

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
CENTRO DE ESTUDIOS DEL MAR Y ACUICULTURA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

**“EFICIENCIA DE LA REMEDIACIÓN DE PARÁMETROS DE CALIDAD DE AGUA EN
LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES “LA CERRA”, VILLA
CANALES, GUATEMALA, 2008-2013”**



Presentado Por:

T.A. KERSTIN STEFANIE KLEIN DROEGE

Para obtener el título de:

LICENCIADA EN ACUICULTURA

Guatemala, marzo de 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
CENTRO DE ESTUDIOS DEL MAR Y ACUICULTURA

Consejo Directivo

| | |
|--|--------------------------------------|
| Presidente | M. Sc. Héctor Leonel Carrillo Ovalle |
| Secretaria | M. A. Olga Marina Sánchez Cardona |
| Representante Docente | M. BA. Allan Franco de León |
| Representante del Colegio de Médicos Veterinarios y Zootecnistas. | M. Sc. Adrián Mauricio Castro López |
| Representante Estudiantil | T. A. Francisco Emanuel Polanco |
| Representante Estudiantil | P. F. Maria José Mendoza Arzú |

El Director del Centro de Estudios del Mar y Acuicultura –CEMA- después de conocer el dictamen favorable del M.Sc. Luis Francisco Franco Cabrera, Coordinador Académico, sobre el trabajo de graduación de la estudiante universitaria **Kerstin Stefanie Klein Droege**, titulado “EFICIENCIA DE LA REMEDIACIÓN DE PARÁMETROS DE CALIDAD DE AGUA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES “LA CERRA”, VILLA CANALES, GUATEMALA, 200-2013” da por este medio su aprobación a dicho trabajo. **IMPRIMASE.**

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”



M.Sc. Héctor Leonel Carrillo Ovalle
DIRECTOR



Guatemala, marzo 2015

El Coordinador Académico del Centro de Estudios del Mar y Acuicultura -CEMA-, después de conocer el dictamen del asesor Licenciado Alan Humberto Herrera y la aprobación de la Encargada de EPS M.Sc. Irene Franco Arenales, al trabajo de graduación de la estudiante universitaria, **Kerstin Stefanie Klein Droege**, titulado “EFICIENCIA DE LA REMEDIACIÓN DE PARÁMETROS DE CALIDAD DE AGUA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES “LA CERRA”, VILLA CANALES, GUATEMALA, 200-2013” da por este medio su aprobación a dicho trabajo.

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”

M.Sc. Luis Francisco Franco Cabre



Guatemala, marzo del 2015

AGRADECIMIENTOS

Universidad de San Carlos de
Guatemala

Por permitir mi formación profesional

Centro de Estudios del Mar y
Acuicultura

Porque en sus aulas y pasillos aprendí
lo necesario para ser una profesional

Autoridad para el Manejo
Sustentable de la Cuenca del
Lago de Amatitlán

Por abrirme las puertas y brindarme su apoyo
para la realización de mi investigación

Licenciado Alan Herrera

Por su asesoría, tiempo, dedicación, conocimiento y
apoyo desinteresado

Licenciado Pablo González

Por las oportunidades que me ha dado y creer en mi
desarrollo profesional

Licenciada Jeannette de Noack y
al Ingeniero Estuardo Noack

Por ser un ejemplo de profesionalismo y buena
voluntad, inspirándome a seguir adelante

Licenciada Irene Franco

Por su dirección y tiempo dedicado al logro de mis
metas

DEDICATORIA

| | |
|---------------------------|--|
| A DIOS | El primer lugar en mi vida. Por su amor infinito, y respaldo en todo momento. |
| A MIS PADRES | Luis y Lisbeth, por ser mis guías, por su amor, cuidado, respaldo y por siempre creer en mí. |
| A MIS HERMANOS Y SOBRINOS | Tavo, Maggie, Adri, Luisito, Chiquis y Tavito por ser mis ejemplos y mi felicidad en todo momento. |
| AL AMOR DE MI VIDA | Chitio, por ser una luz en mi camino y su apoyo incondicional. |
| A MI ABUELITO | Gustavo, Por ser mi inspiración. |
| A MI FAMILIA | Por su cariño. |
| A MIS AMIGAS | Taty y Marilyn por su amistad y fidelidad |
| A MIS COMPAÑEROS | Por la unidad y el afecto durante la carrera. |
| A MI PAIS | Guatemala, el lugar que Dios escogió para mí. Por ser mi tierra, por darme tanto. |

RESUMEN

La planta de tratamiento de aguas residuales “La Cerra” fue construida y puesta en funcionamiento en el año 2005. Es de tipo terciario, busca remediar las aguas residuales procedentes del casco urbano de Villa Canales y eventualmente se bombea agua del río Villalobos. La planta es administrada desde su creación en el año 2005 por la Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca y el Lago de Amatitlán (AMSA).

Siendo el objetivo de la investigación conocer la eficiencia con la que opera la planta de tratamiento, se utilizaron como variables siete parámetros de calidad de agua: demanda bioquímica de oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO), fosfatos (PO_4^{-3}), nitrógeno total (N_{total}), sulfatos (PO_4^{-3}), sulfitos (PO_3^{-2}) y sólidos sedimentables (SS). Los cuales son principales indicadores del funcionamiento de una planta de tratamiento terciario, especialmente de biofiltros. Además, el cumplimiento de la normativa nacional; Reglamento de Descarga y Reuso de Aguas Residuales y de la Disposición de Lodos, Acuerdo Gubernativo 236-2006.

La información fue tomada de la base de datos de monitoreos realizados por AMSA en la planta de tratamiento durante el 2008 al 2013, en la época seca y lluviosa.

Se obtuvieron datos de 12 muestreos, y los resultados mostraron que la planta de tratamiento presenta diferencias en su eficiencia de acuerdo a la época, seca o lluviosa. Lo cual se demostró a través de un análisis de χ^2 y un análisis de varianza. Con una Prueba Múltiple de Medias Tukey se determinó que en la época seca la planta es más eficiente para tratar SS y en la época lluviosa SS, DQO y DBO.

El tratamiento primario es el más eficiente en la planta de tratamiento la Cerra, sin embargo se encontró que contribuye a la reducción en la concentración de los nutrientes, pero no lo esperado en los más importantes como el P- PO_4^{-3} , que generan condiciones de hiper-eutrofización en el lago, y otras moléculas como SO_4^{-3} , SO_3^{-2} .

La eficiencia no es afectada únicamente por factores ambientales sino operativos que tienen relación con el presupuesto y el personal responsable, debido a que en la época que se operó la bomba para alimentar el caudal de ingreso se tuvo la capacidad de tratar un volumen mayor pero la eficiencia disminuyó.

Con las concentraciones que se presentaban en el desfogue de la planta de tratamiento, se evaluó si cumplían o no con los límites permisibles para la descarga de aguas residuales a cuerpos de agua receptores, aplicando el artículo 20 y 21 del Acuerdo Gubernativo 236-2006. Por los resultados obtenidos, puede decirse que la planta de tratamiento sí contribuye a la mejora de la calidad del agua del efluente del río Villalobos próximo a llegar al lago, en los parámetros estudiados.

ABSTRACT

Wastewater treatment plant La Cerra was build and put into operation in 2005, is tertiary type treatment, it seeks to remedy wastewater from Villa Canales and eventually pumped from Villalobos river. La Cerra is managed since its creation by the Authority for Sustainable Management of Amatitlán Lake Basin (ASMA).

Being the aim of this research to know the efficiency with the treatment plant operates, seven water quality parameters were used as variables: biochemical oxygen demand (BOD), chemical oxygen demand (COD), orthophosphate (PO_4^{-3}), total nitrogen (Ntotal), sulfates (PO_4^{-3}), sulfites (PO_3^{-2}) and settleable solids (SS). Which are key indicators of the performance of a tertiary treatment plant, especially biofilters. In addition, compliance with national regulations were determined; Governmental Agreement 236-2006, *Reglamento de Descarga y Reuso de Aguas Residuales y de la Disposición de Lodos*.

The information was taken from the AMSA database of monitoring, during 2008 to 2013, in warm and rainy seasons. Data from 12 samples were obtained, and the results showed that the treatment plant has differences in efficiency according to the season, warm or rainy. Through which χ^2 analysis and analysis of variance showed. Using Tukey's Test was determined that in the warm season the plant is most efficient to treat SS and in the rainy season SS, COD and BOD as they are statistically equal.

Primary treatment is the most efficient in La Cerra, however was found that contributes to the reduction in the concentration of nutrients, but not as is expected in P-PO_4^{-3} that generates hyper-eutrophication in the lake, and other molecules as SO_4^{-3} and SO_3^{-2} .

Efficiency is not affected only by environmental but operational factors that are related to the budget of ASMA, and the responsible personnel, because at the time the pump were operated to feed the income flow, bigger volume was treated but the efficiency decreased.

With the concentrations presented in the water output were evaluated if concentrations of the treated water accomplish the permissible limits for wastewater discharge to receiving water bodies, applying Article 20 and 21 of Governmental Agreement 236-2006. Results shows that the treatment plant do contribute to the improvement of water quality of the effluent of Villalobos river next to the lake, in the parameters studied.

ÍNDICE DE CONTENIDO

| | |
|---|----|
| 1. INTRODUCCIÓN | 1 |
| 2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA | 3 |
| 3. MARCO TEÓRICO | 4 |
| 3.1 Marco Referencial | 4 |
| 3.1.1 Aguas residuales | 4 |
| 3.1.1.1. Planta de tratamiento de Aguas Residuales | 4 |
| 3.1.1.1.1. Eficiencia de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales | 4 |
| 3.2. Marco conceptual | 10 |
| 3.2.1. Conceptos relacionados, basados en el Acuerdo 236-2006 “Reglamento de las Descargas y Reuso de Aguas Residuales y de la Disposición de Lodos”: | 9 |
| 3.2.2. Lago de Amatitlán | 11 |
| 3.2.3. Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca de Lago de Amatitlán -AMSA- | 11 |
| 3.2.4. Planta de Tratamiento de Aguas Residuales –PTAR- “La Cerra” | 12 |
| 3.2.5. Marco Legal | 17 |
| 4. OBJETIVOS | 19 |
| 4.1. Objetivo general | 19 |
| 4.2. Objetivos específicos | 19 |
| 5. HIPÓTESIS | 20 |
| 6. METODOLOGÍA | 21 |
| 6.1. Ubicación geográfica | 21 |
| 6.2. Definición de variables | 22 |
| 6.2.1. Variables dependientes | 22 |
| 6.2.1.1. Eficiencia | 22 |
| 6.2.2. Variables independientes | 22 |
| 6.2.3. Recolección de información | 23 |
| 6.3. Medición de la eficiencia | 23 |
| 6.4. Análisis de eficiencia parcial a través del tiempo | 23 |
| 6.5. Verificación de cumplimiento con el normas nacionales e internacionales | 24 |
| 7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 25 |
| 7.1. Eficiencia | 26 |

| | |
|--|----|
| 7.1.1. Eficiencia de remediación del contenido de demanda química de oxígeno (mg/l) en el agua tratada | 27 |
| 7.1.2. Eficiencia en la remediación del contenido de demanda bioquímica de oxígeno (mg/l) en el agua tratada | 28 |
| 7.1.3. Eficiencia en remediación del contenido de nitrógeno total (mg/l) en el agua tratada | 29 |
| 7.1.4. Eficiencia en remediación del contenido de fosfato (mg/l) en el agua tratada | 30 |
| 7.1.5. Eficiencia en remediación del contenido de sulfato (mg/l) en el agua tratada | 31 |
| 7.1.6. Eficiencia en remediación del contenido de sulfito (mg/l) en el agua tratada | 32 |
| 7.1.7. Eficiencia en el tratamiento de los sólidos en suspensión | 33 |
| 7.2. Cumplimiento de las normas nacionales | 35 |
| 8. CONCLUSIONES | 38 |
| 9. RECOMENDACIONES | 39 |
| 10. BIBLIOGRAFÍA | 40 |
| 11. ANEXOS | 41 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura No. 1 Planta de Tratamiento de Aguas Residuales, La Cerra | 13 |
| Figura No. 2 Canales de la planta de tratamiento La Cerra | 14 |
| Figura No. 3 Lagunas Anaeróbicas de la planta de tratamiento La Cerra | 15 |
| Figura No. 4 Biofiltros de la planta de tratamiento La Cerra | 16 |
| Figura No. 5 Diagrama de flujo Planta de Tratamiento de Aguas Residuales La Cerra, Villacanales, Guatemala | 17 |
| Figura No. 6 Ubicación de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales La Cerra | 21 |
| Figura No. 7 Eficiencia en DQO de la planta de tratamiento de aguas residuales La Cerra | 28 |
| Figura No. 8 Eficiencia en DBO de la planta de tratamiento de aguas residuales La Cerra | 29 |
| Figura No. 9 Eficiencia en la remediación del N_T de la planta de tratamiento de aguas residuales La Cerra del año 2008 al 2013 | 30 |
| Figura No. 10 Eficiencia en la remediación del PO_4 de la planta de tratamiento de aguas residuales La Cerra del año 2008 al 2013 | 31 |
| Figura No. 11 Eficiencia en la remediación del SO_4^{-3} de la planta de tratamiento de aguas residuales La Cerra del año 2008 al 2013 | 32 |
| Figura No. 12 Eficiencia en la remediación del SO_3^{-2} de la planta de tratamiento de aguas residuales La Cerra del año 2008 al 2013 | 33 |
| Figura No. 13 Eficiencia en el tratamiento SS de la planta de tratamiento de aguas residuales La Cerra | 34 |
| Figura No. 14 Estado Politrófico del Lago de Amatitlán | 37 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla No. 1 Límites Máximos permisibles para descargas de aguas residuales a cuerpos receptores | 6 |
| Tabla No. 2 Artículo 17. Modelo de Reducción Progresiva de Cargas de Demanda Bioquímica de Oxígeno | 7 |
| Tabla No. 3 Límite máximos permisibles según el Acuerdo Gubernativo 236-2006, Artículo 20 | 18 |
| Tabla No. 4 Parámetros que se incluyen en el monitoreo de la planta de tratamiento La Cerra. | 22 |
| Tabla No. 5 Calidad de Agua y Eficiencia La Cerra 2008-2013 | 25 |
| Tabla No. 6 Eficiencia de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales La Cerra | 26 |
| Tabla No. 7 χ^2 Tabla de Contingencia para Prueba de Independencia | 27 |
| Tabla No. 8 Cumplimiento del N_T según el “Reglamento de Descargas y Reuso de Aguas Residuales y de la Disposición de Lodos” Acuerdo Gubernativo 236-2006 | 35 |
| Tabla No. 9 Cumplimiento de DBO según el “Reglamento de Descargas y Reuso de Aguas Residuales y de la Disposición de Lodos” Acuerdo Gubernativo 236-2006. | 36 |

1. INTRODUCCIÓN

Guatemala es un país rico en recursos naturales, importante por ser productor de agua. Posee 3 vertientes: Pacífico, Mar Caribe y Golfo de México. Expresadas en 38 cuencas fluviales, 194 cuerpos de agua continentales, a su vez divididos en 7 lagos, 49 lagunas, 109 lagunetas, 19 lagunas costeras, 3 lagunas temporales y 7 embalses distribuidos en 18 de los 22 departamentos del país (Cordero, M. 2013).

Entre ellos el lago de Amatitlán, que posee 15.2 km² de área, su profundidad máxima es de 33 m y su profundidad media es 18 m (AMSA). Es un pequeño cuerpo de agua, que fue una fuente importante de abastecimiento de agua para consumo humano hasta los años 80. En la actualidad se encuentra eutrofizado (Cabrera, D. 2011) debido a la contaminación que se deposita en él, a través de la escorrentía y principalmente de las aguas residuales especiales de origen industrial y ordinarias de origen doméstico de los 14 municipios ubicados en su cuenca.

En Guatemala, la cobertura de saneamiento de aguas residuales alcanza el 60% de la población total, es decir que aproximadamente 6,831,202 de los 11,385,337 habitantes según el censo 2002 (INE, 2002) poseen dicho servicio y para el 2010 la cobertura fue de 86% de agua y 57% de saneamiento (CEPAL). Para prevenir la contaminación por descargas de aguas residuales, la medida más importante es evitar el vertido de ellas a los cuerpos receptores sin el tratamiento adecuado. Sin embargo es un trabajo que requiere una alta inversión y esfuerzo, por lo que no ha sido una prioridad para los gobiernos. Mientras tanto la población aumenta aceleradamente, y los residuos sólidos y líquidos también.

La planta de tratamiento de aguas residuales La Cerra, ubicada en el kilómetro 1, Ruta de Villa Canales al Jocotillo, Playa de Oro, fue diseñada para tratar la tercera parte del caudal que conduce el río Villalobos y las aguas residuales generadas por los habitantes de Villa Canales. Es de tipo lagunaje y biofiltros, en ella se desarrolla tratamiento preliminar para acondicionar el agua residual antes del tratamiento primario, en donde se realiza la remoción de sólidos orgánicos e inorgánicos sedimentables.

El tratamiento secundario en el que el agua residual es sometida a la acción de los microorganismos que intervienen para transformar la materia orgánica biodegradable y el terciario en donde se utiliza fito-depuración para eliminar patógenos, nitrificación, reducción de nutrientes, clarificación y oxigenación. La Cerra es operada por la Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca del Lago de Amatitlán desde su creación (AMSA).

Con este estudio se obtuvo la eficiencia parcial con la que ha trabajado la planta de tratamiento del año 2008 al 2013, durante la época seca y lluviosa, tomando en cuenta demanda bioquímica de oxígeno en el agua, demanda química de oxígeno, contenido de ortofosfatos, nitritos, nitratos disueltos en el agua y la concentración de sólidos suspendidos. También se indagó en la calidad físico-química que muestra el agua que ingresa del río Villalobos (afluente) y fue comparada con el agua tratada (efluente) tomando como criterio de evaluación, los parámetros de calidad de agua físico-químicos indicados por AMSA.

Los parámetros evaluados fueron comparados con límites permisibles del “Reglamento de las Descargas y Reuso de Aguas Residuales y de la Disposición de Lodos”, emitido por el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, Acuerdo Gubernativo 236-2006.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El crecimiento exponencial de la población de Villa Nueva; por el cual actualmente hay 3,121 habitantes por kilómetro cuadrado (Municipalidad de Villa Nueva, 2012); la tala de árboles, anualmente 0.04 hectáreas en el Municipio de Villa Canales (IARNA, 2010); el mal uso del agua y de la tierra, el crecimiento y la expansión de la frontera industrial sin ordenamiento territorial, han contribuido para que el Lago de Amatitlán se haya convertido en un cuerpo de agua receptor de una elevada cantidad de descargas de aguas residuales, de las cuales su mayoría se conducen a través de la red de ríos tributarios del Villalobos. Por lo regular las descargas contienen de forma disuelta: productos farmacéuticos, aceite, derivados del petróleo, pesticidas, fungicidas, y grasas (Reyna, I. 1998).

De las aguas residuales que se generan en la cuenca, no se conoce la proporción de las que están siendo tratadas y remediadas antes de llegar al lago, sin embargo es la planta de tratamiento de aguas residuales La Cerra, ubicada en la rivera del mismo río la que hace el mayor aporte pues fue diseñada para tratar el 30% de las aguas del río Villalobos.

La planta de tratamiento la Cerra en distintos momentos no ha tratado el caudal para el que fue diseñada y se percibe que la eficiencia ha sufrido cambios por diversas causas, sin embargo los datos existentes no habían sido analizados para demostrar cómo ha variado la eficiencia a través del tiempo, por lo que se hizo necesario obtener la eficiencia de la planta de tratamiento primordialmente en aquellos parámetros indicadores para el tratamiento terciario. De igual forma poder comprobar si la descarga cumple con los límites máximos permisibles indicados por las normas nacionales establecidas.

3. MARCO TEÓRICO

3.1 Marco Referencial

3.1.1. Aguas residuales

Son aquellas a las que se les ha dado un uso doméstico, comercial, industrial y que debido a ello sus cualidades han sido modificadas. Están clasificadas en ordinarias y especiales, en dependencia a su origen, siendo este doméstico o industrial. También se denominan las aguas residuales en base al contenido de contaminantes que portan. Aguas negras, grises y negras industriales (Reglamento 236-2006).

Para tratar dichas aguas se conforman plantas de tratamiento de aguas residuales, que son objeto de monitoreo con frecuencia, debido a la importancia que tienen para reducir la contaminación que va a ser descargada a los cuerpos de agua (León, G. 1995).

3.1.2. Planta de tratamiento de Aguas Residuales

Conjunto de obras, instalaciones y procesos para tratar las aguas residuales (RAS, 2000).

3.1.2.1. Eficiencia de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales

La eficiencia de las plantas de tratamiento se define como la reducción porcentual de indicadores apropiados, considerados en forma acumulativa o de determinadas sustancias. Para estimar la reducción se establece el indicador específico, una relación entre la carga que fluye a la planta y la que corresponde en el flujo de salida, es decir del agua cruda al agua tratada. La eficiencia total de un sistema convencional debe estar en el rango de 70% a 90%. Y en algunos casos se dice que de 80% a 95%, lo cual es más ambicioso. Para medir la eficiencia a través del tiempo es necesario realizar una serie de muestreos de las diferentes épocas del año, idealmente de la época seca y de la época lluviosa (AMSA, 2008).

Según estudios realizados, en los que se ha determinado la eficacia de las plantas de tratamiento de agua residual en Guatemala, los parámetros que sirven para estimar la contaminación y remediación de las aguas residuales son sólidos en suspensión, materia

orgánica biodegradable, patógenos, nutrientes, contaminantes prioritarios, materia orgánica refractaria, metales pesados y sólidos orgánicos disueltos (Urzúa, F. 2008).

A diferencia de ello, para la caracterización de los desagües y residuos industriales, se han utilizado los siguientes parámetros: (a) demanda bioquímica de oxígeno, (b) reacción de la demanda bioquímica de oxígeno, (c) formulación de la demanda bioquímica de oxígeno, (d) efectos de la temperatura sobre la demanda bioquímica de oxígeno, (e) factores que afectan la demanda bioquímica de oxígeno, (f) medición de los desechos industriales. Tomando también como referencia los más importantes de transferencia de oxígeno, aireación y tratamiento biológico (Muralles, F. 2004).

AMSA monitorea los siguientes parámetros en las plantas de tratamiento terciario en el afluente y el efluente: temperatura, conductividad, salinidad, oxígeno disuelto, saturación, potencial de hidrogeno, demanda bioquímica de oxígeno, demanda química de oxígeno, nitrógeno total, nitritos, nitratos, amonio, ortofosfato, sulfitos, sulfatos, color, turbidez, dureza, sólidos suspendidos, sólidos sedimentables y caudal, utilizando las dimensionales que se presentan en el “Reglamento de las Descargas y Reuso de Aguas Residuales y de la Disposición de Lodos”.

De ellos los principales son: demanda bioquímica de oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO), nitrógeno total (N_T), ortofosfatos (PO_4^{-3}), sulfitos (SO_3^{-2}), sulfatos (SO_4^{-3}), sólidos sedimentables (SS) y para conocer la eficiencia el caudal (Q).

Tabla No. 1 Límites Máximos permisibles para descargas de aguas residuales a cuerpos receptores

| Fecha máxima de cumplimiento | | | Dos de mayo de dos mil once | Dos de mayo de dos mil quince | Dos de mayo de dos mil veinte | Dos de mayo de dos mil veinticuatro |
|------------------------------|--|----------------------------|-----------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|
| Parámetros | Dimensionales | Valores inicial | Etapa | | | |
| | | | Uno | Dos | Tres | Cuatro |
| Temperatura | Grados Celsius | TCR +/- 7 | TCR +/- 7 | TCR +/- 7 | TCR +/- 7 | TCR +/- 7 |
| Grasas y aceites | Miligramos por litro | 1,500.00 | 100.00 | 50.00 | 25.00 | 10.00 |
| Materia flotante | Ausencia/presencia | Presente | Ausente | Ausente | Ausente | Ausente |
| Sólidos suspendidos | Miligramos por litro | 3,500.00 | 600.00 | 400.00 | 150.00 | 100.00 |
| Nitrógeno total | Miligramos por litro | 1,400.00 | 100.00 | 50.00 | 25.00 | 20.00 |
| Fósforo total | Miligramos por litro | 700.00 | 75.00 | 30.00 | 15.00 | 10.00 |
| Potencial de hidrógeno | Unidades de potencial de hidrógeno | 6 a 9 | 6 a 9 | 6 a 9 | 6 a 9 | 6 a 9 |
| Coliformes fecales | Número más probable en cien mililitros | 1×10^8 | 1×10^6 | 1×10^5 | 1×10^4 | 1×10^4 |
| Arsénico | Miligramos por litro | 1.00 | 0.5 | 0.1 | 0.1 | 0.1 |
| Cadmio | Miligramos por litro | 1.00 | 0.4 | 0.1 | 0.1 | 0.1 |
| Cianuro total | Miligramos por litro | 6.00 | 3.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| Cobre | Miligramos por litro | 4.00 | 4.00 | 3.00 | 3.00 | 3.00 |
| Cromo hexavalente | Miligramos por litro | 1.00 | 0.5 | 0.1 | 0.1 | 0.1 |
| Mercurio | Miligramos por litro | 0.1 | 0.1 | 0.02 | 0.02 | 0.01 |
| Níquel | Miligramos por litro | 6.00 | 4.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 |
| Plomo | Miligramos por litro | 4.00 | 1.00 | 0.4 | 0.4 | 0.4 |
| Zinc | Miligramos por litro | 10.00 | 10.00 | 10.00 | 10.00 | 10.00 |
| Color | Unidades platino cobalto | 1,500.00 | 1,300.00 | 1,000.00 | 750.00 | 500.00 |

TCR = temperatura del cuerpo receptor, en grados Celsius.

Artículo 20, “Reglamento de Descarga y Reuso de Aguas Residuales y de la Disposición de Sólidos” Acuerdo Gubernativo 236-2006 (2006).

La Tabla No. 1 también muestra la fecha máxima de cumplimiento de los límites permisibles que se extienden al dos de mayo de dos mil once, dos de mayo de dos mil quince, dos de mayo de dos mil veinte y dos de mayo de dos mil veinticuatro.

En el Artículo 17 se muestra el Modelo de Reducción Progresiva de Cargas de Demanda Bioquímica de Oxígeno, el cual se convierte a demanda química de oxígeno (Tabla 2).

Tabla No. 2 Artículo 17. Modelo de Reducción Progresiva de Cargas de Demanda Bioquímica de Oxígeno

| Etapa | | | | | | Uno | | | | | |
|-------------------------------------|--|-----------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|--|--|--|--|--|
| Fecha máxima de cumplimiento | | | | | | 2 de mayo de 2011 | | | | | |
| Duración, años | | | | | | 5.00 | | | | | |
| Carga, kilogramos por día | | $3000 \leq EG < 6000$ | $6000 \leq EG < 12000$ | $12000 \leq EG < 25000$ | $25000 \leq EG < 50000$ | $50000 \leq EG < 250000$ | | | | | |
| Reducción porcentual | | 10.00 | 20.00 | 30.00 | 35.00 | 50.00 | | | | | |
| Etapa | | | | | | Dos | | | | | |
| Duración, años | | | | | | 4.00 | | | | | |
| Fecha máxima de cumplimiento | | | | | | 2 de mayo de 2015 | | | | | |
| Carga, kilogramos por día | | $3000 \leq EG < 5500$ | $5500 \leq EG < 10000$ | $10000 \leq EG < 30000$ | $30000 \leq EG < 50000$ | $50000 \leq EG < 125000$ | | | | | |
| Reducción porcentual | | 10.00 | 20.00 | 40.00 | 45.00 | 50.00 | | | | | |

Artículo 20, “Reglamento de Descarga y Reuso de Aguas Residuales” Acuerdo Gubernativo 236-2006 (2006).

A continuación se presenta una descripción de los parámetros de calidad de agua que se monitorean según AMSA:

- **Temperatura:** es probablemente el factor más importante en los ecosistemas acuáticos y de manera directa o indirecta tiene relación con los fenómenos limnológicos, así como en la estabilidad de las masas de agua y sobre el metabolismo biótico. Es medida en centígrados (Arredondo, J. 1998).

- Conductividad: es una expresión numérica de la habilidad que tiene el agua para conducir una corriente eléctrica. Se expresa en micro Siemens por centímetro $\mu S/cm$, y se mide por medio de un conductivímetro (Arredondo, J. 1998).
- Salinidad: Es la cantidad de sales en solución, expresada como gramos por kilogramo de agua. Cuando todos los carbonatos y bicarbonatos se convierten a óxidos, los bromuros y yoduros se expresan como cloruros y toda la materia orgánica es completamente oxidada (Arredondo, J. 1998).
- Oxígeno disuelto (OD): Es el oxígeno que se encuentra en un cuerpo de agua, necesario para la respiración de los microorganismos aerobios, así como otras formas de vida. A medida que la concentración de OD aumenta, la velocidad de crecimiento microbiano también lo hace (Delgadillo, 2010).
- Potencial de hidrógeno (pH): Término que expresa la actividad del ion hidrógeno de una solución (Arredondo, J. 1998).
- Demanda química de oxígeno: Es medida indirecta del contenido de materia orgánica e inorgánica oxidable en aguas residuales, que se determina por la cantidad equivalente de oxígeno utilizado en la oxidación química (Acuerdo gubernativo No. 236-2006).
- Demanda bioquímica de oxígeno: Es la medida indirecta del contenido de materia orgánica en aguas residuales, que se determina por la cantidad de oxígeno utilizado en la oxidación bioquímica de la materia orgánica biodegradable durante un período de cinco días y una temperatura de veinte grados Celsius (Acuerdo gubernativo No. 236-2006).
- Nitrógeno total: El nitrógeno total es el determinado en el laboratorio, compuesto por nitrógeno amoniacal, más el nitrógeno orgánico y este está constituido por las formas de nitrógeno correspondientes al nitrato, nitrito y amonio (Sardiñas y Pérez, 2004).
- Amonio: Es un catión poliatómico cargado positivamente, de fórmula química NH_4^+ . Tiene un peso molecular de 18,04 y se forma mediante la protonación del amoníaco (NH_3). El ion resultante tiene un pKa de 9,25 (Arredondo, J. 1998).
- Ortofosfato: Los fosfatos más avanzados son los ortofosfatos (Con el prefijo de "orto" se suelen denominar los ácidos más hidratados). Contienen el anión PO_4^{3-} . Los ortofosfatos se encuentran ampliamente distribuidos en la naturaleza. También son

compuestos indispensables en la formulación de los abonos minerales. Su ausencia limita el crecimiento de las plantas. Habitualmente en agricultura se utilizan abonos ricos en fosfato para inducir y fortalecer la floración (Arredondo, J. 1998).

- Color: Es la capacidad que tiene el agua de absorber ciertas radiaciones del espectro visible.
- Turbidez: La turbidez del agua es producida por materias en suspensión, como arcilla, materias orgánicas e inorgánicas finamente diluidas, compuestos orgánicos coloreados, plancton y otros microorganismos. Es una expresión de la propiedad óptica que origina que la luz se disperse y absorba en vez de transmitirse en línea recta a través de la muestra (Hanna Inst., 2002).
- Sólidos suspendidos totales (SST): el peso del material seco retenido después de pasar la muestra a través de un filtro muy fino, es la materia particulada total. Esta variable se puede determinar restando los sólidos disueltos de los sólidos totales (Arredondo, J. 1998).
- Sólidos sedimentables: se consideran así a aquellos sólidos que sedimentan en el fondo de un recipiente de forma cónica, como un cono de Imhoff en un tiempo de 60 minutos. Esto se utiliza para conocer el volumen y densidad que se obtendrán en la decantación primaria del agua residual. Pueden ser expresados en unidades de ml/l o mg/l (Arredondo, J. 1998).
- Dureza: concentración de compuestos minerales que hay en una determinada cantidad de agua, en particular sales de magnesio y calcio. El agua denominada comúnmente como “dura” tiene una elevada concentración de dichas sales y el agua “blanda” las contiene en muy poca cantidad.
- Sulfatos: Son las sales o los ésteres del ácido sulfúrico. Contienen como unidad común un átomo de azufre en el centro de un tetraedro formado por cuatro átomos de oxígeno.
- Sulfitos: Son las sales o ésteres del hipotético ácido sulfuroso H_2SO_3 . Las sales de sulfito contienen el anión SO_3^{2-} .
- Caudal (Q): Es el volumen de agua que circula por el cauce de un río en un lugar y tiempo determinados. Se refiere fundamentalmente al volumen hidráulico de la escorrentía de una cuenca hidrográfica concentrada en el río principal de la misma.

3.2. Marco conceptual

3.2.1. Conceptos relacionados, basados en el Acuerdo 236-2006 “Reglamento de las Descargas y Reuso de Aguas Residuales y de la Disposición de Lodos”:

- Afluente: El agua captada por un ente generador.
- Caracterización de una muestra: La determinación de características físicas, químicas y biológicas de las aguas residuales, aguas para reuso o lodos.
- Caracterización de un afluente o efluente: la determinación de características físicas, químicas y biológicas de las aguas.
- Carga: El resultado de multiplicar el caudal por la concentración determinados en un efluente y expresada en kilogramos por día.
- Caudal: El volumen de agua por unidad de tiempo.
- Cuerpo receptor: Embalse natural, lago, laguna, río, quebrada, manantial, humedal, estuario, estero, manglar, pantano, aguas costeras y aguas subterráneas donde se descargan aguas residuales.
- Efluente de aguas residuales: las aguas residuales descargadas por un ente generador.
- Entes generadores: La persona individual o jurídica, pública o privada, responsable de generar o administrar aguas residuales de tipo especial, ordinario o mezcla de ambas, y cuyo efluente final se descarga a un cuerpo receptor.
- Entes generadores existentes: Los entes generadores establecidos previo a la vigencia del presente Reglamento.
- Límite máximo permisible: El valor asignado a un parámetro, el cual no debe ser excedido en las etapas correspondientes para aguas residuales y en aguas para reuso y lodos.
- Lodos: Los sólidos con un contenido variable de humedad provenientes del tratamiento de aguas residuales.
- Meta de cumplimiento: La determinación numérica de los valores que deben alcanzarse en la descarga de aguas residuales al final de cada etapa de cumplimiento. En el caso de los entes generadores nuevos y de las personas nuevas que descargan al alcantarillado público, al iniciar operaciones.

- Monitoreo: El proceso mediante el cual se obtienen, interpretan y evalúan los resultados de una o varias muestras, con una frecuencia de tiempo determinada, para establecer el comportamiento de los valores de los parámetros de efluentes aguas para reuso y lodos.
- Muestra: La parte representativa, a analizar, de las aguas residuales, aguas para reuso o lodos.
- Parámetro: La variable que identifica una característica de las aguas residuales, aguas para reuso o lodos, asignándole un valor numérico.
- Reuso: el aprovechamiento de un efluente, tratado o no.

3.2.2. Lago de Amatitlán

Es un cuerpo de agua situado a pocos kilómetros de la ciudad capital de Guatemala, su cuenca abarca 14 municipios, entre los cuales esta Amatitlán, San Miguel Petapa, Villa Canales, Villa Nueva, Fraijanes. Para los años 80 aún se obtenía agua del lago para consumo humano pero luego de ello el 25% de las industria del país se ubicó en dicha cuenca y con el aumento de la población las condiciones cambiaron drásticamente, como muestra de ello en el año 1800 el lago tenía una profundidad promedio de 33 metros, para el año 1996 esa profundidad se redujo a 18 (AMSA, 2008).

3.2.3. Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca de Lago de Amatitlán

-AMSA-

AMSA es una institución gubernamental creada en el año 1996, dependiente estrictamente del Gobierno central de Guatemala. Recibe su financiación del presupuesto nacional y para algunos proyectos depende de la cooperación internacional (Decreto No. 64-96).

Debido a su naturaleza, AMSA, fue creada según Decreto No. 64-96 del Congreso de la República de Guatemala el 18 de septiembre de 1996, con el propósito de que existiese una autoridad competente y encargada del resguardo y recuperación del Lago de Amatitlán, mediante la descontaminación y el uso racional de los recursos renovables y no renovables de las zonas de recarga de acuíferos y zonas boscosas (AMSA, 2005).

Es también la encargada de planificar, coordinar y ejecutar todas las acciones y medidas que sean necesarias para recuperar el ecosistema de la cuenca y mejorar la calidad de vida de sus habitantes. La meta final de AMSA es “Devolverle a la humanidad el Lago de Amatitlán en condiciones adecuadas, para uso y disfrute sostenible” (AMSA, 2008).

Dentro de sus atribuciones y del PLANDEAMAT, AMSA tiene a su cargo el manejo de 6 plantas de tratamiento, de las cuales la más importante es La Cerra.

3.2.4. Planta de Tratamiento de Aguas Residuales –PTAR- “La Cerra”

La planta de tratamiento de aguas residuales La Cerra está ubicada en el kilómetro 1, Ruta de Villa Canales al Jocotillo, Playa de Oro, fue construida y desarrollada en los años 2005, para tratar la tercera parte del caudal que conduce el río Villalobos y las aguas residuales generadas por los habitantes de Villa Canales. El efluente de la planta ya tratado se descarga finalmente al río Villalobos.

La planta es del tipo lagunaje y biofiltros (Figura No. 1). Una planta de tratamiento es un dispositivo que sirve para situar en el lugar más adecuado, un taller en el que los procesos naturales de descomposición de la materia orgánica muerta se controlan y aceleran. En otras palabras, una planta de tratamiento es un conjunto de instalaciones y estructuras que se utilizan para efectuar la serie de procesos necesarios para tratar las aguas negras. Las estructuras varían dependiendo de la calidad de efluente a tratar y de la calidad de agua que se desee obtener. Debe contar con un sistema de iluminación para la operación durante la noche (AMSA, 2005).



Figura No. 1 Tratamiento secundario en Planta de Tratamiento de Aguas Residuales, La Cerra
(Trabajo de campo, 2014).

Tratamientos que se desarrollan en la PTAR La Cerra

- Tratamiento Preliminar: consiste en el acondicionamiento del agua residual antes del tratamiento primario, el objetivo es separar aquellos constituyentes que puedan dañar, obstruir o interferir con los procesos subsecuentes. Cuenta entre sus estructuras con un canal de rejillas.
- Tratamiento Primario: El objetivo del tratamiento primario es la remoción de sólidos orgánicos e inorgánicos sedimentables, para disminuir la carga en el tratamiento biológico.

- Canal de rejillas: Su función es física y consiste en separar las partículas gruesas y flotantes que arrastran las aguas residuales tales como: bolsas, astillas, plásticos, telas, vegetales y basura en general. La Reja se instala en un canal contiguo a la tubería de entrada a la Planta, antes del desarenador y debe contar con un dispositivo que permita su movilización, cuando sea el caso tendrá una pasarela para que el operador efectúe su limpieza y escurran los residuos extraídos.

Los residuos retenidos en las rejillas se remueven diariamente con un rastrillo o cualquier otra herramienta adecuada, y con la frecuencia que sea necesaria para evitar que el aumento de pérdida de carga entre las rejillas ocasione un estancamiento de residuos, provocando aumento de la velocidad entre ellas y el

arrastré de algunos residuos que debieron ser retenidos en esta unidad. Estos residuos son depositados sobre la plataforma construida sobre el canal delante de la reja, dónde son lavados para quitar los restos de materia orgánica que provocan malos olores y atracción de vectores de enfermedades, para su posterior disposición final. Cuando se observa arena depositada en el fondo del canal, es extraída con una pala y depositada en el mismo sitio que los sólidos extraídos de la reja.

- Canal desarenador: Su función es separara las partículas gruesas, mayores de 0.2 mm, las cuales se depositan en el fondo del mismo. Este se utiliza principalmente en los sistemas de drenaje combinado (Figura No. 2).



Figura No. 2 Canales de la planta de tratamiento La Cerra (Trabajo de campo, 2014).

- Tratamiento Secundario: donde el agua residual es sometida a la acción de los microorganismos que intervienen para transformar la materia orgánica biodegradable.
 - Lagunas de estabilización: Son estanques excavados en el terreno, que al estar en contacto con el oxígeno del aire, favorecen el proceso de estabilización de la materia orgánica, esto es ayudado por el proceso de fotosíntesis propiciado por la insolación solar y favoreciendo la proliferación de algas. Los estanques están circulados por camellones formados por el propio material excavado, sus

taludes deben de ser permanentes y estables, libres de hierba y maleza. Los vientos tienen un papel importante, los mejores son los moderados que ejercen una acción mezcladora. Las lagunas, pueden construirse o funcionar en serie o paralelo, razón por la cual se prefiere la forma rectangular (Figura No. 3).



Figura No. 3 Lagunas Anaeróbicas de la planta de tratamiento La Cerra. (Trabajo de campo, 2014)

- Tratamiento Terciario o Avanzado: En este tipo de tratamiento puede ser utilizada la Fito-depuración, entendiéndose como tal, la reducción o eliminación de contaminantes de las aguas residuales, por medio de una serie de complejos procesos físico-químicos y biológicos en los que participan las plantas del propio ecosistema acuático, aquí se dan los procesos de depuración siguientes: eliminación de patógenos, nitrificación, reducción de nutrientes, clarificación y oxigenación (AMSA, 2005).
 - Biofiltros: Son canales trapezoidales (en paralelo o en serie) dentro de los cuales se realiza un tratamiento terciario de las aguas residuales. Estos fitosistemas acuáticos forman parte de los llamados Sistemas Blandos de Tratamiento de Aguas Residuales (humedales artificiales o filtros verdes) aquí las plantas son la base del proceso ya que degradan, absorben y asimilan en sus

tejidos los contaminantes, pero también proporcionan una extensa superficie donde se posibilita el crecimiento bacteriano y se retienen los elementos sólidos en suspensión (Figura No. 4). Las plantas de tipo emergente (macrofitas acuáticas en suspensión o flotación) se cultivan en lagunas, tanques o canales poco profundos por los que se hace circular el agua residual (biofiltros). Su característica más notable es la remoción de nutrientes (AMSA, 2005).

La macrófita utilizada en la Cerra es la *Eichhornia crassipes*, conocida como jacinto de agua, su cualidad más importante es que tiene la capacidad de absorber nutrientes, especialmente el nitrógeno, el fósforo y el potasio, debido a ello ha sido ampliamente utilizada, sin embargo por su rápido crecimiento llega a ser considerada como maleza (FAO, 2012).



Figura No. 4 Biofiltros de la planta de tratamiento La Cerra (Trabajo de campo (2014).

Como se puede observar en la Figura 5, La Cerra fue diseñada para tratar aguas provenientes del río Villalobos a través de un sistema de bombeo, y un canal en donde ingresan aguas del casco urbano de Villacanales, por lo cual al ingresar a la planta estas aguas se mezclan y son tratadas.

Regularmente el bombeo se utiliza únicamente cuando hay presupuesto o las bombas no están averiadas, sin embargo la mayoría del tiempo lo están, y la disponibilidad financiera es escasa (Trabajo de campo, 2014).

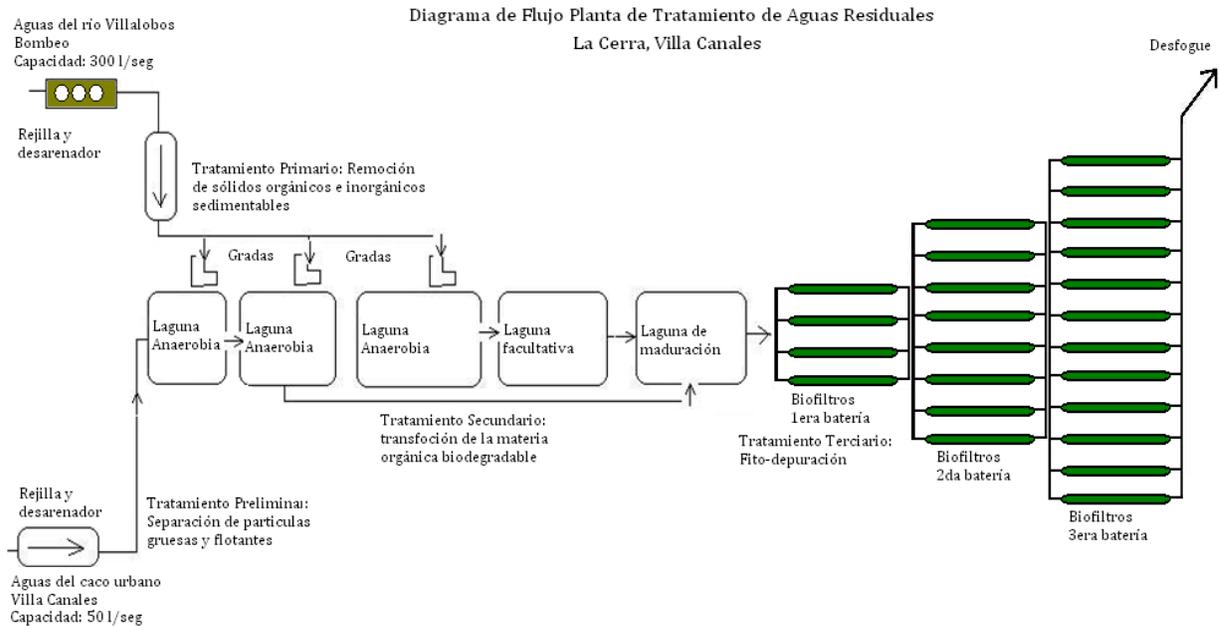


Figura No. 5 Diagrama de flujo Planta de Tratamiento de Aguas Residuales La Cerra, Villacanales, Guatemala (AMSA, 2008).

3.2.5. Marco Legal

El “Reglamento de las Descargas y Reuso de Aguas Residuales y de la Disposición de Lodos” es lo que rige las descargas en todo el país. La calidad del afluente y efluente de las plantas de tratamiento es regulada en base al Acuerdo Gubernativo 236-2006 que dio vida a dicho reglamento. El acuerdo entró en vigencia el 16 de mayo de 2,006. El objetivo es establecer los criterios y requisitos generales que deben cumplirse tanto en la descarga y reuso de aguas residuales como en la disposición de lodos como en el caso del Artículo 20 que indica los límites máximos permisibles para la descarga de aguas residuales a cuerpos receptores (Tabla No.3).

Tabla No. 3 Artículo 20, Acuerdo Gubernativo 236-2006

| Parámetro de Calidad del Agua | Límites Máximos permisibles según Acuerdo Gubernativo 236-2006 (Artículo 20) Descarga aguas residuales a cuerpos receptores |
|------------------------------------|--|
| SS | NER |
| N_T | 50 mg/l |
| PO₄ | NER |
| P_T | NER |
| DQO | NER |
| DBO | NER |
| SO₄⁻³ | NER |
| SO₃⁻² | NER |

NER= No existen referencias.

Reglamento de Descarga y Reuso de Aguas Residuales (2006).

4. OBJETIVOS

4.1. Objetivo general

Evaluar la eficiencia de la planta de tratamiento de aguas residuales “La Cerra” del año 2008 al 2013.

4.2. Objetivos específicos

- Determinar la eficiencia de la planta de tratamiento La Cerra en sus parámetros indicadores: DBO, DQO, $P-PO_4^{-3}$, N_{total} , SO_4^{-3} , SO_3^{-2} y SS.
- Establecer el comportamiento de la eficiencia de la planta de tratamiento en la época seca y época lluviosa.
- Indicar el cumplimiento de los límites máximos permisibles de calidad del agua del año 2008 al 2013 según el “Reglamento de las Descargas y Reuso de Aguas Residuales y de la Disposición de Lodos”, Acuerdo Gubernativo No. 236-2006.

5. HIPÓTESIS

Para conocer si la planta de tratamiento es funcional se plantea que al obtener la eficiencia se determinará que hipótesis nula es aprobada siempre y cuando la eficiencia sea mayor o igual a 1.

H_0 : La planta de tratamiento de aguas residuales La Cerra presenta eficiencia.

H_1 : La planta de tratamiento de aguas residuales La Cerra no presenta eficiencia.

En base a ello se presenta la interrogante que pretende responder si las proporciones de eficiencia son mayores en la época seca o en la época lluviosa.

H_0 : La proporciones de la eficiencia en cada parámetro no dependen de la época.

H_1 : La proporciones de la eficiencia en cada parámetro si dependen de la época.

Sabiendo que se tuvieron siete parámetros de interés, se pudieron conocer cuáles de ellos presentan mayor eficiencia siendo estadísticamente iguales.

H_0 = Todos los parámetros tienen la misma eficiencia.

H_1 = Al menos 1 de los parámetros tienen diferente eficiencia.

6. METODOLOGÍA

6.1. Ubicación geográfica

La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales está ubicada en los Municipios de San Miguel Petapa y Villa Canales, Departamento de Guatemala, en la riberia del río Villalobos de la Cuenca del Lago de Amatitlán, se encuentra dentro de los límites de la zona tributaria de la cuenca sur de la divisoria de aguas, de la Vertiente del Pacífico. El efluente de la planta ya tratado se descarga finalmente al río Villalobos y en seguida al Lago de Amatitlán.

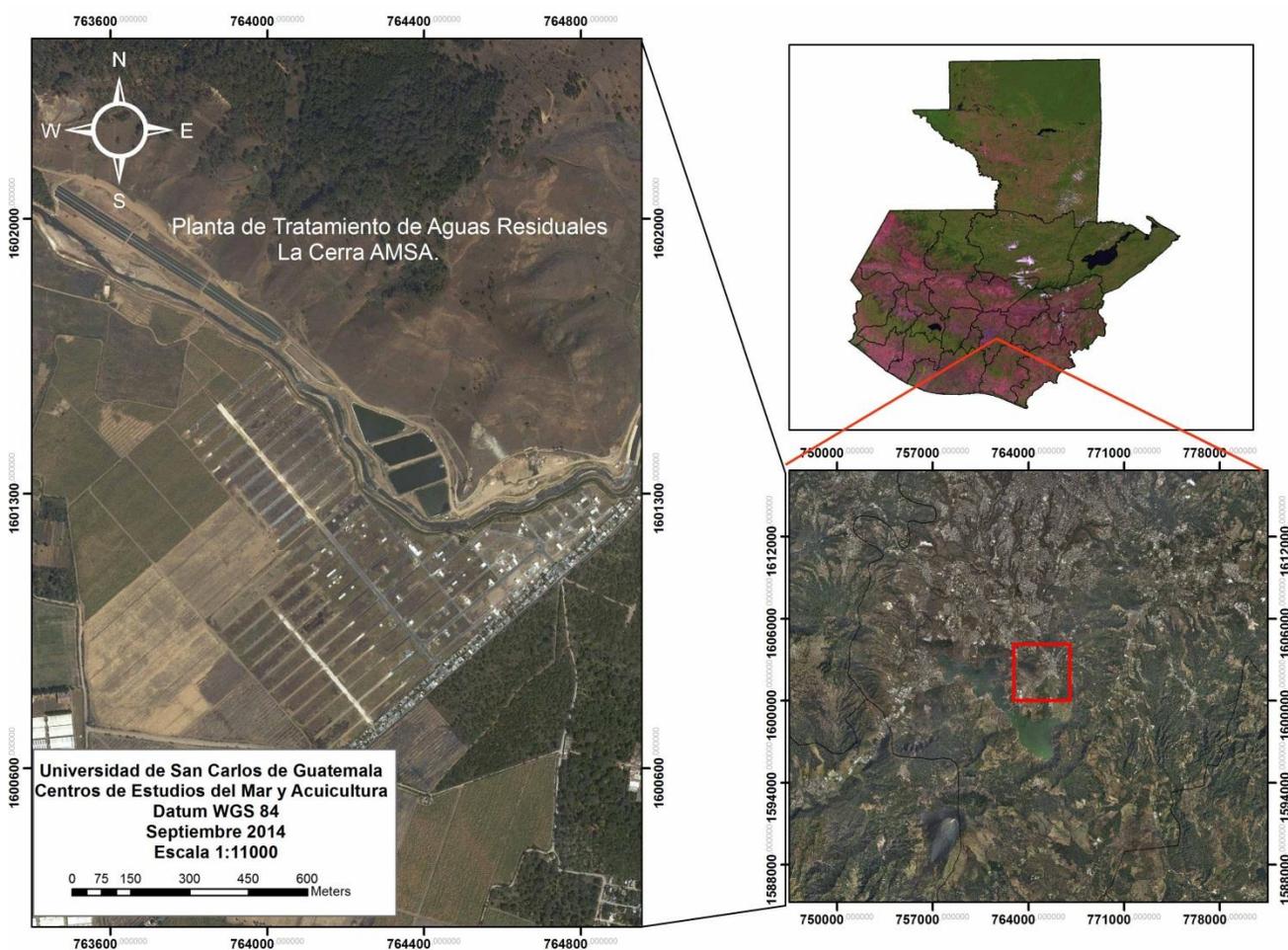


Figura No. 6 Ubicación de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales La Cerra. (Trabajo de campo, 2014)

6.2. Definición de variables

6.2.1. Variables dependientes

Las variables dependientes son las eficiencias parciales, ya que estas dependen de lo efectiva que sea la planta para tratar el agua, y de la concentración de cada uno de los parámetros de calidad del agua en el afluente, que está fuera del alcance de manejo antes de ingresar a la planta, la eficiencia depende del manejo interno y el funcionamiento de cada etapa de tratamiento en la planta.

6.2.1.1. Eficiencia

La eficiencia es la reducción porcentual de indicadores apropiados, puede medir de forma acumulativa o únicamente en donde se operen las cargas de interés, a la cual se le llama eficiencia parcial. En plantas de tratamiento terciario los parámetros de mayor interés son: DQO, DBO, N_{total} , PO_4^{-3} , SO_4^{-3} , SO_3^{-2} y SS.

6.2.2. Variables independientes

Como variable independiente se muestra la calidad del agua que ingresa a la planta de tratamiento, aguas crudas que, no han sido parte de algún proceso de saneamiento. Para obtener la eficiencia a través del tiempo es necesario obtener el valor de cada uno de los parámetros físico-químicos y microbiológicos de interés, tomados del 2008 a 2013 por AMSA.

Tabla No. 4 Parámetros evaluados en el afluente, que se incluyen en el monitoreo de la planta de tratamiento La Cerra

| Parámetro | Dimensional |
|--------------------------------------|-----------------------------|
| DQO | Miligramos por litro (mg/l) |
| DBO₅ | Miligramos por litro (mg/l) |
| N_{total} | Miligramos por litro (mg/l) |
| SO₄⁻³ | Miligramos por litro (mg/l) |
| SO₃⁻² | Miligramos por litro (mg/l) |
| P-PO₄⁻³ | Miligramos por litro (mg/l) |
| SS | Miligramos por litro (mg/l) |
| Q | Litros por segundo (l/seg) |

AMSA (2014)

6.2.3. Recolección de información

Los datos históricos utilizados se obtuvieron de AMSA, los datos del año 2008 al 2013 no estaban disponibles por razones internas. Se realizó la respectiva solicitud para proveer los datos a la Dirección de AMSA, quien por medio de la división de Calidad Ambiental, proveyó los datos a través de tablas en un software Excel®.

6.3. Medición de la eficiencia

A partir de los datos obtenidos se calculó la eficiencia de los parámetros de importancia para plantas de tratamiento terciario. A través de la siguiente fórmula:

$$n = \frac{FZ - FA}{FZ} * 100$$

En donde:

n = Grado de eficiencia en %

FZ = Sumatoria de las cargas que ingresan a la planta (mg/l)

FA = Sumatoria de las cargas en el flujo de salida de la planta (mg/l)

Para calcular las cargas que ingresan a la planta o salen de la planta se utilizó la siguiente fórmula:

$$Z = Q * C$$

Z= carga (mg/l)

Q= caudal (l/seg)

C= concentración (mg/l)

6.4. Análisis de eficiencia parcial a través del tiempo

A razón de dos muestreos anuales del año x al año z, uno en la época seca y otro en la época lluviosa, se analizaron los datos de importancia en la planta de tratamiento terciario: DBO, DQO, N_T, P-PO₄⁻³, SO₄⁻³, SO₃⁻², SS y Q, en las dimensionales establecidas en las normas nacionales.

En el caso de SO₄⁻³ y SO₃⁻² el “Reglamento de las Descargas y Reuso de Aguas Residuales y de la Disposición de Lodos” no lo contempla por lo cual no aplica.

Se utilizó estadística no paramétrica para evaluar si existe dependencia del valor de los parámetros de calidad del agua, entre la época (seca/lluviosa) y la eficiencia de los diferentes parámetros utilizando el análisis de la χ^2 (Chi cuadrada) como prueba de independencia.

Por medio de un Análisis de Varianza y la Prueba Múltiple de Medias Tukey se determinó si todos los parámetros tienen eficiencia estadísticamente igual o al menos uno de ellos tiene eficiencia estadísticamente diferente. Todo ello analizado a través del un paquete estadístico (mencionar cuál) MegaStat 2007[®].

6.5. Verificación de cumplimiento con las normas nacionales e internacionales

En base al “Reglamento de las Descargas y Reuso de Aguas Residuales y de la Disposición de Lodos”, Acuerdo Gubernativo 236-2006, se realizó la verificación del cumplimiento de los límites máximos permisibles de los parámetros analizados anualmente que aplican dentro del reglamento. El Artículo 20 menciona de ellos el N_T y fósforo total (P_T), sin embargo no miden el $P-PO_4^{-3}$ de manera aislada, pero siendo este el compuesto fosfórico más importante se comparó con el límite máximo permisible del P_T .

El DBO está regulado en el Artículo 17 en el cual se presenta un modelo de reducción progresiva de cargas de DBO.

7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación se presentan los resultados obtenidos de la evaluación de la eficiencia de la planta de tratamiento de aguas residuales La Cerra y su discusión, en los parámetros de calidad de agua de interés: DBO, DQO, N_{total} , $P-PO_4^{-3}$, SO_4^{-3} , SO_3^{-2} y SS, así como el cumplimiento de la normativa nacional Acuerdo Gubernativo 236-2006, “Reglamento de Descarga y Reuso de Aguas Residuales y de la Disposición de Sólidos”. En la tabla No. 5 se presenta la información obtenida de los muestreos realizados por AMSA.

Tabla No. 5 Calidad de Agua y Eficiencia La Cerra 2008-2013

| Año | Fecha de toma de muestra | Precipitación (mm) | Punto de Muestreo | Hora | DQO (mg/L O ₂) | DBO (mg/L O ₂) | N_{total} (mg/L) | $P-PO_4^{-3}$ (mg/L) | SO_4^{-3} mg/L | SO_3^{-2} mg/L | SS mg/L | Caudal l/s |
|------|--------------------------|--------------------|-------------------|-------|----------------------------|----------------------------|--------------------|----------------------|------------------|------------------|---------|------------|
| 2008 | 28/10/2008 | 67,4 | CUVC | 10:00 | 624 | 105 | 4 | 3,7 | 97 | 4 | 5 | 41,1 |
| | | | S PTAR | 11:18 | 82 | 45 | 1,5 | 2,68 | 75 | 1 | 0 | 36,92 |
| | | | E | | 88 | 62 | 66 | 35 | 31 | 78 | 100 | |
| | 08/09/2008 | 354,8 | CUVC | 11:20 | 760 | 450 | 31,36 | 4,29 | 88 | 3,6 | 5,5 | 54,26 |
| | | | S PTAR | 13:19 | 79 | 40 | 14 | 2,8 | 57 | 1,1 | 0,1 | 60,81 |
| | | | E | | 88 | 90 | 50 | 27 | 27 | 66 | 98 | |
| 2009 | 28/04/2009 | 17,3 | CUVC | 10:00 | 793 | 450 | 3,36 | 4,66 | 104 | | 6 | 41,1 |
| | | | S PTAR | 10:05 | 87 | 48 | 0,56 | 4,02 | 133 | | 0 | 36,92 |
| | | | E | | 90 | 90 | 85 | 23 | 0 | | 100 | |
| | 01/06/2009 | 189,6 | CUVC | 11:00 | 784 | 340 | 23 | 5,15 | 53 | 3,7 | 3,5 | 54,26 |
| | | | S PTAR | 10:35 | 108 | 50 | 1,2 | 4,01 | 46 | 2,1 | 0,1 | 60,81 |
| | | | E | | 85 | 84 | 94 | 13 | 3 | 36 | 97 | |
| 2010 | 23/03/2010 | 0 | CUVC | 10:25 | 228 | 80 | | | 101 | 3,8 | 0 | 41,1 |
| | | | AB | 10:50 | 272 | 100 | | | 183 | 3,2 | 1,3 | 250 |
| | | | S PTAR | 10:00 | 269 | 80 | 40 | | 95 | 3,2 | 0 | 245 |
| | 23/08/2010 | 470,8 | E | | 15 | 31 | | | 53 | 18 | 100 | |
| | | | CUVC | 13:45 | 553 | | 21 | 4,81 | 105 | 1,7 | 3 | 27,83 |
| | | | S PTAR | 13:00 | 104 | | 11 | 4,37 | 73 | 1,5 | 0,1 | 55,14 |
| 2011 | 24/01/2011 | 0 | E | | 63 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 93 | |
| | | | CUVC | 10:55 | 727 | 410 | 39 | 2,17 | 141 | 6,5 | 5,5 | 60,19 |
| | | | S PTAR | 10:20 | 135 | 36 | 22 | 1,20 | 114 | 2,1 | 0,2 | 50,83 |
| | 28/07/2011 | 238,6 | E | | 84 | 93 | 52 | 53 | 32 | 73 | 97 | |
| | | | CUVC | 12:35 | 526 | 380 | 18 | 3,79 | 60 | 2,1 | 3 | 113,9 |
| | | | S PTAR | 12:05 | 119 | 80 | 21 | 4,67 | 33 | 2,5 | 0 | 62,02 |
| E | | 88 | 89 | 36 | 33 | 70 | 35 | 100 | | | | |

| | | | | | | | | | | | | |
|------|------------|-------|--------|-------|-----|-----|----|------|-------|-----|-----|-------|
| 2012 | 29/03/2012 | 5,1 | CUVC | 11:00 | 415 | 38 | 28 | 4,9 | 115 | 4,8 | 3 | 44,02 |
| | | | S PTAR | 10:08 | 89 | 46 | 15 | 3,69 | 65 | 2,7 | 0 | 54,26 |
| | | | E | | 74 | 0 | 34 | 7 | 30 | 31 | 100 | |
| | 13/09/2012 | 128,9 | CUVC | 10:48 | 495 | 230 | 19 | 3,2 | 109,3 | 4,9 | 4 | 54,26 |
| | | | S PTAR | 10:10 | 133 | 105 | 4 | 2,16 | 67,7 | 1,8 | 0 | 60,81 |
| | | | E | | 70 | 49 | 76 | 24 | 31 | 59 | 100 | |
| 2013 | 04/02/2013 | 2,6 | CUVC | 11:40 | 327 | 35 | 28 | 5,31 | 119 | 5,1 | 5 | 41,1 |
| | | | S PTAR | 12:15 | 62 | 58 | 29 | 4,71 | 102 | 2,1 | 0 | 36,92 |
| | | | E | | 83 | 0 | 7 | 20 | 23 | 63 | 100 | |
| | 24/07/2013 | 262,1 | CUVC | 10:50 | 435 | 384 | 28 | 3,15 | 93 | 5,2 | 2,5 | 54,26 |
| | | | S PTAR | 10:30 | 76 | 19 | 24 | 3,06 | 69 | 2,6 | 1 | 60,81 |
| | | | E | | 80 | 94 | 4 | 0 | 17 | 44 | 55 | |

CUCV= Aguas provenientes del Casco Urbano de Villa Canales

S PTAR= Salida de la planta de tratamiento

AB= Área de bombeo

E= Eficiencia

7.1. Eficiencia

La eficiencia encontrada para cada uno de los parámetros evaluados se observa en la Tabla No. 6.

Tabla No. 6 Eficiencia de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales La Cerra 2008-2013

| Eficiencia de "La Cerra" 2008-2013 (%) | | | | | | | | |
|--|----------|-----|-----|--------------------|---------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----|
| Año | Época | DQO | DBO | N _{total} | P-PO ₄ ⁻³ | SO ₄ ⁻³ | SO ₃ ⁻² | SS |
| 2008 | Seca | 88 | 62 | 66 | 35 | 31 | 78 | 100 |
| | Lluviosa | 88 | 90 | 50 | 27 | 27 | 66 | 98 |
| 2009 | Seca | 90 | 90 | 85 | 23 | 0 | | 100 |
| | Lluviosa | 85 | 84 | 94 | 13 | 3 | 36 | 97 |
| 2010 | Seca | 15 | 18 | | | 45 | 3 | 100 |
| | Lluviosa | 63 | | 0 | 0 | 0 | 0 | 93 |
| 2011 | Seca | 84 | 93 | 52 | 53 | 32 | 73 | 97 |
| | Lluviosa | 88 | 89 | 36 | 33 | 70 | 35 | 100 |
| 2012 | Seca | 74 | 0 | 34 | 7 | 30 | 31 | 100 |
| | Lluviosa | 70 | 49 | 76 | 24 | 31 | 59 | 100 |
| 2013 | Seca | 83 | 0 | 7 | 20 | 23 | 63 | 100 |
| | Lluviosa | 80 | 94 | 4 | 0 | 17 | 44 | 55 |

Trabajo de campo (2014)

Por lo que se puede decir que para la época lluviosa y la época seca la eficiencia varia aún cuando se trate del mismo parámetro, debido a que los caudales son muy diferentes. En la

época lluviosa hay mayor variación respecto al promedio (Anexo 1). En los datos que aparecen con 0 no se tuvo eficiencia alguna, y en blanco se presentan las casillas de los datos no existentes.

Tabla No. 7 χ^2 Tabla de Contingencia para Prueba de Independencia

| | DQO | DBO | N _{total} | P-PO ₄ ⁻³ | SO ₄ . ₃ | SO ₃ ⁻² | SS | Total |
|--------------------------|----------|----------|--------------------|---------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|------|-------|
| Época seca 2008-20013 | 434 | 191 | 267 | 191 | 203 | 257 | 585 | 2128 |
| Época lluviosa 2008-2013 | 474 | 404 | 296 | 69 | 171 | 188 | 534 | 2135 |
| Total | 908 | 594 | 562 | 261 | 374 | 445 | 1119 | 4263 |
| | 152.48 | χ^2 | | | | | | |
| | 2.31E-30 | P-valor | | | | | | |

Trabajo de campo (2014)

En la tabla 7 se presenta la sumatoria de las eficiencias del año 2008 al 2013, en cada época respectivamente, el valor P , que nos indica la probabilidad de obtener un resultado al menos tan extremo como el que realmente se ha obtenido y supone que la hipótesis nula es cierta, expresando los resultados con un α de 0.5, por lo tanto se acepta la H_1 que indica que la proporción de los parámetros si depende de la época. Y el valor de χ^2 que por su alto valor indica la diferencia de las variables, pero no indica el grado o el tipo de relación que tienen.

7.1.1. Eficiencia de remediación del contenido de demanda química de oxígeno (mg/l de OD) en el agua tratada

Los valores de DQO en el ingreso de la planta de tratamiento son una evidencia de la contaminación orgánica que contiene, revela la cantidad de materia orgánica que puede ser biodegradada (tabla No. 5). La eficiencia de la planta de tratamiento para reducir la DQO es aceptable, en la época seca se mantiene entre 74 y 90%, se observó que en el año 2010 disminuyó a 15%, con la particularidad que es el único muestreo en el que se tomó en cuenta que la planta de tratamiento estaba obteniendo aguas del casco urbano de Villa Canales y del río Villalobos debido a que la bomba estaba funcionando. También se conoce que en el año 2010, en el mes de mayo, la planta tuvo problemas causados por la tormenta tropical Agatha que provocó desbordamiento de las aguas y pérdidas en la infraestructura, el agua se desbordó y el tratamiento no se pudo llevar a cabo correctamente. Durante la época lluviosa las

eficiencias de la planta anualmente estuvieron entre 63 y 88% como se muestra en la Figura No. 7 debido a que se realizó el trabajo para la estabilización del proceso.

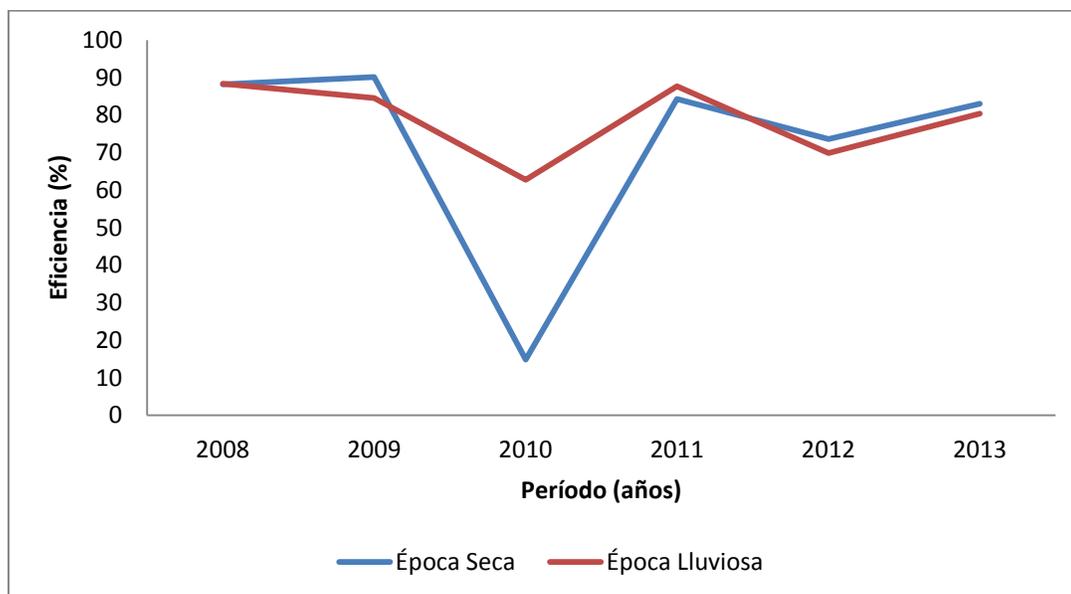


Figura No. 7 Eficiencia en demanda química de oxígeno (DQO) de la planta de tratamiento de aguas residuales La Cerra.

7.1.2. Eficiencia en la remediación del contenido de demanda bioquímica de oxígeno (mg/l de OD) en el agua tratada

Al analizar el comportamiento de la DBO en la planta de tratamiento se observa que presenta reducción, en el 91% de los muestreos con una eficiencia de 49 a 94% en la época lluviosa y en la época seca se presentó eficiencia de 18 a 93 % del año 2008 al 2011 (Figura No. 8), en el año 2012 y 2013 no se presentó eficiencia (0%), las causas son variables, entre ellas, las precipitaciones fueron sumamente bajas, en el 2013 fueron de 5.1mm y 2.1 en el 2012 (Anexo 5), por lo que no hubo dilución en el caudal, y las lagunas que realizan el tratamiento secundario fueron deshabilitadas, quedando únicamente una en funcionamiento, según los resultados de los análisis el curso del agua tratada fue prácticamente como un río de aguas negras, se incluyen las deficiencias en la operación.

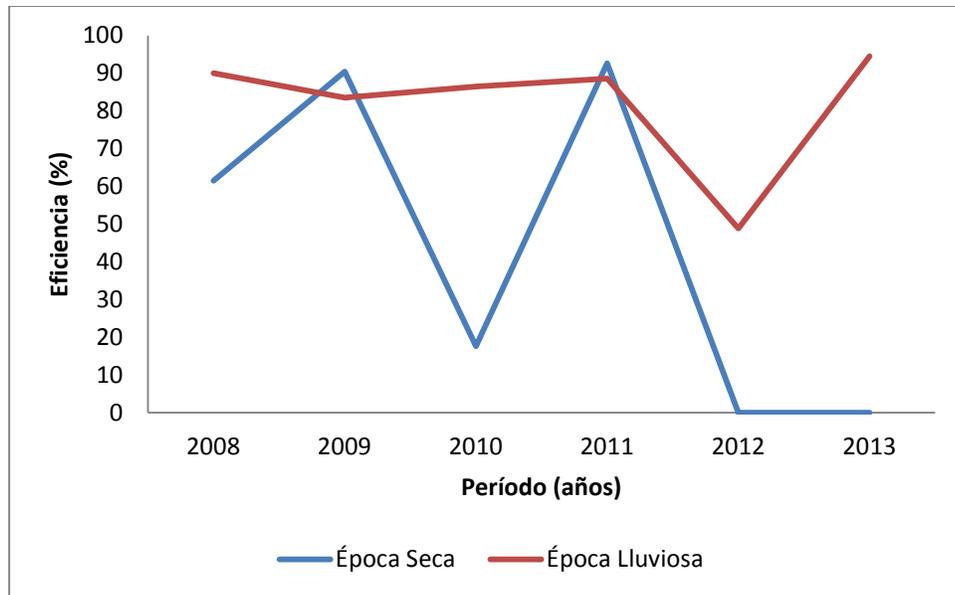


Figura No. 8 Eficiencia en demanda bioquímica de oxígeno (DBO) de la planta de tratamiento de aguas residuales La Cerra.

7.1.3. Eficiencia en remediación del contenido de nitrógeno total (mg/l) en el agua tratada

Se observó que se ha dado una reducción de nitrógeno en las aguas tratadas sin embargo el porcentaje de eficiencia de la planta de tratamiento no alcanza lo esperado, presentando en la época seca un declive muy fuerte, para el año 2008, 66%, y el 2009, 85%, a partir del año 2011 la eficiencia se redujo a 52%, 34% y 7%. Lo antes descrito ha sido provocado por el tiempo de residencia de las plantas acuáticas utilizadas como biofiltros en las lagunas, ya que el trabajo es manual y lento por escasez de presupuesto. Favoreciendo el crecimiento de microorganismos, agotamiento del oxígeno en el ecosistema y eutrofización del lago (Figura No.9).

Durante la época lluviosa la eficiencia fue sumamente variable, en el año 2008 fue de 50%, en el 2009 mejoró y fue de 94%, en el 2010 no presentó eficiencia, como en los otros parámetros debido a la tormenta Agatha. Seguido de ello en el 2011 fue de 36%, en el 2012 de 76% y en el 2013 de 4%, debido a que las lluvias que provocaron un únicamente se alcanzó en dos ocasiones la eficiencia esperada.

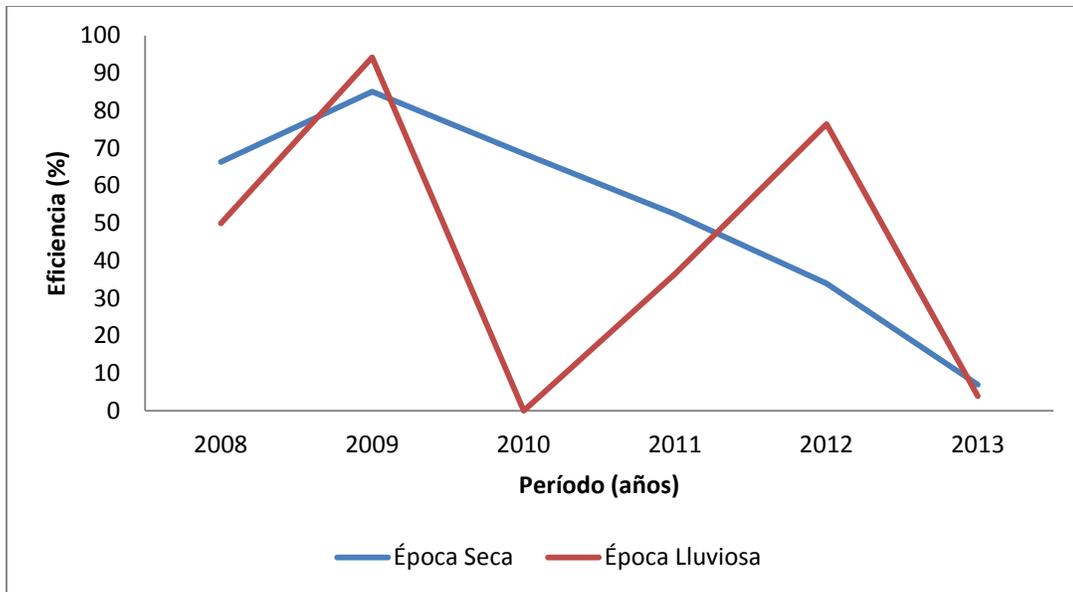


Figura No. 9 Eficiencia en la remediación del nitrógeno total (N_{total}) de la planta de tratamiento de aguas residuales La Cerra del año 2008 al 2013.

7.1.4. Eficiencia en remediación del contenido de fosfato (mg/l) en el agua tratada

Se observa que en la época seca todos los años en estudio tuvieron algún porcentaje de eficiencia, en el año 2009 durante la misma época no se tienen registros de caudales, debido a ello no se conoce el resultado de la eficiencia. La eficiencia en el 2008 fue de 35%, en el 2009 de 23%, en el 2011 de 7% y 2013 de 20%.

En el sistema durante la época lluviosa se observa que el año 2008 se tuvo una eficiencia de 27%, en el 2009 de 13% y en el 2010 no se presentó eficiencia a causa del desborde de las aguas, y fue el único muestreo realizado en el que estaba utilizándose bombeo para captar agua e ingresarla a la planta para ser tratada, debido a ello el caudal aumentó significativamente y la planta no presentó la suficiente capacidad para tratarlo pues el tiempo de retención en la planta a causa del volumen no es el suficiente para que se realice correctamente el proceso de retención de los nutrientes tomando en cuenta que la etapa de tratamiento secundaria fue deshabilitada en un 80%. En el año 2011 fue de 33% y 24% en el 2012. Luego se presenta una reducción de la eficiencia en el 2013, a un aumento de fosforo de 9% al salir de la planta.

En la figura No. 10 se observa que en ningún año se tuvo una eficiencia mayor a 53% por lo que no llega a lo esperado, sin embargo en el 83% de los muestreos se obtuvo alguna reducción en la concentración de fosfato.

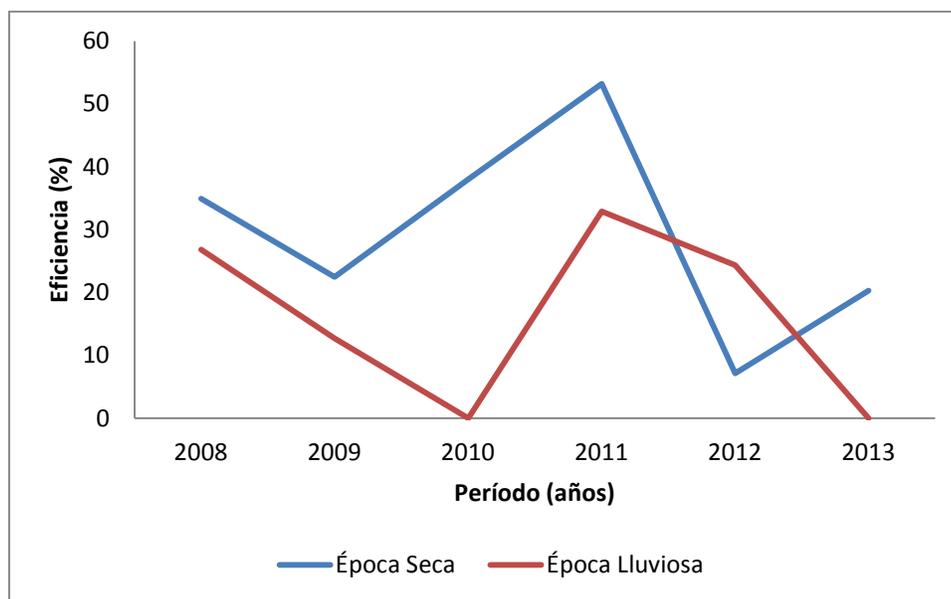


Figura No. 10 Eficiencia en la remediación del ortofosfato (PO_4^{-3}) de la planta de tratamiento de aguas residuales La Cerra del año 2008 al 2013.

7.1.5. Eficiencia en remediación del contenido de sulfato (mg/l) en el agua tratada

La eficiencia presentada por la planta de tratamiento durante los años del 2008-2013 no llegó a los valores óptimos de 70 a 90% (ATV, 1998), en la época seca del año 2008 hubo una eficiencia de 31%, en el 2009 se observó un descenso importante que llevó a no presentar eficiencia (Figura No. 11).

En la misma época, del año 2010 al 2013 aumentó, manteniéndose de 30-45%. La eficiencia en la época de lluvia ha sido significativamente baja, incluso aumentando la concentración de sulfato en 38% en el año 2010. En el 2008 la concentración disminuyó en 27% y en el 2009, 3%. Para el año 2011 se obtuvieron los mejores resultados llegando a la eficiencia óptima de 70% y en el 2013 nuevamente disminuyó a 23%.

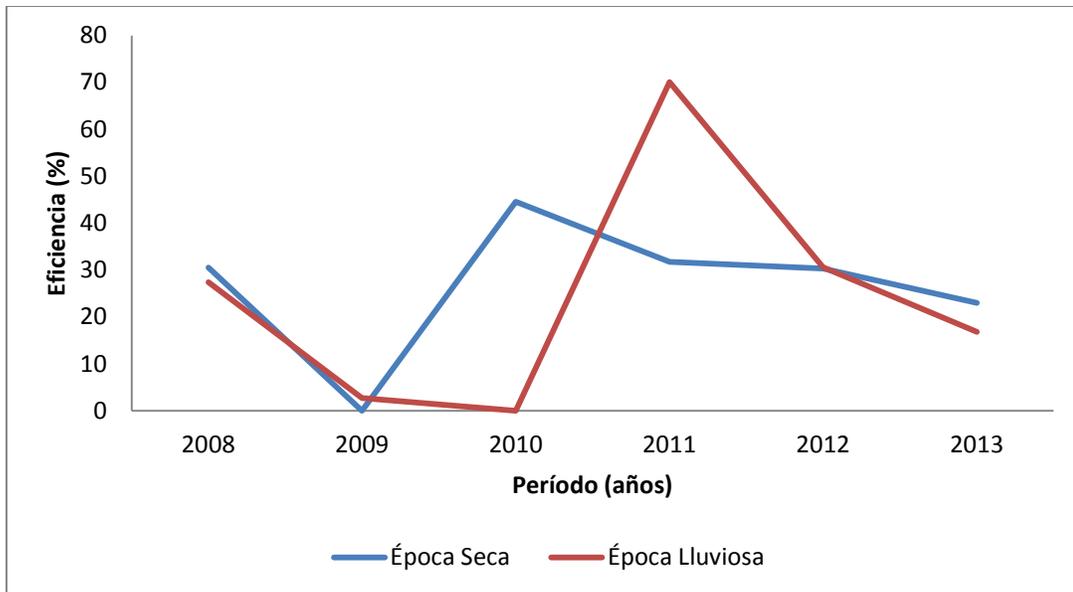


Figura No. 11 Eficiencia en la remediación del sulfato (SO_4^{-3}) de la planta de tratamiento de aguas residuales La Cerra del año 2008 al 2013

7.1.6. Eficiencia en remediación del contenido de sulfito (mg/l) en el agua tratada

Durante la época seca las concentraciones de sulfito se vuelven mayores posiblemente a causa de que el caudal de ingreso es menor en volumen pero mayor en concentración pues siguen siendo los mismos generadores de aguas residuales, además, se reduce el tiempo de residencia del agua en las lagunas de la planta de tratamiento debido a la evaporación. La eficiencia presentada varía en cada año, para el 2008 se tuvo 78% cumpliendo con los estándares esperados, para el 2009 no se obtuvieron datos, en el 2010 se tuvo 3% y en el 2011-2013 la eficiencia fue positiva pero no cumplió lo requerido. Durante la época lluviosa se presentó eficiencia todos los años en un rango de 36 a 66%) excepto en el 2010, que fue el único muestreo en el que estuvo activada la bomba, en ese momento fue el único en el que la planta estuvo más cerca de tratar el volumen de agua para el que fue diseñada, sin embargo no se presentó eficiencia por lo que podemos observar que hay problemas de funcionamiento (Figura No. 12).

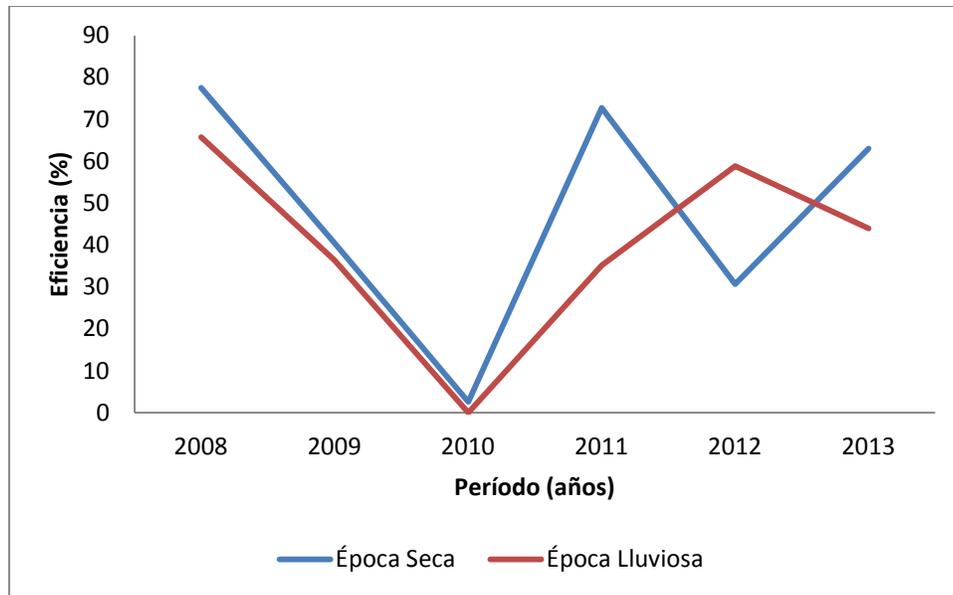


Figura No. 12 Eficiencia en la remediación del sulfito (SO_3^{-2}) de la planta de tratamiento de aguas residuales La Cerra del año 2008 al 2013

7.1.7. Eficiencia en el tratamiento de los sólidos en suspensión

En la época seca, la planta de tratamiento muestra una eficiencia óptima desde el año 2008 hasta el 2013, manteniéndose entre 97 y 100%. Durante la época del año 2008 al año 2012 la eficiencia fue de 93 a 100%, pero en el año 2013 se puede observar un descenso en la eficiencia (Figura No. 13), lo cual indica que el tratamiento primario es eficiente

La precipitación durante la época lluviosa del 2013 fue de 262.1 mm (Anexo 5), por ello se pudo provocar la mezcla de las aguas y arrastre de sedimento por escorrentía pluvial, lo que contribuyó a no disminuir la concentración de los sólidos en suspensión durante el tratamiento primario y secundario principalmente.

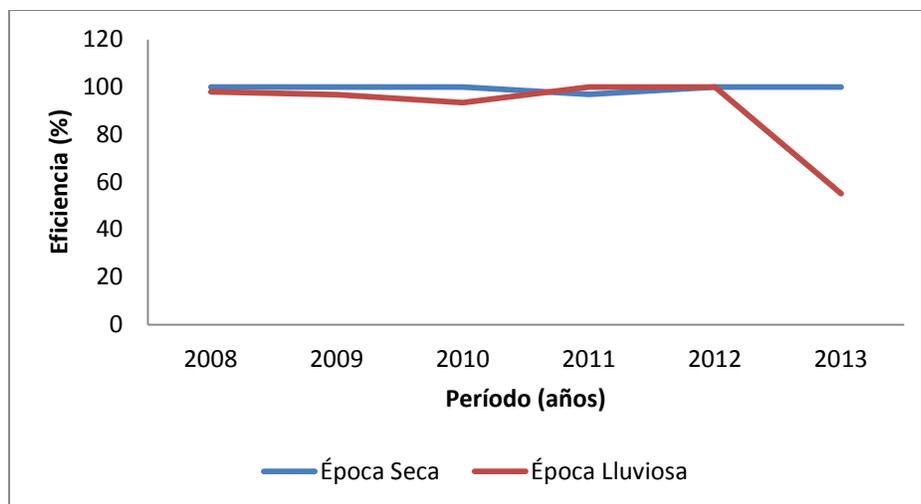


Figura No. 13 Eficiencia en sólidos sedimentables (SS) de la planta de tratamiento de aguas residuales La Cerra

Conforme a los resultados anteriores se muestra que para cada parámetro la eficiencia ha sido diferente, sin embargo, la mayoría de los parámetros se vieron afectados en el año 2010 a causa de la tormenta Agatha que hizo estragos en la dinámica del río y la infraestructura de la planta. Posterior a ello en el año 2011 se dejaron de utilizar las lagunas aeróbicas y facultativas por lo que el tratamiento secundario se redujo a una laguna anaeróbica.

Utilizando el análisis de varianza y la prueba múltiple de medias Tukey se plantearon las hipótesis para comprobar si todos los parámetros presentaban la misma eficiencia (Anexo 2). Con ello se pudo obtener como resultado que no todos los parámetros presentan la misma eficiencia, durante la época lluviosa los parámetros estadísticamente iguales o que en su comportamiento son relativos son DBO, DQO y SS y en ellos la planta es más eficiente alcanzando así los niveles óptimos. En la época seca el más eficiente es SS, y ninguno otro es estadísticamente igual. Por ello se puede observar que la planta de tratamiento es bastante eficiente, el sistema fue diseñado de manera adecuada.

Tomando en cuenta que para cada época la eficiencia es diferente, se analizó para la época seca la eficiencia de los parámetros que son estadísticamente similares.

Las estimaciones del grado de eficiencia de la planta de tratamiento no fueron fáciles por las oscilaciones que se producen en los flujos de las aguas residuales en el ingreso y salida, también debido a la permanencia de los vertidos en la planta que se ven afectados por la época.

En la época lluviosa se diluye y se puede apreciar una mayor eficiencia. En el caso de la época seca la concentración es mayor en los caudales. Y al realizar los análisis se pudo evaluar el rendimiento de los procesos de la planta de tratamiento de aguas residuales en sus diferentes tratamientos.

7.2. Cumplimiento de las normas nacionales

En la Tabla No. 8 se presentan los resultados del cumplimiento o no cumplimiento del contenido de N_T en el afluente de la planta de tratamiento. En 11 de los 12 muestreos realizados se cumplió con el límite del reglamento que para la primera fase fue de 100mg/l.

Tabla No. 8 Cumplimiento del N_T según el “Reglamento de Descargas y Reuso de Aguas Residuales y de la Disposición de Lodos” Acuerdo Gubernativo 236-2006

| Año | Valor mg/l del N_{total} | Cumple (+) o no cumple (-) según Acuerdo Gubernativo 236-2006 (Artículo 20) Límite máximo permisible = 100mg/l |
|-----------------------|--|---|
| Época Seca | | |
| 2008 | 1.5 | + |
| 2009 | 0.56 | + |
| 2010 | 40 | + |
| 2011 | 22 | + |
| 2012 | 15 | + |
| 2013 | 29 | + |
| Época Lluviosa | | |
| 2008 | 2.8 | + |
| 2009 | 4.01 | + |
| 2010 | 4.37 | + |
| 2011 | 4.67 | + |
| 2012 | 2.16 | + |
| 2013 | 69 | + |

En el caso de la DBO el Artículo 21 explica que para entes generadores nuevos deberían cumplir desde el inicio de sus operaciones, con una meta de tres mil kilogramos por día de DBO, con un parámetro de calidad asociado igual o menor que doscientos miligramos por litro (200 mg/l), debido a que los datos obtenidos ya cumplen con este requerimiento se omite el Artículo 17 que es menos ambicioso, y como se observa en la siguiente tabla en el 91% de los resultados se cumple con el reglamento.

Tabla No. 9 Cumplimiento de DBO según el “Reglamento de Descargas y Reuso de Aguas Residuales y de la Disposición de Lodos” Acuerdo Gubernativo 236-2006

| Año | Valor DBO mg/l de OD | Cumple o no cumple según Acuerdo Gubernativo 236-2006 (Artículo 20) Límite máximo permisible = 200 mg/l de OD |
|-----------------------|-----------------------------|--|
| Época Seca | | |
| 2008 | 82 | + |
| 2009 | 87 | + |
| 2010 | 269 | - |
| 2011 | 135 | + |
| 2012 | 89 | + |
| 2013 | 62 | + |
| Época Lluviosa | | |
| 2008 | 79 | + |
| 2009 | 108 | + |
| 2010 | 104 | + |
| 2011 | 119 | + |
| 2012 | 133 | + |
| 2013 | 76 | + |

El agua descargada al río Villalobos, para llegar al lago de Amatitlán cumplió en un 91% la remediación de la DBO, según los artículos y parámetros que contempla el reglamento. Lo cual indica en primera instancia que están preparados para las metas que tienen por delante para la fase dos en el 2015 (tabla No. 9).

Los compuestos de nitrógeno y fósforo son los que contribuyen principalmente a la eutrofización del lago. Analizando las concentraciones de fosfatos y convertidos a fósforo en el agua descargada se puede decir que según la clasificación de Vollenweider (Anexo 3) se encuentra en el nivel politrófico (Figura No. 14), lo que continúa contribuyendo a que el lago se mantenga en el estado actual (Anexo 5). De los 6 años muestreados, en ningún momento sale de dicho estado.



Figura No. 14 Estado politrófico del Lago de Amatitlán (Trabajo de campo, 2014)

8. CONCLUSIONES

- 8.1. La planta de tratamiento de aguas residuales presenta eficiencia en el 95% para tratar SS, DBO y DQO, en los cuales, la eficiencia se mantuvo estable durante el período de estudio. No siendo así al tratar SO_3^{-2} , SO_4^{-3} , PO_4^{-3} y N_t , que no alcanzaron la eficiencia esperada.
- 8.2. Las malas condiciones actuales de la planta de tratamiento La Cerra, se podrían atribuir al hecho de la limitada capacidad financiera que se tiene para el mantenimiento y funcionamiento de la misma, lo cual ha provocado la inhabilitación del bombeo y tratamiento secundario.
- 8.3. Las proporciones de eficiencia son diferentes en la época seca y en la época lluviosa, ya que en cada una de ellas varían las precipitaciones y el caudal de ingreso y salida, también el caudal tratado disminuye radicalmente al no haber disponibilidad de bombeo en el río Villalobos
- 8.4. En la época seca la planta es muy eficiente para tratar SS y ningún parámetro de calidad del agua tiene la misma eficiencia estadística entre sí, en la época lluviosa la planta de tratamiento es muy eficiente para tratar SS, DQO y DBO, parámetros que no mostraron diferencia estadística entre las épocas.
- 8.5. La planta de tratamiento si cumple con lo establecido según el “Reglamento de Descargas y Reuso de Aguas Residuales y de la Disposición de Lodos” Acuerdo Gubernativo 236-2006, para el valor de los parámetros de calidad del agua analizados en el presente estudio Las aguas tratadas por la planta de tratamiento La Cerra que son descargadas en el río Villa Lobos, presentaron un estado poli-eutrofizado en base a su contenido de ortofosfatos.

9. RECOMENDACIONES

- 9.1. Llevar a cabo estudios de análisis de la eficiencia que presentan las plantas de tratamiento a cargo de AMSA, realizando muestreos sistemáticos y representativos del año hídrico, y darle flujo y análisis a la información que se genera anualmente.
- 9.2. Es preciso colocar medidores de caudal en el afluente y efluente de la planta, y que generen a una base de datos con la información, para obtener datos diarios y precisos.
- 9.3. Realizar investigaciones sobre eficiencia total de la planta de tratamientos de aguas residuales La Cerra.
- 9.4. Rehabilitar las lagunas anaeróbicas, aeróbicas y facultativas que se encuentran fuera de uso en el tratamiento secundario, impermeabilizándolas para evitar las pérdidas por infiltración.
- 9.5. Para que haya disponibilidad de fondos para el funcionamiento de las plantas de tratamiento, sería posible estimular a los usuarios del sistema municipal de agua potable y saneamiento a incorporar los pagos por servicios ambientales, y que se incluya en la tarifa actual del agua, el costo de su tratamiento,
- 9.6. Realizar un inventario de las plantas de tratamiento de aguas residuales en la cuenca del lago de Amatitlán para poder conocer la proporción y volumen de las aguas residuales que están siendo tratadas y las que no.
- 9.7. Establecer un método que permita almacenar la información que se genera en las plantas de tratamiento de AMSA, permitiendo que de forma sistemática se mantengan los registros de los parámetros de calidad del agua, de forma continua.
- 9.8. La descarga, tanto de fósforo como de nitrógeno; debe ser controlada con especial atención ya que provoca un crecimiento excesivo de algas en los cuerpos receptores (río Villalobos y lago de Amatitlán).
- 9.9. Exhortar a los (as) estudiantes de la Licenciatura en Acuicultura a sumergirse en temas de saneamiento de aguas, mediante técnicas acuícolas establecidas que permitan la reducción de nutrientes del agua.

10. BIBLIOGRAFÍA

1. Autoridad para el Manejo Sustentable de la cuenca y del lago de Amatitlán [AMSA]. (s. f.). *Manual de operación y mantenimiento: Planta de tratamiento de aguas residuales "La Cerra"*. Guatemala: Autor.
2. AMSA. (s. f.). *Manual de operación y mantenimiento: planta de tratamiento de aguas residuales "Mezquital"*. Guatemala: Autor.
3. Arredondo, J. (1988) *Calidad del agua en acuicultura: Conceptos y aplicaciones*. México: AGT Editor.
4. Asociación Alemana de Saneamiento [ATV]. (1988). *Determinación del grado de eficiencia de plantas de tratamiento de aguas residuales: Hoja técnica M 755*. Costa Rica: ATV.
5. Benavente, C. (2010, 02 de febrero). Vecinos de El Frutal protestan contra AMSA [en línea]. *El Periódico*. Recuperado marzo 27, 2014, de <http://www.elperiodico.com.gt/es//pais/34369>
6. Benítez, I. (2008). *Evaluación de la distribución de metales pesados en las plantas acuáticas Jacinto de agua (Eichhornia crassipes) y Tul (Thypha spp) utilizadas en la planta de tratamiento de aguas residuales La Cerra, Villa Canales por medio de fluorescencia de rayos X*. Tesis Maestría en Ciencia y Tecnología del Medios Ambiente. Guatemala: Universidad San Carlos de Guatemala [USAC].
7. Cabrera, D. (2011). *Evaluación de la relación entre las densidades poblacionales de cianobacterias (Mycrocistis sp, Anabaena sp, Oscillatoria sp.) y las concentraciones de los parámetros físicoquímicos: nitratos y fosfatos en el lago de Amatitlan, Guatemala durante los meses de mayo a octubre de 2009*. Tesis Licenciatura en Biología. Guatemala: USAC.

8. Canadian Government. (s. f.). *Canadian environmental quality guidelines: summary table* [en línea]. Recuperado mayo 08, 2014, de <http://st-ts.ccme.ca/>
9. Congreso de la República de Guatemala. (1996). *Decreto No. 64-96: Ley de creación para el manejo sustentable de la cuenca y lago de Amatitlán/ Acuerdo Gubernativo No. 186-99* [en línea]. Recuperado agosto 10, 2014, de http://www.mem.gob.gt/wp-content/uploads/2012/05/6._Manejo_Sustentable_de_la_Cuenca_y_del_Lago_de_Amatitlan_Decreto-64-96.pdf
10. Cordero, M. (2013). *Agua, recurso suficiente, pero hay que aprovecharlo* [en línea]. Recuperado agosto 10, 2014, de <http://revistadata.export.com.gt/2013/07/agua-recurso-suficiente-pero-hay-que-aprovecharlo/>
11. Delgadillo, O., et. al. (2010). *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales* [en línea]. Recuperado agosto 10, 2014, de http://www.infoandina.org/sites/default/files/publication/files/depuracion_de_aguas_residuales_por_medio_de_humedales_artificiales.pdf
12. FODONTO. (s. f.) *Caudal disuelto* [en línea]. Recuperado mayo 11, 2014, de <http://www.fodonto.uncu.edu.ar/upload/hidrodinamica.pdf>
13. Gil, N. (2008). *Interpretación quimiométrica de la calidad del agua de los ríos que conforman la microcuenca del río Villalobos, principal tributario del lago de Amatitlán, durante los años 1996 a 2006*. Tesis Maestría en Ciencia y Tecnología del Medio Ambiente. Guatemala: USAC.
14. Hanna Instruments. (2013). *Turbidez* [en línea]. Recuperado mayo 25, 2014, de <http://www.hannainst.es/blog/tag/turbidez/>
15. Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente [IARNA]. (2010). *Zacapa* [en línea]. Recuperado mayo 04, 2014, de <http://www.infoiarna.org.gt/>

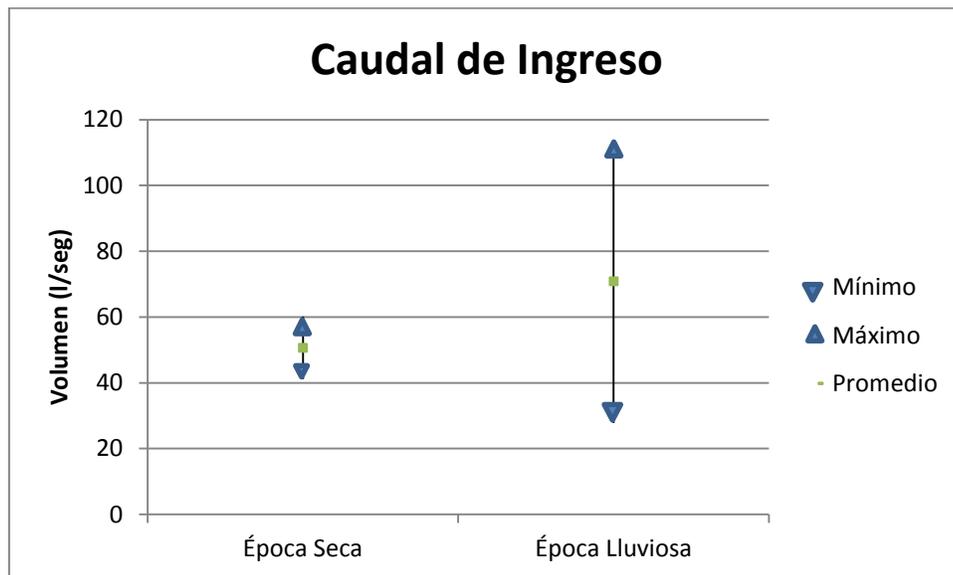
descargas/aGandara/IndicadoresMunicipales/Indicadores/F116%20%20Guatemala%20-%20Villa%20Canales.pdf

16. Instituto Nacional de Bosques [INAB]. (2012). *Dinámica de la cobertura forestal 2006-2010 en Guatemala* [en línea]. Recuperado mayo 04, 2014, de <http://www.sifgua.org.gt/Documentos/Informes/Cobertura/2010/Guatemala.pdf>
17. Instituto Nacional de Estadística [INE]. (2002). *Censo nacional 2002* [en línea]. Recuperado marzo 02, 2014, de <http://www.ine.cl/cd2002/sintesis censal.pdf>
18. INE. (2003). *Características de la población y de los locales de habitación censados* [en línea]. Recuperado agosto 10, 2014, de <http://www.ine.gob.gt/sistema/uploads/2014/02/20/jZqeGe1H9WdUDngYXkWt3GIhUUQCukcg.pdf>
19. Lentini, E. (2010). *Servicios de agua potable y saneamiento en Guatemala: Beneficios potenciales y determinantes de éxito 2010* [en línea]. Recuperado marzo 02, 2014, de <http://www.eclac.cl/publicaciones/xml/0/41140/lcw335e.pdf>
20. León, G. (s. f.). *Tratamientos de aguas residuales* [en línea]. Recuperado mayo 04, 2014, de <http://www.bvsde.ops-oms.org/bvsair/e/repindex/rep184/vleh/fulltext/acrobat/leon3.pdf>
21. Municipalidad de Villanueva. (s. f.). *Zacapa* [en línea]. Recuperado mayo 03, 2014, de <http://www.villanueva.gob.gt/datos-generales-villanueva-guatemala>
22. Muralles, F. (2004). *Determinación del comportamiento de una planta de tratamiento de aguas residuales industriales, durante su puesta en marcha*. Tesis Ingeniería Química. Guatemala: USAC.

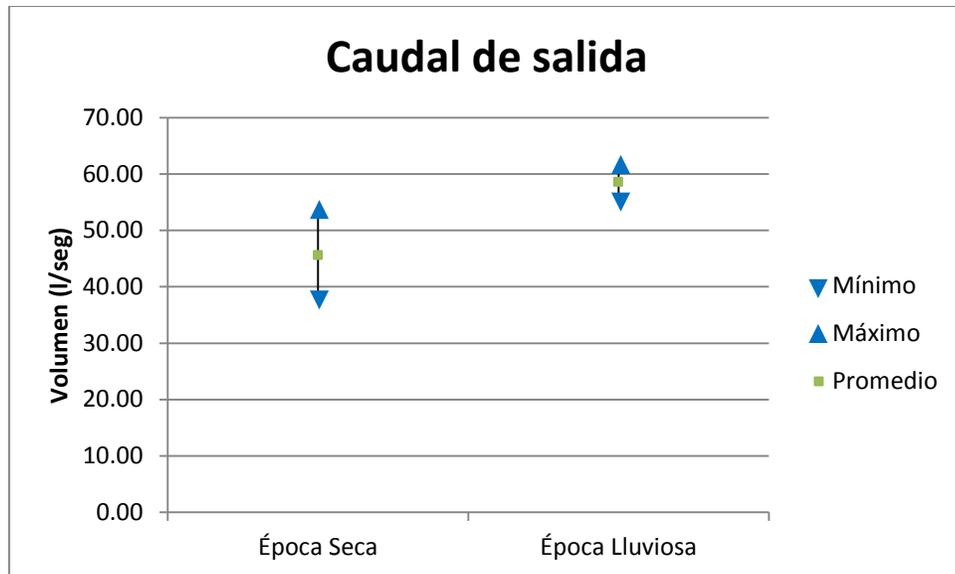
23. Navarra. (s. f.). *Oxígeno disuelto* [en línea]. Recuperado mayo 11, 2014, de http://www.navarra.es/home_es/Temas/Medio+Ambiente/Agua/Documentacion/Parametros/OxigenoDisuelto.htm
24. Ramírez, A. (2011, 28 de febrero). Virtual sentencia a muerte para lago [en línea]. *Prensa Libre*. Recuperado marzo 27, 2014, de http://www.prensalibre.com/noticias/Virtual-sentencia-muerte-lago_0_435556455.html
25. Reyna, I. (1998). *Integrated management of the lake Amatitlán basin* [en línea]. Recuperado marzo 26, 2014, de <http://srdis.ciesin.columbia.edu/cases/guatemala-004-en.html>
26. Urzúa, F. (2008). *Determinación de la eficacia de la planta de tratamiento de agua residual de Estanzuela, Zacapa*. Tesis Química Bióloga. Guatemala: USAC.
27. YPF. (s. f.). *Estudio de impacto ambiental dragado para la extensión del canal de acceso hasta Puerto Cuatrerros, Provincia de Buenos Aires* [en línea]. Recuperado mayo 08, 2014, de <http://bahia blanca.gov.ar/cte/eia/eia-dragado/Cap%2004%20LBA%20Anexo%20IV%20-%20Rev0.pdf>

11. ANEXOS

Anexo 1. Caudales de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales “La Cerra” 2008-2013. El caudal fue tomado en cuenta para el cálculo de la eficiencia, se hizo un promedio de los caudales obtenidos para aplicarlos a los años en los que no hay registro. En el caudal de ingreso durante la época seca se mantuvieron entre los 41.1 y 60.1 l/seg, en la época lluviosa el rango es mayor debido a que las precipitaciones diarias tienden a ser variables.



Tomando en cuenta que únicamente en uno de los muestreos durante los años en estudio se estaba utilizando bomba para ingresar agua a la planta de tratamiento, se aisló el dato. En la época seca se tuvo en la salida de la planta de tratamiento un caudal promedio de 45.5l/seg, y en la época lluviosa de 58.5 l/seg.



Cuando se observa que el caudal de la salida de la planta de tratamiento es menor que el de la entrada se puede decir que es debido a las pérdidas que se dan en el verano por evaporación o infiltración. En el invierno se provocan desbordes por las altas precipitaciones.

Anexo 2. Comparación simultanea de Tukey t-valores (d.f.=32) para la época seca y lluviosa.

En la siguiente tabla se observa la comparación simultanea de Tukey t-valores (d.f.=32) para la época seca.

| | SO ₄ ⁻³ | P-PO ₄ ⁻³ | DBO | N _T | SO ₃ ⁻² | DQO | SS |
|---------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|------|----------------|-------------------------------|------|------|
| Media | 26.7 | 27.6 | 43.7 | 48.9 | 49.3 | 72.3 | 99.5 |
| SO ₄ ⁻³ | 26.7 | | | | | | |
| P-PO ₄ ⁻³ | 27.6 | 0.06 | | | | | |
| DBO | 43.7 | 1.09 | 0.98 | | | | |
| N _T | 48.9 | 1.35 | 1.24 | 0.32 | | | |
| SO ₃ ⁻² | 49.3 | 1.38 | 1.26 | 0.34 | 0.02 | | |
| DQO | 72.3 | 2.92 | 2.72 | 1.83 | 1.43 | 1.40 | |
| SS | 99.5 | 4.65 | 4.38 | 3.57 | 3.08 | 3.06 | 1.74 |

Al menos uno de los parámetros tiene eficiencia diferente. Los valores en color celeste indican que los sólidos sedimentables tienen una eficiencia representativamente mayor que el resto en la época seca.

Durante la época lluviosa la tabla presenta en los cuadros celestes que la eficiencia de los parámetros DQO, DBO y SS son estadísticamente iguales. Y que presentan mayor eficiencia que el resto.

En la siguiente tabla se observa la comparación simultanea de Tukey t-valores (d.f.=32) para la época lluviosa.

| | P-PO ₄ ⁻³ | SO ₄ ⁻³ | SO ₃ ⁻² | N _T | DQO | DBO | SS |
|---------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------|------|------|------|
| | 16.1 | 24.6 | 40.0 | 43.5 | 78.9 | 81.1 | 90.6 |
| P-PO ₄ ⁻³ | 16.1 | | | | | | |
| SO ₄ ⁻³ | 24.6 | 0.65 | | | | | |
| SO ₃ ⁻² | 40.0 | 1.82 | 1.18 | | | | |
| N _T | 43.5 | 2.08 | 1.44 | 0.26 | | | |
| DQO | 78.9 | 4.79 | 4.14 | 2.97 | 2.70 | | |
| DBO | 81.1 | 4.72 | 4.10 | 2.98 | 2.73 | 0.16 | |
| SS | 90.6 | 5.67 | 5.03 | 3.85 | 3.59 | 0.89 | 0.69 |

| SO ₄ ⁻³ | P-PO ₄ ⁻³ | DBO | N _T | SO ₃ ⁻² | DQO | SS |
|---------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|----------------|-------------------------------|-----|----|
| P-PO ₄ ⁻³ | SO ₄ ⁻³ | SO ₃ ⁻² | N _T | DQO | DBO | SS |

Anexo 3 A continuación se presenta la tabla de concentraciones de fósforo (P) que indica el nivel trófico indicado por Vollenweider para la caracterización de lagos (1968).

| Estado trófico | Fósforo total (UgL-1) |
|--------------------------|---------------------------------|
| Ultraoligotrófico | <5 |
| Oligomesotrófico | 5-10 |
| Mesoeutrófico | 10-30 |
| Eupolitrófico | 30-100 |
| Politrófico | >100 |

(Roldan, G. 2008)

Anexo 4 En la siguiente tabla se presenta el estado trófico en base a la carga de nitrato de las aguas tratadas por la planta de tratamiento de aguas residuales La Cerra.

| Estado Trófico en base a Fósforo total | | | | |
|---|--|--|-----------------------------|-----------------------|
| Año | Concentración de fosfato (mg/l) | Concentración de Fósforo (mg/l) | Fosforo total (Ug/l) | Estado trófico |
| Época Seca | | | | |
| 2008 | 2,68 | 0,87368 | 873,68 | Politrófico |
| 2009 | 4,02 | 1,31052 | 1310,52 | Politrófico |
| 2010 | --- | --- | --- | Politrófico |
| 2011 | 1,2 | 0,3912 | 391,2 | Politrófico |
| 2012 | 3,69 | 1,20294 | 1202,94 | Politrófico |
| 2013 | 4,71 | 1,53546 | 1535,46 | Politrófico |
| Época Lluviosa | | | | |
| 2008 | 2,8 | 0,9128 | 912,8 | Politrófico |
| 2009 | 4,01 | 1,30726 | 1307,26 | Politrófico |
| 2010 | 4,37 | 1,42462 | 1424,62 | Politrófico |
| 2011 | 4,67 | 1,52242 | 1522,42 | Politrófico |
| 2012 | 2,16 | 0,70416 | 704,16 | Politrófico |
| 2013 | 3,06 | 0,99756 | 997,56 | Politrófico |

(Trabajo de campo, 2014)

Anexo 5. Precipitaciones diarias registradas en la Estación Compuertas (INDE, 2014).

| Fecha | Precipitación |
|-------------------|----------------------|
| | Milímetros (mm) |
| 28/10/2008 | 67,4 |
| 08/09/2008 | 354,8 |
| 28/04/2009 | 17,3 |
| 01/06/2009 | 189,6 |
| 23/03/2010 | 0 |
| 23/08/2010 | 470,8 |
| 24/01/2011 | 0 |
| 28/07/2011 | 238,6 |
| 29/03/2012 | 5,1 |
| 13/09/2012 | 128,9 |
| 04/02/2013 | 2,6 |
| 24/07/2013 | 262,1 |