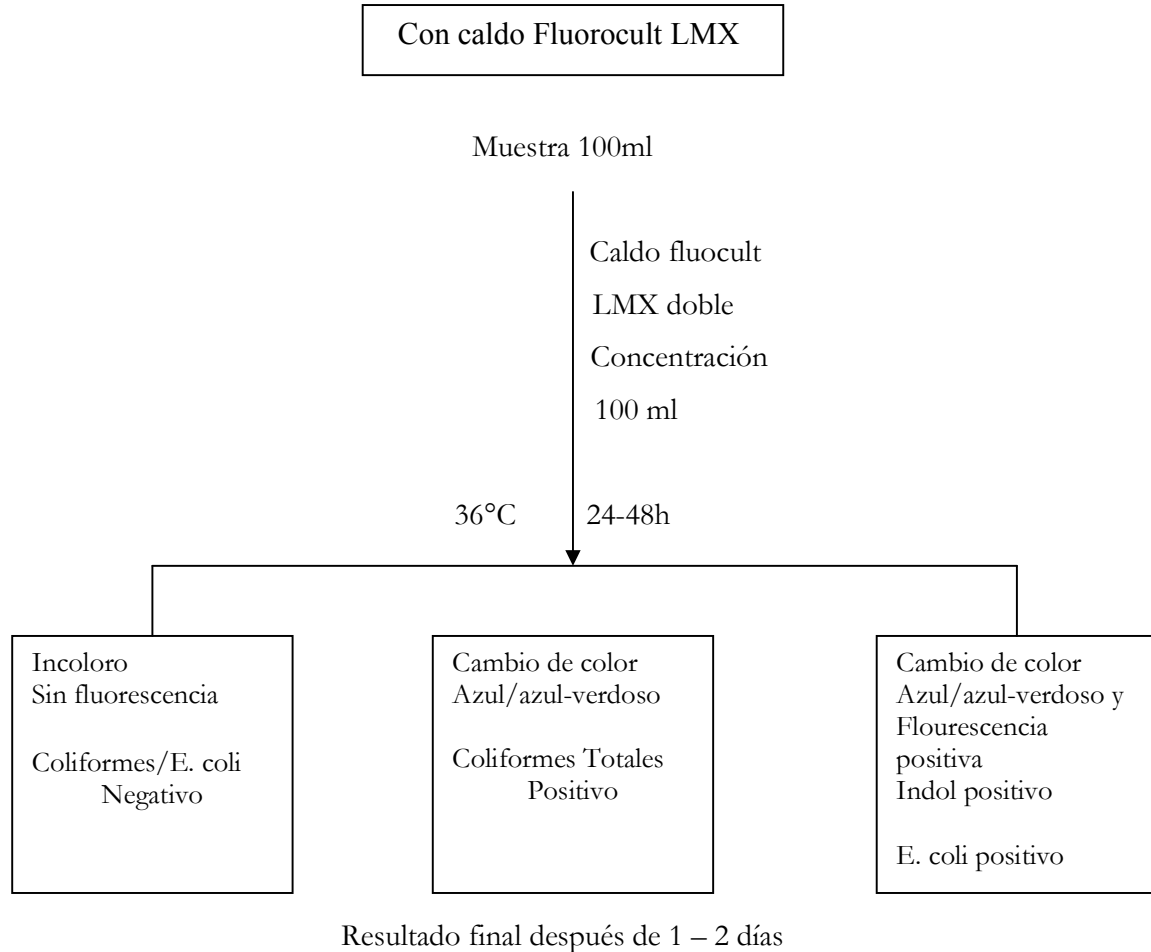
1. Se preparó una serie de tubos de la misma cantidad de las muestras se le agregó únicamente 5 ml de la muestra y preparó un tubo con agua destilada para el blanco.
2. Luego se tomó 5 ml de muestra a la cual se le añadió 3 gotas del reactivo Fe-1A y se mezcló.
3. Se dejó reposar 3 minutos, luego se midió el blanco y las muestras en el fotómetro a una longitud de onda de 565 nm en mg/L, siendo primero las que tienen el reactivo y luego las sin reactivo, se hizo la diferencia y se obtuvo el resultado final en mg/L. (Este procedimiento se hizo por la turbidez de las muestras) (28).

**e) Níquel (mg/L):**

**PROCEDIMIENTO:**

1. Se preparó una serie de tubos de la misma cantidad de las muestras se agregó únicamente 5 ml de la muestra y preparó un tubo con agua destilada para el blanco
2. A cada tubo se le adicionó 5 ml de muestra, se añadió 1 gota del reactivo Ni-1<sup>a</sup> mezcló y dejó en reposo 1 minuto
3. Se añadió 2 gotas de Ni-2<sup>a</sup> mezcló.
4. Se añadió 2 gotas de Ni-3<sup>a</sup> mezcló y se midió en el fotómetro a 445 nm en mg/L, primero el blanco luego las muestras con reactivo y después los tubos sin reactivo se obtuvo el resultado final por la diferencia reportándolo en mg/L (28).

### E. Método Microbiológico:



#### 1. Técnica de tubos múltiples o número más probable:

##### PROCEDIMIENTO:

1. Se midió 100 ml de las muestras en recipientes estériles previamente rotulado cada frasco con el lugar, fecha y hora a la que se tomó la muestra
2. Se transportó en una hielera hasta que llegaron al laboratorio
3. Se rotularon los tubos de agua peptonada para hacer las diluciones correspondientes de  $10^1$  hasta  $10^7$ .
4. Se sembraron las muestras en tres tubos del caldo Fluorocult, se traspasó 1 ml de la dilución de  $10^5$  del caldo agua peptonada al caldo Fluorocult y así sucesivamente hasta llegar a  $10^7$ .

5. Se incubaron las muestras durante 24 horas a 36°C para luego leer los resultados. Los cuales se evidencia con una coloración verde si hay presencia de Coliformes Totales, si hay fluorescencia se debe a que hay presencia de Coliformes fecales y si produce un anillo rojo con el reactivo de KOVAX es porque hay *E. coli*.
6. Se interpretaron los resultados en la tabla para número más probable y se reportó en NMP/100ml (17).

## **G. Diseño de la investigación:**

### **1. Muestra y diseño de muestreo:**

Diseño estratificado (anidado o jerárquico) de 2 etapas, consistente en 5 puntos de muestreo (1era. Etapa) y en épocas del año lluviosa y seca (2da. Etapa). El cálculo de muestras se realizó para el nivel de significancia,  $\alpha = 0.05$  y considerando un límite de error igual a dos veces la desviación estándar que se obtenga. Se tomó una vez por mes durante la época seca y época lluviosa durante los 8 meses de muestreo, divididos en 4 para cada época.

### **2. Análisis de resultados:**

Las variables que se van a determinar son:

Análisis físico:

- Oxígeno disuelto
- PH
- Temperatura
- Salinidad
- Conductividad
- Color
- Turbidez
- Sólidos sedimentables
- Sólidos en suspensión

Análisis fisicoquímico:

- Demanda química de oxígeno
- Demanda bioquímica de oxígeno

- Fósforo
- Nitritos
- Nitratos
- Amonio
- Alcalinidad
- Metales (plomo, cadmio, manganeso, hierro, níquel)

Análisis microbiológico:

- Número Más Probable

Para el análisis de todos los resultados tanto fisicoquímicos como microbiológico se hizo un análisis de varianza de tres vías y se observó si existe diferencia significativa entre los 5 puntos de muestreo y las épocas del año. La determinación en que punto la concentración es la más baja, se establecerá por la prueba de intervalos múltiples de Duncan ( $p < 0.005$ ).



## VIII. RESULTADOS

Se realizó una primera visita a la planta de tratamiento de aguas residuales de ciudad San Cristóbal para determinar los lugares donde se efectuaría el muestreo, los cuales son: el primer punto en la entrada a la planta de tratamiento, el siguiente punto en la salida del digestor, tercer punto en la entrada al biofiltro, cuarto punto en la salida al biofiltro y el quinto punto en la descarga al río.

La evaluación de la efectividad de los biofiltros de la planta de tratamiento de ciudad San Cristóbal, se realizó por comparación de los parámetros fisicoquímicos (DQO y  $\text{DBO}_5$ ), físicos (POR, pH, color, turbiedad, sólidos suspendidos, sólidos sedimentables), metales (plomo y níquel) y microbiológico entre las dos épocas del año y en cada unidad de tratamiento (sistema de laguna y biofiltros).

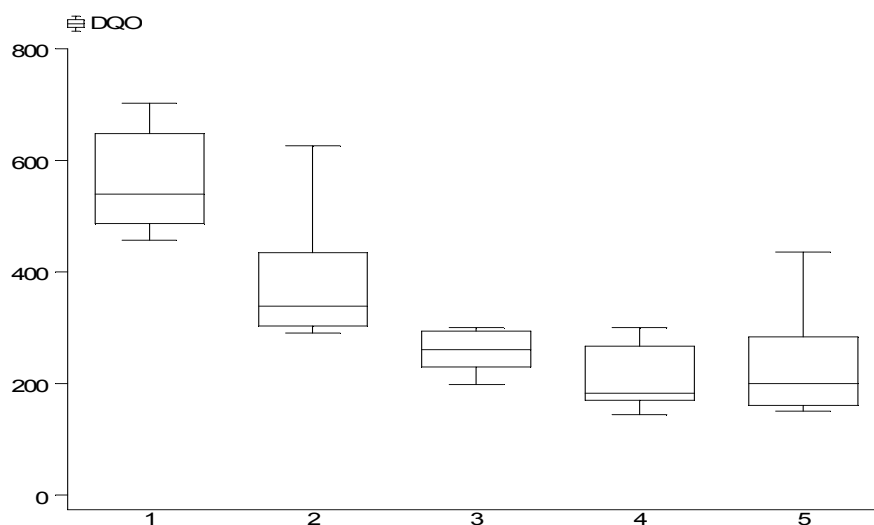
Por los resultados de DQO obtenidos se determinó que el sistema de laguna y los biofiltros permitieron una disminución en la carga contaminante en los puntos estudiados, a excepción del punto 5 donde se incrementó el valor (Tabla 4, Gráfica 1).

**Tabla 4. DQO en la planta de tratamiento de aguas residuales de Ciudad San Cristóbal**

Lugares	DQO (mg/L)	Desviación Estándar	Frecuencia
1	563.000	96.463168	8
2	383.500	113.64607	8
3	258.125	37.680755	8
4	210.375	58.272604	8
5	233.875	97.049969	8
<b>Total</b>	329.775	155.42506	40

Fuente: Datos experimentales

**Gráfica 1. Análisis y comportamiento de los datos muestreados de la DQO las cajas representan los cinco puntos de muestreo.**



Fuente: Análisis Estadístico.

Los resultados de la DQO mostraron que el valor obtenido en la época lluviosa es más alto que en la seca, sin importar el punto de muestreo (Tabla 5).

**Tabla 5. DQO en la planta de tratamiento de aguas residuales de Ciudad San Cristóbal**

Época	DQO(mg/L)*	Desviación Estándar	Frecuencia
Seca	373.45	145.36107	20
Lluviosa	286.10	156.33193	20
<b>Total</b>	329.77	155.42506	40

Fuente: \* Media de dos repeticiones. Datos experimentales.

Asimismo, se encontró diferencia estadísticamente significativa entre cada valor DQO de los 5 puntos de muestreo evaluados ( $p=0.0183$ ), y entre ambas épocas ( $p=0.003$ ) (Tabla 6).

**Tabla 6. Tabla de Varianza para un diseño anidado de la DQO**

Fuente	Parcial SS	df	MS	F	Prob>F
<b>Lugar</b>	686937.35	4	171734.337	8.60	0.0183
<b>Época</b>	64474.625	5	12894.925	6.61	0.0003
<b>Residual</b>	58565.75	30	1952.19167		
<b>Total</b>	268502.775	39	6884.68654		

Fuente: Análisis Estadístico

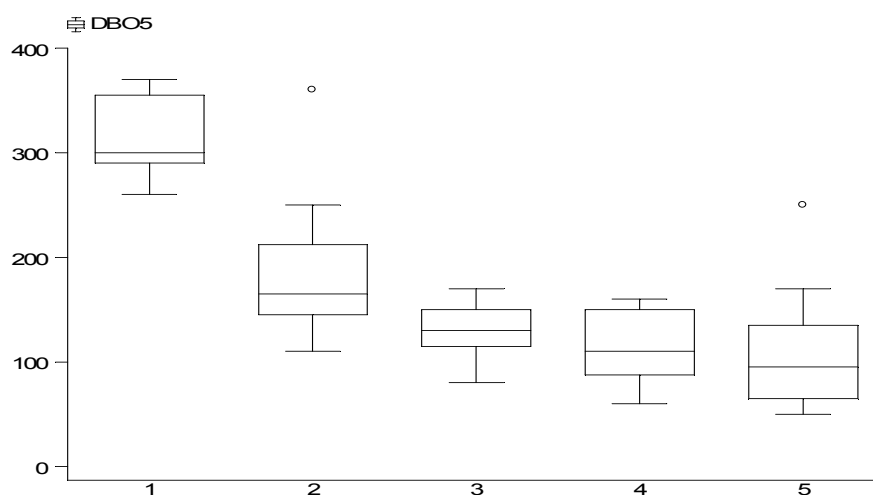
Se determinó que la DBO<sub>5</sub> presentó disminución en los cinco puntos de muestreo. Los valores, iniciaron en 315.00 mg/L en el punto 1, hasta 111.25 mg/L en el punto 5 (Tabla 7) (Gráfica 2).

**Tabla 7. DBO<sub>5</sub> en la planta de tratamiento de aguas residuales de Ciudad San Cristóbal**

Lugares	DBO(mg/L)	Desviación Estándar	Frecuencia
1	315.00	40.000000	8
2	189.25	79.777816	8
3	130.00	27.774603	8
4	114.37	36.590153	8
5	111.25	67.493386	8
<b>Total</b>	171.97	93.175458	40

Fuente: Datos experimentales

**Gráfica 2. Análisis y comportamiento de los datos muestreados de la demanda bioquímica de oxígeno por medio de la cajas de Tuckey, las cajas representan los cinco puntos de muestreo.**



Fuente: Análisis Estadístico.

Se observó que la DBO<sub>5</sub> en la época lluviosa tuvo un valor más bajo de (150.95 mg/L) con respecto a la época seca (193.00 mg/L) (Tabla 8).

**Tabla 8. DBO<sub>5</sub> en la planta de tratamiento de aguas residuales de Ciudad San Cristóbal**

Época	DBO (mg/L)*	Desviación Estándar	Frecuencia
Seca	193.00	86.517415	20
Lluviosa	150.95	96.976109	20
<b>Total</b>	171.97	93.175458	40

Fuente: \* Media de dos repeticiones. Datos experimentales

Se demostró la diferencia significativa para la DBO<sub>5</sub> para los cinco puntos de muestreo ( $p=0.0154$ ). También se encontró diferencia significativa entre las dos épocas del año ( $p=0.0402$ ) (Tabla 9).

**Tabla 9. Tabla de Varianza para un diseño anidado del Demanda Bioquímica de Oxígeno**

Fuente	Parcial SS	df	MS	F	Prob>F
<b>Lugar</b>	236174.1	4	59043.525	9.32	0.0154
<b>Época</b>	31680.125	5	6336.025	2.69	0.0402
<b>Residual</b>	70730.75	30	2357.69167		
<b>Total</b>	338584.975	39	8681.66603		

Fuente: Análisis Estadístico

La cantidad de sólidos sedimentables disminuyó al pasar el agua residual por la planta de tratamiento. Se observó que en el punto 3 (entrada al biofiltro) el valor obtenido fue 0.1625 ml-H/L, en tanto que en el punto 4 (salida del biofiltro) el valor fue de 0.00, por lo que se observó disminución. En el punto 5 (descarga al río), ocurrió un aumento, debido a que el agua tratada se mezcla con el agua no tratada (Tabla 10).

**Tabla 10. Sólidos sedimentables en la planta de tratamiento de aguas residuales de Ciudad San Cristóbal**

Lugares	SS (ml-H/L)	Desviación Estándar	Frecuencia
1	3.9375	1.67838140	8
2	2.2375	2.57123510	8
3	0.1625	0.28252687	8
4	0.0000	0.00000000	8
5	0.2000	0.56568543	8
<b>Total</b>	1.3075	2.05705630	40

Fuente: Datos experimentales

Al comparar los resultados para sólidos sedimentables, con el análisis de varianza realizado, se determinó que existe diferencia significativa entre los puntos de muestreo ( $p=0.0208$ ) (Tabla 11). No se encontró diferencia significativa entre las épocas seca y lluviosa.

**Tabla 11. Tabla de varianza para un diseño anidado de sólidos sedimentables**

Fuente	Parcial SS	df	MS	F	Prob>F
<b>Lugar</b>	96.231499	4	24.057875	8.08	0.0208
<b>Residual</b>	53.9025001	30	1.79675		
<b>Total</b>	165.02775	39	4.2314807		

Fuente: Análisis Estadístico

La concentración inicial de los sólidos suspendidos fue de 588.50 mg/L (punto 1). Al pasar por la laguna, se observó una disminución a 421.62 mg/L (punto 2). En el digestor fue de 241.25 mg/L (punto 3). En la entrada al biofiltro fue de 198.00 mg/L (punto 4), se comprobó que en el digestor se quedaron la mayor cantidad de sólidos ya que este funcionó como sedimentador de sólidos (Tabla 12).

**Tabla 12. Sólidos suspendidos en la planta de tratamiento de aguas residuales de Ciudad San Cristóbal**

Lugares	Ssup(mg/L)	Desviación Estándar	Frecuencia
1	588.50	155.26567	8
2	421.62	201.39651	8
3	241.25	101.46322	8
4	198.00	85.996678	8
5	197.37	86.686525	8
<b>Total</b>	329.35	200.89231	40

Fuente: Datos experimentales

En los valores de sólidos suspendidos existió diferencia significativa entre los resultados entre los lugares de muestreo ( $p=0.0163$ ) (Tabla 13) No se observó diferencia significativa entre las épocas seca y lluviosa.

**Tabla 13. Tabla de varianza para un diseño anidado de sólidos suspendidos**

<b>Fuente</b>	<b>Parcial SS</b>	<b>df</b>	<b>MS</b>	<b>F</b>	<b>Prob&gt;F</b>
<b>Lugar</b>	944841.85	4	236210.463	9.08	0.0163
<b>Residual</b>	498971.5	30	16632.38		
<b>Total</b>	1573951.1	39	40357.7205		

Fuente: Análisis Estadístico

El comportamiento del níquel fue similar al de sólidos sedimentables y sólidos suspendidos, ya que en todos los puntos de muestro se disminuyeron los valores, existiendo además diferencia significativa en los lugares. Por el contrario, en las épocas del año no hubo diferencia entre ellas (Tabla 14).

**Tabla 14. Níquel en la planta de tratamiento de aguas residuales de Ciudad San Cristóbal**

<b>Lugares</b>	<b>Ni (mg/L)</b>	<b>Desviación Estándar</b>	<b>Frecuencia</b>
1	0.270	0.42995017	8
2	0.1250	0.17695843	8
3	0.0437	0.76706770	8
4	0.0425	0.03615443	8
5	0.0437	0.52898150	8
<b>Total</b>	0.1050	0.22045408	40

Fuente: Datos experimentales

En los parámetros (POR, pH, turbiedad, color y plomo) no se observó una disminución ni diferencia significativa entre los valores de los puntos evaluados. Sin embargo durante la época seca y lluviosa si se observó una diferencia. A continuación se presentan las medias de todos los parámetros que demostraron tener diferencia significativa en las épocas (Tabla 15).

**Tabla 15. Desviación estándar y medio de los cinco parámetros en los cinco puntos de muestreo en las época seca y lluviosa.**

Parámetro	Época seca		Época lluviosa	
	Punto	Media	Punto	Media
POR	1	11.0000	1	-47.0000
	2	43.0000	2	-20.0000
	3	46.0000	3	-12.0000
	4	49.0000	4	-15.0000
	5	46.0000	5	-24.0000
pH	1	7.0000	1	7.0000
	2	6.0000	2	7.0000
	3	6.0000	3	7.0000
	4	6.0000	4	7.0000
	5	6.0000	5	7.0000
Turbiedad	1	2.7400x10 <sup>2</sup>	1	2.2600x10 <sup>2</sup>
	2	2.4000x10 <sup>2</sup>	2	1.1600x10 <sup>2</sup>
	3	1.4700x10 <sup>2</sup>	3	93.0000
	4	1.1500x10 <sup>2</sup>	4	56.0000
	5	1.4800x10 <sup>2</sup>	5	57.0000
Color	1	47.0000	1	46.0000
	2	42.0000	2	24.0000
	3	27.0000	3	19.0000
	4	21.0000	4	12.0000
	5	27.0000	5	12.0000
Plomo	1	0.0000	1	0.0000
	2	0.0000	2	0.0000
	3	0.0000	3	0.0000
	4	0.0000	4	0.0000
	5	0.0000	5	0.0000

Fuente: Datos experimentales.

Los resultados que se obtuvieron del análisis microbiológico no presentaron diferencia significativa entre los cinco puntos de muestreo y épocas del año (Tabla 16).

**Tabla 16. Análisis microbiológico en ambas épocas.**

Punto	Época		C. Totales	C. fecales	E. coli
1	seca	Media	$6.63 \times 10^9 \pm 5.32 \times 10^9$	$2.33 \times 10^9 \pm 2.61 \times 10^9$	$3.97 \times 10^9 \pm 5.13 \times 10^9$
	lluviosa	Media	$2.30 \times 10^{10} \pm 1.65 \times 10^{10}$	$2.70 \times 10^9 \pm 2.20 \times 10^9$	$2.43 \times 10^9 \pm 2.50 \times 10^9$
2	seca	Media	$1.75 \times 10^{10} \pm 7.50 \times 10^9$	$2.99 \times 10^9 \pm 5.34 \times 10^9$	$8.33 \times 10^9 \pm 1.06 \times 10^{10}$
	lluviosa	Media	$8.75 \times 10^9 \pm 1.14 \times 10^{10}$	$3.90 \times 10^9 \pm 5.20 \times 10^9$	$3.90 \times 10^9 \pm 5.20 \times 10^9$
3	seca	Media	$2.71 \times 10^9 \pm 2.24 \times 10^9$	$1.28 \times 10^9 \pm 2.21 \times 10^9$	$1.34 \times 10^9 \pm 2.19 \times 10^9$
	lluviosa	Media	$6.71 \times 10^9 \pm 5.26 \times 10^9$	$4.60 \times 10^9 \pm 0.00000$	$2.71 \times 10^9 \pm 2.19 \times 10^9$
4	seca	Media	$4.44 \times 10^9 \pm 4.74 \times 10^9$	$2.53 \times 10^8 \pm 3.40 \times 10^8$	$1.34 \times 10^9 \pm 2.19 \times 10^9$
	lluviosa	Media	$4.07 \times 10^9 \pm 5.03 \times 10^9$	$2.37 \times 10^9 \pm 2.57 \times 10^9$	$4.12 \times 10^8 \pm 5.30 \times 10^8$
5	seca	Media	$9.06 \times 10^9 \pm 1.11 \times 10^{10}$	$6.39 \times 10^9 \pm 1.17 \times 10^{10}$	$8.93 \times 10^9 \pm 1.12 \times 10^{10}$
	lluviosa	Media	$3.92 \times 10^9 \pm 5.18 \times 10^9$	$3.21 \times 10^9 \pm 5.21 \times 10^9$	$3.67 \times 10^8 \pm 5.61 \times 10^8$

Fuente: Datos experimentales.



## IX. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En el presente estudio se evaluó la capacidad de los biofiltros de la planta de tratamiento en la reducción de la contaminación de la planta de tratamiento de ciudad San Cristóbal en base a parámetros fisicoquímicos y microbiológicos.

El estudio permitió evaluar el comportamiento de los parámetros mencionados, antes y después del tratamiento en dos épocas del año y en cinco puntos de muestreo.

Al respecto, solamente se observó disminución de la contaminación en los parámetros DQO, DBO<sub>5</sub>, sólidos sedimentables, sólidos suspendidos, níquel, POR, pH, plomo, turbiedad y color.

En el caso de la DQO ésta da una medida de la cantidad de materia oxidable presente en la muestra de agua tanto orgánica como inorgánica (30). Los resultados obtenidos en este estudio indicaron que el funcionamiento de los biofiltros disminuyó la materia orgánica del agua durante el paso del agua por la laguna de oxidación (laguna anaeróbica) por medio de digestión anaeróbica. La eficacia que tienen las lagunas anaeróbicas para transformar y eliminar la materia orgánica del agua es muy grande, porque al efecto biológico hay que añadir el fenómeno físico de decantación de materia orgánica coloidal. En esta laguna la DQO disminuyó el valor en la salida del digestor (punto 2) comparado con la entrada al biofiltro (punto 3). En los demás valores de los otros puntos de muestreo, también hubo disminución de la DQO en la salida al digestor (punto 2), sin embargo los valores ya no se redujeron más.

Los biofiltros también contribuyeron a la depuración de la DQO debido a que el valor encontrado en la salida del biofiltro (punto 4) fue menor, mientras que en la entrada al biofiltro (punto 3) fue mayor. La disminución de la DQO en los biofiltros, se debe a la sedimentación de sólidos suspendidos, así como a los procesos de descomposición que ocurren en el agua y en las capas superiores del suelo (31).

La disminución de la DQO también fue corroborada por el análisis de varianza, ya que se encontró diferencia significativa en los puntos de muestreo y en las épocas del año. La DQO en la época lluviosa fue menor que la época seca por lo que se cree que durante esta época hubo dilución del agua residual y el tiempo de retención fue menor debido a que la velocidad del caudal fue mayor. La disminución lograda por los biofiltros permitió que al salir del biofiltro, el agua residual procedente de ciudad San Cristóbal tuviera una concentración de DQO aceptable según el Reglamento de las Descargas y Reuso de Aguas Residuales y de la Disposición de lodos (33).

El comportamiento de la  $DBO_5$  fue similar al de la DQO, tanto en la laguna anaeróbica como en los biofiltros lográndose una disminución de este parámetro.

El sistema de filtro que se utilizó fue de plantas emergentes que de forma natural se enraízan en el terreno, pero las transforman artificialmente en flotantes por lo que toda la raíz de la planta queda en contacto directo con todos los nutrientes del agua residual, funcionando de manera más eficaz en la reducción de la contaminación. Al evaluar la carga contaminante del agua residual en la  $DBO_5$ , los niveles de contaminación en los distintos puntos de muestreo presentaron una diferencia significativa  $p < 0.05$  por lo que la carga contaminante disminuyó en todos los puntos.

Los valores en la entrada a la planta (punto 1), con respecto a la salida del biofiltro (punto 4) mostraron que la contaminación disminuyó notablemente (salida al biofiltro); encontrándose que al momento de pasar por los biofiltros (punto 4) estos actuaron como se esperaba.

La carga contaminante disminuyó en los cinco puntos de muestreo, esta disminución fue mayor en la época lluviosa. El acuerdo gubernativo número 236-2006 establece que el límite máximo permisible de descargas a cuerpos receptores para aguas residuales es de 700 mg/L, en este estudio se obtuvo un valor de 193mg/L en la época seca y 150.95 mg/L en la época lluviosa, resultados que deben considerarse satisfactorios.

La determinación de los sólidos sedimentables interesa fundamentalmente a efectos de tratamiento de aguas, a fin de conocer el volumen y la densidad del fango que se obtendrá en los decantadores. Los sólidos en suspensión y los sólidos totales son de interés, tanto para definir la calidad del agua, como a efectos de su tratamiento (30). Para poder eliminar los sólidos en suspensión debe utilizarse sedimentación, decantación, filtración y degradación a través del conjunto que forma el sustrato del humedal con las raíces y rizomas de las plantas. Como se observó en los sólidos sedimentables se encontró diferencia significativa entre la entrada al biofiltro (punto 3) hasta la descarga al río (punto 5).

Los sólidos suspendidos disminuyeron al comparar antes y después del tratamiento, ya que en la entrada a la planta (punto 1), los valores fueron muy altos, en el digestor es donde los sólidos precipitan es por ello que hay diferencia con respecto a la entrada al biofiltro (punto 3). Cuando pasan por la salida del biofiltro (punto 4) los biofiltros trabajaron para disminuir los niveles de contaminación, haciendo que el agua no se encuentre con una gran cantidad de sólidos suspendidos al momento de ser descargada al río.

Tanto para sólidos sedimentables como para sólidos suspendidos, no se encontró una diferencia significativa entre las épocas del año. Durante la época seca y lluviosa la concentración de los sólidos se mantuvo estable por lo que se pensó que en la época lluviosa los valores serían menores por la dilución del agua, sin embargo es probable que hubo más arraste de material sólido.

Como constituyente importante del agua residual se pueden encontrar varios metales pesados, aunque su cuantificación sea a niveles traza. Cualquier catión se considera un metal pesado, así las aguas residuales contienen gran número de metales pesados diferentes. Entre ellos se pueden destacar el níquel, manganeso, plomo, cromo, cadmio, zinc, cobre, hierro y mercurio entre otros. Todos ellos se encuentran catalogados en la directiva Europea 96/61/CE IPPC (ley 16/2002) como sustancias contaminantes que se deben tener obligatoriamente en consideración para fijar valores límites de emisiones, aunque algunos de ellos son imprescindibles para el normal desarrollo de la vida biológica (31). Es sabido que los biofiltros remueven metales debido al fenómeno precipitación-adsorción, precipitación de los hidróxidos, sulfuros y ajuste de pH (32).

Con respecto al níquel, los tejidos de las plantas pueden almacenar altas concentraciones de algunos metales y pueden llegar a desarrollar tolerancia al níquel, plomo y cobre. En este estudio los valores del níquel fueron menores con respecto al acuerdo gubernativo de uso y reuso de aguas residuales que muestra que el valor permisible es de 6 mg/L. En este estudio el níquel no se encontró en altas concentraciones en el agua bruta (entrada a la planta). Debido a que el nivel del níquel fue disminuido, se puede inferir que las plantas no han desarrollado tolerancia al níquel, probablemente sea porque no se encontraron grandes cantidades de níquel en la descarga del agua residual de ciudad San Cristóbal.

Los parámetros físicos de POR, pH, turbiedad, color y el plomo, presentaron diferencia estadísticamente significativa únicamente durante las épocas del año no así entre los cinco puntos de muestreo. Esto se debe a que la raíz de las plantas sirven en parte como trampas de sedimento capturando sólidos. El tejido de la planta se renueva constantemente y todo el detritus se deposita en el fondo del humedal por lo que la turbiedad y color se incrementan y solo se disminuye con la dilución del agua como sucedió en la época lluviosa. Con respecto al plomo, es probable que la raíz de la planta creó tolerancia por lo que no se encontró diferencia significativa entre los cinco puntos de muestreo. En la época seca los valores de plomo fueron menores que en la época lluviosa.

En el análisis microbiológico no se observó diferencia significativa, tanto en los puntos de muestreo como en las épocas del año. Esto es probable que sea porque el tiempo de retención en el humedal no fue el suficiente para la remoción de microorganismos como lo son los Coliformes totales, fecales y *E. coli*, se sugiere que el tiempo de retención hidráulica se incremente hasta 6.3 días para lograr una mayor eficiencia en la remoción de *E. coli* (34).

Otro parámetro que ayudaría para la remoción de estos microorganismos, es el aumento del pH, el cual fue similar desde la entrada de la planta hasta la salida del biofiltro, caso contrario a las épocas del año en las cuales si se observó una diferencia (35).

## X. CONCLUSIONES

- Durante las épocas estudiadas, la carga contaminante de las aguas residuales evaluada por los parámetros para la DQO y DBO<sub>5</sub> en los cinco puntos de muestreo fue reducido por los filtros verdes.
- Los filtros verdes disminuyeron los valores de sólidos suspendidos, sólidos sedimentables y níquel en los cinco puntos de muestreo no así entre épocas del año.
- Los valores de pH, POR, turbiedad, color y plomo disminuyeron únicamente entre ambas épocas.
- Los parámetros microbiológicos (coliformes totales, fecales y *E. coli*) no fueron disminuidos en los puntos de muestreo y épocas.

## **XI. RECOMENDACIONES**

- Evaluar la eficacia de otras plantas acuáticas para la eficiencia de la reducción de contaminación.
- Aumentar el número de muestreos para aumentar la precisión y exactitud de resultados.
- Aumentar los lugares de muestreo para aumentar la representatividad de los resultados.

## XII. REFERENCIAS

1. Autoridad para el Manejo Sustentable del lago de Amatitlán. La Cuenca y el Lago de Amatitlán. Guatemala: Editorial Piedra Santa, Doc. Tec. 2005. 30p.
2. Borrero JA. Depuración de Aguas Residuales con Humedales Artificiales. Barcelona: 1999. 44p.
3. Autoridad para el Manejo Sustentable del lago de Amatitlán. Realidad. 2005. 17p.
4. Lámina Multi-Color doble. Lago de Amatitlán. Guatemala: Editorial Piedra Santa. 1997.
5. Autoridad para el Manejo Sustentable del lago de Amatitlán. Monografía del Municipio de Villa Nueva. Guatemala: Editorial Piedra Santa, Doc. Tec. No. 7, 1999.
6. Autoridad para el Manejo Sustentable del lago de Amatitlán. Catacterización Físico-Biótica. Guatemala: Editorial Piedra Santa, Doc. Tec. Vol. 1. 1998. 20p.
7. Fair GM., Geyer JC., Okun DA. Abastecimiento de Agua y Remoción de Aguas Residuales. México: Editorial Limusa, 1980.
8. López ML. Evaluación de los Filtros Percoladores de la Planta de Tratamiento de Agua Residual de la Universidad de San Carlos de Guatemala, a través de la Eficiencia en la Remoción de *Streptococcus faecalis*. Guatemala: Universidad de San Carlos, (tesis de Maestría en Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos, Facultad de Ingeniería. Escuela de Regional Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos-ERIS- a nivel de Post-grado). 2001. 19p.
9. Tchobanoglous G. Ingeniería de Aguas Residuales Redes de Alcantarillado y Bombeo. México: Editorial McGraw-Hill, 1996. 31p.
10. La Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca y del lago de Amatitlán. Guatemala: Doc. Tec. 2004. 31p.
11. Crites R. Tchobanoglous G. Sistemas de Manejo de Aguas Residuales para Núcleos y Descentralizados. Camargo M, Pardo L, Mejía G, trad. Bogotá, Colombia: Editorial McGraw-Hill. Tomo 1. 2000. 169p.
12. Romero JA. Calidad del Agua. 2ed. México: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, AlfaOmega, 1999. 119p.

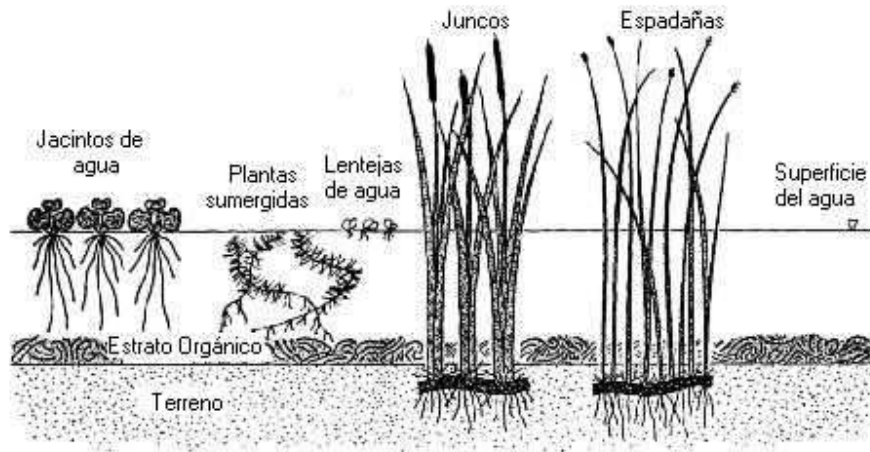
13. Metcalf & Eddy, Inc. Wastewater Engineering Treatment, Disposal and Reuse. 3ed. Estados Unidos de América: Editorial MacGraw-Hill, 1991.
14. Guía para la Calidad del Agua Potable. Criterios Relativos a la Salud y otra Información de Base. Washington, DC: Vol. 2. 1987. 325p.
15. Rodríguez JE. Sánchez EM. Evaluación de Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Panajachel, Sololá. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, (tesis de Maestría en Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos, Facultad de Ingeniería. Escuela de Regional Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos –ERIS- a nivel de post-grado). 2001. 38p.
16. Organización Panamericana de la Salud (OPS) Guía para la Calidad del Agua Potable. Control de la Calidad del Agua Potable en Sistemas de Abastecimiento para Pequeñas Comunidades. Washington, DC: Organización Mundial de la Salud, Doc. Tec. Vol. 3. 1988. 35p.
17. Merck. Microbiología. Colombia. Doc. Tec. 2005.
18. Crites R. Tchobanoglous, G. Sistemas de Manejo de Aguas Residuales para Núcleos y Descentralizados. Camargo M, Pardo L, Mejía G, trad. Bogotá, Colombia: Editorial McGraw-Hill. Tomo 2. 2000. 600p.
19. Beascoechea E. Proposal for Construction of a Green Filter in the Lagoon or Boada de Campos. Fundación Global Nature Director. Doc. Tec.
20. Botánica para Aventureros. junio del 2005. <<http://www.vivelanaturaleza.com/botanica/Espadana.php>>
21. Cartees, J. North Carolina Estados Unidos: La Comisión para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad. en junio del 2005. Disponible en: <[http://siit.conabio.gob.mx/pls/itisca/taxastep?king=Plantae&p\\_action=exactly+for&taxa=typha+latifolia&p\\_format=&p\\_ifx=itismx&p\\_lang=es](http://siit.conabio.gob.mx/pls/itisca/taxastep?king=Plantae&p_action=exactly+for&taxa=typha+latifolia&p_format=&p_ifx=itismx&p_lang=es)>
22. Tule H. España B. Manual de Plantas de Costa Rica. junio del 2005. <<http://www.mobot.org/MOBOT/research/treat/typhaceae.shtml>>
23. Typha. junio del 2005. <<http://es.wikipedia.org/wiki/Thyphaceae>>
24. Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca y del Lago de Amatitlán. Descripción de Biofiltros. Doc. Tec.. 2003. 8p.
25. Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca y del Lago de Amatitlán. Memoria Técnica. Guatemala: Doc. Tec. 2005.16p.



26. Instituto de Fomento Municipal –INFOM- Laboratorio de Calidad de Agua. Procedimiento Estándar de Laboratorio “Captación y Preservación de Muestras de Agua”. Guatemala: Doc. Tec. 2003. 23p.
27. Standard Methods For the Examination of Water and Wastewater. 20ed. Baltimore, Maryland: United Book Press Inc. 1998.
28. Insertos. Reactivos de Laboratorio. junio del 2005. <[http:// photometry.merck.de](http://photometry.merck.de)
29. Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca y del Lago de Amatitlán. Biofiltro San Cristóbal. Guatemala: Doc. Tec. 2004. 2p.
30. Martínez O.E. Determinación de la Calidad Fisicoquímica del Agua del Canal de Chiquimulilla en la Reserva Natural de Usos Múltiples Monterrico. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, (tesis de graduación, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia). 2006. 94p.
31. Los Metales Pesados en la Aguas Residuales. octubre 2008. <<http://weblogs.madrimasd.org/rentavares/archive/2008/02/02/83698.aspx>>.
32. Tratamiento Biológico de Aguas Residuales. 23 de mayo de 2009. <<http://welogs.madrimasd.org/rentavares/archive/2008/02/02/83698.aspx>. >
33. Reglamento de las descargas y reuso de Aguas Residuales y de la Disposición de Lodos. Doc. Tec. 2006.
34. Investigaciones y experiencias con biofiltros en Nicaragua, Centro América. agosto 2009. <<http://bvsde.per.paho.org/bvsaidis/méxico/26/ii-109.df>>.
35. Diseño y Diagnóstico de Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales Mediante Humedales (Wetlands). Agosto 2009. <<http://www.cepis.org.pe/bvsaidis/tratagua/mexicana/R-0144.pdf>>.
36. Manual. Fotómetro SQ118. MERCK, Alemania. Febrero 2010.

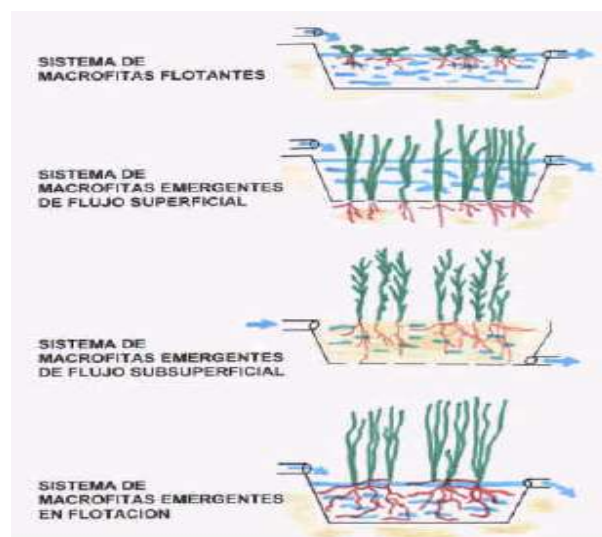
## X. ANEXOS

Figura 1. Plantas acuáticas comunes, encontradas en los humedales.



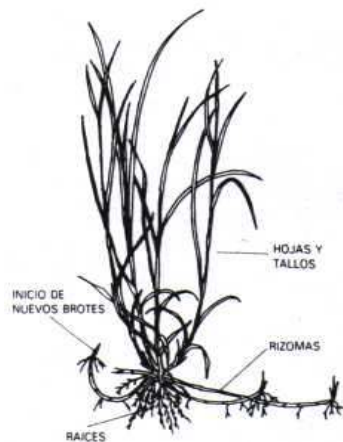
Fuente: Borrero JA. Depuración de Aguas Residuales con Humedales Artificiales. Barcelona: 1999. 44p.

Figura 2. Tipos de Sistemas, de depuración de aguas residuales por medio de sistemas naturales.



Fuente: Borrero JA. Depuración de Aguas Residuales con Humedales Artificiales. Barcelona: 1999. 44p.

Figura 3. Esquema típico de planta emergente, encontrada en humedales superficiales.



Fuente: Borrero JA. Depuración de Aguas Residuales con Humedales Artificiales. Barcelona: 1999. 44p.

Figura 4. Plantas herbáceas acuáticas oriundas del hemisferio norte y hoy distribuidas en buena parte del mundo. Son frecuentes en humedales y pantanos.



Fuente: Typha. junio del 2005. <<http://es.wikipedia.org/wiki/Thyphaceae>>

Figura 5. Planta *Typha domingensis*. Es una planta monoica, la inflorescencia es una espiga cilíndrica más o menos actinomorfa.



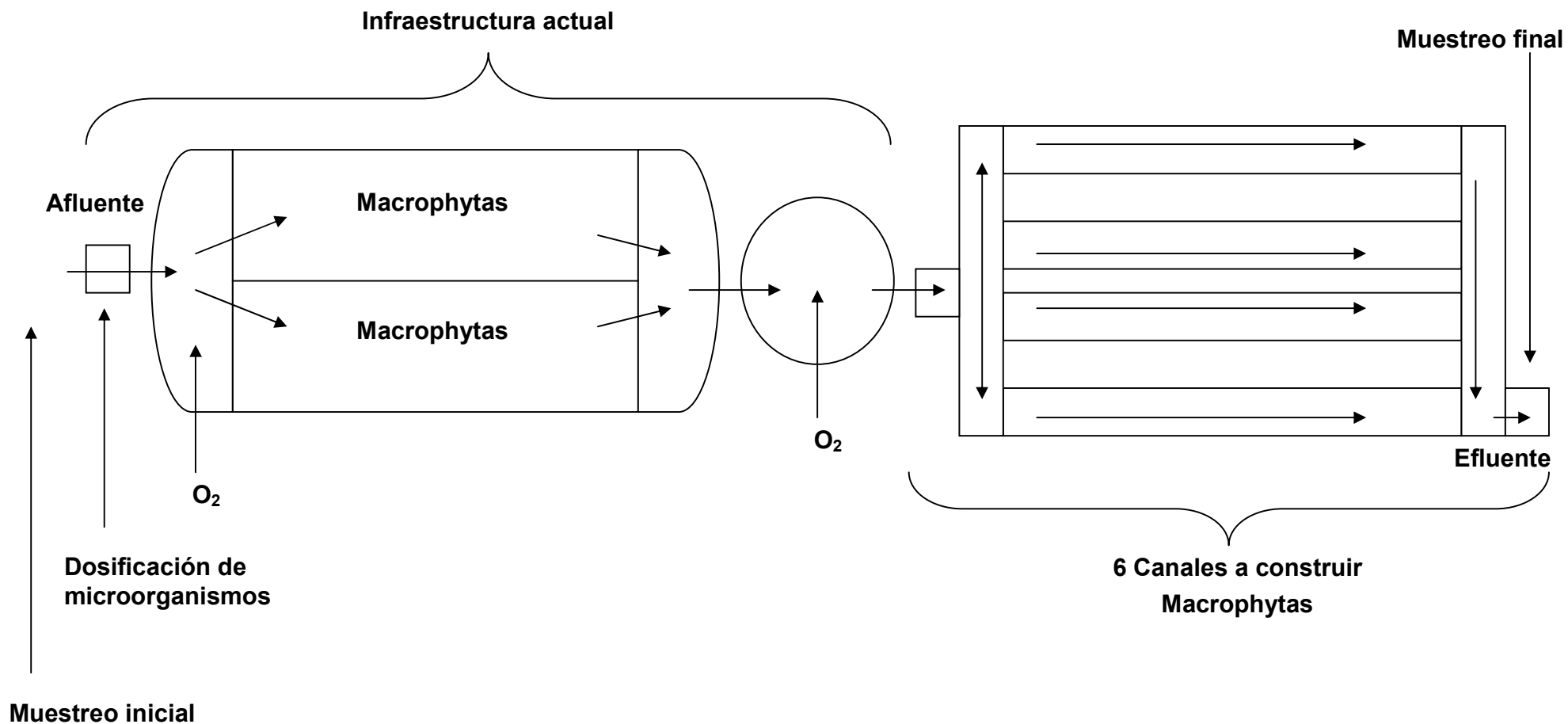
Fuente: Tule H. España B. Manual de Plantas de Costa Rica. junio del 2005.  
<<http://www.mobot.org/MOBOT/research/treat/typhaceae.shtml>

Figura 6. Planta *Typha latifolia*. Planta unisexual, aclamídea, rodeadas de pelos o de escamas. Inflorescencia cilíndrica compacta.



Fuente:Typha. junio del 2005. <<http://es.wikipedia.org/wiki/Thyphaceae>

Figura 7: Esquema de la planta de tratamiento para aguas residuales ubicada en la localidad de Ciudad San Cristóbal, dentro del perímetro de la ciudad de Guatemala, en donde AMSA realiza sus pruebas para disminución de contaminantes por medio de la planta *thypa*.



Fuente: Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca y del Lago de Amatitlán. Descripción de Biofiltros. Doc. Tec.. 2003. 8p.

