

**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
ZARAGOZA**

**TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES A TRAVÉS DE
UN HUMEDAL CONSTRUIDO DE FLUJO
SUBSUPERFICIAL PARA EL CULTIVO DE TRUCHA
(*Oncorhynchus mykiss*) EN EL CAMPAMENTO ARCO ÍRIS,
PUEBLA.**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

BIÓLOGO

PRESENTA:

Zariñana Andrade Edgar Andrés

Directora de Tesis: Biól. Maricela Arteaga Mejía

Noviembre de 2011



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Solo después de que el último árbol sea cortado,
Solo después de que el último río sea envenenado,
Solo después de que el último pez sea apresado,
Solo entonces sabrás que el dinero no se puede comer.

Profecía india

La tierra es suficiente para todos pero no para la voracidad de los
consumidores.

Un país, una civilización se puede juzgar por la forma en que
trata a sus animales.

Hay suficiente en el mundo para cubrir las necesidades de todos
los hombres, pero no para satisfacer su codicia.

Mahatma Gandhi

El alcohol es malo, pero el agua es aun peor: ite mata si no bebes!

Mark Twain

Después me dijo un arriero
que no hay que llegar primero
Pero hay que saber llegar...

José Alfredo Jiménez

DEDICATORIAS Y AGRADECIMIENTOS

Mamá, no me equivoco si digo que eres la mejor mamá del mundo, gracias por todo tu esfuerzo, tu apoyo y por la confianza que depositaste en mí. Gracias por que siempre, aun que lejos, has estado a mi lado. Te quiero mucho.

Papá, este es un logro que quiero compartir contigo, gracias por ser mi papá y por creer en mí. Quiero que sepas que ocupas un lugar especial.

A mis hermanos, ¡adivinen qué? Me voy a España y también tienen cara de panqué! Son unos grandes hermanos. Gracias.

Ahora, aun que todavía no puedes leer bien, un día vas a aprender y por eso te dedico esta tesis, gracias por alegrarme todos los días con tus ocurrencias de niño.

A mi futuro primo o prima, que ya vienes en camino, te quiero bebe.

A mi preciosa y hermosa "Chela", no tengo palabras para decirte lo mucho que te quiero, gracias por apoyarme a conseguir esa beca para estudiar la maestría, gracias porque te pareció interesante este proyecto, por ayudarme a procesar las muestras en el laboratorio y por estar conmigo en esas noches de desvelo donde estuve trabajando. Gracias por amarme a pesar de cómo soy y porque desde que te conocí supe que eras la mujer de mis sueños, junto a tí me han pasado las cosas más increíbles, lo único que te puedo decir es que TE AMO.

A mi "abue" que siempre está ahí cuando se le necesita, gracia por cuidarnos desde pequeños y darnos todo su cariño. La quiero mucho.

A mi directora de tesis Biol. Maricela Arteaga Mejía que me permitió estar en este proyecto, así como todo su apoyo incondicional y depositar su confianza en mí. Admiro su inteligencia y calidad humana.

Para poder realizar esta tesis fue fundamental el apoyo del Biol. Lauro Sánchez, al cual le quiero agradecer infinitamente su apoyo.

La presente Tesis es un esfuerzo en el cual, directa o indirectamente, participaron varias personas leyendo, opinando, corrigiendo, teniéndome paciencia, dando ánimo, acompañando en los momentos de crisis y en los momentos de felicidad. Sin su ayuda y conocimientos no estaría donde me encuentro ahora.

Y como olvidarme de tí Amada Universidad Nacional Autónoma de México, que me has dado todo el apoyo, tan generosa y desinteresadamente durante los años de estudio de la Licenciatura. Te agradezco profundamente. Eres mi "alma mater".

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

ÍNDICE	PÁGINA
1. RESUMEN	3
2. INTRODUCCIÓN	4
3. MARCO TEÓRICO	5
3.1 Sectores consumidores de agua.....	5
3.2 Calidad del agua en México.....	5
3.3 Contaminación del agua	6
3.4 Principales fuentes de contaminación.....	8
3.5 Tratamiento de las aguas residuales en México y en Puebla	9
3.6 Tratamiento de aguas residuales con humedales construidos	10
3.61 Antecedentes.....	10
3.62 Humedales construidos	11
3.63 Humedales de Flujo Subsuperficial.....	12
3.7 Requerimientos del medio ambiente de la trucha (<i>Oncorhynchus mykiss</i>)...	15
4. PROBLEMÁTICA	18
5. JUSTIFICACIÓN	18
6. HIPÓTESIS	19
7. OBJETIVOS	19
7.1 Objetivo general.....	19
7.2 Objetivos particulares.....	19
8. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	20
8.1 Santa Cruz Otlatla y Campamento de Pesca deportiva Arco iris.....	20
8.2 Clima.....	21
8.3 Tipo de vegetación.....	21
8.4 Bosque de Coníferas y Latifoliadas (Pino-Encino).....	22
8.5 Principales actividades económicas.....	23
8.6 Hidrografía	23
9 MÉTODO	25
9.1 Trabajo de gabinete	25
9.2 Trabajo de campo	25
9.3 Trabajo de laboratorio	28

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

10. RESULTADOS.....	29
11. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	46
12. CONCLUSIONES	61
13. BIBLIOGRAFÍA	64

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

1. RESUMEN

En México existe una alta demanda en el consumo de agua, por lo que es de suma importancia la depuración del agua contaminada y su reúso. El objetivo de este trabajo fue tratar las aguas residuales del Río Otlatla, a través de humedales de flujo sub-superficial para determinar si cumple con los criterios de calidad para el cultivo de trucha (*Oncorhynchus mykiss*) de acuerdo a la NOM-003-SEMARNAT-1997.

La comunidad de Sta. Cruz Otlatla, vierte sus aguas residuales sin tratamiento al Río Otlatla, las cuales llegan al centro de pesca deportiva "Arco iris", donde se utiliza para el cultivo y reproducción de trucha. Estas actividades requiere de temperaturas entre 7.2 a 17.0 °C, oxígeno disuelto mayor a 5 mg L⁻¹, pH de 6.7 a 9.0, nitrógeno menor a 110% de saturación total, nitritos menor a los 0.55 mg L⁻¹, sólidos suspendidos menor a 80 mg L⁻¹ y sólidos disueltos menor a 400 mg L⁻¹.

En el año 2009 el campamento truchero invirtió en una planta de tratamiento para mejorar la calidad del agua que recibía; posteriormente fue abandonada por el alto costo de operación y mantenimiento, El costo de energía eléctrica y productos químicos fue superior a \$15,000.00 mensuales. Una alternativa para depurar el agua residual proveniente de Sta. Cruz Otlatla y obtener la calidad para el cultivo de trucha, la presentan los humedales construidos de flujo sub-superficial, debido a su bajo costo de operación y mantenimiento, la alta remoción de contaminantes y la posibilidad de desarrollar proyectos productivos. De acuerdo a los resultados obtenidos en temporada de secas el aumento de la temperatura hizo que los procesos de biotransformación fueran más eficientes y alcanzaran porcentajes de remoción de 85% para DBO, 70% en DQO, coliformes fecales en 88% y fósforo 59%. La temperatura, pH, oxígeno, nitritos y sólidos suspendidos y disueltos fueron aptos para el cultivo de trucha (Temperaturas entre 7.2 a 17.0 °C, oxígeno disuelto mayor a 5 mg L⁻¹, pH de 6.7 a 9.0, nitrógeno menor a 110% de saturación total, nitritos menor a los 0.55 mg L⁻¹, sólidos suspendidos menor a 80 mg L⁻¹ y sólidos disueltos menor a 400 mg L⁻¹).

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

2. INTRODUCCIÓN

La disponibilidad de agua promedio anual en el mundo es de aproximadamente 1 386 millones de Km^3 , 97.5% es agua salada y 2.5% es agua dulce; de esta última, el 70% no está disponible para consumo humano porque se encuentra en los glaciares, la nieve y en el hielo (CONAGUA, 2008). En México, existe una disponibilidad natural media de agua de 474 mil 637 $\text{hm}^3/\text{año}$, ubicado en el ámbito mundial como uno de los países con disponibilidad baja (INEGI, 2006). En Puebla, el volumen de agua para el año 2010, fue de 2,469 $\text{hm}^3/\text{año}$; el sector agrícola ocupa 2,009 $\text{hm}^3/\text{año}$; el abastecimiento público 382 $\text{hm}^3/\text{año}$; la industria autoabastecida 72 $\text{hm}^3/\text{año}$ y las termoeléctricas 6 $\text{hm}^3/\text{año}$ (CONAGUA, 2010). De las aguas residuales municipales solamente se trata el 35% y el 18% de aguas residuales industriales (CONAGUA, 2010), lo cual significa que la inmensa mayoría del líquido se vierte a los ríos, lagos o mares sin ningún tratamiento, ocasionando la contaminación de estos (SEMARNAT, 2002). La contaminación más frecuente son elevadas cantidades de nitrógeno y fósforo, necesarios para la formación de proteínas, amino azúcares, nucleótidos, etc. Estos nutrimentos, junto con la temperatura y la luz son los responsables abióticos de la productividad primaria en todo el sistema acuático (De la Lanza, 1990), y están asociados a un cambio en la composición y diversidad de las especies, lo cual acelera los pasos hacia la eutrofización e incluso, la hipereutrofización (Kevern *et al.*, 1996).

El campamento recreativo y de pesca deportiva “Arco iris” se abastece de agua para el cultivo de trucha *Oncorhynchus mykiss*, del río Otlatla, donde la comunidad de Sta. Cruz Otlatla, descarga sus aguas residuales sin tratamiento. Para el cultivo de trucha se necesita agua que cumpla con ciertas características físicas, químicas y biológicas y, debido a las descargas generadas por la comunidad de Sta. Cruz Otlatla, no cumple con los criterios de calidad, ni con lo establecido en la NOM-003-SEMARNAT-1997. Una alternativa para depurar las aguas residuales provenientes de la comunidad Sta. Cruz Otlatla y así obtener agua de calidad para el cultivo de trucha, la presentan los humedales construidos de flujo sub-superficial, debido a su bajo costo de operación, mantenimiento, alta remoción de contaminantes y la posibilidad de desarrollar proyectos productivos.

3. MARCO TEÓRICO

3.1 Sectores consumidores de agua

El agua es empleada de diversas formas prácticamente en todas las actividades humanas, ya sea para subsistir o para producir e intercambiar bienes y servicios. En el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA), están registrados los volúmenes concesionados (o asignados, en el caso de volúmenes destinados al uso público urbano o doméstico) a los usuarios de aguas nacionales y se han agrupado en cinco grandes grupos; cuatro de ellos corresponden a usos consuntivos, es decir el agrícola, el abastecimiento público, la industria autoabastecida y las termoeléctricas y por último, el hidroeléctrico, que se contabiliza aparte por corresponder a un uso no consuntivo (CONAGUA, 2010).

El 63% del agua utilizada en el país para uso consuntivo proviene de fuentes superficiales (ríos, arroyos y lagos), mientras que el 37% restante proviene de fuentes subterráneas (acuíferos). Destacan los volúmenes de agua empleados en la agricultura, como el riego de cultivos, que representan el 77% del total destinado a usos consuntivos, 14% para el abastecimiento público, 5% a las termoeléctricas y 4% para la industria autoabastecida (CONAGUA, 2010).

3.2 Calidad del agua en México

Según la Secretaría del Estado del Medio Ambiente y Recursos Naturales de la República Dominicana (2001), la calidad del agua es un concepto que implica un juicio subjetivo que es en función del uso. Relación de parámetros físicos, químicos y biológicos que define su composición, grado de alteración y utilidad del cuerpo hídrico.

La calidad del agua, son términos difíciles de definir, imposibles de medir en términos absolutos y como un concepto abstracto, es muy subjetivo. El término "calidad" referido a las aguas continentales, no es un concepto absoluto ni de fácil

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

definición. Por el contrario es un concepto relativo que depende del destino final del recurso (Herbas *et al.*, 2006).

La calidad del agua está afectada por diversos factores como los usos del suelo, la producción industrial y agrícola, el tratamiento que se le da antes de ser vertida nuevamente a los cuerpos de agua y la cantidad misma de agua de los ríos y lagos, ya que de ésta depende su capacidad de purificación (SEMARNAT, 2002).

La información del Índice de Calidad del Agua (2001), estimada a partir de la Red Nacional de Monitoreo de la República Mexicana, muestra que sólo el 6% de los cuerpos monitoreados están en la categoría de excelente y el 20% se considera aceptable, la mayor proporción (51%) corresponde según al uso que se le designe:

1. Requiere tratamiento mayor para usarse como abastecimiento público.
2. Es aceptable más no recomendable para uso recreativo.
3. Puede afectar especies sensibles de vida acuática.
4. No requiere tratamiento para su uso agrícola o industrial.
5. No tiene problemas para uso con fines de navegación

El 16% de los cuerpos de agua están en la categoría de contaminados, valores con los que el líquido sólo podría tener uso industrial o agrícola con tratamiento: su empleo para otros fines sería dudoso y por último, el 6% de los cuerpos de agua monitoreados se encuentran altamente contaminados, que los vuelve prácticamente inaceptables para cualquier uso (SEMARNAT, 2002).

3.3 Contaminación del agua

La Ley de Agua Nacionales (2008) define a las aguas residuales como las aguas de composición variada provenientes de las descargas de usos público urbano, doméstico, industrial, comercial, de servicios, agrícola, pecuario, de las plantas de tratamiento y en general, de cualquier uso, así como la mezcla de ellas. De

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

acuerdo a la NOM-003-SEMARNAT-1997, la cantidad de un contaminante expresado en unidades de masa por unidad de tiempo, aportada en una descarga de aguas residuales, se le conoce como carga contaminante.

La NOM-001-SEMARNAT-1996 define a las aguas crudas como aguas residuales sin tratamiento.

Las aguas residuales tratadas son aquellas que mediante procesos individuales o combinados de tipo físicos, químicos, biológicos u otros, se han adecuado para hacerlas aptas para su reúso en servicios al público (NOM-003-SEMARNAT-1997).

En términos generales los contaminantes del agua son: microorganismos patógenos, desechos orgánicos, sustancias químicas inorgánicas, nitratos y fosfatos, compuestos orgánicos, sedimentos y materiales suspendidos, sustancias radiactivas y contaminación térmica (Echarri, 1998).

La mayoría de los cuerpos de agua superficiales del país reciben descargas de aguas residuales sin tratamiento, lo que ocasiona distintos niveles de contaminación en prácticamente todos estos cuerpos (SEMARNAT, 2002).

A nivel nacional, las cuencas más contaminadas son las de Lerma, Alto Balsas, Blanco y la de San Juan; las menos contaminadas las de los ríos Grijalva y Usumacinta (SEMARNAT, 2002).

En cuanto a las regiones hidrológicas administrativas, las que tienen mayores problemas de contaminación es el Valle de México, con un 70% de sus cuerpos de agua monitoreados altamente contaminado. Después figura la península de Baja California, con un 27%. La región del Noroeste es la que mejor presenta el agua de calidad con el 88% de sus cuerpos de agua en la categoría de aceptable. Las

demás regiones están en la categoría de poco contaminadas, centrando la mayor parte en la categoría de poco contaminados (SEMARNAT, 2002).

3.4 Principales fuentes de contaminación

Según Echarri (2007), hay un gran número de contaminantes del agua que se pueden clasificar de muy diferentes maneras. Una posibilidad bastante usada es clasificarlos en los siguientes ocho grupos:

1. Microorganismos patógenos. Son los diferentes tipos de bacterias, virus, protozoos y otros organismos que transmiten enfermedades como el cólera, la tifoidea, diversas gastroenteritis, hepatitis, etc. En los países en vías de desarrollo las enfermedades producidas por estos patógenos son uno de los motivos más importantes de muerte prematura, sobre todo de niños.

Normalmente estos microorganismos llegan al agua en las heces y otros restos orgánicos que producen las personas infectadas. Por esto, un buen índice para medir la calidad sanitaria de las aguas, en lo que se refiere a estos microorganismos, es el número de bacterias coliformes presentes en el agua. La OMS (Organización Mundial de la Salud) recomienda que en el agua para beber haya cero colonias de coliformes por 100 ml de agua.

2. Desechos orgánicos. Son el conjunto de residuos orgánicos producidos por los seres humanos, ganado, etc. Incluyen heces y otros materiales que pueden ser descompuestos por bacterias aeróbicas, es decir en procesos con consumo de oxígeno. Cuando este tipo de desechos se encuentran en exceso, la proliferación de bacterias agota el oxígeno y ya no pueden vivir en estas aguas peces y otros seres vivos que necesitan oxígeno. Buenos índices para medir la contaminación por desechos orgánicos son la cantidad de oxígeno disuelto en agua, o la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO_5).

3. Sustancias químicas inorgánicas. En este grupo están incluidos ácidos, sales y metales tóxicos como el mercurio y el plomo. Si están en cantidades altas pueden causar graves daños a los seres vivos, disminuir los rendimientos agrícolas y corroer los equipos que se usan para trabajar con el agua.

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

4. Nutrientes vegetales inorgánicos. Nitratos y fosfatos son sustancias solubles en agua que las plantas necesitan para su desarrollo, pero si se encuentran en cantidad excesiva inducen el crecimiento desmedido de algas y otros organismos provocando la eutrofización de las aguas. Cuando estas algas y otros vegetales mueren, al ser descompuestos por los microorganismos, se agota el oxígeno y se hace imposible la vida de otros seres vivos. El resultado es un agua con mal olor e inutilizable.

5. Compuestos orgánicos. Muchas moléculas orgánicas como petróleo, gasolina, plásticos, plaguicidas, disolventes, detergentes, etc. acaban en el agua y permanecen en algunos casos, largos períodos de tiempo porque, al ser productos fabricados por el hombre, tienen estructuras moleculares complejas difíciles de degradar por los microorganismos.

6. Sedimentos y materiales suspendidos. Muchas partículas arrancadas del suelo y arrastradas a las aguas, junto con otros materiales que hay en suspensión son, en términos de masa total, la mayor fuente de contaminación del agua. La turbidez que provocan en el agua dificulta la vida de algunos organismos y los sedimentos que se van acumulando destruyen sitios de alimentación o desove de los peces, rellenan lagos o pantanos y obstruyen canales, ríos y puertos.

7. Sustancias radiactivas. Isótopos radiactivos solubles pueden estar presentes en el agua y a veces, se pueden ir acumulando a lo largo de las cadenas tróficas, alcanzando concentraciones considerablemente más altas en algunos tejidos vivos que las que tenían en el agua.

8. Contaminación térmica. El agua caliente liberada por centrales de energía o procesos industriales, eleva en ocasiones, la temperatura de ríos o embalses con lo que disminuye su capacidad de contener oxígeno y afecta a la vida de los organismos.

3.5 Tratamiento de las aguas residuales en México y en Puebla

Las descargas de aguas residuales se clasifican en municipales e industriales. Las primeras corresponden a las que son manejadas en los sistemas de alcantarillado municipales urbanos y rurales, en tanto que las segundas son aquellas

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

descargadas directamente a los cuerpos receptores de propiedad nacional, como es el caso de la industria autoabastecida (CONAGUA, 2010).

En el año 2008, las 1,833 plantas de tratamiento de aguas residuales municipales en operación en el país, trataron $83.6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, es decir el 40% de los $208 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ recolectados en los sistemas de alcantarillado. La industria cuenta con 2,082 plantas en operación a nivel nacional y tratan $33.8 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ de aguas residuales, esto significa que solo se trata el 18% de las aguas industriales. En Puebla existen 69 plantas de tratamiento de aguas residuales municipales en operación, con una capacidad instalada de $302 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ con un caudal tratado $2.42 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Para el tratamiento de las aguas residuales industriales, existen en operación 96 plantas de tratamiento con capacidad instalada de $2.874 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ y caudal tratado $2.624 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (CONAGUA, 2010).

3.6 Tratamiento de aguas residuales con humedales construidos

3.61 Antecedentes

La investigación científica y sistemática amplió el horizonte de aplicaciones de humedales como sistemas de control de contaminación. Esta investigación en particular se inició alrededor de los años cincuenta con el trabajo de Seidel y posteriormente de Kickuth que crearon el concepto de "rhizosphere". Sin embargo, los resultados obtenidos por estos sistemas no fueron del todo satisfactorios pero marcaron el inicio en el desarrollo y en la investigación de esta tecnología. El primer humedal construido específicamente para tratar aguas residuales entró en operación en 1974 en Othofresen (Vymasal *et al.*, 1998). A partir de esa fecha, el desarrollo ha sido acelerado y efectivo y ha llevado a la construcción de estos sistemas, tanto en el Norte de América como en Europa. Según Kadlec y Knight (1996) existen más de 200 de estos sistemas en operación en Norte América y más de 500 de estos sistemas en operación en Europa.

En México, la UNAM a través de la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza con Belmont y Cantellano (2004), Cantellano *et al.* (2008), Eugenio y Gallardo (2009),

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

De la Orta y Muñoz (2011), López (2011), Santos y Hortiales (2011), han desarrollado investigación de esta tecnología principalmente en humedales de flujo sub-superficial. Los desarrollos están ubicados en Ixmiquilpan, Hidalgo; Apaxtla de Castejón, Tetipac y Coyuca de Benítez, Guerrero; Sta. Rita Tlahuapan, Puebla.

Además el Instituto Mexicano de la Tecnología del Agua, ha desarrollado proyectos de humedales a través de Seoánez y Gutiérrez (1999), Miceli (1999) y (2008), Calvo y Gutiérrez (1999), López, Marañón (2003), Rivas y Pozo (2005), Trejo (2008), Martínez (2008), Miranda, Gómez, Gavito y López (2010), estos desarrollos se encuentran ubicados en cuatro municipios de la cuenca del lago Pátzcuaro, Michoacán; Santa Fe de la Laguna, Michoacán; Mapastepec, Escuintla y Yajalón (Chiapas).

3.62 Humedales construidos

Los humedales son medios semi-terrestres con un elevado grado de humedad y una profusa vegetación, que reúnen ciertas características biológicas, físicas y químicas, que les confieren un elevado potencial auto-depurador. El progreso del conocimiento científico de los humedales ha puesto en evidencia unos bienes y servicios más sutiles y han sido descritos a la vez como los “riñones del medio natural”, a causa de las funciones que pueden desempeñar en los ciclos hidrológicos y químicos y como supermercados biológicos, en razón de las extensas redes alimentarias y la diversidad biológica (Llagas y Guadalupe, 2006).

Los componentes de un humedal construido son las plantas, el sustrato y la población microbiana. Las plantas pueden ser de diferentes especies y hábitos de enraizamiento y entre sus principales funciones se encuentra la absorción de nutrimentos; la relación simbiótica que se establece con los microorganismos, el suministro de oxígeno y la filtración de partículas (Brix *et al.*, 2001). El sustrato es el soporte para las plantas y un medio de fijación para los microorganismos en el sistema y funciona como conductor hidráulico (Faulkner y Richardson, 1989). Por su parte, los microorganismos son la parte fundamental del funcionamiento de los

humedales construidos, ya que de ellos depende la eficiencia en la remoción de los contaminantes: contribuyen a la degradación de la materia orgánica y a la transformación de compuestos nitrogenados y de fósforo contenidos en las aguas residuales, a compuestos más simples (Romero *et al.*, 2009).

Los humedales proveen sumideros efectivos de nutrientes y sitios amortiguadores para contaminantes orgánicos e inorgánicos. Esta capacidad es el mecanismo detrás de los humedales artificiales para simular un humedal natural con el propósito de tratar las aguas residuales. Los humedales logran el tratamiento de las aguas residuales a través de la sedimentación, absorción y metabolismo bacteriano. Además de tener una interacción con la atmósfera (Llagas y Guadalupe, 2006).

Los humedales construidos son sistemas de depuración constituidos por lagunas o canales poco profundos (< 1 m), plantados con vegetales propios de las zonas húmedas y en los que, los procesos de descontaminación tienen lugar mediante las interacciones entre el agua, el sustrato sólido, los microorganismos, la vegetación e incluso la fauna. Los humedales construidos también se denominan “humedales artificiales” (García y Corzo, 2008).

3.63 Humedales de Flujo Sub-superficial

Según García y Corzo (2008), en los sistemas de flujo superficial el agua está expuesta directamente a la atmósfera y circula preferentemente a través de los tallos y hojas de las plantas. Estos tipos de humedales se pueden entender como una modificación del lagunajo natural con una profundidad de la lámina de agua entre 0.3 y 0.4 m y con plantas. Se suelen aplicar para mejorar la calidad de efluentes que ya han sido previamente tratados en una depuradora. La circulación del agua es de tipo subterráneo a través de un medio granular y en contacto con las raíces y rizomas de las plantas. La profundidad de la lámina de agua suele ser entre 0.3 y 0.9 m. La biopelícula que crece adherida al medio granular, a las raíces y rizomas de las plantas tiene un papel fundamental en los procesos de descontaminación del agua.

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

Las principales diferencias de los sistemas de flujo sub-superficial respecto a los superficiales son: mayor capacidad de tratamiento (admiten mayor carga orgánica), bajo riesgo de contacto del agua con las personas y de aparición de insectos y menor utilidad para proyectos de restauración ambiental debido a la falta de lámina de agua accesible (García y Corzo, 2008).

Son los sistemas más utilizados en Europa y tienen su origen en la investigación de Seidel (1967) y Kickuth (1977). El diseño de estos sistemas por lo general consiste en una cama, ya sea de tierra o arena y grava, plantada con macrófitas acuáticas, en la mayoría de los casos con la caña común o carrizo (*Phragmites australis*). Toda la cama es recubierta por una membrana impermeable para evitar filtraciones en el suelo (Kolb, 1998).

Las especies utilizadas son macrófitos emergentes típicos de las zonas húmedas como el carrizo (*Phragmites sp*), la espadaña (*Typha sp*) o los juncos (*Scirpus sp*). Todas estas plantas presentan adaptaciones especiales para vivir en ambientes permanentemente anegados. Sus tejidos internos disponen de espacios vacíos que permiten el flujo de gases desde las partes aéreas hasta las subterráneas. Sus rizomas tienen una gran capacidad colonizadora. Las raíces y rizomas proporcionan una superficie adecuada para el crecimiento de la biopelícula. La biopelícula crece adherida a las partes subterráneas de las plantas y sobre el medio granular. Alrededor de las raíces se crean microambientes aeróbicos donde tienen lugar procesos microbianos que usan el oxígeno, como la degradación aeróbica de la materia orgánica y la nitrificación (García y Corzo, 2008).

La selección de la vegetación que se va a usar en un sistema de humedales debe tener en cuenta las características de la región donde se realizará el proyecto, así como las siguientes recomendaciones:

1. Las especies deben ser colonizadoras activas, con eficaz extensión del sistema de rizomas.

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

2. Deben ser especies que alcancen una biomasa considerable por unidad de superficie para conseguir la máxima asimilación de nutrientes.
3. La biomasa subterránea debe poseer una gran superficie específica para potenciar el crecimiento de la biopelícula.
4. Deben disponer de un sistema eficaz de transporte de oxígeno hacia las partes subterráneas para promover la degradación aeróbica y la nitrificación.
5. Se debe tratar de especies que puedan crecer fácilmente en las condiciones ambientales del sistema proyectado.
6. Debe tratarse de especies con una elevada productividad.
7. Las especies deben tolerar los contaminantes presentes en las aguas residuales.
8. Se deben utilizar especies propias de la flora local (García y Corzo, 2008).

Es muy importante lograr una distribución del agua uniforme en toda el área del sistema. Para la distribución, redes de tuberías dispuestas sobre la superficie, ya sea en forma radial o a lo largo del lecho. Debido al flujo discontinuo, en climas fríos se suelen colocar enterradas en el lecho entre 0.05 y 0.1 m por debajo de la superficie con el fin de evitar la congelación. La recogida del agua se realiza mediante redes de tuberías perforadas situadas sobre el fondo del lecho y a lo largo del mismo (García y Corzo, 2008).

El agua ingresa en forma permanente. Es aplicada en la parte superior de un extremo y recogida por un tubo de drenaje en la parte opuesta inferior. El agua residual se trata a medida que fluye lateralmente a través de un medio poroso (flujo pistón). La profundidad del lecho varía entre 0,45 m a 1 m y tiene una pendiente de entre 0,5 % a 1 % (Delgadillo *et al.*, 2010).

En el medio granular ocurren múltiples procesos como la retención y sedimentación de la materia en suspensión, la degradación de la materia orgánica, la transformación y asimilación de los nutrientes y la inactivación de los microorganismos patógenos. El conjunto medio granular/biopelícula/plantas debe

ser considerado como el principal constituyente de los humedales (García y Corzo, 2008).

3.7 Requerimientos del medio ambiente de la trucha (*Oncorhynchus mykiss*)

El elemento principal para la piscicultura es el agua, ya que constituye el medio en el cual se desarrollan los peces. Para el desarrollo de la trucha la cantidad de agua ocupa un lugar primordial, requiere de abundante agua, en renovación continua para asegurar un contenido de oxígeno disuelto suficiente. La necesidad de oxígeno disuelto en las truchas, es casi el doble que las demás especies de agua dulce (Delegación Federal de Pesca, 1994). La trucha *Oncorhynchus mykiss* es una especie de agua dulce (aunque puede ser adaptada a agua salada) y que vive, en condiciones naturales, en ríos de aguas frescas y de buena calidad (Camacho *et al.*, 2000). A continuación se ofrece en la Tabla 1 las exigencias mínimas de calidad referidas a diferentes parámetros físico-químicos.

Tabla 1. Requerimientos del agua para cultivo de trucha. (Camacho *et al.*, 2000).

PARÁMETRO	CALIDAD DE EL AGUA
Temperatura	De 7.2 a 17.0 °C para crecimiento De 7.2 a 12.8 °C para reproducción e incubación.
Oxígeno disuelto	Mayor a 5 mg L ⁻¹
pH	6.5 a 9.0
Dióxido de carbono	Menor a 2 mg L ⁻¹
Calcio	Mayor a 52 mg L ⁻¹
Zinc	Menor a 0.04 mg L ⁻¹ a pH de 7.6
Amonio	Menor a 0.012 mg L ⁻¹ como NH ₃
Nitrito	Menor a 0.55 mg L ⁻¹
Nitrógeno	Menor a 110 % de saturación total
Sólidos suspendidos	Menor a 80 mg L ⁻¹
Sólidos disueltos	Menor a 400 mg L ⁻¹
Ácido sulfhídrico	Menor a 0.002 mg L ⁻¹

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

A la vista de estos datos, está claro que las condiciones de cultivo deben ser mantenidas en unos valores muy próximos a los mismos (Camacho *et al.*, 2000).

Según (Aquino, 2007), la calidad del agua es fundamental en un criadero de truchas, pues es el medio donde los peces se desarrollaran, así que conocer y mantener los parámetros del agua como: temperatura, oxígeno, pH y amonio es de suma importancia para que el criadero tenga una buena producción acuícola y que las truchas cosechadas, sean de las características deseadas; los puntos más importantes son:

1. El cultivo de la trucha *Oncorhynchus mykiss* es una de las prácticas que demandan de mayor cantidad de oxígeno disuelto en el agua. Dentro de la truticultura (cultivo de trucha) se estima que los peces en crecimiento deben de tener continuamente tasas mínimas de oxígeno de 5 a 5.5 mg L⁻¹, mientras que los huevos y alevines son más exigentes, demandando de 6 a 7 mg L⁻¹; con cifras muy inferiores a las mencionadas, las truchas presentan dificultades para extraer el oxígeno del agua y transportarlo a través de sus branquias.
2. Los valores de pH (potencial de hidrógeno), es de gran importancia al igual que la temperatura y el oxígeno, esto debido a que si los valores en el pH del agua son demasiado bajos o elevados, causarán estrés en las truchas.
3. La composición química de las aguas de un criadero de truchas se puede ver afectada por el metabolismo de los mismos peces que en ellos habitan o por la degradación de la materia orgánica presente en el agua. De especial importancia es el contenido de amoniaco, pues su toxicidad y efectos sobre el organismo varían con el pH y la temperatura del agua. Los efectos tóxicos son debidos esencialmente a la forma no ionizada del amoniaco, que es perjudicial para los peces. El pH, la temperatura y la salinidad del agua determinan la toxicidad del amoniaco no ionizado, el pH es el más importante, cuando el pH aumenta una unidad causa que se incremente 10 veces la producción de amonio tóxico
4. Las sustancias amoniacales son producto de la excreción de los peces, es importante considerar la carga de peces que se tendrán por estanque, puesto que

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

una alta concentración de truchas puede traer consecuencias negativas en los niveles de amonio bajos o elevados y esta causará estrés en las truchas.

5. Las partículas en suspensión son generalmente arrastradas desde el suelo o de la vegetación adyacente, así como de organismos planctónicos, que pueden generar una disminución en la absorción de oxígeno por parte de las truchas, puesto que sus branquias se ven afectadas, en el caso de los alevines, los problemas branquiales son más notorios y pueden dar origen a infecciones, cuando las branquias de los pequeños peces son expuestas al contacto con las partículas suspendidas, se irritan fácilmente ya que se dificulta el paso del oxígeno a través de ellas. Las partículas en suspensión causan reducción en la tasa de crecimiento de las truchas

6. El nivel de contaminación por bacterias en la trucha dependerá del medio ambiente y de la calidad del agua en la cual los peces son cultivados. Entre los factores más importantes que afectan el contenido de bacterias patógenas, están la temperatura y salinidad del agua, la proximidad de la granja acuícola a las áreas de asentamientos humanos, la cantidad y calidad del alimento consumido por los peces y los métodos de cosecha. Ejemplos de bacterias que pueden representar un peligro a la salud humana son *Aeromonas hydrophyla*, *Vibrio parahaemolyticus*, *Vibrio vulnificus*, *Listeria monocytogenes*, *Streptococcus initiae*, *Erysipelothrix rhusiopathiae*, *Leptospira interrogans*, *Yersinia enterocolitica*, *Pseudomonas ssp.*, *Mycobacterium sp.*, las cuales se encuentran normalmente en el medio acuático. Existen otras bacterias que son potencialmente patógenas y que se introducen debido a la contaminación del medioambiente a través de los desechos domésticos o industriales, éstas son *Salmonella spp.*, *Shigella spp.*, *Escherichia coli* y *Vibrio cholerae* (SENASICA, 2003).

Los peligros químicos en el cultivo de trucha son los que representan los plaguicidas, otros químicos industriales y de origen natural y los productos utilizados como medicamentos veterinarios. Estos contaminantes llegan a acumularse en los peces a niveles mayores a los permisibles que pueden causar daño a la salud humana. Generalmente, este peligro se asocia con la exposición

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

prolongada a esos contaminantes. Para la trucha producida por acuicultura, hasta la fecha se han identificado dos tipos de peligros químicos relacionados con la especie provenientes de la contaminación por algunos productos químicos como los plaguicidas ó los metales pesados (US-FDA, 2001).

4. PROBLEMÁTICA

El campamento recreativo “Arco Iris” se encuentra en una cañada boscosa, ofrece servicios de pesca deportiva de trucha, donde además de cultivarla, se encargan de su reproducción y crecimiento; actividades que requieren agua con temperaturas entre 7.2 a 17.0 °C, oxígeno disuelto mayor a 5 mg L⁻¹, pH de 6.7 a 9.0, nitrógeno menor a 110% de saturación total, nitritos menor a los 0.55 mg L⁻¹, sólidos suspendidos menor a 80 mg L⁻¹ y sólidos disueltos menor a 400 mg L⁻¹ (Camacho *et al.*, 2000). La única fuente de abastecimiento es el Río Otlatla, que lleva en su cauce aguas residuales crudas de la comunidad de Sta. Cruz Otlatla, por lo que es necesario su tratamiento para que cumpla con los límites señalados antes de ingresar a los estanques de cultivo del campamento recreativo.

5. JUSTIFICACIÓN

La calidad del agua que recibe el centro de pesca Arco iris, no es apta para las actividades de reproducción y cultivo de trucha *Oncorhynchus mykiss*; en una acción por revertir esa mala calidad de agua recibida al campamento, se invirtió en una planta de tratamiento que además de ser costosa en su infraestructura, el mantenimiento de la misma, tan sólo en costos de energía eléctrica reportados por el campamento, fue superior a los \$15,000.00 mensuales por el gasto de electricidad y productos químicos, haciendo que se abandonara el proyecto, ya que su operación era muy costosa; aunado a ello la permanente generación de lodos residuales, hizo necesario la búsqueda de alternativas para tratar el agua residual que se ocupa en el cultivo y reproducción de trucha. Esta alternativa la representan los humedales construidos de flujo sub-superficial, debido a su bajo costo de operación, mantenimiento, alta remoción de contaminantes y la posibilidad de desarrollar proyectos productivos.

6. HIPÓTESIS

El agua del Río Otlatla presenta una alta carga contaminante y no es apta para el cultivo de trucha, se espera, que después de recibir tratamiento en un sistema de humedales de flujo sub-superficial se reduzcan los niveles de nutrientes y material en suspensión, siendo posible su uso para el cultivo de la trucha (*Oncorhynchus mykiss*).

7. OBJETIVOS

7.1 Objetivo general

Tratar las aguas residuales que provienen del Río Otlatla, a través de humedales de flujo sub-superficial y determinar si el agua tratada cumple con los criterios de calidad para el cultivo de trucha (*Oncorhynchus mykiss*) y el reúso establecido en la NOM-003-SEMARNAT-1997.

7.2 Objetivos particulares

- Caracterizar la calidad del agua residual del Río Otlatla, a través de pH, temperatura, sustancias activas al azul de metileno (SAAM), nitrógeno amoniacal, nitrógeno orgánico, nitratos, nitritos, coliformes totales y fecales, sólidos suspendidos, sólidos volátiles, sólidos disueltos, sólidos totales, fósforo total y fósforo ortosoluble, empleando las normas oficiales mexicanas.
- Evaluar la calidad física, química y bacteriológica del efluente de los humedales y determinar si cumple con los Límites Máximos Permisibles para reúso de aguas residuales en reproducción y cultivo de trucha, empleando la NOM-003-SEMARNAT-1997 y los requerimientos de agua para el cultivo de trucha.

8. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

8.1 Santa Cruz Otlatla y Campamento de Pesca deportiva Arco iris.

La localidad de Santa Cruz Otlatla está situada en el Municipio de Tlahuapan (en el Estado de Puebla). (Figura 1). Tiene 1142 habitantes y situada a 2,860 metros de altitud (SEDESOL, 2008). Está ubicado a $19^{\circ}22'18.08''$ LN y $98^{\circ}37'26.94''$ LO. El campamento de pesca deportiva, se encuentra ubicado a $19^{\circ}21'17.23''$ LN y $98^{\circ}36'35.15''$ LO.

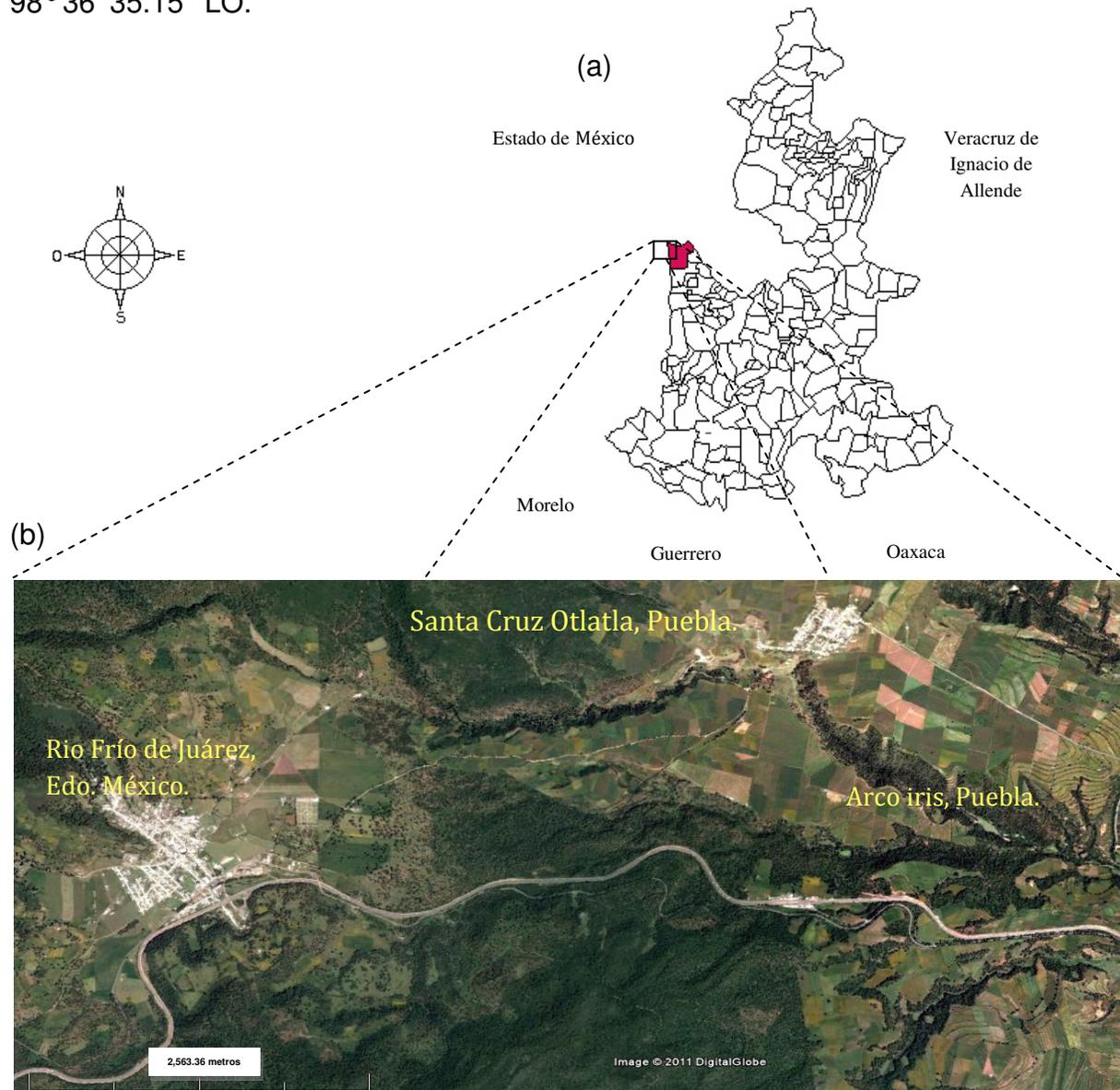


Figura 1. (a) Muestra el estado de Puebla y en rojo el municipio de Tlahuapan. (Fuente INEGI. Marco Geoestadístico Municipal. Escala: 1:1,500,000. (b) Imagen satelital de las comunidades cercanas a Arco iris, Puebla. DigitalGlobe, 2011)

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

En esta comunidad (Santa Cruz Otlatla) hay un total de 233 viviendas, de las cuales 49 tienen piso de tierra y unas 27 consisten de una sola habitación; 216 de todas las viviendas tienen instalaciones sanitarias, 226 son conectadas al servicio público (INAFED, 2009), donde las aguas residuales son vertidas al Río Otlatla sin tratamiento. Por esta razón, el campamento truchero recibe aguas residuales de la comunidad, provocando que ésta sea de mala calidad para el cultivo de trucha.

8.2 Clima

De acuerdo a García (1998), el clima es semifrío subhúmedo con verano fresco largo (Cb), temperatura media anual de 5°C a 12°C, temperatura del mes más frío 3°C a 18°C, temperatura del mes más caliente 22°C. Precipitación del mes más seco de 40 mm; lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal del 5 al 10.2% del total anual (CONAFOR, 2010). (Figura 2).

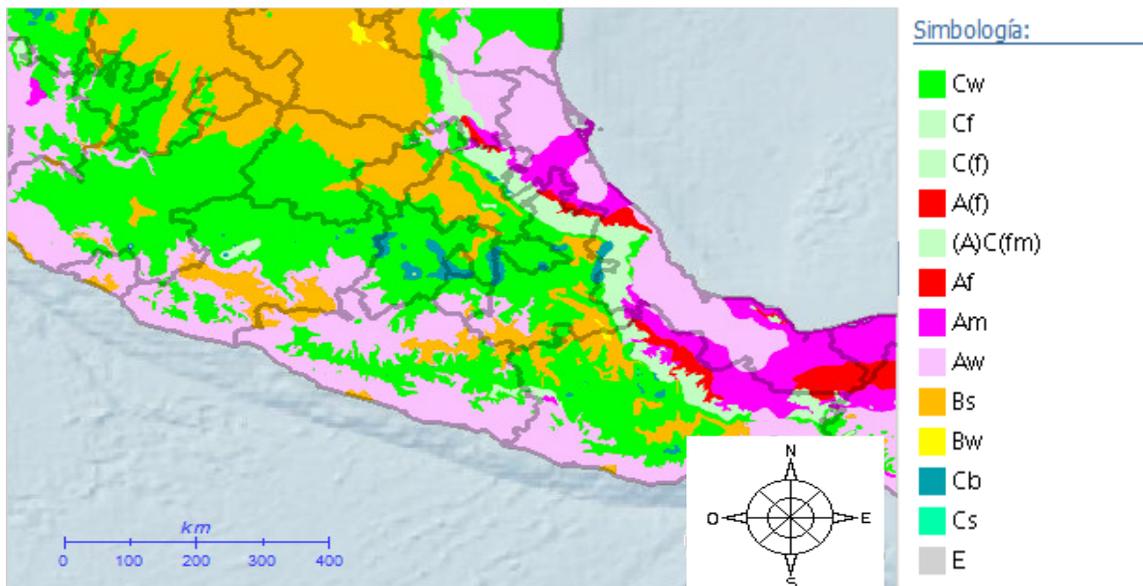


Figura 2. Climas registrados para el estado de Puebla y sus alrededores. (Fuente: García – Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. (CONABIO), 1998. Escala 1:8,000,000)

8.3 Tipo de vegetación

Su vegetación se caracteriza por ser una comunidad de bosque ampliamente distribuida que ocupa la mayor parte de la superficie forestal de las porciones superiores de los sistemas montañosos del país, la cual está compartida por las

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

diferentes especies de pino (*Pinus* spp.) y encino (*Quercus* spp.); dependiendo del dominio de uno y otro, se le denomina “pino-encino” si predominan las coníferas, y es llamado “encino-pino” cuando dominan los encinares. La transición del bosque de encino al de pino está determinada (en condiciones naturales) por el gradiente altitudinal. Estas mezclas son frecuentes y ocupan muchas condiciones de distribución (CONAFOR, 2010). (Figura 3).

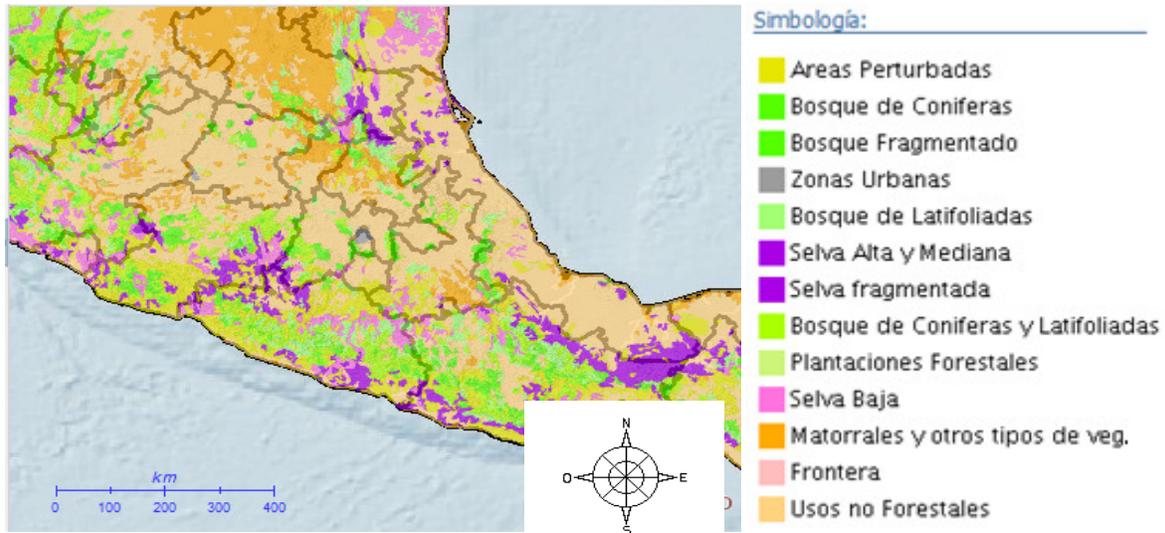


Figura 3. Tipos de vegetación presentes en los estados aledaños a Puebla. (Fuente: Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH), 1992. Escala 1:8,000,000)

8.4 Bosque de Coníferas y Latifoliadas (Pino-Encino)

Algunas de las especies más comunes en la zona de estudio son pino chino *Pinus leiophylla*, *Pinus hartwegii*, *P. montezumae* (ocote blanco), *P. pseudostrobus* (pino lacio), *P. rudis*, *P. michoacana* (pino escobetón), *P. teocote* (pino chino), *P. oocarpa* (ocote trompillo), *P. ayacahuite* (pino ayacahuite), *P. pringlei*, *P. duranguensis*, *P. chihuahuana*, *P. engelmani*, *P. lawsoni*, *P. oaxacana*, *Quercus laurina* (encino laurelillo), *Q. magnoliifolia*, *Q. candicans* (encino blanco), *Q. crassifolia* (roble), *Q. rugosa* (encino quebracho), *Q. crassipes* (encino tesmilillo), *Q. urbanii* (encino cucharo), *Q. microphylla* (charrasquillo), *Q. castanea* (encino colorado), *Q. laeta* (encino prieto), *Q. mexicana* (laurelillo), *Q. glaucoides*, y *Q. scytophylla* (CONAFOR, 2010). (Figura 3).

8.5 Principales actividades económicas

La actividad económica preponderante es la agropecuaria, siendo los principales cultivos, el maíz y el frijol además se crían aves de corral. Su distancia aproximada a la cabecera municipal es de 15 kilómetros (INAFED, 2009).

8.6 Hidrografía

La localidad de Sta. Cruz Otlatla pertenece a la cuenca del río Atoyac, una de las cuencas más importantes del Estado, que tiene su nacimiento cerca del límite de los Estados de México y Puebla, en la vertiente oriental de la Sierra Nevada; por su ubicación se localiza en la parte occidental de la cuenca alta del Atoyac (INAFED, 2009).

Los ríos que atraviesan el municipio de Tlahuapan generalmente de oeste a este son formadores o afluentes del Atoyac, destacando los siguientes: Las Rositas, Río Grande, Chautonco y Ayotla además de gran cantidad de arroyos intermitentes y ríos; uno de ellos el Río Otlatla (INAFED, 2009), donde se estima que el manantial que nace dentro de la comunidad de Santa Cruz Otlatla, aporta un volumen de 500,000 m³/año (Meza, 2011). El campamento Arco liris, para realizar las actividades de pesca deportiva, cuenta con un sistema lentic (Figura 4).



Figura 4. Imagen satelital del sitio de trabajo Lago Arco iris. (Fuente: DigitalGlobe, 2011)

El sistema acuático lenticó tiene las siguientes características:

Ancho máximo: 65,5 m

Longitud máxima: 213,13 m

Área: 6980 m²

Perímetro: 482 m

pH: 9.8

Temperatura máxima: 16 °C

Temperatura mínima: 13 °C

NH₄: 0.27 mg L⁻¹

NH₃: 0.24 mg L⁻¹

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

9. MÉTODO

El trabajo se dividió en tres etapas: gabinete, campo y laboratorio.

9.1 Trabajo de gabinete

La búsqueda de información se realizó a partir de bases de datos, consulta y análisis de instrumentos ambientales relacionados con el proyecto (leyes, reglamentos, normas oficiales mexicanas e internacionales, etc.) manuales de procedimientos, artículos científicos, consulta y procesamiento de cartografía digital, como la base de datos del INEGI para la descripción de la zona de estudio.

9.2 Trabajo de campo

Se recolectaron muestras simples, de acuerdo a la NOM-AA-3 (Aguas residuales-Muestreo) y la NOM-AA-14 (Cuerpos receptores-Muestreo), durante nueve salidas distribuidas en 14 meses de trabajo.

Se establecieron dos sitios de muestreo: sitio 1 canal de ingreso (agua del río Otlatla). Sitio 2 efluente (agua residual tratada en el sistema de humedales).

La determinación de los parámetros de campo se realizó de acuerdo a los siguientes métodos:

PARÁMETRO	MÉTODO	NORMA
Oxígeno disuelto	Alstelberg azida	APHA, AWWA, WPCF, 1992
pH	Potenciométrico	NOM-AA-008-SCFI-2000
Temperatura	Termómetro de inmersión	NOM-AA-007-SCFI-2000

Para el resto de los parámetros que se determinaron en el laboratorio se recolectaron las muestras y fueron conservadas de acuerdo a las siguientes especificaciones:

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

CONDICIONES DE MUESTREO Y CONSERVACIÓN DE PARÁMETROS DE LABORATORIO

MUESTREO	RECIPIENTE	CONSERVADOR	DÍAS DE CONSERVACIÓN
DBO	Botella Winkler	Sin conservador	De 5 a 7 días
DQO	Polietileno	Mantener en refrigeración	De 6 horas a 14 días máximos
Nitrógeno amoniacal y orgánico	Polietileno o vidrio	Añadir H ₂ SO ₄ hasta obtener un pH≤2 y refrigerar	Se recomienda de 7 a 28 días máximos
Fósforo total y Ortosoluble	Polietileno	Filtrar inmediatamente y refrigerar	48 días máximos
Coliformes	Vidrio ámbar esmerilado	Añadir H ₂ SO ₄ hasta pH≤2 y refrigerar	de 7 a 28 días máximos
Sólidos	Polietileno o vidrio	Mantener en refrigeración	De 2 a 7 días máximo
Nitratos y Nitritos	Polietileno o vidrio	Añadir H ₂ SO ₄ hasta pH≤2 y refrigerar	28 días
SAAM	Polietileno	Añadir H ₂ SO ₄ hasta pH≤2 y refrigerar	De 2 a 7 días máximo

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

9.3 Trabajo de laboratorio

Se determinaron: DBO₅, DQO, nitrógeno orgánico, nitrógeno amoniacal, nitratos, nitritos, SAAM, fósforo total y ortosoluble, coliformes totales y fecales, sólidos totales, sólidos suspendidos totales, sólidos volátiles totales y sólidos disueltos totales, de acuerdo con las siguientes Normas.

DETERMINACIÓN	MÉTODO	NORMA
Nitrógeno amoniacal (N-NH ₃ ⁺) y nitrógeno orgánico (N-Org).	Kjendahl	NOM-AA-026-SCFI-2001
Nitritos (NO ₂).	Ácido sulfanilico	NOM-AA-099-SCFI-2006
Nitratos (NO ₃).	Ácido fenoldisulfónico	NOM-AA-079-SCFI-2001
Número más probable de Coliformes totales y fecales.	Tubos múltiples	NMX-AA-042-SCFI-2005
Demanda Bioquímica de Oxígeno después de n días (DBO _n).	Dilución	UNE-EN 1899-1
Demanda Química de Oxígeno (DQO).	Reflujo cerrado, colorimétrico	APHA, AWWA, WPCF, 1992
Sólidos (ST, SS, SD, SSF, SSV, SDF, SDV).	Gravimétrico	NOM-AA-004-SCFI-2000
Sustancias activas al azul de metileno (SAAM).	Colorimétrico de azul de metileno	NOM-AA-039-SCFI-2001
Fósforo Total.	Fosfovanadatolibdato	NOM-AA-029-SCFI-2001

10. RESULTADOS

De acuerdo a los muestreos que se realizaron a partir de marzo del 2010 a mayo del 2011, se obtuvieron los siguientes resultados.

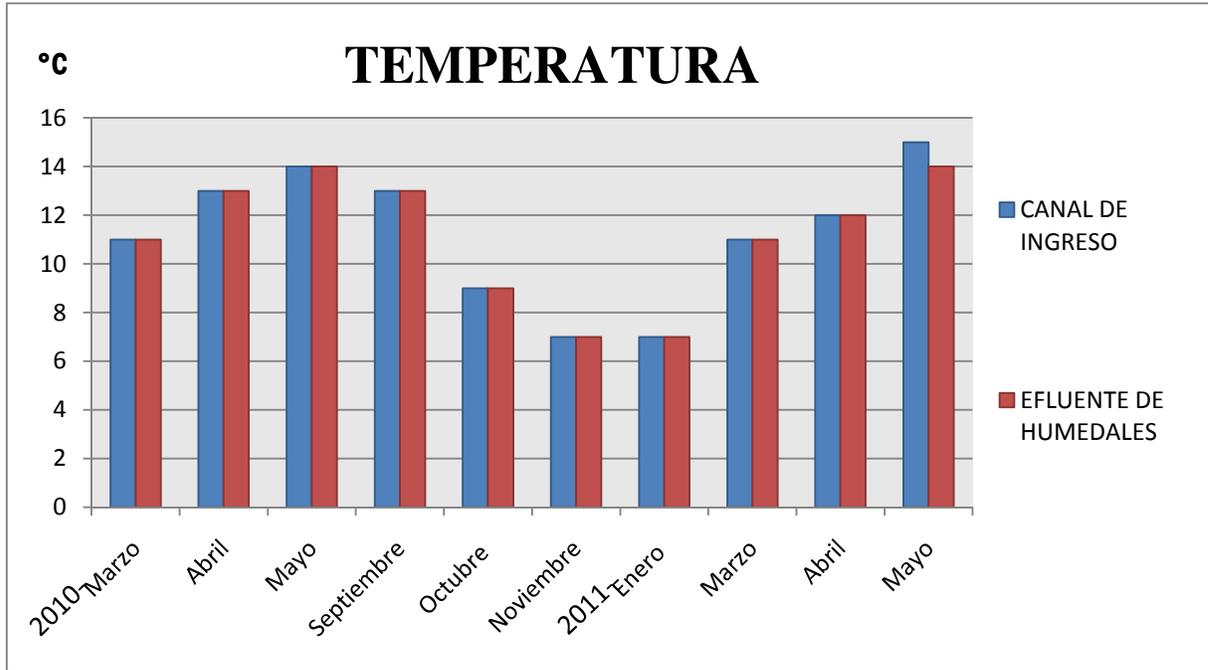


Figura 6

En la temporada seca la temperatura máxima del agua del canal de ingreso alcanzó 15°C y una mínima de 7°C y se observó el mismo comportamiento para el efluente tratado. En la temporada de lluvia tanto el canal de ingreso como el efluente tratado registraron una temperatura máxima de 14°C y una mínima de 7°C, excepto en el mes de mayo se incrementó un grado más (15°C).

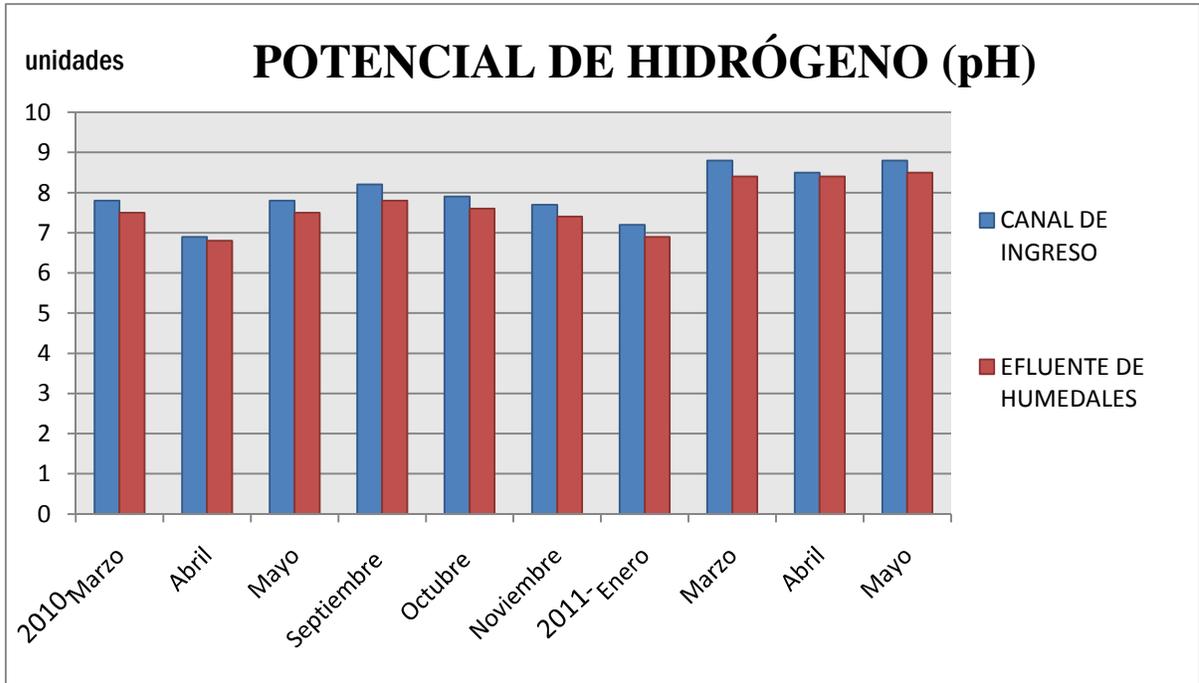


Figura 7

De acuerdo a los resultados en la temporada seca el agua residual del canal de ingreso alcanzó el valor máximo de 8.8 y un valor mínimo de 7.2, en tanto que en la época de lluvias el valor máximo registrado fue de 8.8 y el mínimo de 6.8 unidades de pH.

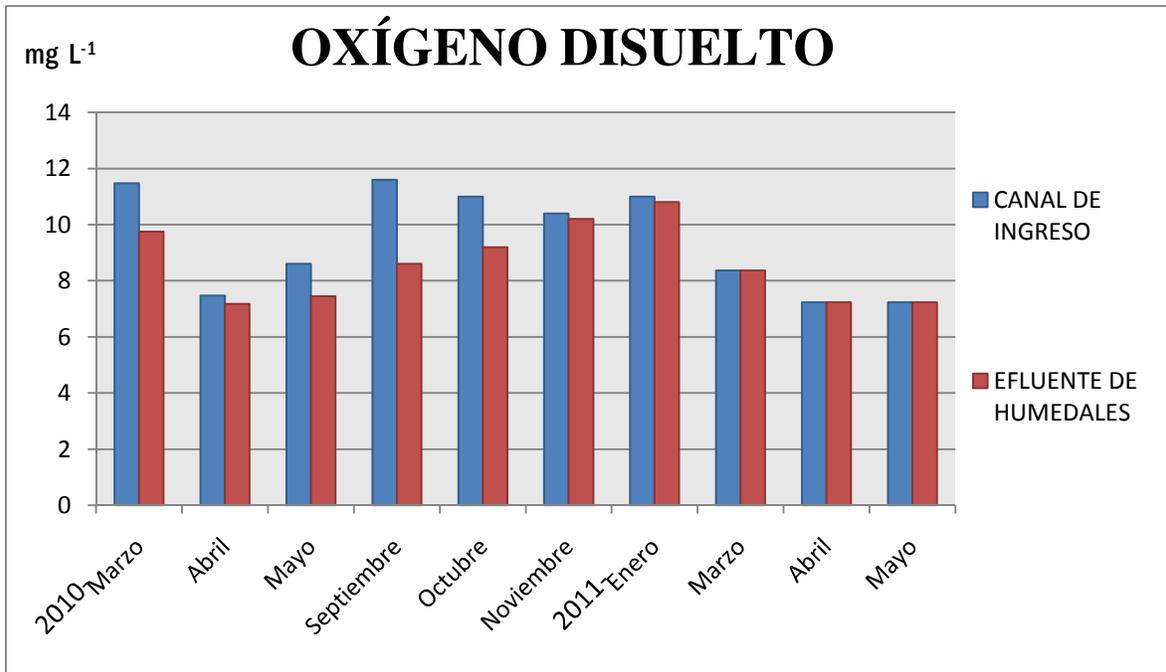


Figura 8

La concentración máxima registrada en el agua residual en el canal de ingreso fue de 11.47 mg L⁻¹ y la mínima de 7.23 mg L⁻¹. El agua tratada en el sistema registró una concentración máxima de oxígeno disuelto de 10.8 mg L⁻¹ y una mínima de 7.18 mg L⁻¹, por lo que en todo momento el sistemas presentó buena aireación.

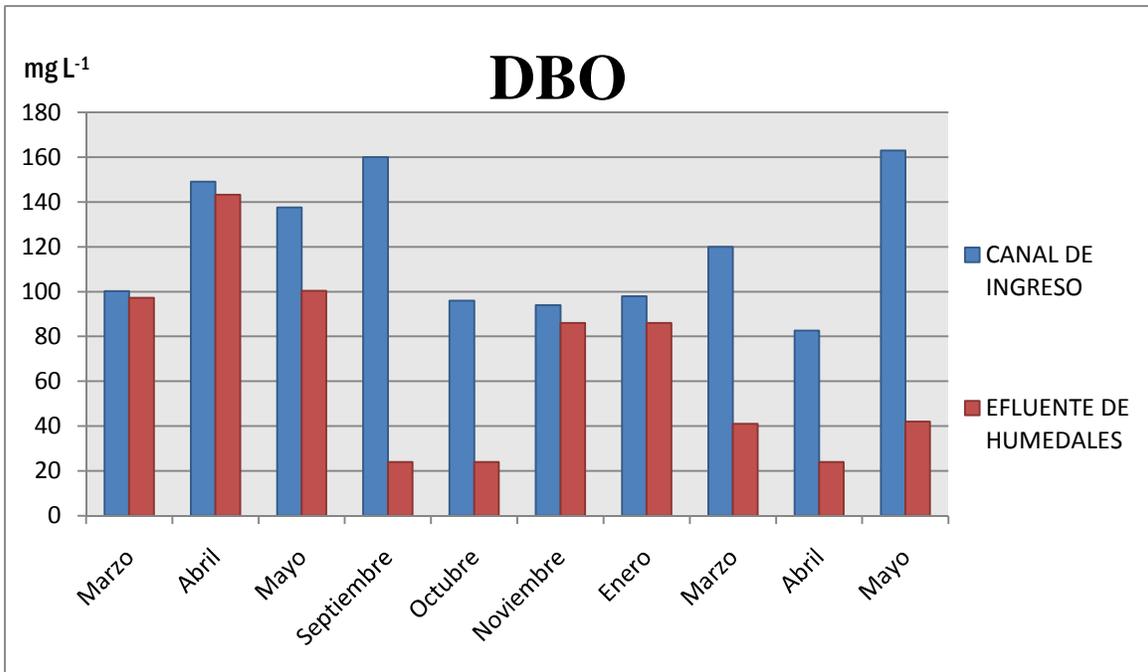


Figura 9

La concentración máxima de DBO registrada en el agua residual del canal de ingreso fue de 120.0 mg L⁻¹ y la mínima de 82.6 mg L⁻¹ en la temporada seca. En la temporada de lluvia de 163.11 mg L⁻¹ como máximo y de 96.0 mg L⁻¹ concentración mínima Para la temporada de lluvia la concentración máxima de DBO registrada en el agua tratada fue de 143.0mg L⁻¹ de DBO y una mínima de 24.0 mg L⁻¹ la temporada seca registro una mínima de 24.0 mg L⁻¹ y la máxima de 86.0 mg L⁻¹.

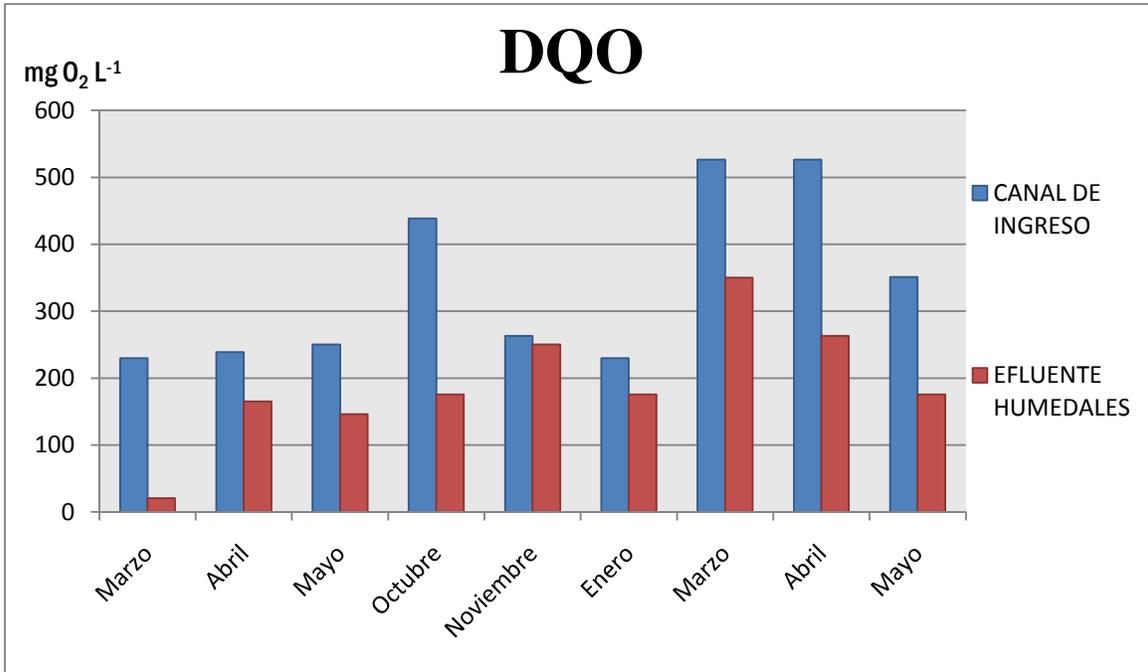


Figura 10

La DQO registró una concentración máxima de 526.2 mg L⁻¹ y la mínima de 230.0 mg L⁻¹ para el agua del canal de ingreso en la temporada seca. En la temporada de lluvia de 438.5 mg L⁻¹ como máximo y de 250 mg L⁻¹. Para la temporada de lluvia la concentración máxima de DQO registrada en el agua tratada fue de 175.4 mg L⁻¹ de DQO y una mínima de 146 mg L⁻¹. La temporada seca registró una mínima de 20.6 mg L⁻¹ y la máxima de 350.0 mg L⁻¹.

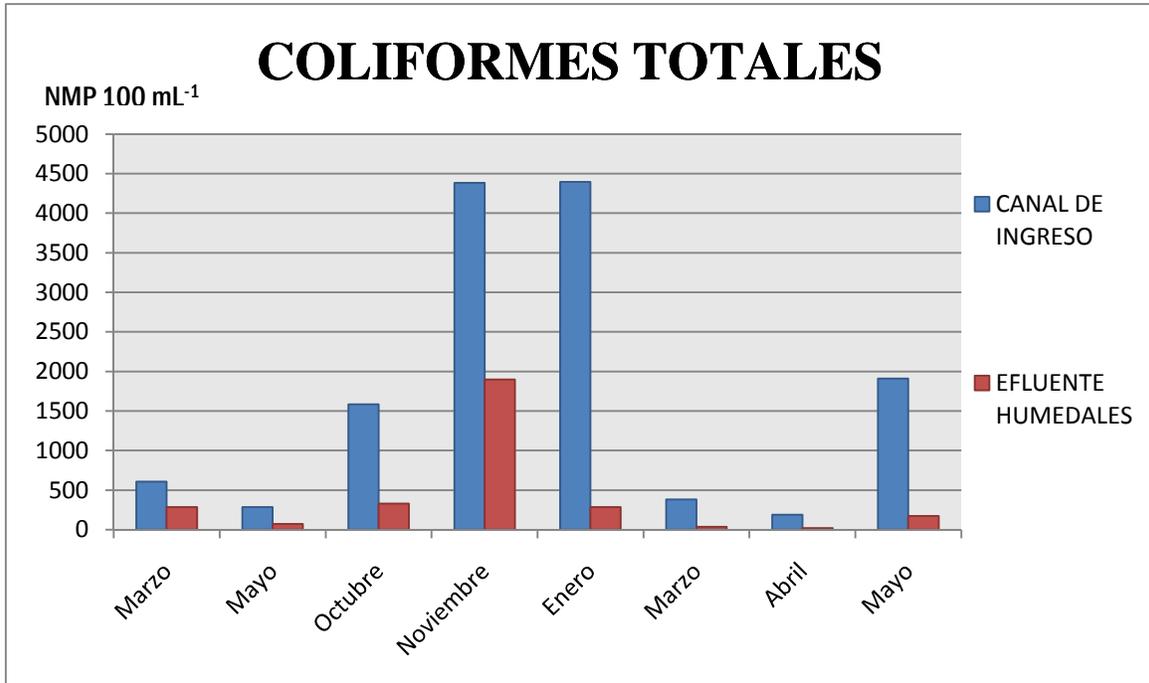


Figura 11

La concentración máxima de organismos coliformes totales registrada en la temporada seca para el agua residual del canal de ingreso fue de 4 396 NMP 100 mL⁻¹ y la mínima de 191 NMP 100 mL⁻¹. En la temporada de lluvia de 1911 NMP 100 mL⁻¹ como máximo y de 288 NMP 100 mL⁻¹ concentración mínima. Para la temporada de lluvia la concentración máxima registrada en el agua tratada fue de 330 NMP 100 mL⁻¹ y una mínima de 73 NMP 100 mL⁻¹ la temporada seca registró una concentración máxima de 1898 NMP 100 mL⁻¹ y la mínima fue 19 NMP 100 mL⁻¹.

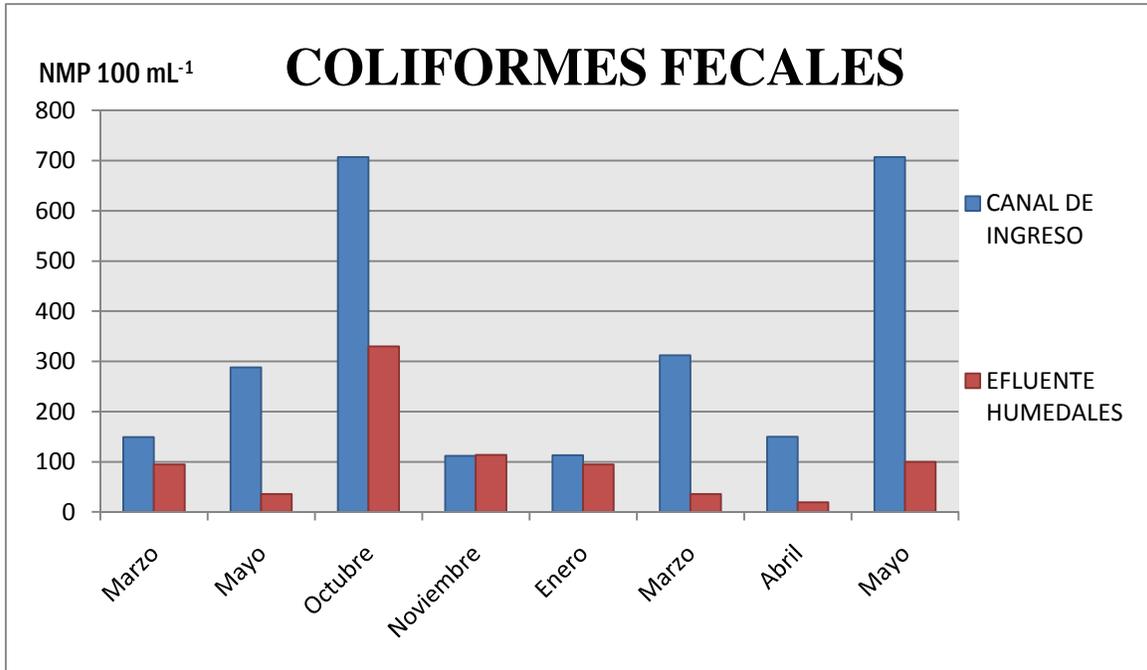


Figura 12

La concentración máxima de organismos coliformes fecales registrada en la temporada seca para el agua residual del canal de ingreso fue de 312 NMP 100 mL y la mínima de 112 NMP 100 mL. En la temporada de lluvia de 707 NMP 100 mL como máximo y de 288 NMP 100 mL concentración mínima. Para la temporada de lluvia la concentración máxima registrada en el agua tratada fue de 330 NMP 100 mL y una mínima de 36 NMP 100 mL, la temporada seca registró una concentración máxima de 114 NMP 100 mL y la mínima fue 19 NMP 100mL.

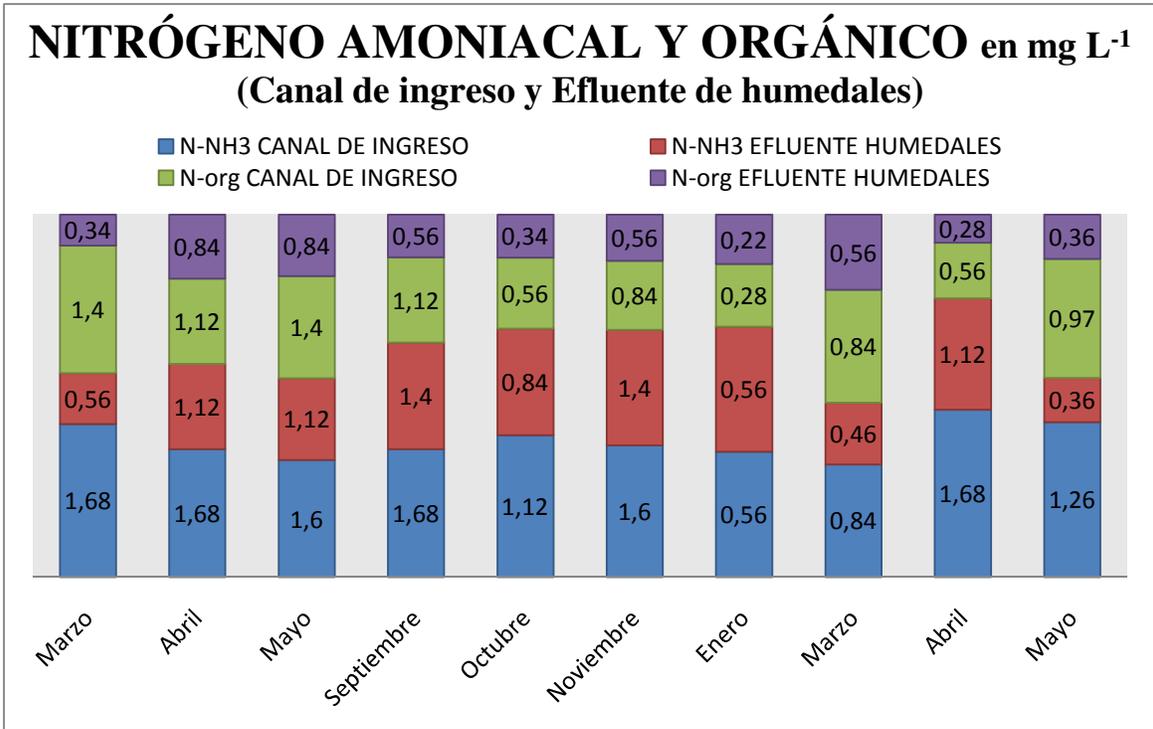


Figura 13

El comportamiento del ingreso de nitrógeno amoniacal (1.60 - 1.68 mg N-NH₃ L⁻¹) y orgánico (1.12 - 1.40 mg N-Org L⁻¹) en el agua residual del canal de ingreso fue homogéneo en marzo, abril, mayo y septiembre de 2010. En octubre de 2010 y enero 2011, el nitrógeno amoniacal mostró un descenso (1.12 – 0.56 mg N-NH₃ L⁻¹) y el descenso fue significativo para el nitrógeno orgánico (0.56 – 0.28 mg N-N Org L⁻¹).

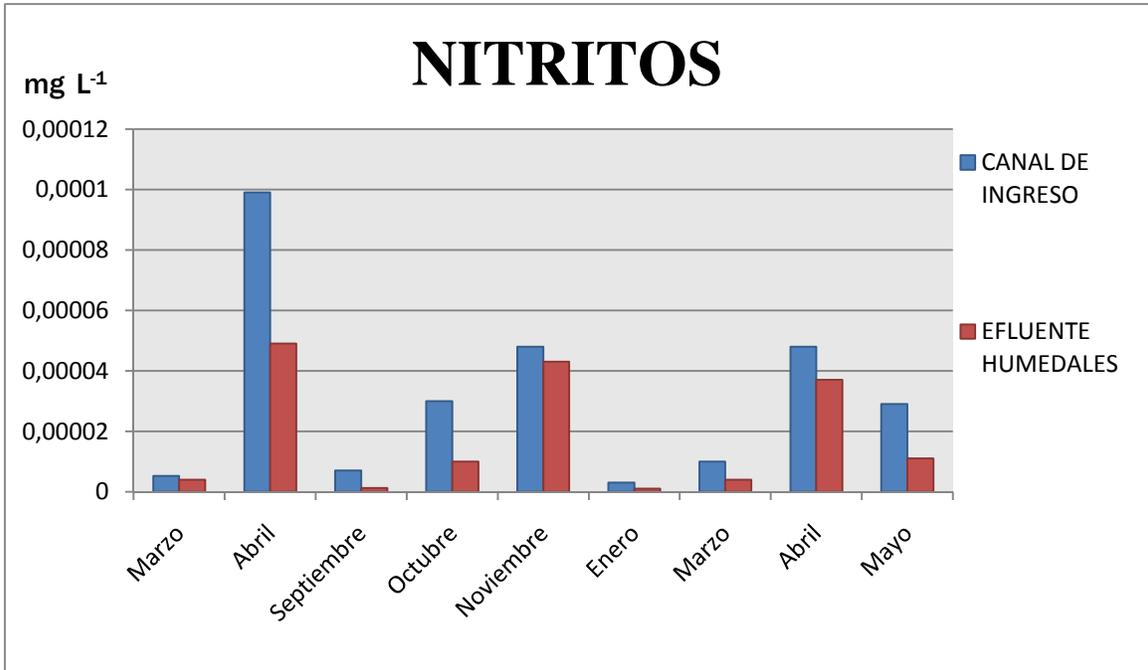


Figura 14

En la época de secas ingresó al sistema de tratamiento la máxima concentración de nitritos de $9.9 \times 10^{-5} \text{ mg NO}_2 \text{ L}^{-1}$, en la época de lluvia fue de $2.9 \times 10^{-5} \text{ mg NO}_2 \text{ L}^{-1}$. El efluente tratado en el sistema de humedales registró concentraciones máximas de $4.9 \times 10^{-5} \text{ mg NO}_2 \text{ L}^{-1}$ en la época de secas y la mínima de $1.2 \times 10^{-5} \text{ mg NO}_2 \text{ L}^{-1}$ en la época de lluvia. El factor dilución fue determinante aunado a la disminución de la actividad biológica de la biopelícula.

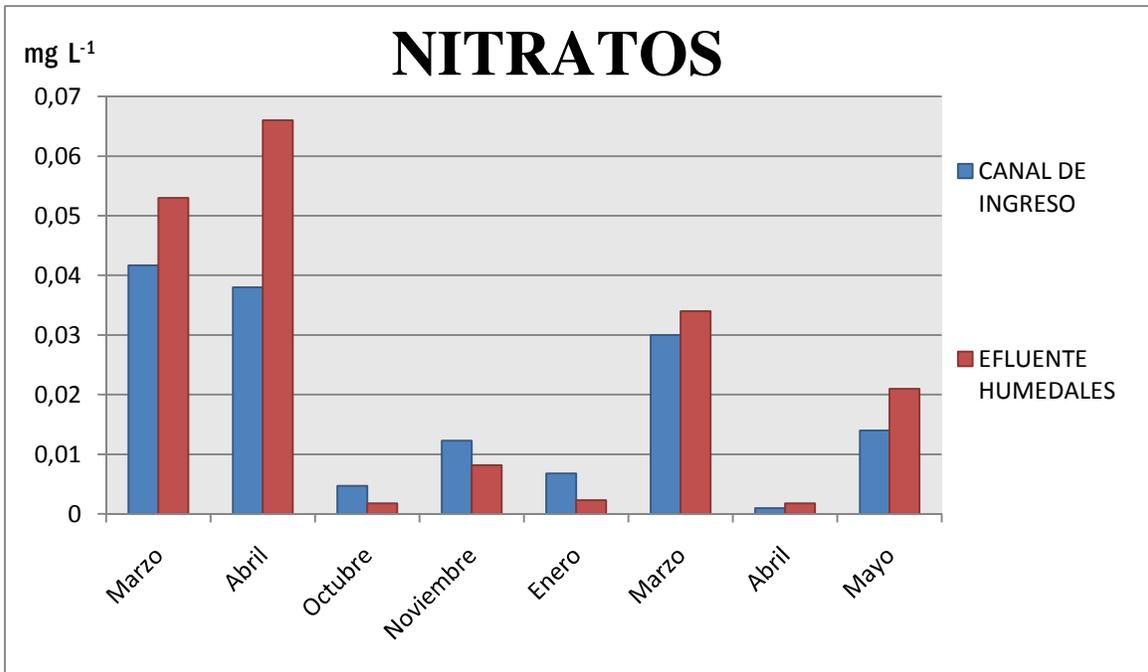


Figura 15

El agua residual que ingresó al sistema en la época de secas llevaba de 0.0010 a 0.0417 mg NO₃ L⁻¹ después del tratamiento registró concentraciones de 0.0018 a 0.053 mg NO₃ L⁻¹. En lluvia registró el canal de ingreso 0.0047 a 0.038 mg NO₃ L⁻¹ después del tratamiento las concentraciones registradas fueron de 0.0018 a 0.066 mg NO₃ L⁻¹. En los meses fríos no hubo biotransformación, debido al impacto de la temperatura sobre la biopelícula.

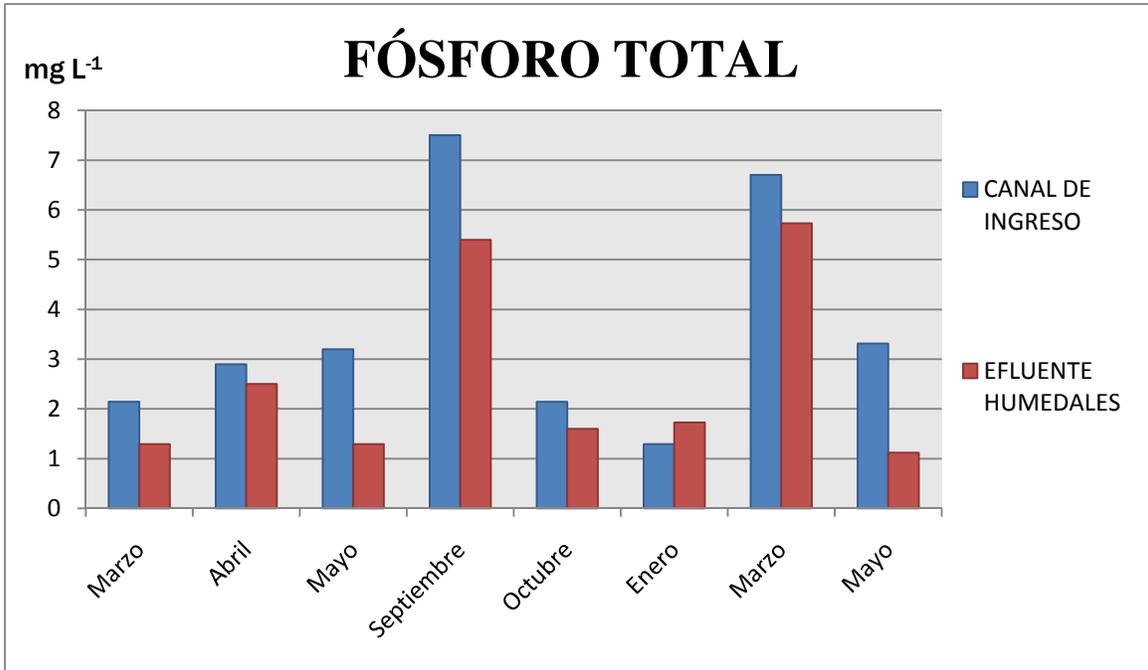


Figura 16

En la época de secas ingresó al sistema de tratamiento una concentración máxima de fósforo total de 6.7 y una mínima de 1.29 mg P-total L⁻¹, en la época de lluvia de 7.5 y 3.2 mg P-total L⁻¹. El efluente tratado en el sistema de humedales registró una concentración máxima de 5.73 mg P-total L⁻¹ y una mínima de 1.29 mg P-total L⁻¹, en la época de secas. En la época de lluvia el valor máximo registrado fue de 5.4 mg P-total L⁻¹ y el mínimo 1.21 mg P-total L⁻¹ en el efluente de los humedales. El factor dilución fue determinante aunado a la disminución de la actividad biológica de la biopelícula en los meses fríos.

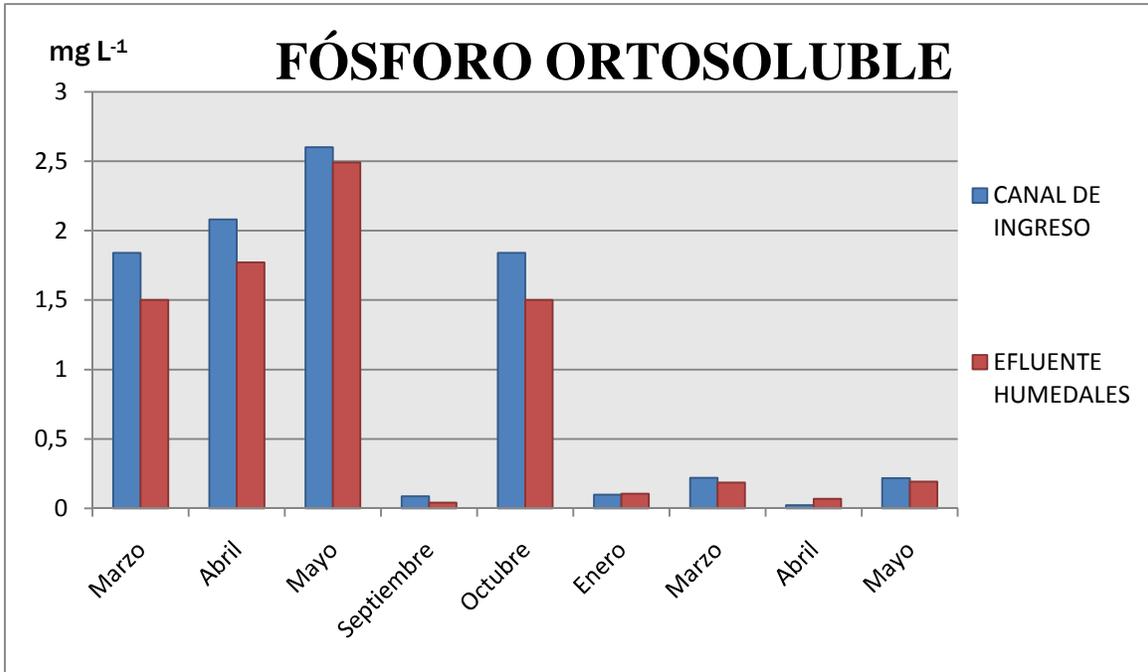


Figura 17

En la temporada de secas ingresó al sistema de tratamiento una concentración máxima de fósforo ortosoluble de 2.8 y una mínima de 0.022 mg P-PO₄ L⁻¹; en la época de lluvia de 2.6 y 0.088 mg P-PO₄ L⁻¹. El efluente tratado en el sistema de humedales registró una concentración máxima de 1.77 mg P-PO₄ L⁻¹ y una mínima de 0.069 mg P-PO₄ L⁻¹, en la época de secas. En la época de lluvia el valor máximo registrado fue de 2.49 P-PO₄ L⁻¹ y el mínimo 0.069 P-PO₄.

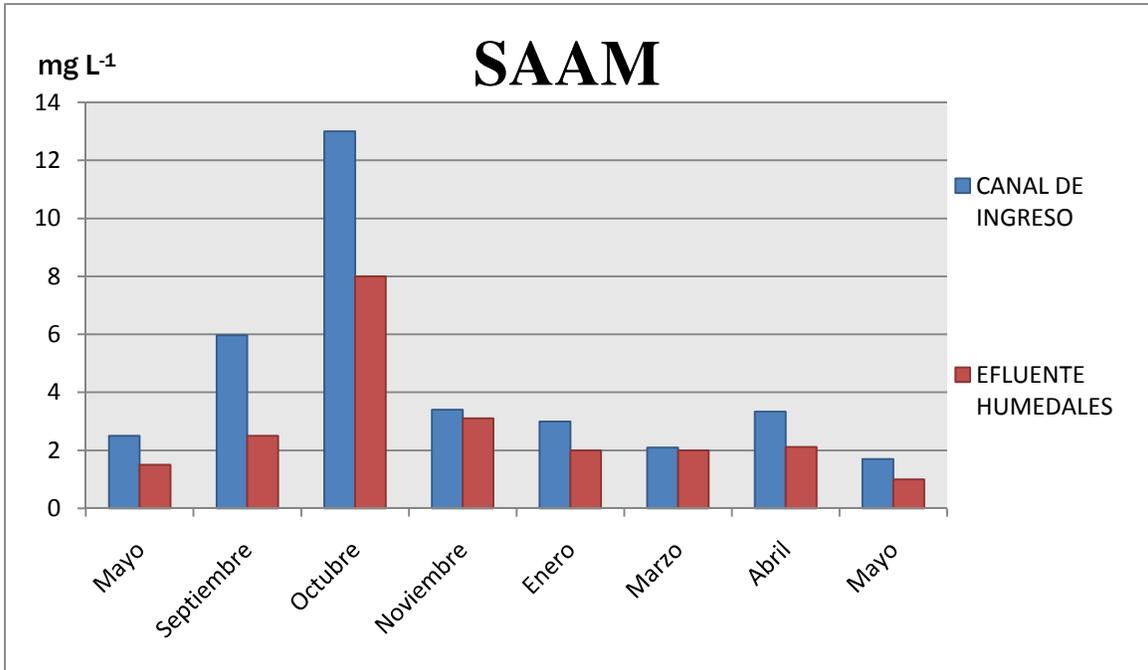


Figura 18

Para la época de secas ingresó al sistema de tratamiento una concentración máxima de sustancias tenso activas de 3.4 mg L⁻¹ y una mínima de 2.1 mg L⁻¹, en la época de lluvia de 13 y 1.7 mg L⁻¹. El efluente tratado en el sistema de humedales registró una concentración máxima de 3.1 mg L⁻¹ y una mínima de 2 mg L⁻¹, en la época de secas. En la época de lluvia el valor máximo registrado fue de 8 mg L⁻¹ y el mínimo de 1 mg L⁻¹.

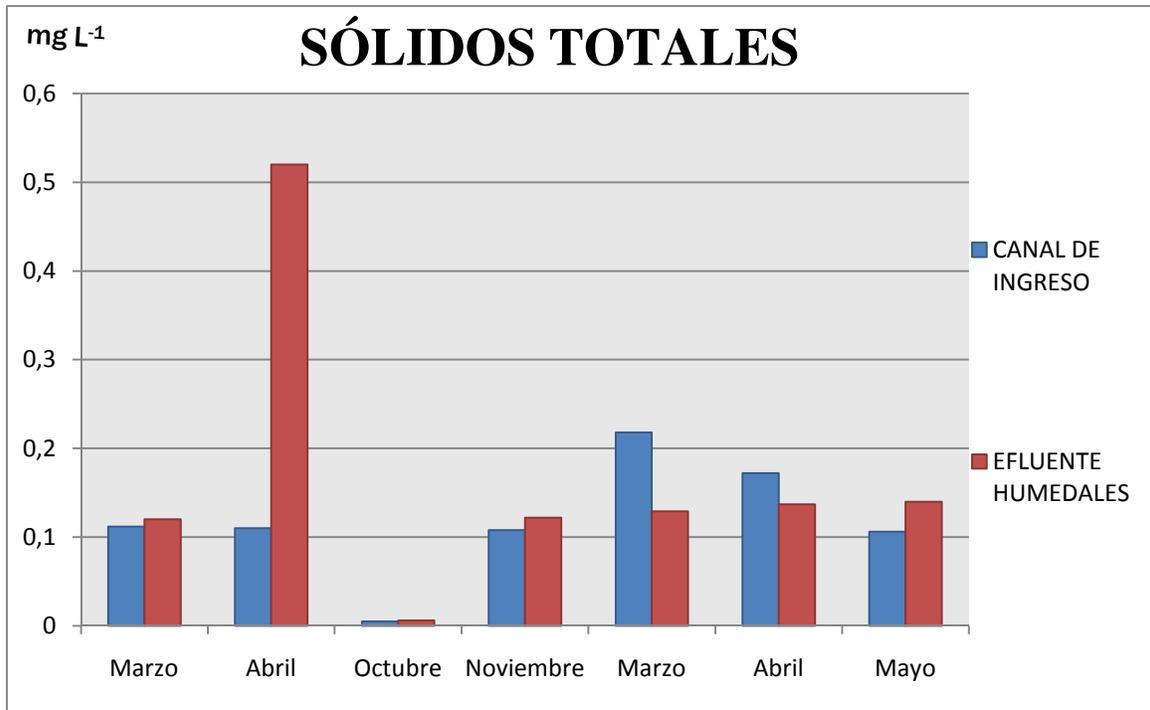


Figura 19

En la época de secas ingresó al sistema de tratamiento una concentración máxima de sólidos totales de 2.18 mg L⁻¹ y una mínima de 0.11 mg L⁻¹, en la época de lluvia de 0.106 y 0.0051 mg L⁻¹. El efluente tratado en el sistema de humedales registró una concentración máxima de 0.52 mg L⁻¹ y una mínima de 0.120 mg L⁻¹, en la época de secas. En la época de lluvia el valor máximo registrado fue de 0.14 mg L⁻¹ y el mínimo de 0.006 mg L⁻¹.

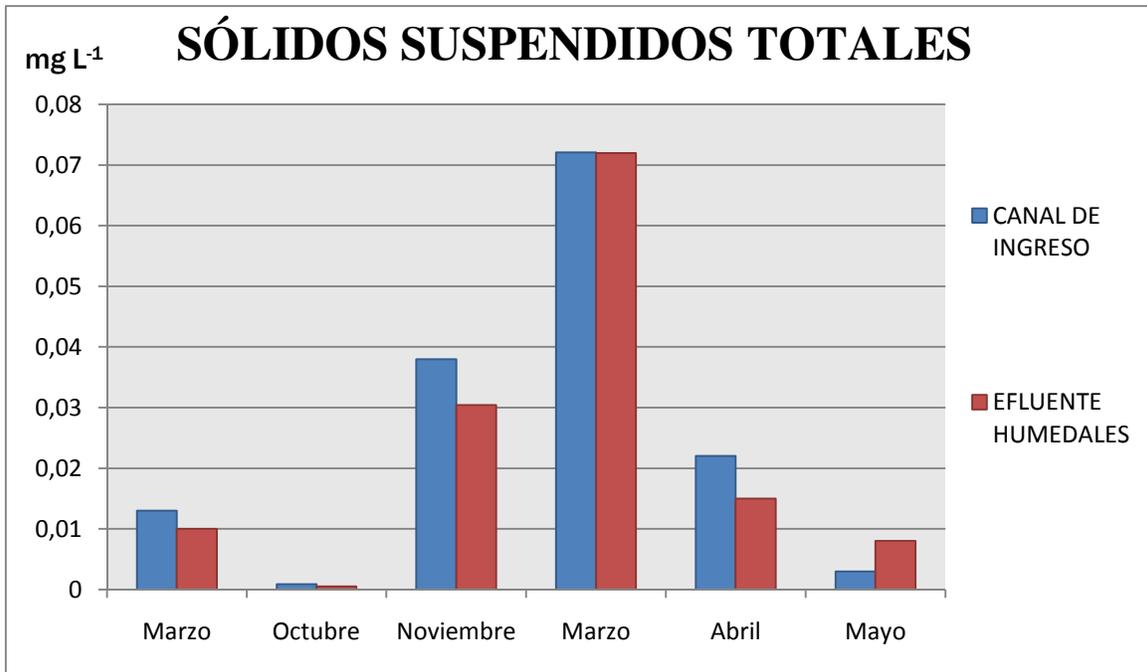


Figura 20

En la temporada de secas ingresó al sistema de tratamiento una concentración máxima de sólidos suspendidos totales de 0.0721 y una mínima de 0.013 mg L⁻¹, en la época de lluvia de 0.003 y 0.0009 mg L⁻¹. El efluente tratado en el sistema de humedales registró una concentración máxima de 0.072 mg L⁻¹ y una mínima de 0.01 mg L⁻¹, en la época de secas. En la época de lluvia el valor máximo registrado fue de 0.008 mg L⁻¹ y el mínimo de 0.0005 mg L⁻¹.

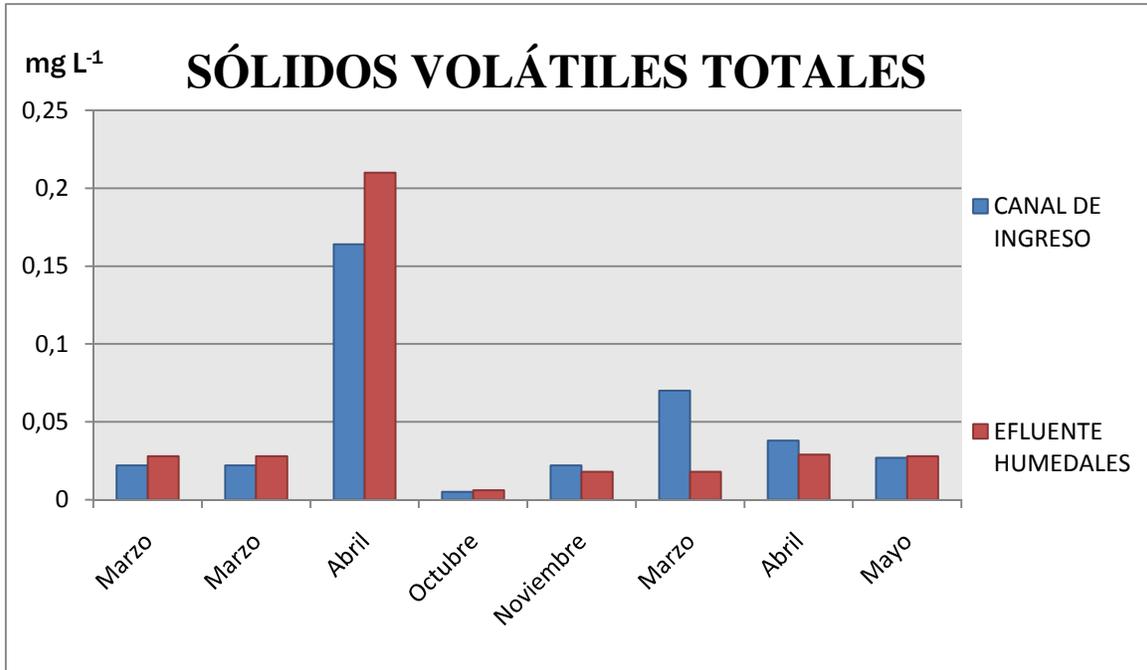


Figura 21

En la temporada de secas ingresó al sistema de tratamiento una concentración máxima de sólidos volátiles totales de 0.164 y una mínima de 0.022 mg L⁻¹, en la época de lluvia de 0.027 y 0.0051 mg L⁻¹. El efluente tratado en el sistema de humedales registró una concentración máxima de 0.21 mg L⁻¹ y una mínima de 0.018 mg L⁻¹, en la época de secas. En la época de lluvia el valor máximo registrado fue de 0.028 mg L⁻¹ y el mínimo de 0.0062 mg L⁻¹.

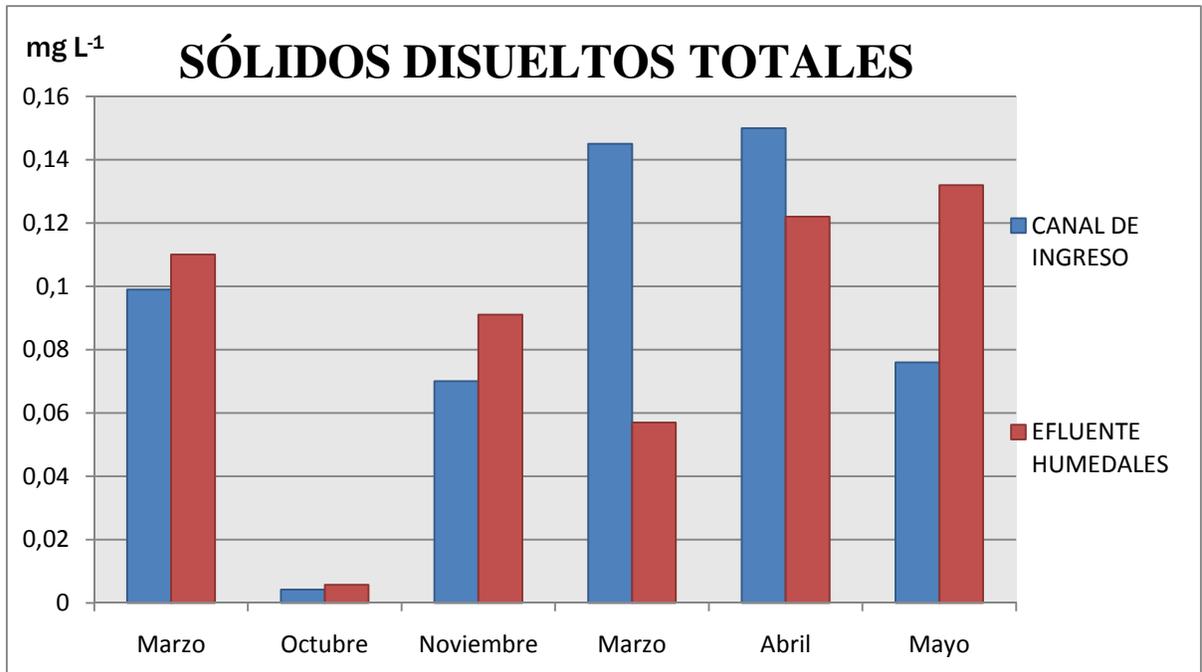


Figura 22

Al sistema de tratamiento en la temporada de secas ingresó una concentración máxima de sólidos disueltos totales de 0.15 y una mínima de 0.07 mg L⁻¹, en la época de lluvia de 0.076 y 0.0042 mg L⁻¹. El efluente tratado en el sistema de humedales registró una concentración máxima de 0.122 mg L⁻¹ y una mínima de 0.057 mg L⁻¹, en la época de secas. En la época de lluvia el valor máximo registrado fue de 0.132 mg L⁻¹ y el mínimo de 0.0057 mg L⁻¹.

11. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Temperatura

La temperatura es un factor abiótico que regula procesos vitales para los organismos vivos, así como también afecta las propiedades químicas y físicas de otros factores abióticos como son: la solubilidad de nutrientes, solubilidad de gases, el estado físico de nutrientes, el grado de toxicidad de xenobióticos y propiedades físico-químicas del medio acuoso como: pH, potencial redox, solubilidad de gases, densidad, el estado físico y la viscosidad del sustrato (Mogollón *et al.*, 2006).

De acuerdo a la NOM-001-SEMARNAT-1996 el límite máximo permisible (LMP) de temperatura es de 40°C. Los resultados obtenidos no rebasaron este límite establecido por dicha norma, lo cual nos indica que la temperatura registrada no presenta una contaminación térmica.

Para el cultivo de trucha (*Oncorhynchus mykiss*), la temperatura debe estar entre 7.2 a 17 °C para crecimiento y de 7.2 a 12.8 °C para reproducción e incubación (Camacho *et al.*, 2000). En los diferentes meses de muestreo no se registró una temperatura que ponga en peligro la biología de la especie.

La temperatura es determinante para el desarrollo de la actividad bacteriana, cuyo intervalo óptimo se encuentra entre 25 °C a 35 °C. Cuando la temperatura se acerca a los 50 °C los procesos de digestión aerobia y nitrificación bacteriana se detienen; por otro lado, cuando la temperatura es menor a 5 °C la actividad microbiana se inhibe (Crites y Tchobanoglous, 2000). En los meses fríos el sitio donde se ubica el sistema alcanza temperatura de -5°C lo que implica que biopelícula cese completamente su actividad. Es recomendable colocar un techo al sistema para evitar que el efecto de las temperaturas bajo cero limite la capacidad de remoción.

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

Potencial de Hidrogeno (pH)

El pH de los sistemas naturales y artificiales así como el agua residual doméstica, en general, es ligeramente alcalino por la presencia de bicarbonatos, carbonatos y metales alcalinos (Jiménez, 2002).

El pH controla diferentes reacciones químicas, la actividad biológica normalmente se restringe a una escala bastante estrecha entre 6.0 y 8.0 (Tebbutt, 2002), en los resultados obtenidos se rebasó ligeramente lo señalado por Tebbutt (2002). Lo que indica una alerta de vigilancia en la actividad biológica del sistema de tratamiento.

Según Camacho *et al.* (2000), el pH para el cultivo de trucha se debe encontrar en un intervalo de 6.5 a 9.0 unidades de pH. En todos los meses de muestreo en el efluente del sistema, no se registró un valor fuera del intervalo.

Para Crites y Tchobanoglous (2000), valores de pH superiores a 9.3 el equilibrio se desplaza hacia donde predominando el amoníaco (NH_3), mientras que para valores menores a 9.3 existe un predominio de la concentración del ión amonio (NH_4^+). Es de suma importancia para el cultivo de trucha que el pH sea lo más estable dentro de un intervalo de 6.5 a 8.0 ya que las variaciones del mismo lesionan o estresan a los organismos (Delegación Federal de Pesca, 1994)

Oxígeno Disuelto

En ambientes naturales la concentración de este elemento está en constante cambio, dependiendo de factores físico-químicos como la temperatura y la salinidad y de factores biológicos como la fotosíntesis y la respiración (Lara, 1999).

El oxígeno es de suma importancia para la adecuada integridad y función de tejidos y órganos. En el caso de los humedales construidos, las plantas suministran oxígeno a sus propias raíces para mantenerlas en condiciones aerobias. Los microorganismos que crecen sobre las raíces promueven la formación de la biopelícula. En las capas de esta biopelícula y en la más próximas

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

al rizoma se dan procesos aerobios, mientras que en las más alejadas, al no difundir el oxígeno, los procesos serán anaerobios, esta situación si permitiría el proceso de nitrificación-desnitrificación (Brix, 1997). Si se encuentran con un lecho muy reductor, tienen que suministrar más oxígeno para contrarrestar esas condiciones. Muchas transformaciones de los nutrientes y del carbono orgánico en humedales son debidas al metabolismo microbiano y están directamente relacionadas con el crecimiento de los microorganismos, ya que esta utiliza los nutrientes y el carbono tanto como fuente de energía como para la formación de nueva biomasa microbiana. La energía es obtenida por la oxidación de compuestos reducidos (dador de electrones) con un oxidante (aceptor de electrones) a través de la cadena respiratoria y estos procesos son llevados a cabo por bacterias heterótrofas y autótrofas. La degradación aerobia de materia orgánica alcanza mayor energía por unidad de masa como donador de electrones, que la nitrificación o cualquier otra degradación orgánica. Las bacterias que no utilizan oxígeno como acepto final de electrones tienen un crecimiento más lento ya que el proceso resulta, en general, menos eficiente que el de la respiración aeróbica (Lara, 1999).

Debido a todo este proceso y que el agua no se queda estancada, sino que es corriente es por lo que se tienen concentraciones arriba de 5 mg L^{-1} adecuado para cualquier organismo acuático y de acuerdo a los resultados obtenidos, este parámetro cumple satisfactoriamente la condición para el desarrollo de trucha Arco-Iris (Camacho *et al.*, 2000).

Demanda Biológica de Oxígeno

La materia orgánica sedimentable es descompuesta aeróbica o anaeróbicamente, dependiendo del oxígeno disponible, el resto se encuentra en estado disuelto o en forma coloidal y continúa siendo removida del agua residual al entrar en contacto con los microorganismos que crecen en el sistema. Esta actividad biológica ocurre cerca de las raíces y los rizomas, pero la descomposición anaerobia prevalece en el resto del sistema (Lara, 1999).

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

Los resultados obtenidos indican que la biopelícula alcanzó la maduración (después de los primeros tres meses de muestreo), en los meses cálidos la remoción incrementó significativamente debido a que el consorcio de hongos, bacterias, algas y protozoarios que la conforman realizó satisfactoriamente los procesos de biotransformación de la materia orgánica, en tanto que en los meses fríos prácticamente no hubo remoción, el consorcio cesó su procesos de transformación ya que según datos del campamento truchero, en diciembre se registró temperatura ambiente menor a 0°C, aunado a esto, se plantaron nuevas especies en el mes de octubre en un nuevo modulo y las hojas de plantas ornamentales que se estaban desarrollando en el sistema de tratamiento eran pequeñas y su tamaño no fue suficiente para aminorar el impacto de los cambios drásticos de temperatura ambiente.

En marzo del 2010 se registró una remoción de DBO₅ de 2.9% (100.2 mg L⁻¹ - 97.3 mg L⁻¹); en abril de 3.9% (149 mg L⁻¹ - 143.2 mg L⁻¹); en mayo de 27% (137.5 mg L⁻¹ - 100.4 mg L⁻¹); para septiembre la remoción alcanzó el 85% (160 mg L⁻¹ - 24 mg L⁻¹); en octubre el 75% (96 mg L⁻¹ - 24 mg L⁻¹); en noviembre se registró un 8% de remoción de DBO (94 mg L⁻¹ - 86 mg L⁻¹). Para enero del 2011, hubo una remoción de DBO₅ del 12% (98 mg*L⁻¹ - 86 mg*L⁻¹); en marzo se registró una remoción que equivale a 66% (120 mg*L⁻¹ -41 mg*L⁻¹); en abril se alcanzó el 71% de remoción (82.6 mg*L⁻¹ - 24 mg*L⁻¹); finalmente para mayo fue de 74% (163 mg*L⁻¹ - 42 mg*L⁻¹).

La eliminación de la DBO ocurre rápidamente por sedimentación y filtración de partículas en los espacios entre el sustrato y las raíces. La DBO soluble es eliminada por los microorganismos que crecen en la superficie del sustrato, raíces y rizoma de las plantas. La degradación de la materia orgánica es aerobia en micro sitios de las raíces de las plantas, pero en el resto del lecho sumergido ocurre por vías anaerobias: fermentación metánica y sulfato reducción. Estos procesos se ven relegados en mayo, septiembre y octubre del 2010, así como en marzo, abril y mayo de 2011, donde se alcanzaron concentraciones por debajo del

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

límite máximo permisible de la NOM-001-SEMARNAT-1996 para la protección de la vida acuática que requiere de 30 mg L^{-1} de DBO y también se cumple con la NOM-003-SEMARNAT-1997 para servicios al público con contacto indirecto u ocasional cuyo límite máximo permisible es de 30 mg L^{-1} .

Destacan los meses de marzo y mayo del 2011, que aunque no cumplen con la NOM-003-SEMARNAT-1997, se obtuvo una remoción de DBO_5 cercana al 70%, se propone incrementar el tiempo de retención hidráulica, con el objetivo de elevar el porcentaje de eficiencia de remoción y cumplir con el límite máximo permisible de la norma mencionada.

Demanda Química de Oxígeno

La DQO es una medida aproximada del contenido de materia orgánica biodegradable y no biodegradable de una muestra de agua. En condiciones naturales, dicha materia orgánica puede ser biodegradada lentamente (oxidada) hasta CO_2 y H_2O mediante un proceso que puede tardar desde unas pocas semanas hasta unos cuantos cientos de años, dependiendo del tipo de materia orgánica presente y de las condiciones de la oxidación (APHA 1992).

La temperatura es un factor importante en el proceso de biotransformación de la materia orgánica, donde en los meses fríos (noviembre y enero del 2011) la remoción de DQO es de 5 a 23%. Para los demás muestreos realizados se obtuvieron porcentajes de remoción entre 50 y 70%.

Metcalf y Eddy (1996), consideran que $250 \text{ mg O}_2 \text{ L}^{-1}$ es una concentración débil; que $500 \text{ mg O}_2 \text{ L}^{-1}$ es una concentración media y que $1000 \text{ mg O}_2 \text{ L}^{-1}$ es una concentración fuerte. Es importante destacar que en octubre de 2010, marzo, abril y mayo del 2011 ingresó al sistema agua con una concentración media, después del tratamiento se redujo a una concentración débil. El sistema cuenta con las condiciones adecuadas para depurar el material oxidable presente determinados como DQO y DBO, cuando permanece en el sistema una concentración media a

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

alta es necesario airear para incorporar oxígeno al sistema y no sea un factor limitante en el cultivo de la trucha.

De acuerdo a la fuente de nutriente, los organismos están clasificados como heterótrofos o autótrofos. Los heterótrofos requieren material orgánico como fuente de carbono para la síntesis de nuevo tejido proteico; en cambio, los autótrofos no utilizan materia orgánica sino dióxido de carbono como fuente de carbono (Kolb, 1998). Ambos grupos usan luz o una reacción química de oxidación-reducción como fuente de energía para todas las síntesis y son llamados fotótrofos y quimiótrofos, respectivamente. Dos clases diferentes de biodegradación microbiana, la aeróbica o la anaeróbica, tienen lugar en los humedales construidos, dependiendo de la presencia de oxígeno disuelto. En el caso el sistema del campamento de pesca arcoiris el proceso fue prácticamente aeróbico; donde dos grupos de microorganismos participan en este proceso de degradación: aeróbicos quimioheterótrofos, oxidando compuestos orgánicos y liberando amonio y aeróbicos quimioautótrofos, los cuales oxidan el nitrógeno amoniacal a nitrito ó nitrato dependiendo de las condiciones oxidativas (Cooper, 1996).

Debido a que se obtuvieron remociones superiores al 70% tanto para DQO como para DBO se puede inferir que la nitrificación se llevó a cabo de manera satisfactoria, ya que la presencia de organismos heterótrofos derivados de este proceso fueron los responsables de los resultados positivos, además que el oxígeno disuelto no fue un factor limitante.

Coliformes Totales y Fecales

La presencia de contaminación fecal es un factor importante en la determinación de la calidad de un cuerpo de agua. Las heces contienen una variedad de microorganismos y formas de resistencia de los mismos, involucrando organismos patógenos, los cuales son un riesgo para la salud pública al estar en contacto con el ser humano. Dada la limitada capacidad de algunos miembros del grupo de

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

organismos coliformes para sobrevivir en agua; sus números también pueden emplearse para estimar el grado de contaminación fecal (NMX-AA-042-SCFI-2005).

Los organismos importantes, desde el punto de vista de la salud pública son las bacterias patógenas y los virus. Todos los patógenos son capaces de sobrevivir al menos un corto tiempo en agua natural y más aún, en agua con temperaturas más frías y con presencia de polución orgánica (como en las aguas residuales) (Delgadillo *et al.*, 2010).

La disminución de la cantidad de bacterias coliformes que ingresa a los humedales y que reciben el tratamiento, se debe principalmente a los procesos de retención, muerte, sedimentación, atrapamiento y adsorción (Sans y Ribas, 1999).

De acuerdo con la NOM-003-SEMARNAT-1997, el límite máximo permisible de coliformes fecales en las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público con contacto indirecto es de 1000 NMP 100 mL⁻¹ de coliformes fecales.

Los valores obtenidos en los meses de muestreo, ninguno rebasó el límite máximo permisible que indique una contaminación fecal; sin embargo, en mayo y octubre del 2010, marzo, abril y mayo del 2011, hay una notable disminución de la concentración de coliformes fecales después del sistema de tratamiento, donde se alcanzaron porcentajes de remoción que van del 53 al 88%. De acuerdo a estos valores disminuye el riesgo considerablemente de que organismo coliformes se alojen en la trucha y aumenta la factibilidad de obtener un producto para consumo humano sin riesgo sanitario.

La adopción de las Buenas prácticas de producción acuícola de trucha, tiene como objetivo asegurar que el producto que se obtiene a pie de granja sea inocuo, es decir, que pudiera encontrarse libre de bacterias, parásitos o compuestos químicos que atenten contra la salud de los consumidores (SENASICA, 2003).

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

La remoción de estos microorganismos estuvo basada en una combinación de factores físicos, químicos y biológicos. Los factores físicos incluyen la filtración, sedimentación y agregación. Los mecanismos biológicos incluyeron la predación y ataque por bacteriófagos y también la muerte (declinación *die-off*). Finalmente, los factores químicos fueron la oxidación, adsorción y la exposición a toxinas fijadas por otros microorganismos y exudadas por las raíces de las plantas (aunque la cantidad de estos antibióticos causa dudas respecto a su efectividad para afectar a los patógenos) (Delgadillo *et al.*, 2010).

El sistema de humedales en Arco Iris alcanzó remoción de organismos coliformes cercanas al 90%. Kolb (1998), reporta remoción de bacterias (coliformes fecales) y enterobacterias en varios humedales en la República Checa, siendo la eficiencia de remoción entre 98% y 99% para estos indicadores bacterianos. En los casos en que se registraron las tasas más bajas, fue debido a tiempos de retención menores.

Nitrógeno total

El nitrógeno puede ocasionar problemas, ya que es un elemento muy móvil que experimenta tres transformaciones principales: la mineralización del nitrógeno orgánico a ión amonio, la nitrificación en la que se forma nitrato y por último la desnitrificación (en la que se produce la reducción del nitrato a N_2). Esta última sólo ocurre en condiciones de limitación de oxígeno y presencia de materia orgánica suficiente. Si se completa el último proceso, gran parte del nitrógeno escapa a la atmósfera (Mendonça, 2000).

En las aguas residuales urbanas el nitrógeno se encuentra fundamentalmente en forma de amonio y también como nitrógeno orgánico. No suele ser habitual encontrar concentraciones significativas de nitratos y nitritos. En los humedales el principal mecanismo de eliminación de nitrógeno es de tipo microbiano y consiste en la nitrificación seguida de desnitrificación. Sin embargo, también hay otros procesos que contribuyen a la eliminación como la adsorción del amonio y la asimilación realizada por las plantas. En los humedales el ciclo del nitrógeno está

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

acoplado al ciclo del carbono (materia orgánica) fundamentalmente a través de la desnitrificación (García y Corzo 2008).

El efluente tratado respecto a nitrógeno amoniacal mostró una biotransformación promedio de 43% en marzo, abril, mayo y septiembre de 2010. En octubre, enero y noviembre, meses en los que la temperatura desciende, la remoción fue de 12.5%

Según la norma NOM-001-SEMARNAT-1996 el límite máximo permisible de nitrógeno total para la protección a la vida acuática es de 15 mg L^{-1} . Con base a los resultados obtenidos y después de haber sumado el nitrógeno amoniacal y el nitrógeno orgánico, ninguno rebasó el límite máximo permisible.

Al relacionar los resultados registrados de pH con el nitrógeno total, en el efluente tratado (6.8 – 8.5), se infiere que existe un predominio de la concentración del ión amonio (NH_4^+). (Crites y Tchobanoglous, 2000).

Nitritos

Los procesos de remoción de nitrógeno en humedales artificiales incluyen diferentes mecanismos como: su utilización por los organismos del sistema (plantas y microorganismos), amonificación, nitrificación/desnitrificación y adsorción en la matriz del sustrato. Numerosos estudios han demostrado que el mecanismo más importante de remoción es el proceso de nitrificación/desnitrificación (Vymazal, 2002).

De acuerdo con los resultados obtenidos, en el agua residual cruda por su origen sanitario, el nitrógeno se presentó mayormente como N-NH_4^+ , probablemente procedente de la urea humana y de compuestos orgánicos nitrogenados. De acuerdo con las condiciones que prevalecen en el sistema, se favorecen los procesos de nitrificación, dando como resultado la formación de nitritos y nitratos por la actividad de bacterias nitrificantes (*Nitrosomas* y *Nitrobacter*). Los resultados

sugieren además, que existen zonas anaerobias al interior del humedal, que conducen a la formación de nitritos.

Para los requerimientos de la trucha (*Oncorhynchus mykiss*) la cantidad de nitritos debe ser menor a 0.55 mg L^{-1} . Los resultados obtenidos no alcanzaron una concentración rebase este requerimiento; sin embargo, están presentes.

La presencia de nitritos indica polución, rara vez su concentración excede 1 mg L^{-1} en aguas residuales y $0,1 \text{ mg L}^{-1}$ en aguas superficiales o subterráneas (Crites y Tchobanoglous, 2000). La importancia de la determinación de los nitritos en aguas residuales radica en que son altamente tóxicos para peces y otras especies acuáticas, aún en pequeñas cantidades.

Nitratos

En la naturaleza, el nitrógeno amoniacal y el nitrógeno orgánico se transforman primero a nitritos y posteriormente a nitratos; estas reacciones se producen por el consumo de oxígeno y en presencia de bacterias nitrificantes (Sans y Ribas, 1999).

En las aguas residuales, a excepción de unos pocos vertidos industriales, el nitrógeno es escaso: fundamentalmente como amonio (por hidrólisis de la urea), proteínas, aminas y escasas cantidades de nitratos (Delgadillo *et al.*, 2010).

De acuerdo a los resultados obtenidos se observa que se desarrolló eficientemente el proceso de nitrificación, ya que la condición limitante para la nitrificación en los humedales es la disponibilidad de oxígeno y está relacionada con la eficiencia de la transferencia de oxígeno a las raíces de las plantas ornamentales. El género de bacterias *Nitrobacter*, continúa con la oxidación del nitrito (NO_2^-) a nitrato (NO_3^-), el cual queda disponible para ser absorbido por las plantas. Los nitratos es la única forma en la cual las plantas pueden absorber este elemento para poder sintetizar sus propias proteínas, por medio de la fotosíntesis.

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

Por lo tanto, es de gran importancia si se quiere tener una buena eficiencia en el proceso de nitrificación, cuando se realice el diseño de un humedal de flujo sub-superficial es importante que la profundidad no supere los 60 cm, ya que el flujo bajo la zona de las raíces será anaeróbico y la nitrificación en esta zona no será posible si la profundidad es mayor (Romero *et al.*, 2009).

En los últimos 20 o 30 años las concentraciones de nitrógeno y fósforo en muchos mares y lagos casi se han duplicado. La mayor parte es acarreada por los ríos. El nitrógeno es más móvil que el fósforo y puede ser lavado a través del suelo o trasladarse al aire por evaporación del amoniaco o por desnitrificación. Se debe procurar la eliminación de los nitratos en el proceso llamado desnitrificación. Para esto se usan bacterias en condiciones anaerobias que hacen reaccionar el nitrato con parte del carbono que contiene el agua que está siendo tratada. Como resultado de la reacción se forma CO_2 y N_2 que se desprenden a la atmósfera (Echarri, 2007). Para llevar a cabo estos procesos el agua tratada en los humedales recibe aireación suficiente a su paso por el lago y promueve el proceso de depuración; situación favorable para el cultivo de trucha.

En la degradación aeróbica, participan dos grupos de microorganismos en este proceso de degradación: aeróbicos quimio heterótrofos, oxidando compuestos orgánicos y liberando amonio y aeróbicos quimio autótrofos, los cuales oxidan el nitrógeno amoniacal a nitrito y nitrato. (Cooper, 1996).

Fósforo total

El fósforo en aguas residuales se encuentra principalmente como fosfatos y en formas orgánicas. La contaminación de agua por este elemento tiene su fuente principal en el uso de productos de limpieza con compuestos fosforados como principios activos. El fósforo es esencial para el crecimiento de los organismos y puede ser un nutriente limitante para productividad primaria. En concentraciones elevadas por la incorporación de aguas residuales o tratadas, estimula el

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

crecimiento acelerado de macro y microorganismos, provocando eutrofización (APHA, 1992).

Los principales procesos del fósforo dentro del humedal son la adsorción, sedimentación, precipitación química y asimilación vegetal. El sedimento orgánico es un elemento fundamental en el proceso de depuración por humedales, ya que sirve de sustrato para el crecimiento de multitud de microorganismos; jugando un papel fundamental en la dinámica del fósforo, cuyo principal mecanismo de eliminación es, junto con la asimilación por los seres vivos, su adsorción a las arcillas, la precipitación y formación de complejos con Al, Fe y Ca presentes en los sedimentos (Agustín, 2008). Esto se ve reflejado en los meses de marzo, mayo, septiembre y octubre del 2010, donde se alcanzan porcentajes de remoción que van desde el 25% hasta 63%.

La remoción del fósforo en los humedales artificiales es eficiente en un período corto hasta que el medio se satura. Sin embargo, a largo plazo los procesos son más limitados y se reducen a la asimilación por parte de las plantas y la biomasa (Romero, 2009). Esto está reflejado en los meses de abril 2010, enero, marzo y mayo del 2011.

De acuerdo a los resultados es importante hacer más eficiente el proceso de remoción de fósforo, ya que se observa una ligera disminución del poder auto-depurador del lago por dificultar la actividad bacteriana, induce el crecimiento desmesurado de algas y otros organismos provocando la eutrofización del sistema, cuando estas algas y otros vegetales mueren, al ser descompuestos por los microorganismos, se agota el oxígeno y se hace imposible la vida de otros seres vivos, como la trucha. El resultado puede ser un agua maloliente e inutilizable (Echarri, 2007).

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

Fósforo ortosoluble

El fósforo, elemento constitutivo importante y necesario del protoplasma, tiende a “circular” a través de la descomposición de los compuestos orgánicos hasta acabar en fosfatos, que quedan nuevamente a disposición de las plantas (Odum, 1972).

El fósforo puede ser absorbido por las plantas en diferentes formas iónicas, se integrará al metabolismo principalmente en el proceso de fotosíntesis, razón por la cual disminuye su concentración en el agua a su paso por los humedales.

Según Crites y Tchobanoglous (2000) la distribución de varias especies de fosfatos es una función estricta del pH. Los fosfatos presentes a un pH de 0 - 2.15 unidades, es el H_3PO_4 (Ácido fosfórico); a un pH de 2.15 - 7.2 unidades, el fosfato presente es el H_2PO_4^- (Fosfato primario); de 7.2 – 12.35 unidades de pH, se presenta el HPO_4^{2-} (Fosfato secundario) y finalmente a un pH de 12.35 – 14 unidades, el PO_4^{3-} (Ortofosfato). Las formas de fosfatos provienen de una gran cantidad de fuentes, según Cartró (2003), sólo una pequeña parte se origina en forma natural de los fosfatos derivados del propio detritus.

La forma del fósforo más importante para la nutrición vegetal es el ortofosfato inorgánico ionizado donde las bacterias son las que actúa como mediadoras de fósforo orgánico disuelto a fósforo inorgánico disuelto (Wetzel, 1981).

Al relacionar los resultados de pH con el fósforo, se infiere que el agua residual de ingreso, predomina el fosfato primario (H_2PO_4^-) y secundario (HPO_4^{2-}), así mismo en el efluente del sistema.

La mineralización es la conversión microbiana del P orgánico a H_2PO_4 o HPO_4^{2-} (ortofosfato), son formas de fósforo disponibles para las plantas. El P orgánico puede ser mineralizado con subproducto de la mineralización de la materia orgánica mediante enzimas específicas que son reguladas por la demanda de este

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

nutriente (Piconte y Zamuner, 2002). Este proceso en el humedal está mediado por enzimas fosfatasas que pueden ser sintetizadas por las raíces de las plantas, las cuales producen fosfatasas ácidas (Ridge y Rovira, 1971), como por los hongos y bacterias capaces de producir fosfatasas ácidas y alcalinas, estas fosfatasas son conocidas como fosfomonoesterasa ácida y fosfomonoesterasa alcalina, son enzimas inespecíficas que catalizan la ruptura hidrolítica del fósforo orgánico del enlace éster (C-O-P), dejando el fósforo inorgánico disponible para que pueda ser asimilado (H_2PO_4^- , HPO_4^{2-}) (Begonia *et al.*, 2004).

Sustancias Activas al Azul de Metileno (SAAM)

Debido a que una de las particularidades de los detergentes es su capacidad de producir espumas en concentraciones menores hasta de 1.0 mg L^{-1} ; ésta cualidad representa un verdadero problema en sistemas de tratamiento basados en la tecnología aeróbica como son los lodos activados. La espuma formada interfiere negativamente con el intercambio de aire atmosférico (Ramírez, 2006).

De acuerdo a los datos obtenidos, los humedales lograron una remoción de SAAM cercana al 40%. Los detergentes determinados como sustancias activas al azul de metileno (SAAM), son un excelente indicador de calidad para el agua de consumo humano y cuando sean detectados en suministros de abastecimiento las medidas correctivas deben ser inmediatas, dado que la presencia de los detergentes en el agua de suministro es indeseable desde todo punto de vista y es indicio de contaminación por aguas residuales ordinarias de tipo doméstico (Ramírez, 2006).

Sólidos

Los humedales son capaces de proporcionar una alta eficiencia física en la remoción de contaminantes asociado con material particulado. El agua se mueve muy lentamente a través del sustrato y las raíces, debido al flujo laminar característico y la resistencia proporcionada por las raíces y el sustrato. La sedimentación de los sólidos suspendidos se promueve por la baja velocidad de flujo y por el hecho de que es con frecuencia laminar en los humedales. Las

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

esteras de plantas en los humedales pueden servir como trampas de sedimentos, pero su rol primario es la remoción de sólidos suspendidos para limitar la suspensión de material particulado (Llagas y Guadalupe, 2006).

Con respecto a los sólidos totales la Norma Oficial Mexicana NOM-SEMARNAT-003, el límite máximo permisible es de 30 mg L^{-1} , para servicios al público con contacto indirecto, y en los resultados obtenidos no tenemos registrado un valor que sobrepase este límite.

Para el cultivo de trucha (*Oncorhynchus mykiss*), el requerimiento del agua de trucha debe ser menor a 80 mg L^{-1} de sólidos suspendidos y menor a 400 mg L^{-1} de sólidos disueltos, de los cuales en los resultados obtenidos, no tenemos un registro que sobrepase ese límite.

Aunque la mayor parte de los sólidos suspendidos y sedimentables fueron removidos en el sedimentador, el sistema filtró y sedimentó los remanentes, complementando esta remoción. En efecto, las raíces de las plantas ornamentales y el sustrato redujeron la velocidad del agua, favoreciendo ambos procesos. El sedimentador fue muy importante para evitar obstrucciones y la rápida colmatación del humedal (Delgadillo *et al.*, 2010).

Es importante destacar que cuando se hagan labores de mantenimiento o trasplante, se deberá retirar a los peces de los estanques y se confinen en un solo sitio para evitar el impacto de los sólidos en las branquias de los organismos.

12. CONCLUSIONES

El agua tratada en el sistema de humedales de flujo subsuperficial registró las siguientes características para el cultivo de trucha (*Oncorhynchus mykiss*).

La temperatura no rebasó el LMP de la NOM-001-SEMARNAT-1996, de 40°C. De acuerdo a lo reportado no se registró una temperatura que ponga en peligro la biología de la especie.

El pH registrado fue de 6.9 a 8.8, en temporada de secas y lluvias rebasa ligeramente esta escala, lo que indica una alerta de vigilancia en la actividad biológica del sistema, ya que las variaciones del mismo lesionan o estresan a la trucha. En todos los meses de muestreo, no se registró un valor fuera del intervalo.

El oxígeno disuelto para el cultivo de trucha, debe estar por encima de 5 mg L⁻¹, en los meses de muestreo siempre se registraron valores entre 7.23 a 11.47 mg L⁻¹, lo que hace apta al agua para el cultivo de trucha.

El límite máximo permisible de la DBO₅ para la protección de la vida acuática según la NOM-001-SEMARNAT-1996 y la NOM-003-SEMARNAT-1997 para servicios al público con contacto indirecto u ocasional es de 30 mg L⁻¹. En todos los meses de muestreo el agua residual rebasó significativamente esta concentración (82 a 163.0 mg L⁻¹). El agua tratada a partir de la maduración de la biopelícula en septiembre la remoción fue significativa y cumplió las normas mencionadas.

Cabe destacar que en los meses fríos existió una remoción de DBO, pero fue mínima ya que cesaron los procesos de biotransformación y no se cumplió con el límite establecido.

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

El agua residual del canal de ingreso que abastece a los humedales presentó una contaminación de coliformes fecales (112 a 707 NMP), al recibir tratamiento en los humedales se alcanzaron porcentajes de remoción que fueron del 53 al 88%.

El resto de los parámetros, DQO, SMM, nitrógeno total, cumplieron satisfactoriamente los requerimientos establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-1996.

Los nitritos para el cultivo de trucha deben ser menores a $0.55 \text{ mg NO}_2 \text{ L}^{-1}$ y en el efluente de los humedales no se reportaron valores superiores a este requerimiento.

Los sólidos suspendidos totales no rebasaron el límite máximo permisible de la NOM-003-SEMARNAT-1997.

Para el cultivo de trucha los sólidos suspendidos deben ser menores a 80 mg L^{-1} . No se registraron valores superiores a lo indicado. Los sólidos disueltos deben ser menores a 400 mg L^{-1} , los resultados obtenidos no rebasaron ese requerimiento.

El fosforo total según la NOM-001-SEMARNAT-1996, para la protección de la vida acuática debe ser menores de 5 mg L^{-1} . En el efluente de los humedales en octubre y marzo de 2011 no rebasaron el límite máximo permisible.

El análisis global de los parámetros físicos, químicos y biológicos de calidad del agua indican que el sistemas de tratamiento de aguas residuales a través de humedales de flujo sub-superficial, abatió considerablemente los niveles de contaminación encontrados en el agua residual del Río Otlatla y que es la que ingresa al sistema de tratamiento.

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

Al tener agua de calidad apta para el cultivo de trucha se garantiza la inocuidad del producto final y se puede declarar al campamento truchero Arco iris como sitio aceptable para realizar esta práctica.

A un año del funcionamiento del sistema de humedales, los productores de trucha tuvieron ahorros financieros considerables ya que el sistema de tratamiento no requiere energía eléctrica y productos químicos para la operación y mantenimiento. Por lo que estos sistemas de tratamiento representan una opción viable para tratar agua residual y reusarla en diferentes actividades.

Como se ve, la problemática en torno al agua residual es sumamente compleja y se la puede abordar desde diferentes ángulos y con distintos enfoques. Es importante considerar el agua residual como una fuente potencial para reusarla en diferentes actividades productivas.

13. BIBLIOGRAFÍA

1. AENOR, 1998. Determinación de la demanda bioquímica de oxígeno después de n días (DBOn), Parte 1: Método de dilución y siembra con adición de alil tiourea Norma oficial europea. UNE-EN 1899-1. 21p.
2. Agustín L., 2008. Depuración de aguas residuales mediante humedales artificiales: La Edar de los Gallardos (Almería). Gestión de Aguas del Levante Almeriense, S.A. Galasa.113p.
3. APHA, AWWA, WPCF, 1992. "*Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*". (Métodos Normalizados para el Análisis del Agua y Aguas Residuales), 18º Edición. E.U.A. 1605p.
4. Aquino M., 2007. Manual básico para el cultivo de trucha arco iris (*Oncorhynchus mykiss*). GEM-TIES, Cuencas Sanas y Modos de Vida Sustentable, Series de Manuales de Capacitación. 25p.
5. Begonia M., Begonia G., Miller G., Gilliard D. y Young C., 2004. Phosphatase Activity and Populations of Microorganisms from Cadmium- and Lead Contaminated Soils. Bull. Environ. Contam. Toxicol. 73:1025-1032.
6. Brix H., 1997. Do macrophytes play a role in constructed treatment wetlands? *Water Science and Technology*, 35 (5): 11-17.
7. Brix H., Arias C. y Bubba M., 2001. *Media selection for sustainable phosphorus removal in subsurface flow constructed wetlands*. *Water Sci. Technol.* 44: 47-54.
8. Camacho B., Moreno R., Rodríguez G., Luna R. y Vásquez M., 2000. Guía para el cultivo de trucha. Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. México D.F. 135p.
9. Cartró J., 2003. *Tratamiento de aguas industriales. Depuración biológica de las aguas residuales*, Ed. Fundación Universitaria Iberoamericana – Universidad de Catalunya, Barcelona. 125p.
10. CONAFOR, 2010. Tipos de Vegetación forestal y de suelos, recuperado el 29 de junio de 2010 en:

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

“http://148.223.105.188:2222/gif/snif_portal/index.php?option=com_content&task=view&id=12&Itemid=7”

11. CONAGUA, 2008. Estadísticas del Agua en México. Capitulo 8, Agua en el mundo. Recuperado el 21 de agosto de 2010 en “<http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/Cap8%5B1%5D.pdf>”
12. CONAGUA, 2010. Estadísticas del agua en México, edición 2010. Recuperado el 25 de agosto de 2010 de “http://www.agua.org.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=1169:estadisticas-del-agua-en-mexico-edicion-2010&catid=1128:estadisticas&Itemid=100062”.
13. Cooper, P., 1996. *Reed beds and constructed wetlands for wastewater treatment*, WRc, Swindon. 184p.
14. Crites R. y Tchobanoglous G., 2000. *Sistemas de manejo de aguas residuales para núcleos pequeños y descentralizados*, Mc. Graw Hill, Santafé de Bogota. 135p
15. Curtidor L., 1999. Determinación de metales pesados en sedimento y agua del estero “La Ventosa” Salina Cruz Oaxaca, México. Tesis Licenciatura Hidrobiología. Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa. México. 109p.
16. De la Lanza E, G. 1990. Algunos conceptos sobre hidrología y calidad del agua. Pp. 181-198. En: La acuicultura en México: De los conceptos a la producción (Lanza de la, E. G. y Arredondo, F. J. L. compiladores). UNAM. México, D. F.
17. De la Orta A. y Muños L., 2011. Evaluación de la fenología y la calidad del agua residual generada en el CBTA No. 176 del Municipio de Apaxtla de Castrejón, Guerrero tratada en un humedal construido de flujo sub-superficial. Universidad Nacional Autónoma de México. Tesis de Licenciatura en Biología. Laboratorio de proyectos ambientales, FES-Zaragoza. 116p.

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

18. Delegación Federal de Pesca, 1994. CULTIVO DE TRUCHA ARCOIRIS. Dirección de Publicaciones, Unidad de Comunicación Social de la Secretaría de Pesca. 37p.
19. Delgadillo O., Camacho A., Pérez L., Andrade M., 2010. Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales. Centro Andino para la Gestión y Uso del Agua (Centro AGUA). Edición: Nelson Antequera Durán. Cochabamba, Bolivia. 105p.
20. Echarri L., 2007. Ecología Población y Medio Ambiente. Tema 8, Contaminación del Agua. Universidad de Navarra. Recuperado el 2 de marzo de 2011 en "www.unav.es/.../Tema%208%20Contaminacion%20del%20agua%2007.pdf
21. Echarri P., 1998. Ciencias de la Tierra y el Medio Ambiente. Libro electrónico. Tema 11. Contaminación del agua. España. 714p.
22. Eugenio K. y Gallardo A., 2009. Evaluación de la calidad física, química y bacteriológica del agua tratada en un humedal de flujo subsuperficial para uso piscícola. Universidad Nacional Autónoma de México. Tesis de Licenciatura en Biología. Laboratorio de proyectos ambientales, FES-Zaragoza. 63p.
23. Faulkner S. y Richardson C., 1989. Physical and chemical characteristics of freshwater wetlands soils. Lewis Publishers. Tennessee. 805 p.
24. García S. y Corzo H., 2008. Depuración con Humedales Construidos, Guía Práctica de Diseño, Construcción y Explotación de Sistemas de Humedales de Flujo Subsuperficial. Departamento de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental de la Universidad Politécnica de Catalunya. Libro electrónico. Recuperado el 13 de febrero de 2011 en "http://upcommons.upc.edu/eprints/bitstream/2117/2474/1/JGarcia_and_ACorzo.pdf"
25. García, E., 1988. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. México, Offset Larios, 217 p.
26. Gleick, P. H., 1993. An introduction to global freshwater issues. Water in crisis. A guide to the world's freshwater resources. Oxford University Press. New York. Pp. 3-12.

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

27. Herbas A., Rivero F. y Gonzales A., 2001. Indicadores Biológicos de Calidad de Agua. Universidad Mayor de San Simón, Facultad de Ciencias y Tecnología. Cochabamba, Bolivia. 21p
28. Hortiales R. y Guevara L., 2011. Evaluación de la calidad del agua residual tratada en un humedal de flujo sub-superficial y su producción florícola, Municipio de Tetipac, Guerrero. Universidad Nacional Autónoma de México. Tesis de Licenciatura en Biología. Laboratorio de proyectos ambientales, FES-Zaragoza. 105p.
29. INAFED, 2009. Instituto Nacional para el Federalismo y Desarrollo Municipal. Enciclopedia de los Municipios de México, Puebla. Recuperado el 8 de diciembre de 2010 en "<http://www.inafed.gob.mx/work/templat/enciclo/puebla/Mpios/21180a.htm>"
30. INEGI, 2006. Estadísticas a propósito del día mundial del agua. Recuperado el 21 de agosto de 2010 en "<http://www.inegi.org.mx/inegi/contenidos/espanol/prensa/contenidos/estadisticas/2006/agua2006.pdf>"
31. Jiménez J.R. 2002. "Agua de Mayor Calidad". Rev. Agua Potable. México. 51 (4) 34-41.
32. Kadlec R. y Knight R., 1996. Tratamiento con humedales. Lewis-CRC publishers, Boca Raton. FL, USA. 156p.
33. Kevern, N., King L. y Ring R., 1996. Lake classification systems- Part 1. The Michigan Riparian. Recuperado el 31 de enero de 2011 en "<http://www.mlswa.org/lkclassif1.htm>"
34. Kolb P., 1998. *Design of a constructed wetland (pilot plant) for the reclamation of the river Besós*. Diplomarbeit zur Erlangung des akademischen Grades Diplomingenieur. Universität für Bodenkultur. 30p.
35. Lara B., 1999. Depuración de aguas residuales municipales con humedales artificiales. Universidad Politécnica de Cataluña. Tesis de Máster en Ingeniería y Gestión Ambiental ICT-UPC. 114p.
36. Llagas Ch. y Guadalupe E., 2006. Diseño de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales en la UNMSM, Revista del Instituto de

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

Investigaciones FIGMMG Vol. 15 (17): 85-96.

37. López M., 2011. Diseño construcción y mantenimiento de humedales de flujo sub-superficial para el tratamiento de aguas residuales en los municipios de Apaxtla de Castrejón y Tetipac, Guerrero. Universidad Nacional Autónoma de México. Tesis de Licenciatura en Biología. Laboratorio de proyectos ambientales, FES-Zaragoza. 48p.
38. Mena S., 2006. Depuración de aguas residuales con humedales artificiales: Ventajas de los sistemas híbridos. Congreso Nacional del Medio Ambiente. Comunicación técnica. 126p.
39. Mendonça S., 2000. *Sistemas de lagunas de estabilización: Como utilizar aguas residuales tratadas en sistemas de riego*, Mc. Graw Hill, Santafé de Bogota. 110p.
40. Metcalf y Eddy, Inc. 1996. "Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización". Editorial Mc Graw Hill. Tomo 1. México D. F. 751p
41. Meza V., 2011. Nestlé: apropiación privada de agua de la Iztaccíhuatl. La jornada del campo. Número 40. Recuperado el 28 de febrero de 2011 en <http://www.jornada.unam.mx/2011/01/15/agricultura.html>
42. Miranda J., Gómez E., Garavito L., López F., 2010. Estudio de comparación del tratamiento de aguas residuales domésticas utilizando lentejas y buchón de agua en humedales artificiales. *Tecnología y ciencias del agua*. 2 (1):24-45.
43. Mogollón J., Ramírez A., García B. y Bifano C., 2006. Uso de los parámetros fisicoquímicos de las aguas fluviales como indicadores de influencias naturales y antrópicas. Instituto de Ciencias de la Tierra. Universidad Central de Venezuela. Apto. 3895. Caracas 1010-A. Venezuela. 23p.
44. Navarro A. y Vázquez A., 2004. Tecnología para la agricultura sustentable: Humedales artificiales para el tratamiento descargas domésticas, Memorias del 2do Foro de Transferencia de Tecnología en el Sector Agropecuario en el Estado de Puebla, Izúcar de Matamoros, Puebla, México, 27-29. , pp. 257-260. ISBN 968-839-423-8

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

45. Navarro A. y Vázquez A., 2006. Eficiencia de dos humedales construidos de diferente escala. Memorias: Cuarto Encuentro de Innovación Tecnológica para el fortalecimiento de las cadenas Agroalimentarias en el Estado de Puebla. p. 358-364. ISBN: 968-839-534-X.
46. Odum, 1972. Ecología. Nueva editorial interamericana, 3ª. Ed. Impreso en México. 111p.
47. Piconte L. y Zamuner E., 2002. Fósforo orgánico y fertilidad fosfórica. Informaciones Agronómicas del cono sur 16: 11-15.
48. Ramírez C., 2006. Detergentes orgánicos sintéticos y ambientes. Hidrogénesis, Revista del Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillado. Vol. 4 N°1. 22 p.
49. Rigde E. y Rovira A., 1971. Phosphatase activitt of intact young wheat roots under sterile and non-sterile conditions. New phylot. 70: 1017-1026.
50. Romero A., Colín C., Sánchez S. y Ortiz H., 2009. Tratamiento de aguas residuales por un sistema piloto de humedales artificiales: evaluación de la remoción de la carga orgánica. Revista Internacional de Contaminación Ambiental. 25 (3):157-167.
51. Sans F. y Ribas J., 1999. Ingeniería Ambiental, contaminación y tratamientos. Editorial Alfaomega. Col. Del Valle, México D.F. 122 p.
52. Secretaría de Comercio y Fomento industrial, 1980. Norma Oficial Mexicana. NMX-AA-003-1980, AGUAS RESIDUALES.- MUESTREO. Dirección general de normas. Fecha de aprobación y publicación: Marzo 25,1980.
53. Secretaría de Comercio y Fomento industrial, 1980. Norma Oficial Mexicana. NMX-AA-014-1980, CUERPOS RECEPTORES.- MUESTREO. Dirección general de normas. Fecha de aprobación y publicación: Septiembre 5,1980.
54. Secretaria de Comercio y Fomento Industrial, 2000. Norma Oficial Mexicana NOM-AA-008-SCFI-2000 ANÁLISIS DE AGUA - DETERMINACIÓN DEL pH - MÉTODO DE PRUEBA. Diario Oficial de la Federación, 18 de Diciembre de 2000 México, D.F. 31p.

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

55. Secretaría de Comercio y Fomento Industrial, 2000. Norma Oficial Mexicana. NOM-AA-004-SCFI-2000 ANÁLISIS DE AGUA - DETERMINACIÓN DE SÓLIDOS SEDIMENTABLES EN AGUAS NATURALES, RESIDUALES Y RESIDUALES TRATADAS - MÉTODO DE PRUEBA. Diario Oficial de la Federación, 18 de Diciembre de 2000. México, D.F. 7p.
56. Secretaría de Comercio y Fomento Industrial, 2001. Norma Oficial Mexicana. NOM-AA-026-SCFI-2001 ANÁLISIS DE AGUA - DETERMINACIÓN DE NITRÓGENO TOTAL KJELDAHL EN AGUAS NATURALES, RESIDUALES Y RESIDUALES TRATADAS - MÉTODO DE PRUEBA (CANCELA A LA NMX-AA-026-1980). Diario Oficial de la Federación, 17 de Abril de 2001. México, D.F. 16p.
57. Secretaría de Comercio y Fomento Industrial, 2001. Norma Oficial Mexicana. NOM-AA-039-SCFI-2001 ANÁLISIS DE AGUAS - DETERMINACIÓN DE SUSTANCIAS ACTIVAS AL AZUL DE METILENO (SAAM) EN AGUAS NATURALES, POTABLES, RESIDUALES Y RESIDUALES TRATADAS - MÉTODO DE PRUEBA. Diario Oficial de la Federación, 1 de Agosto de 2001. México, D.F. 18p.
58. Secretaría de Comercio y Fomento Industrial, 2001. Norma Oficial Mexicana. NOM-AA-079-SCFI-2001 ANÁLISIS DE AGUAS - DETERMINACIÓN DE NITRATOS EN AGUAS NATURALES, POTABLES, RESIDUALES Y RESIDUALES TRATADAS - MÉTODO DE PRUEBA. Diario Oficial de la Federación 13 de Agosto de 2001. México, D.F. 22p.
59. Secretaría de Comercio y Fomento Industrial, 2005. Norma Oficial Mexicana. NOM-AA-042-SCFI-2005 CALIDAD DEL AGUA.- DETERMINACION DEL NUMERO MAS PROBABLE (NMP) DE COLIFORMES TOTALES, COLIFORMES FECALES (TERMOTOLERANTES) Y Escherichia coli PRESUNTIVA. Diario Oficial de la Federación. México, D.F. 21p.
60. Secretaría de Comercio y Fomento Industrial, 2006. NORMA Oficial Mexicana NOM-AA-099-SCFI-2006 ANÁLISIS DE AGUA -

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

DETERMINACIÓN DE NITRÓGENO DE NITRITOS EN AGUAS NATURALES Y RESIDUALES – MÉTODOS DE PRUEBA. Diario Oficial de la Federación 18 de Diciembre de 2000. México, D.F. 15p.

61. Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. 2001. Norma Oficial Mexicana. NOM-AA-029-SCFI-2001 ANÁLISIS DE AGUAS - DETERMINACIÓN DE FÓSFORO TOTAL EN AGUAS NATURALES, RESIDUALES Y RESIDUALES TRATADAS - MÉTODO DE PRUEBA. Diario Oficial de la Federación 17 de Abril de 2001. México, D.F. 21p.
62. Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, 1997. Norma Oficial Mexicana. NOM-003-SEMARNAT-1997, QUE ESTABLECE LOS LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE CONTAMINANTES PARA LAS AGUAS RESIDUALES TRATADAS QUE SE REUSEN EN SERVICIOS AL PÚBLICO. Diario Oficial de la Federación, 23 de Abril de 2003, México, D.F. 6p.
63. Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, 1997. Norma Oficial Mexicana. NOM-001-SEMARNAT-1997, QUE ESTABLECE LOS LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE CONTAMINANTES EN LAS DESCARGAS DE AGUAS RESIDUALES EN AGUAS Y BIENES NACIONALES. Diario Oficial de la Federación, 23 de abril 2003, México, D.F. 33p.
64. Secretaría del Estado del Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2001. Normas ambientales sobre la calidad del agua y control de descargas. Editorial Búho, Santo Domingo, Republica Dominicana. Pp 9-10.
65. Secretaría General, 2008. LEY DE AGUAS NACIONALES. Diario Oficial de la Federación, 18 de abril de 2008. México D.F. 103p.
66. SEDESOL, 2008. Catalogo de Localidades. Recuperado el 8 de diciembre de 2010 de
“<http://cat.microrregiones.gob.mx/catloc/contenido.aspx?clave=211800017&tbl=tbl01>”
67. SEMARNAT, 2002. Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Compendio de Estadísticas Ambientales. Recuperado el 8 de febrero de

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

2011 de

“http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/estadisticas_2000/informe_2000/img/cap4.pdf”

68. SENASICA, 2003. Manual de Buenas Prácticas de Producción Acuícola Trucha para la inocuidad Alimentaria. Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A. C. Unidad Mazatlán en Acuicultura y Manejo Ambiental y el Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria, SAGARPA. 86p.
69. Tebbutt T., 2002. *Fundamentos de Control de la Calidad del Agua*. Ed. Limusa. México. 220p.
70. US-FDA., 2001. Fish and Fisheries Products Hazards and Controls Guidance. Third Edition. US Food and Drug Administration, Center for Food Safety and Applied Nutrition. 326 p.
71. Vymazal J., 2002. The use of sub-surface constructed wetlands for wastewater treatment in the Czech Republic: 10 years experience. *Ecol. Engin.* 18: 633-646.
72. Vymazal J., Brix H., Cooper P., Green M. y Haberl R., 1998. *Costructed wetlands for wastewater treatment in Europe*. Backhuys Publishers, Leiden. The Netherlands. 190p.
73. Wetzel R. 1981. *Limnología*. Ediciones omega, S.A., Barcelona. 1010p.