



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
IZTACALA**

**Remoción de bacterias, nutrientes y materia
orgánica en un sistema de tratamiento biológico de
aguas residuales de una industria textil.**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

B I Ó L O G O

P R E S E N T A

DANIEL ALBERTO MARTÍNEZ MARTÍNEZ



DIRECTOR DE TESIS:

MTRA. ESPERANZA DEL S. ROBLES VALDERRAMA

LOS REYES IZTACALA 2014.



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.

Dedicatoria

A mi familia

A mi padre y a mi madre, no solo por este logro si no por todo aquello cuanto me constituye en vida, no existe ni existirá nunca expresión numérica, unidad de medición, ni parámetro capaz de medir o cuantificar ni una ínfima parte del absoluto y eterno agradecimiento que profeso hacía ellos, los amo y gracias por todo.

Al resto de mi familia, por todo aquello que me brindaron, a ellos también muchas gracias.

A mis amigos y compañeros

A todos mis amigos, por aquel sueño que empezó como broma desde la preparatoria hasta convertirse en una realidad en la universidad, gracias por ser mis compañeros de locuras y por haberme permitido compartir tantas experiencias, Rafael, Luis, Juan Carlos, Mario, Eduardo, Mariela, Ismael, Denisse, Jonathan, Samuel, Rodrigo, Iván, Lourdes, etc.

A todos mis compañeros de laboratorio, de la UIICSE, de IINGEN y de IDECA, de cada uno de ellos adquirí no solo experiencia y conocimientos si no verdaderos momentos gratos de crecimiento personal.

Y por supuesto

A Lidia, ella bien lo sabe.

Agradecimientos

Al Laboratorio de Calidad del Agua, Conservación y Mejoramiento del Ambiente de la Unidad de Investigación Interdisciplinaria en Ciencias y de la Salud (UIICSE)

A la QFB Esperanza Robles Valderrama, por aceptarme y guiarme en la etapa final de mi carrera y otorgarme la oportunidad de realizar este proyecto.

A la M. en C. Elizabeth Ramírez Flores, por tantos conocimientos que recibí de ella en sus cursos y fuera de ellos

A la Biol. María de Guadalupe Sáinz Morales, a la M. en C. María Elena Martínez Pérez y a la Biol. Blanca Martínez Rodríguez por todo lo que aprendí de ellas durante mi estancia en el laboratorio.

Y por supuesto a la M. en C. Isaura Yáñez Noguez y al Biol. Reynaldo Ayala Patiño, por todos aquellos valiosos conocimientos y experiencias que tuvieron el gusto de enseñarme, no solo en el laboratorio si no fuera del mismo.

INDICE

CONTENIDO	Pág.
RESUMEN	1
1. INTRODUCCIÓN	3
2. ANTECEDENTES	5
2.1 Características de las aguas residuales industriales	5
2.1.1 Microorganismos de las aguas residuales	5
2.1.2 Materia orgánica	6
2.2 Sistemas de Tratamiento de aguas residuales	7
2.2.1 Sistemas de tratamiento por lodos activados	8
2.2.2 Importancia y funcionamiento del tratamiento de aguas residuales industriales	9
2.2.3 Importancia de los microorganismos en el proceso de lodos activados	10
2.2.4. Eliminación de microorganismos patógenos	12
2.3 Contaminantes de la industria textilera	12
3. JUSTIFICACIÓN	13
4. OBJETIVOS	14
4.1 Objetivo General	14
4.2 Objetivos particulares	14
5. METODOLOGÍA	15
5.1 Zona de Estudio	15
5.2 Trabajo de campo	16
5.3 Trabajo de Laboratorio	16
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	18
6.1 Parámetros estadísticos descriptivos	18
6.2 Pseudomonas spp	24
6.3 Porcentajes de remoción	25
6.3.1 DBO ₅	25
6.3.2 DQO	26
6.3.3 Nitrógeno total	27
6.3.4 Fósforo total	29

6.3.5 Ortofosfatos	30
6.3.6 Sólidos suspendidos	31
6.3.7 Sólidos sedimentables	32
6.3.8 Coliformes fecales	33
6.3.9 Coliformes totales	34
6.3.10 Remoción promedio de cada proceso	35
6.4 Análisis de correlación	36
6.5 Análisis de varianza (ANOVA)	38
6.6 Comparación de las medias de la Salida con la NOM-03	40
7. CONCLUSIONES	42
8. REFERENCIAS	44

Índice de figuras

Fig. 1 Tanque de homogenización	15
Fig. 2 Reactor biológico	15
Fig. 3 Decantador	15
Fig. 4. Porcentaje de Remoción de DBO	25
Fig. 5. Porcentaje de Remoción de DQO	27
Fig. 6. Porcentaje de Remoción de Nitrógeno Total Kjeldahl	28
Fig. 7. Porcentaje de Remoción de Fósforo Total	29
Fig. 8. Porcentaje de Remoción de Ortofosfatos	30
Fig. 9. Porcentaje de Remoción de Sólidos Suspendidos	31
Fig. 10. Porcentaje de Remoción de Sólidos Sedimentables	33
Fig. 11 Porcentaje de Remoción de Coliformes Fecales	34
Fig. 12 Porcentaje de Remoción de Coliformes Totales	35

Índice de tablas

Tabla 1 Técnicas analíticas de los parámetros bacteriológicos y fisicoquímicos	16
Tabla 2. Valores obtenidos de los parámetros evaluados en la Entrada	18
Tabla 3. Valores obtenidos de los parámetros evaluados en el Decantador	20
Tabla 4. Valores obtenidos de los parámetros evaluados en la Salida	22
Tabla 5 Resultados de las pruebas para <i>Pseudomona spp</i>	24

Tabla 6. Valores de remoción promedio de los contaminantes evaluados	35
Tabla 7 Parámetros que presentaron correlación	38
Tabla 8. Resultados del ANOVA	39
Tabla 9. Comparación entre los valores promedio obtenidos en el efluente y la norma oficial mexicana	41

Resumen

El tratamiento biológico de lodos activados, es un tratamiento que ha sido muy estudiado principalmente en aguas residuales domésticas, sin embargo en las descargas industriales el tratamiento de lodos activados no se puede generalizar ya que cada planta tiene características biológicas y fisicoquímicas muy particulares en sus influentes derivadas del tipo de proceso que manejen. De ahí la importancia de estudiar cada proceso. La industria textil es una industria que genera diversos contaminantes, por lo tanto el objetivo de este estudio fue evaluar la eficiencia de remoción de materia orgánica, bacterias y nutrientes en una industria textil.

Se evaluó la calidad fisicoquímica y bacteriológica en el influente, el decantador y el efluente de una planta de tratamiento de aguas residuales perteneciente a una industria textil, ubicada en el Edo. de México. Se realizaron seis muestreos bimensuales desde enero de 2012 a diciembre del mismo año, cubriendo un total de catorce parámetros fisicoquímicos y dos bacteriológicos.

Los resultados obtenidos en el efluente de la planta se compararon con la NOM-003-ECOL-1997. La DBO_5 y los sólidos suspendidos presentaron valores por debajo de los límites permisibles en todos los muestreos realizados.

En los análisis bacteriológicos durante todos los muestreos a excepción del último tuvieron resultados de coliformes fecales que sobrepasaron los límites máximos, Esto es debido a que no aplican cloración ya que el agua tratada la reutilizan en su proceso.

Durante los seis muestreos realizados, los valores de la DBO_5 presentaron un notable porcentaje de remoción cuyos valores oscilaron entre 92.4% y un 99.6%. Los sólidos suspendidos tuvieron una remoción promedio de 96.7%.

La remoción de la DQO también fue buena sin embargo los nutrientes y bacterias la remoción fue baja.

Con los parámetros analizados se quiere obtener un mejor diagnóstico en la eficiencia del tratamiento biológico en aguas residuales de una industria textil y ampliar sus estudios en un futuro próximo así como su saneamiento oportuno.

1. INTRODUCCIÓN

La disponibilidad del agua para el uso humano es muy limitada debido a la distribución que presenta en la Tierra, el volumen de agua en nuestro planeta se estima en unos 1,358,000,000 km³ de los cuales el 97.22% es agua salada contenida principalmente en los Océanos, el 2.13% en Capas de hielo, el 0.611% son Aguas subterráneas, el 0.015% en Glaciares, el 0.009% en Lagos de agua dulce, el 0.008% en Mares internos (salados), el 0.005% en la Humedad de la Tierra, el 0.001% contenida en la Atmósfera y el 0.0001% restantes en Ríos (Guerrero, 2006).

El agua en México se extrae primordialmente de los cuerpos de agua superficiales y de los acuíferos, donde se obtiene aproximadamente un volumen total de 186 km³ anuales, los cuales están destinados principalmente para las actividades agrícolas, domésticas, industriales y de acuicultura intensiva (CONAGUA, 2004).

El uso de agua predominante en México es el agropecuario, en la actualidad el 76% del agua extraída se utiliza para el riego de 6.3 millones de hectáreas seguida por el uso público urbano con 14% y el uso industrial con un 10% (SEMARNAT, 2004) por lo tanto se genera una gran cantidad de agua contaminada por estos procesos y ésta es generalmente vertida a los cauces y cuerpos naturales de agua cercanos como los mares, ríos y lagos. El tratamiento de estas aguas residuales es necesario para la prevención de la contaminación ambiental y del agua, al igual que para la protección de la salud pública

Se estima que las industrias en todo el país descargan anualmente alrededor de 8 km³ de aguas residuales (CONAGUA, 2004).

La industria textil es una industria que consume grandes cantidades de agua, energía y productos químicos, además genera una gran cantidad de agua residual; estos efluentes poseen elevadas concentraciones de colorantes, contaminantes orgánicos refractarios, compuestos tóxicos, componentes inhibidores, tensoactivos y componentes clorados. Por lo tanto, se consideran de los efluentes de más difícil tratamiento (Salazar *et al.*, 2009).

El tratamiento de aguas residuales es un proceso de tratamiento de aguas que incorpora técnicas físicas, químicas y biológicas, llevadas a cabo en instalaciones especiales denominadas plantas de tratamiento en los cuales se remueven contaminantes del agua ya sean de origen doméstico, agrícola o industrial. Dependiendo de la disponibilidad económica, técnica y de diseño, se puede producir agua de buena calidad para diversas actividades como el riego de áreas verdes, lavado de flota vehicular, sanitarios, lavado domestico e industrial, centros deportivos, fuentes de ornato y en la industria incluso se puede reusar para algunos procesos.

El tratamiento de aguas residuales es aún bajo en el país. La mayor parte del agua tratada recibe tratamiento secundario mediante lodos activados y lagunas de estabilización, procesos que tienen entre 80 y 90% de eficiencia para la remoción de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5).

Un sistema de lodos activados es un tratamiento biológico de depuración de efluentes líquidos, el principio básico de la depuración biológica se fundamenta en un proceso físico-biológico, la biofloculación o bioadsorción y en un aspecto exclusivamente biológico como el metabolismo bacteriano.

El sistema de lodos activados se emplea tanto para el tratamiento de aguas residuales de origen doméstico como industrial (Tchobanoglous *et al.*, 2003; Mantis *et al.*, 2005).

Incrementar los estudios en los sistemas de depuración de agua mediante lodos activados contribuirá a una mejora de este sistema, y a la identificación y resolución de sus principales problemas.

2. ANTECEDENTES

2.1 Características de las aguas residuales industriales

Las aguas residuales industriales se denominan al conjunto de líquidos residuales provenientes de distintos procesos y usos industriales. Las industrias que utilizan materias primas orgánicas son las principales contribuyentes a la contaminación orgánica, mientras que las industrias del petróleo, el acero y la minería representan el mayor riesgo en la liberación de metales pesados (Terry *et al.*, 2010).

Los contaminantes industriales presentan una composición muy variable dependiendo del uso industrial al que hayan sido destinadas las aguas. Así se tiene que la industria textil se caracteriza por generar aguas residuales abundantes en materia orgánica y nutrientes (Muñoz, 2008).

2.1.1 Microorganismos de las aguas residuales

Los microorganismos patógenos identificados en aguas residuales son muy diversos, encontrando principalmente: Enterovirus, Coliformes totales, Coliformes fecales, Estreptococos fecales, *Escherichia coli*, entre otros (Basulto *et al.*, 2010).

Entre las bacterias patógenas presentes en el agua residual de origen doméstico podemos encontrar: *Salmonella typhi* que produce fiebre tifoidea, *Salmonella paratyphi* produce fiebre paratifoidea, *Shigella dysenteriae* ocasiona disentería bacteriana, *Vibrio cholerae* es el causante del cólera, *Legionella pneumophila* origina enfermedades respiratorias agudas y las bacterias *Escherichia coli* enteropatógena, *Yersinia enterocolítica* y *Campylobacter jejuni* producen gastroenteritis (Tortora *et al.*, 2007).

Pseudomonas aeruginosa puede causar diversos tipos de infecciones. Coloniza predominantemente partes dañadas del organismo, como quemaduras y heridas quirúrgicas, el aparato respiratorio de personas con enfermedades subyacentes o las lesiones físicas en los ojos. Desde estos lugares puede invadir el organismo y

causar lesiones destructivas o septicemia y meningitis. Las personas con fibrosis quística o inmunodeprimidas son propensas a la colonización por *P. aeruginosa*, que puede conducir a infecciones pulmonares progresivas graves. Las foliculitis y las otitis relacionadas con el agua se asocian con ambientes húmedos y cálidos como las piscinas y bañeras de hidromasaje. Muchas cepas son resistentes a diversos antibióticos, lo que puede aumentar su relevancia en el ámbito hospitalario (En Linea¹). También es capaz de sobrevivir y multiplicarse en aguas tratadas, esto debido a una densa capa polisacárida la cual establece una barrera no solo física sino química capaz de proteger a la bacteria de las moléculas e iones de Cloro libre residual (Reilly, 2000, citado por Marchand, 2013).

En general la supervivencia de las bacterias en el agua depende mucho de la presencia de otros microorganismos que tengan relación de predación o competencia, así como una disponibilidad adecuada de nutrientes y condiciones de ambiente favorables, como los son el pH y la temperatura por esta razón, en las aguas residuales el tiempo de promedio de vida de las bacterias es de 20 días, siendo este el tiempo óptimo para llevar a cabo los análisis para su identificación y cuantificación.

Dado la complejidad de identificar cada una de estas bacterias, se utilizan los indicadores de contaminación, los cuales con su sola presencia indican que ha ocurrido contaminación y que puede haber la existencia de bacterias patógenas. Dentro de los indicadores bacteriológicos de contaminación se encuentran los Coliformes totales y los Coliformes fecales (Madigan *et al.*, 2009, Robles *et al.*, 2006; Jiménez *et al.*, 2003).

2.1.2 Materia orgánica

La materia orgánica es uno de los componentes característicos de las aguas residuales, constituyendo uno de los indicadores claros de contaminación acuática y el parámetro de medición es la demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅).

Los compuestos orgánicos presentes en las aguas residuales industriales están constituidas básicamente en proteínas en un 40-60%, carbohidratos de 25-50% y grasas y aceites en un 8-12% (Muñoz, 2008).

La Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5) y la Demanda Química de Oxígeno (DQO) son los parámetros más representativos de la eficiencia de remoción de materia orgánica en un sistema de depuración de aguas, definiéndose como DBO la cantidad de oxígeno necesario que utilizan los microorganismos para llevar a cabo la degradación de la materia orgánica biodegradable y la DQO como la cantidad de un agente químico fuertemente oxidante necesaria para la oxidación de la materia orgánica (Jiménez, 2001).

En las aguas residuales industriales también existen todo tipo de sólidos, de naturaleza orgánica e inorgánica, los primeros se caracterizan por ser sustancias que contienen carbono, hidrógeno y oxígeno pudiendo combinarse con nitrógeno, fósforo y azufre, susceptibles de ser degradados por bacterias y otros seres vivos, los sólidos inorgánicos poseen una naturaleza mineral inerte. Los sólidos comúnmente se clasifican en sólidos suspendidos y disueltos, los primeros conformados por arcillas, restos fecales, material de papel, de madera, comida y basura en descomposición 70% orgánicos y 30% inorgánicos. Los sólidos disueltos conformados por las sales disueltas y los sólidos totales, que son la suma de los dos (Molina y Tigreros 2005).

Los sólidos sedimentables son aquellos sólidos que pueden sedimentarse por su tamaño y peso en un determinado tiempo.

2.2 Sistemas de Tratamiento de aguas residuales

El propósito del tratamiento dependerá del uso que se le quiera dar al agua tratada, por ejemplo:

En las aguas de uso agrícola el principal objetivo es la eliminación de los nutrientes que pueden favorecer el crecimiento de plantas acuáticas, como el nitrógeno y el fósforo. En el caso de las aguas residuales industriales, el principal

objetivo es la reducción de la concentración de compuestos tanto orgánicos como inorgánicos. A menudo puede ser necesario llevar a cabo un pretratamiento previo, debido a la potencial toxicidad de estos compuestos para los microorganismos (Metcalf y Eddy, en línea²).

En el agua residual doméstica el principal objetivo es la reducción de la materia orgánica y en muchos casos la eliminación de nutrientes como el nitrógeno y el fósforo. A menudo la eliminación de compuestos a nivel traza que pueden resultar tóxicos, también constituye un objetivo de tratamiento importante (Pérez, 2002).

El conocimiento de la presencia de microorganismos patógenos así como su identificación y cuantificación en las aguas residuales que son descargadas a los cuerpos de aguas naturales es un tema de polémica debido a que se han desarrollado una gran diversidad de tratamientos tanto físicos, químicos y biológicos para tratar de reducir y en el mejor caso eliminar la concentración de contaminantes en dichas aguas; sin embargo poco se sabe de los microorganismos patógenos que existen en las mismas y sobretodo de la supervivencia de estos al tratamiento diseñado.

Dentro de los sistemas de tratamiento biológico de aguas residuales se encuentran los lodos activados.

En México ha adquirido mayor auge la implementación de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas, de acuerdo al registro de CONAGUA en 2008 existían 1,833 plantas municipales en operación con una capacidad total de 113,024 L/s, que representa el 40.2 % de aguas residuales tratadas (Basulto *et al.*, 2010).

2.2.1 Sistemas de tratamiento por lodos activados

Los lodos o fangos activos son agregados de partículas y colonias de bacterias aeróbicas los cuales forman estructuras microscópicas denominadas flóculos. Los flóculos se mantienen en un reactor biológico o reactor aeróbico a partir de la agitación mecánica externa, la que a su vez renueva el contenido de oxígeno del

medio líquido. Las bacterias presentes en los flóculos o lodos activados remueven la materia orgánica disuelta principalmente en su contenido de carbono, nitrógeno y fósforo. En el primer caso la eficiencia del sistema se evalúa en términos de remoción de la DBO₅. En el caso del nitrógeno mediante reacciones de oxidación y reducción se libera finalmente como nitrógeno gaseoso en un subsistema anóxico. Esta misma combinación de mecanismos aeróbicos-anaeróbicos es utilizada por las bacterias del fósforo las cuales lo asimilan eliminándolo del medio líquido (González y Saldarriaga, 2008; Jiménez, 2001).

El proceso de lodos activados está basado en proporcionar un contacto íntimo entre el agua residual y los lodos biológicamente activos. Los lodos se desarrollan inicialmente por una aireación prolongada bajo condiciones que favorecen el crecimiento de organismos que tienen la habilidad de oxidar materia orgánica. Siendo por esto último, el oxígeno, mediante la aireación, uno de los principales factores limitantes que permiten el óptimo crecimiento microbiano en un sistema de tratamiento de aguas (Pérez, 2002, Quevauviller *et al.*, 2006). La aireación también contribuye a que el nitrógeno y los óxidos de nitrógenos producidos sean liberados y favorezcan la regeneración completa de las bacterias degradadoras de fósforo (Pérez, 2002).

2.2.2 Importancia y funcionamiento del tratamiento de aguas residuales industriales

El proceso de depuración de aguas industriales mediante lodos activados generalmente conlleva un proceso dividido en tres etapas: tratamiento primario o llamada clarificación primaria, en los tanques de clarificación primaria se da un tiempo de reposo al flujo de agua para sedimentar el material coagulado; después sigue el tratamiento secundario o tratamiento biológico en donde el influente está en contacto con los lodos durante determinado periodo de tiempo recibiendo oxígeno mediante un sistema de difusores de burbuja fina, posteriormente el flujo de agua va dirigido a estanques circulares, el agua reposa en ellos por un tiempo determinado permitiendo la floculación y sedimentación de la masa de lodos activados, los cuales se depositan en el fondo y regresan al proceso para servir de

inóculo y finalmente el influente pasa al tratamiento terciario o estanque de adición de cloro de agua tratada que sale de los clarificadores secundarios, permaneciendo en un tanque de cloración por un tiempo mínimo de 30 minutos, para finalmente ser vertida directamente al cuerpo de agua natural correspondiente, siendo de vital importancia este último proceso de eliminación de bacterias para evitar la contaminación de los cuerpos de agua y la propagación de enfermedades (Pacheco *et al.*, 2006).

La reducción de DBO₅ y DQO mediante el sistema de lodos activados ha demostrado tener una buena eficiencia (Palma y Manga, 2005).

2.2.3 Importancia de los microorganismos en el proceso de lodos activados

En la naturaleza, el papel clave de las bacterias es el de descomponer la materia orgánica producida por otros organismos vivos. En el proceso de lodos activados, las bacterias son los microorganismos más importantes, ya que estos son la causa de descomposición de la materia orgánica del efluente (Vargas *et al.*, 1992). En el reactor parte de la materia orgánica del agua residual es utilizada por las bacterias aeróbicas con el fin de obtener energía para la síntesis del resto de la materia orgánica en nuevas células.

En un sistema de lodos activados, se tienen bien diferenciados dos grupos de bacterias las aeróbicas y las anaeróbicas, siendo ellas los organismos responsables de la remoción de nutrientes, principalmente nitrógeno y fósforo (Di Marzio *et al.*, 2009)

Otro tipo de microorganismos igualmente importantes son los protozoos y rotíferos que actúan como depurificadores de los efluentes. Los protozoos consumen las bacterias dispersas que no han flocculado y los rotíferos consumen partículas biológicas que no hallan sedimentado.

En realidad solo parte del residuo original es verdaderamente oxidado a compuestos de bajo contenido energético tales como el NO₃⁻², SO₄⁻² y CO₂; el resto es sintetizado en materia celular. (En línea³)

La dependencia de la temperatura en la constante de la velocidad de la reacción biológica es muy importante a la hora de evaluar la eficacia total del tratamiento biológico. La temperatura no solo influye en las actividades metabólicas sino que tiene un profundo efecto en factores tales como las tasas de transferencias de gases y características de sedimentación de sólidos biológicos. (En línea³)

El nitrógeno y fósforo son los principales micronutrientes en las aguas residuales y para su remoción requieren la acción metabólica de ciertos géneros específicos de bacterias como *Acinetobacter spp*, *Nitrosomas spp* y *Nitrobacter spp*. El nitrógeno orgánico es convertido por las bacterias en amoníaco, el compuesto más importante en el tratamiento de aguas, ya que su presencia en el efluente de la planta puede estimular el descenso del oxígeno disuelto en la corriente receptora través del proceso biológico de nitrificación. El amoníaco se oxida biológicamente a nitrito y posteriormente a nitrato por ciertos géneros específicos de bacterias como *Acinetobacter spp*, *Nitrosomas spp* y *Nitrobacter spp* (Erijman *et al*, 2011), siendo el nitrato el estado de oxidación final de los compuestos de nitrógeno y como tal representa su producto estabilizado.

El fósforo es un elemento esencial en el crecimiento de plantas y animales; actualmente es considerado como uno de los nutrientes que controla el crecimiento de las algas. La descarga de 1 g de fósforo, en un cuerpo de agua natural, puede permitir la formación más de 100 g de biomasa, la cual puede representar una DBO de 150000 mg de oxígeno para su oxidación aerobia completa (Reyes *et al.*, 2011). Teniendo en cuenta la importancia del fósforo como nutriente, su determinación es necesaria en estudios de contaminación de ríos, lagos y embalses, así como en los procesos químicos y biológicos de purificación y tratamiento de aguas residuales.

La eliminación de ambos micronutrientes es de vital importancia en los cuerpos de agua de descarga, debido a que la presencia del nitrógeno y el fósforo en forma excesiva ocasiona graves problemas de eutrofización, aumento desmedido de biomasa y contaminación acuática por bacterioplancton (Moreta, 2008).

2.2.4. Eliminación de microorganismos patógenos

El sistema de lodos activados permite la eliminación considerable de materia orgánica y de sólidos suspendidos, sin embargo no se han llegado a eliminar de forma definitiva los microorganismos patógenos mediante un solo tratamiento secundario, es necesario implementar una segunda o inclusive una tercera depuración para eliminar de forma definitiva a los microorganismos patógenos, siendo *E. coli* y *Pseudomonas aeruginosa* los principales bioindicadores de contaminación en aguas residuales, estos microorganismos pueden sobrevivir al proceso biológico e inclusive al proceso de cloración y se han encontrado en muchos efluentes de plantas de tratamiento (Martínez *et al.*, 2008).

2.3 Contaminantes de la industria textilera

Anualmente en todo el mundo, se producen cerca de 700000 toneladas de más de 10000 diferentes tipos de colorantes y pigmentos, de los cuales el 20% son descargados directamente en los efluentes industriales, estos efluentes normalmente no pueden ser tratados por métodos convencionales de tratamiento tanto biológicos como fisicoquímicos ya que en el primer caso los procesos aerobios no son capaces de degradar los colorantes, no obstante los procesos anaerobios si rompen estas moléculas, sin embargo, no pueden degradar por completo los subproductos, lo que genera metabolitos intermediarios que son potencialmente tóxicos, en el caso de los procesos fisicoquímicos como es la coagulación floculación tienen una alta eficiencia de remoción de los colorantes, sin embargo se tiene el problema de una alta generación de lodos químicos los cuales generan una nueva problemática de tratamiento (Cuevas y Garzón, 2010).

3. JUSTIFICACIÓN

El tratamiento biológico de lodos activados, es un tratamiento intensivo y normalmente con buena eficiencia de remoción, pero que representa un costo elevado. Aunque este sistema de tratamiento ha sido muy estudiado, cada planta de tratamiento tiene características biológicas y fisicoquímicas muy particulares en sus influentes, que dependen de diversos factores como son: volumen de agua, tipo de agua y grado de contaminación a tratar, por lo que la caracterización de estos procesos es importante para el desarrollo de una estrategia que permita optimizar el proceso biológico en cuanto a costos y acorde al tipo de procesos específicos que realicen y así poder tener buenas eficiencias de remoción de los contaminantes y poder reusar esa agua sin ningún riesgo (Tejero *et al.*, 2007; Herrera *et al.*, 2007 y Caldera *et al.*, 2010).

Por lo anterior esta investigación se enfocó en dar a conocer las características bacteriológicas y fisicoquímicas así como la eficiencia de remoción de bacterias, materia orgánica y nutrientes de un sistema de tratamiento de aguas residuales mediante lodos activados de una industria textil.

4. OBJETIVOS

4.1 Objetivo General

Determinar la remoción de bacterias, materia orgánica y nutrientes de un sistema de tratamiento de lodos activados en una industria textil.

4.2 Objetivos particulares:

Analizar los parámetros fisicoquímicos: pH, temperatura, oxígeno disuelto, demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5), demanda química de oxígeno (DQO) y detergentes (SAAM), nitrógeno total, nitratos, nitritos, fósforo total, ortofosfatos, sólidos sedimentables y sólidos suspendidos.

Analizar los parámetros bacteriológicos: Coliformes totales y Coliformes fecales.

Determinar la eficiencia del sistema de tratamiento.

Comparar los resultados del efluente con la NOM.003-Ecol-1997 para agua residual tratada.

5. METODOLOGÍA

5.1 Zona de Estudio

La planta de tratamiento de las aguas residuales de la industria textil seleccionada, cuenta con un tratamiento preliminar para la eliminación de fibras que podrían dañar los equipos de bombeo, un sistema primario o tanque de homogenización que permite amortiguar los horarios “picos”, un sistema biológico secundario donde se realiza la degradación biológica, un decantador que permite la separación del agua depurada y los lodos biológicos; finalmente el agua es tratada por un proceso de filtración para la eliminación de sólidos suspendidos y mejoramiento de la calidad de agua. Para este estudio se tomaron muestras en el influente al sistema secundario o efluente del tanque de homogenización, en el efluente del decantador y después del sistema de filtros y se realizaron 6 muestreos cada dos meses durante un año.



Fig 1 Tanque de homogenización



Fig. 2 Reactor biológico

Fig. 3 Decantador

5.2 Trabajo de campo

En el lugar de muestreo se determinaron el pH con un potenciómetro Conductronic modelo pH10 y el oxígeno disuelto y temperatura con un equipo YSI modelo 51b. Se tomaron muestras en la entrada del sistema, después en el decantador y por último en la salida de los filtros, mediante recipientes con capacidad de tres litros y un litro para los análisis fisicoquímicos, siendo estos últimos fijados con ácido sulfúrico para su posterior análisis y con recipientes estériles para los análisis bacteriológicos, las muestras se transportaron en hieleras a una temperatura aproximada de 4 C°.

5.3 Trabajo de Laboratorio

En el laboratorio se determinaron los parámetros bacteriológicos y fisicoquímicos siguiendo las técnicas normalizadas (Tabla 1). (Robles *et al.*, 2008; APHA-AWWA-WEF., 1998).

Tabla 1 Técnicas analíticas de los parámetros bacteriológicos y fisicoquímicos.

Parámetro	Técnica
Coliformes totales	NMP
Coliformes fecales	NMP
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	Dilución
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	Reflujo
Nitrógeno total	Digestión, Kjeldahl
Nitratos	Brucina
Nitritos	Diazotización
Ortofosfatos	Cloruro estanoso
Fósforo total	Cloruro estanoso

Sólidos totales	Gravimétrica
Sólidos suspendidos	Gravimétrica
Sólidos sedimentables	Cono Imhoff
Sustancias activas al azul de metileno	Azul de metileno

Aunque no es objetivo de este estudio la determinación de *Pseudomonas* spp, se logró determinar su presencia cualitativa en tres muestreos, analizando la entrada y el decantador.

Para su determinación la muestra se sembró en caldo asparagina y los tubos positivos (pigmentos fluorescentes verdes con UV) se resembraron en caldo cetrimida, (la alcalinización y turbiedad es la prueba positiva) y de ahí se resembraron en agar leche y agar nutritivo para aislar las colonias y hacer las pruebas bioquímicas: oxidasa, catalasa, citrato, indol y TSI.

Con los resultados se calculó el porcentaje de remoción de bacterias, nutrientes y materia orgánica efectuada en el sistema, se hicieron un análisis de correlación, el ANOVA, y se compararon las medias del efluente con los límites permisibles de la Norma Oficial NOM- 003 (SEMARNAP, 2003).

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 Parámetros estadísticos descriptivos

En las tablas 2, 3 y 4 se presentan la media, valor mínimo y valor máximo obtenido de cada parámetro analizado en la entrada, en el decantador y en la salida respectivamente, del sistema de tratamiento de la planta textil monitoreada

Tabla 2. Valores obtenidos de los parámetros evaluados en la Entrada.

Entrada					
Parámetro	Unidad	Valor min.	Media	Valor máx.	Desv. Est.
pH		6,1	7,12	8,1	0,75
Temperatura	C°	32	33,2	37	1,9
Oxígeno Disuelto	mg/L	0,2	2,83	5,5	1,99
DBO ₅	mg/L	150	281	391	94
DQO	mg/L	588	1102	1600	404
Nitrógeno Total K.	mg/L	8,1	29,9	110	39,5
Nitritos	mg/L	0,03	0,041	0,361	0,156
Nitratos	mg/L	0,848	1,87	3,5	1,05
Fósforo Total	mg/L	0,516	1,12	1,67	0,449
Ortofosfatos	mg/L	0	0,011	0,06	0,18
Conductividad	µs/Cm	682	876	1202	178
SAAM	mg/L	0	0	0	0
Sólidos Suspendidos	mg/L	10	78,83	135	54,57
Sólidos Totales	mg/L	717	918	1280	206
Sólidos Sedimentables	mg/L	0,1	0,35	1,3	0,47

Coliformes Fecales	NMP/100mL	1,20E+11	6,3393E+16	2,20E+17	9,9888E+16
Coliformes Totales	NMP/100mL	1,20E+11	2,9339E+17	1,60E+18	6,4329E+17

Los valores de pH oscilaron alrededor de la neutralidad con ligeras variaciones, mostrando ocasionalmente aguas ligeramente alcalinas y ligeramente ácidas. La industria textil utiliza una gran cantidad de productos químicos como blanqueadores, suavizantes, colorantes y limpiadores cuyos ingredientes activos son sales de bases y ácidos como el hidróxido de sodio, hidróxido de potasio, ácido sulfúrico, ácido oxálico entre otros (Muñoz, 2008), la mezcla de ácidos y bases en la utilización conjunta de estos productos, producen un agua residual con valores en promedio neutros.

La temperatura en el agua residual se muestra con valores altos, causado por los procesos industriales a altas temperaturas en el teñido y blanqueamiento de prendas, altas temperaturas en el agua inciden directamente en los bajos niveles de oxígeno disuelto obtenidos, este último parámetro es muy importante pues determina la calidad del agua y su capacidad de estabilizar el material orgánico, además de afectar los niveles de oxígeno disuelto la temperatura elevada afecta la tasa de crecimiento bacteriana heterótrofa (Díaz, 2003), sumado a los bajos niveles de oxígeno disuelto, el agua residual industrial requiere un significativo ajuste de temperatura y oxigenación para hacer efectivo el tratamiento biológico.

La cantidad de DBO₅ en el influente de la planta es relativamente baja comparada con cifras reportadas de aguas municipales o de origen doméstico, los elevados valores de DQO y Nitrógeno total Kjeldahl demuestran la utilización de una amplia variedad de productos químicos en la industria como lo son los limpiadores con base de amonio, productos en aerosol, blanqueadores, colorantes, adhesivos, y emulsionantes. También cuando desmontan colores lo hacen con hidróxido de amonio. Todo esto hace que los valores de nitrógeno total y por consiguiente de DQO se eleven más en algunos muestreos.

Comúnmente en la industria, la presencia de nitrógeno amoniacal y orgánico, fósforo total y ortofosfatos se debe esencialmente a la combinación del agua residual de origen industrial y al agua residual proveniente de sanitarios, cocinas y otras instalaciones de tipo domésticas que utilizan los usuarios que laboran en la industria (Jiménez, 2001). Sin embargo en esta industria el agua residual del proceso no se mezcla con la de sanitarios, por lo que la presencia de estos compuestos se debe a las materias primas utilizadas en los procesos que se estén llevando a cabo en esos momentos. Los sólidos que ingresan en las aguas residuales industriales son de origen mayormente orgánico, por poseer carbono, oxígeno e hidrógeno, por otro lado los sólidos de naturaleza inorgánica son debido a las sales. Los sólidos en suspensión desempeñan un papel importante como contaminantes, tanto debido a la materia orgánica o inorgánica que los forman, como por los agentes patógenos que son transportados en la superficie de dichas partículas. Los niveles altos de conductividad reflejan el nivel de contaminación del agua debido a la cantidad de iones disueltos entre ellos los nitratos, nitritos, sulfatos y cloruros, también de otros compuestos no iónicos como alcoholes, fenoles, aceites y azúcares (En línea⁴)

Los valores elevados de coliformes totales y fecales normalmente provienen de las aguas negras originadas en sanitarios y letrinas, los coliformes totales como grupo cosmopolita siempre están presentes en aguas residuales (Martínez *et al*, 2008). La planta de tratamiento de este estudio no recibe aguas negras de origen doméstico en su influente, el agua residual a tratar proviene únicamente de los procesos industriales llevados a cabo en la misma industria textil, la presencia de coliformes puede deberse a la contaminación de las materias primas utilizadas, las cuales están conformadas por tejidos orgánicos de origen animal, así como de factores sanitarios en el transporte de las mismas.

Tabla 3. Valores obtenidos de los parámetros evaluados en el Decantador.

Decantador

Parámetro	Unidad	Valor min.	Media	Valor máx.	Desv. Est.
pH		5,6	6,16	6,58	0,38
Temperatura	C°	27	29,6	32	1,8
Oxígeno Disuelto	mg/L	1,7	3,28	5	1,32
DBO ₅	mg/L	1,79	11,6	30	10,1
DQO	mg/L	63	113	158	36
Nitrógeno Total K.	mg/L	1,22	7,19	19	9,07
Nitritos	mg/L	0,016	0,105	0,273	0,096
Nitratos	mg/L	2,9	17,5	33,1	15,6
Fosforo Total	mg/L	0,069	0,883	1,44	0,548
Ortofosfatos	mg/L	0	0,047	0,1	0,041
Conductividad	µs/Cm	773	977	1212	146
SAAM	mg/L	0	0	0	0
Sólidos Suspendidos	mg/L	15	33,2	70	24,9
Sólidos Totales	mg/L	785	923	1123	121
Sólidos Sedimentables	mg/L	0,1	0,4	0,7	0,3
Coliformes Fecales	NMP/100mL	1,60E+06	177383333	9,00E+08	357379733
Coliformes Totales	NMP/100mL	1,60E+06	204383333	9,00E+08	347263349

En la Tabla 3 se expresan los resultados obtenidos en el agua residual sometida al proceso de tratamiento biológico, la cual es incorporada al decantador. Aquí se aprecia un descenso gradual en los valores de pH, tornando el agua más ácida en el Decantador que en la Entrada, originada posiblemente por el ingreso de una amplia variedad de productos químicos utilizados en la industria textil, como lo son el ácido nítrico, el ácido sulfúrico, el ácido clorhídrico, el amoníaco y la sosa por

ejemplo, los cuales son compuestos químicos ampliamente utilizados en la industria textil dentro de sus aplicaciones para la obtención, limpieza y teñido de telas, lanas y sedas (Cuevas y Garzón, 2010). Debido al uso intensivo de productos químicos no se llega a una estabilización adecuada del pH, el cual es un factor importante durante los procesos biológicos posteriores, afecta principalmente la remoción de la materia orgánica y nutrientes (Díaz, 2003).

Paralelamente la temperatura desciende y el oxígeno disuelto aumenta, situación favorable para la remoción de la materia orgánica putrescible, elevando la calidad del agua residual para posteriormente someterse a un último tratamiento por filtros con resinas de intercambio iónico.

En la Tabla 3, también se puede apreciar una reducción de los sólidos suspendidos bajo la exclusiva acción de la gravedad (En línea⁷). En esta etapa ya se puede apreciar la remoción de los principales contaminantes como los son la DBO₅, la DQO y el nitrógeno total kjeldahl, coliformes fecales y totales, aunque también se manifiesta el incremento de ciertos nutrientes, como lo expresan los valores de nitritos, nitratos fósforo total y ortofosfatos debido a la contundente acción microbiana en la planta.

El agua residual tratada posterior al proceso de decantación, es sometida a un tratamiento terciario en filtros con resinas de intercambio iónico, con la finalidad de continuar con la eliminación de los contaminantes evaluados como se puede apreciar en la Tabla 4,

Tabla 4. Valores obtenidos de los parámetros evaluados en la Salida.

Salida					
Parámetro	Unidad	Valor min.	Media	Valor máx.	Desv. Est.
pH		3,82	5,77	6,8	1,15
Temperatura	C°	25	27,5	31	1,9

Oxígeno Disuelto	mg/L	2,4	5,17	7,8	1,83
DBO ₅	mg/L	1,19	5,88	16,9	5,68
DQO	mg/L	14,7	44,2	70	21,9
Nitrógeno Total K.	mg/L	0,148	5,31	15	7,13
Nitritos	mg/L	0,004	0,044	0,074	0,028
Nitratos	mg/L	2,55	16,9	32,2	15,2
Fósforo Total	mg/L	0	0,812	1,4	0,577
Ortofosfatos	mg/L	0	0,049	0,1	0,043
Conductividad	µs/Cm	730	994	1258	176
SAAM	mg/L	0	0	0	0
Sólidos Suspendidos	mg/L	4	20,3	60	20,9
Sólidos Totales	mg/L	735	901	1135	154
Sólidos Sedimentables	mg/L	0,1	0,275	0,45	0,247
Coliformes Fecales	NMP/100mL	5,00E+02	498917	2,40E+06	950784
Coliformes Totales	NMP/100mL	5,00E+02	610417	3,40E+06	1368896

Como se muestra en la Tabla 4 los valores de pH muestran un descenso significativo del influente al efluente de la PTAR tornando el agua más acida debido a los procesos químicos originados en la actividad industrial, previo al tratamiento en la planta.

Los valores de temperatura en el agua residual tratada descienden considerablemente en comparación con los valores registrados en el influente, en contraparte el oxígeno disuelto aumenta significativamente en el agua residual tratada mejorando su calidad.

Los valores de DQO, DBO₅, sólidos suspendidos y demás parámetros analizados en general disminuyen después de pasar por los filtros

6.2 *Pseudomonas spp.*

Se buscó aislar en tres muestreos a *Pseudomonas aeruginosa* en el influente y efluente del tanque biológico (lodos activados).

Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 5, en donde se puede apreciar que en general las bioquímicas realizadas podrían indicar la presencia de *Pseudomonas aeruginosa* en dos muestreos tanto en la entrada como en el decantador. Sin embargo dado a que faltarían pruebas serológicas para confirmar su presencia si podemos asegurar que el género si estuvo presente. Esto es importante ya que su presencia en el agua residual tratada es un indicador de la eficiencia en la remoción de patógenos llevado a cabo en la planta.

Tabla 5 Resultados de las pruebas para *Pseudomonas spp.*

	<i>P. aeruginosa</i>	Abril		Junio		agosto	
		E	D	E	D	E	D
Caldo asparagina (turbidez y fluorescencia con UV)	+	+	+	+	+	+	+
Caldo acetamida (turbiedad o alcalinización)	+	+	+	+	+	+	+
Oxidasa	+	+	+	+	+	+	+
Catalasa	+	+	+	+	+	+	+
Citrato	+	-	-	+	+	+	+
Indol	-	-	-	-	-	-	-
TSI	Alc/alc/gas neg	-	-	+	+	+	+

6.3 Porcentajes de remoción

En cada parámetro se calculó el porcentaje de remoción con la siguiente fórmula:

$$\% \text{ remoción} = 100 - \frac{(\text{valor del Decantador (ó Salida)} \times 100)}{\text{Valor de Entrada}}$$

6.3.1 DBO₅

Con los resultados de la DBO₅ se calculó el porcentaje de remoción de la entrada con el decantador y de la entrada con la salida (Fig. 4).

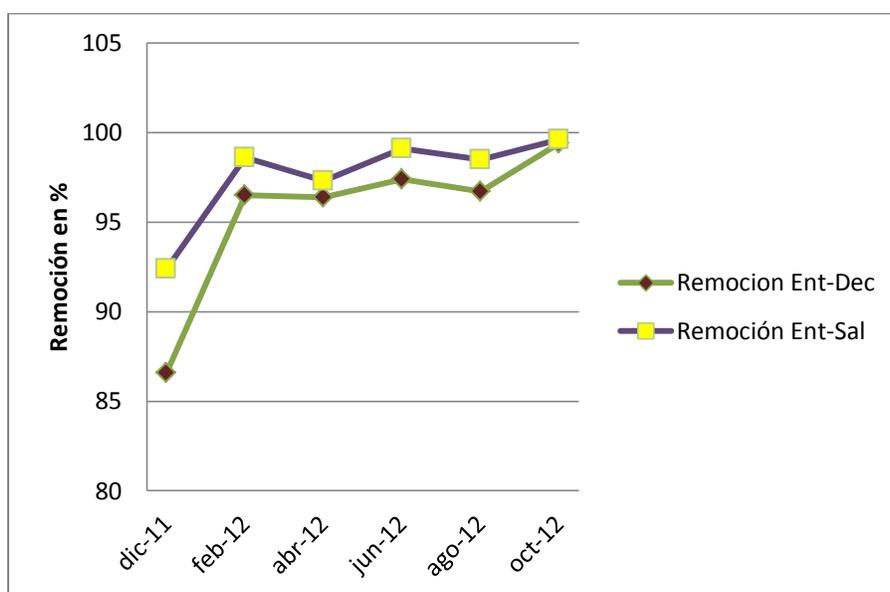


Fig. 4. Porcentaje de Remoción de DBO₅

En la figura 4 se aprecia que los porcentajes de remoción de la DBO₅, obtenidos durante los 6 muestreos realizados, oscilaron entre un 86.6% y un 99.4% de la entrada al decantador y de un 92.4% a un 99.6% de la entrada a la salida, los niveles de remoción más bajos correspondieron al mes de diciembre de 2011 y el valor más alto registrado fue en el mes de octubre de 2012, aumentando el porcentaje de remoción del decantador a la salida en un valor promedio de 2.0%,

estos valores se colocan por encima del estándar de remoción por lodos activados, el cual es de un 85% a un 90% (Poch, 1999), lo cual ratifica que el sistema de lodos activados es muy eficiente para la remoción de materia orgánica en el tratamiento de aguas residuales industriales, reflejado en un valor promedio de 5.8 mg/L de DBO₅ en el efluente final, debido a las buenas condiciones propiciadas de oxigenación en el reactor biológico y a los flóculos en un óptimo estado metabólico de los fangos activados (Castillo *et al.*, 2012).

En la misma figura se aprecia un comportamiento similar de remoción en la entrada-decantador y de remoción en la entrada-salida, el cual es causado por las variaciones de los volúmenes y contaminantes del influente, en la cantidad de oxígeno disuelto en el reactor biológico, indispensable para la degradación de la materia orgánica, provocado por un aumento en la temperatura del agua residual, originado en los procesos industriales a altas temperaturas del teñido de prendas y ropa, también los productos químicos en los tintes y colorantes contienen sustancias tóxicas, las cuales afectan a la comunidad microbiana de los lodos activados reduciendo la efectividad en la remoción de DBO₅ (Nodal, 2001).

6.3.2 DQO

Con los resultados de la DQO de la entrada y del decantador, y de la entrada con la salida, se calculó el porcentaje de remoción (Fig. 5).

En la figura 5 se observan los porcentajes de remoción de la DQO, obtenidos durante los 6 muestreos realizados, los cuales varían entre un 82.4%, un 92.4% de la entrada al decantador y de un 91.4% a un 97.9% de la entrada a la salida, los niveles de remoción más bajos correspondieron al mes de junio de 2012 y el valor más alto reportado fue en el mes de febrero del mismo año, aumentando el porcentaje de remoción del decantador a la salida en un valor promedio de 4.9%; en dicho mes de junio los valores de remoción disminuyeron posiblemente causado por un aporte mayor de materia orgánica biodegradable que de materia orgánica no biodegradable, como lo son los productos de limpieza industrial y desengrasantes relacionados con algún proceso textil; los valores de remoción de

DQO están directamente relacionados con los valores de remoción de DBO_5 , dependiendo ambos directamente de la eficiencia en la actividad microbiana de los lodos activados y de las buenas condiciones ambientales de pH, temperatura y oxígeno disuelto en el bio-reactor (Arango y Garcés, 2007), siendo ambos factores importantes para ambos parámetros.

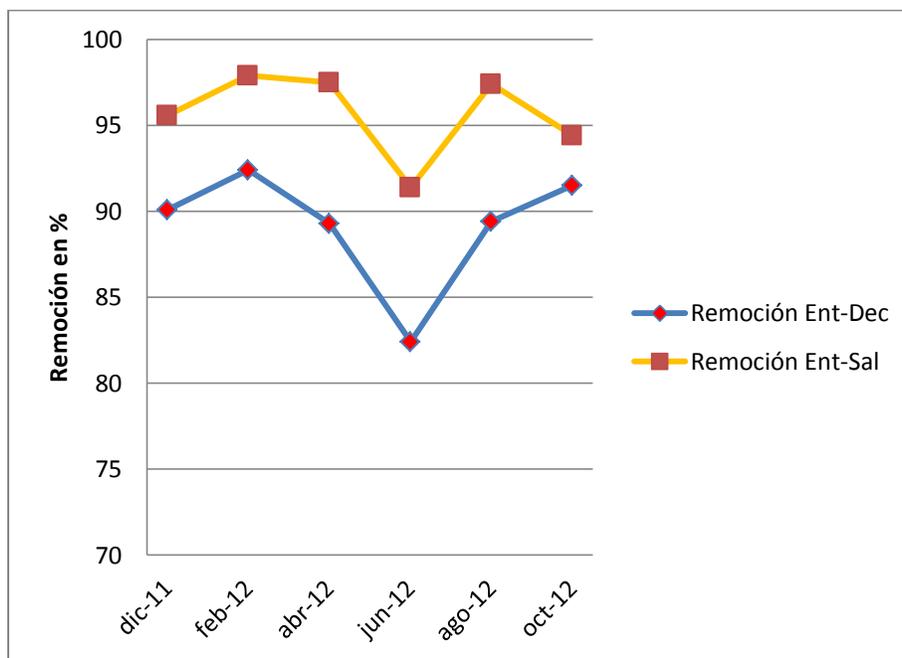


Fig. 5. Porcentaje de Remoción de DQO

Los valores reportados de DQO en el influente fueron muy elevados, con un valor promedio de 1102 mg/L de DQO comparados con un valor promedio de 281 mg/L de DBO, este comportamiento es habitual en aguas residuales industriales, en comparación con las aguas servidas domésticas, debido a las altas concentraciones de materia inorgánica y materia orgánica no biodegradable, vertidas en las aguas residuales originadas por el uso masivo de productos químicos en la industria textil (Ramahlo, 1996).

6.3.3 Nitrógeno total

Con los resultados del nitrógeno total de la entrada y del decantador, y de la entrada con la salida, se calculó el porcentaje de remoción (Fig. 6)

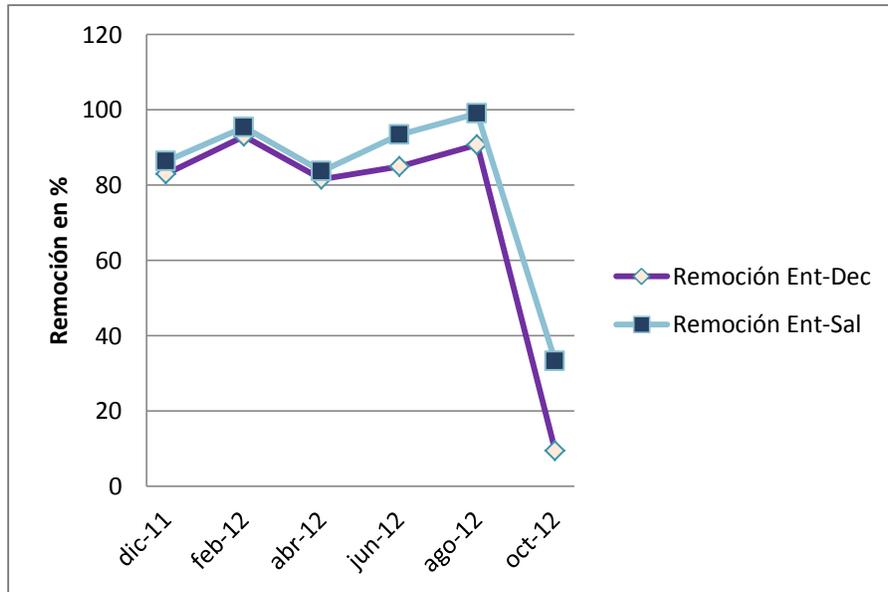


Fig. 6. Porcentaje de Remoción de Nitrógeno Total Kjeldahl

En la figura 6 se muestran los porcentajes de remoción del nitrógeno total, obtenidos durante los 6 muestreos realizados, situados entre un 9.5% y un 90.7% de la entrada al decantador y de un 33.3% a un 99.0% de la entrada a la salida, los niveles de remoción más bajos correspondieron al mes de Octubre de 2012 y el valor más alto registrado fue en el mes de agosto del mismo año, aumentando el porcentaje de remoción del decantador a la salida en un valor promedio de 5.2%, excepto para el ultimo muestreo; en aguas residuales sin tratar están presentes el nitrógeno orgánico y el nitrógeno amoniacal cuantificado como nitrógeno total, su remoción indica una buena nitrificación en la etapa aeróbica del proceso de depuración, es decir, el nitrógeno orgánico es convertido en nitrógeno amoniacal por la acción microbiana y este último, en presencia de oxígeno, es degradado por las bacterias nitrificantes *Nitrosomas spp.* y *Nitrobacter spp.* en nitritos y posteriormente en nitratos durante el proceso de depuración (Pérez, 2002).

En la figura 6 también se aprecia un descenso drástico de remoción durante el mes de octubre, posiblemente debido a procesos de decoloración efectuados en la fábrica, en los cuales son utilizados compuestos como el hidróxido de amonio en grandes cantidades, con la finalidad de obtener una mejor textura en las prendas, puede ser un aporte excesivamente mayor de nitrógeno a la planta de tratamiento.

El incremento de nitritos y nitratos en el decantador y salida es el resultado de la oxidación de la materia orgánica degradando el nitrógeno orgánico a nitrógeno amoniacal y después a nitritos y por último a nitratos siendo la presencia de estos un indicador de un buen tratamiento. (Collì *et al.*, 2002, Saldarriaga *et al.*, 2011).

6.3.4 Fósforo total

Con los resultados del fósforo total de la entrada y del decantador, y de la entrada con la salida, se calculó el porcentaje de remoción (Fig. 7)

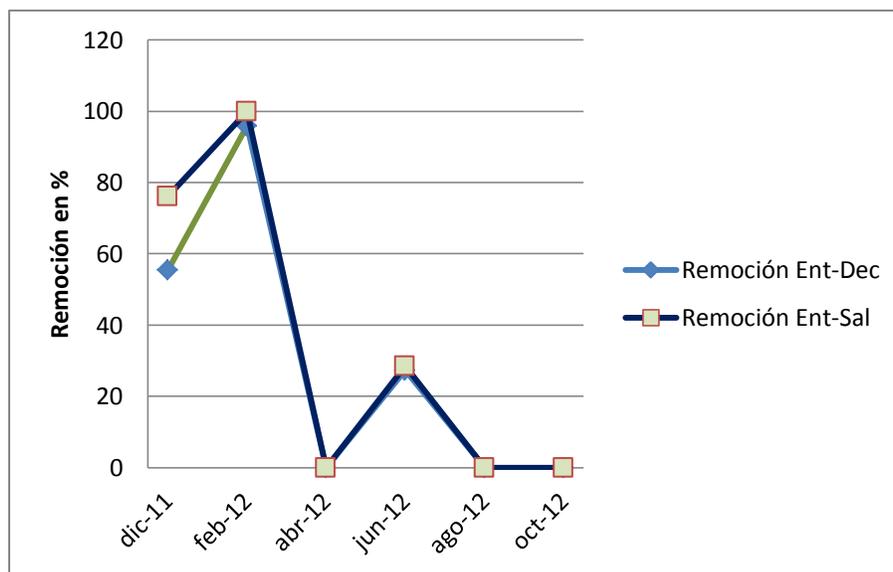


Fig. 7. Porcentaje de Remoción de Fósforo Total

En la figura 7 se aprecian los porcentajes de remoción de fósforo total, obtenidos durante los 6 muestreos realizados, situados entre un 27.3% y un 95.9% de la entrada al decantador y de un 28.6% a un 100% de la entrada a la salida de la planta, el valor más alto registrado fue en el mes de febrero de 2012. Mientras que en los meses de abril, agosto y octubre del 2012 no hubo remoción, incluso

aumentaron ligeramente durante el proceso de tratamiento, esto se debe posiblemente a la ausencia de una etapa anaeróbica en el tratamiento a la que es sometida el agua residual (González y Saldarriaga, 2008); otro factor importante es la competencia entre las bacterias acumuladoras de fosforo y las bacterias nitrificantes, es decir, el aumento de las bacterias nitrificantes reduce la tasa reproductiva de las bacterias acumuladoras de fósforo principalmente del género *Acinetobacter*, este desbalance se ve reflejado en una buena remoción del nitrógeno pero una mala remoción del fósforo (Suárez y Jácome, 2007), en la gráficas 6 y 7 se puede apreciar claramente que en general los meses con los valores más altos de remoción de nitrógeno total se sitúan en contraparte con los datos más bajos de remoción de fosforo durante los mismos meses.

Otro factor importante para una óptima remoción de fósforo es que se obtiene en un intervalo de 7.4 a 6.6 de pH; los valores en la entrada y el decantador se sitúan entre 7.1 y 6.1, ya que a valores más bajos de pH la remoción de fósforo decrece (Palma y Manga, 2005).

6.3.5 Ortofosfatos

Con los resultados de los ortofosfatos de la entrada y del decantador, y de la entrada con la salida, se calculó el porcentaje de remoción (Fig. 8)

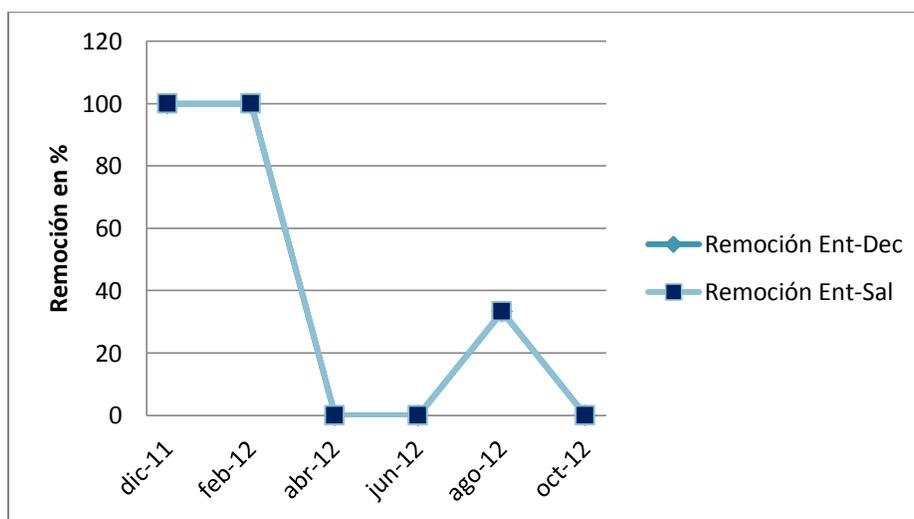


Fig. 8. Porcentaje de Remoción de Ortofosfatos

En la figura 8 se muestran los porcentajes de remoción de ortofosfatos obtenidos durante los 6 muestreos realizados, situados entre un 33.3% y un 100% de la entrada al decantador manteniéndose con los mismos valores del decantador a la salida, los valores más altos registrados fueron los meses de diciembre de 2011 y febrero de 2012 y los valores más bajos de remoción correspondieron a los meses de abril, junio y octubre de 2012 en donde los resultados obtenidos fueron porcentajes de remoción negativos, es decir, los niveles de ortofosfatos aumentaron en lugar de disminuir durante el proceso de tratamiento, relacionados directamente con los resultados obtenidos de fósforo total, mostrando un comportamiento similar como lo muestran las gráficas 5 y 6.

Una gran proporción de fósforo total en el agua residual es insoluble y queda retenido en los procesos de decantación, pasando a formar parte del fango mediante las bacterias acumuladoras del fósforo. El resto del fósforo soluble, después del tratamiento biológico se encuentra en forma de ortofosfatos (Dobson *et al.*, 2004), por lo tanto el incremento en las concentraciones del fósforo total inherentemente indica un aumento en los niveles de ortofosfatos.

6.3.6 Sólidos suspendidos

Con los resultados de los sólidos suspendidos de la entrada y del decantador, y de la entrada con la salida, se calculó el porcentaje de remoción (Fig. 9)

En la figura 9 se muestran los porcentajes de remoción de los sólidos suspendidos obtenidos durante los 6 muestreos realizados, valores que oscilaron entre un 0.0% y un 86.9% de la entrada al decantador y de un 33.4% a un 96.7% de la entrada a la salida de la planta, los niveles de remoción más bajos correspondieron al mes de junio de 2012 en donde los resultados obtenidos fueron porcentajes de remoción negativos, es decir, los niveles de sólidos suspendidos aumentaron en lugar de disminuir durante el proceso de tratamiento y el valor más alto registrado fue en el mes de octubre de 2012, observándose un incremento de sólidos suspendidos en el mes de febrero, ocasionado por el tiempo sin operaciones de la planta y en el mes de Junio, debido posiblemente a una acumulación de residuos

ó por un aporte inusual de sólidos provenientes del exterior, llevados a través de las corrientes de aire durante la estación de verano.

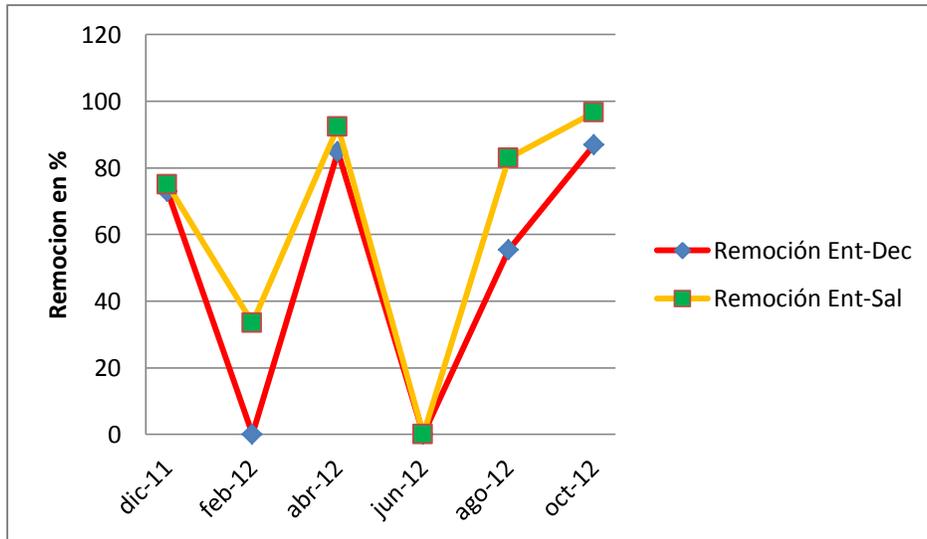


Fig. 9. Porcentaje de Remoción de Sólidos Suspendedos

Los sólidos suspendidos en aguas residuales domésticas e industriales presentan una naturaleza mayormente de tipo orgánica, sirviendo como sustrato y fuente nutritiva para muchos microorganismos, su eliminación se convierte en un factor importante para la óptima remoción de bacterias y nutrientes (Molina y Tigreros, 2005).

6.3.7 Sólidos sedimentables

Con los resultados de los sólidos sedimentables de la entrada y del decantador, y de la entrada con la salida, se calculó el porcentaje de remoción (Fig. 10).

En la figura 10 se muestran los porcentajes de remoción de los sólidos sedimentables obtenidos durante los 6 muestreos realizados, valores que oscilaron entre un 50.0% y un 100% de la entrada al decantador manteniendo los mismos valores de la entrada a la salida, los niveles de remoción más bajos correspondieron a los meses de diciembre de 2011 y agosto de 2012 en donde los resultados obtenidos fueron porcentajes de remoción negativos, es decir, los niveles de sólidos sedimentables aumentaron en lugar de disminuir durante el

proceso de tratamiento, durante los meses restantes todos los valores de remoción fueron de un 100%; durante el mes de febrero de 2012 ocurrió un aumento en los niveles de sólidos sedimentables de la entrada al decantador ocasionado probablemente por algún aporte ambiental externo de partículas extrañas, aunque logrando una excelente remoción en los últimos proceso del tratamiento, resultando en su eliminación total en el efluente.

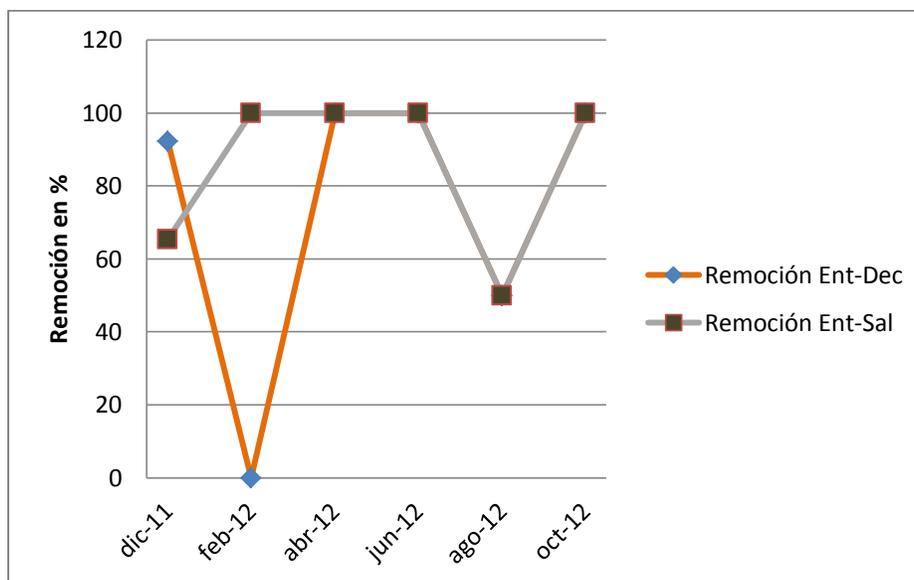


Fig. 10. Porcentaje de Remoción de Sólidos Sedimentables

6.3.8 Coliformes fecales

Con los resultados de los coliformes fecales de la entrada y del decantador, y de la entrada con la salida, se calculó el porcentaje de remoción (Fig. 11)-

En la figura 11 se observan los porcentajes de remoción de la coliformes fecales, obtenidos durante los 6 muestreos realizados, los cuales varían entre un 34.9% y un 58.7% de la entrada al decantador y de un 41.2% a un 84.3% de la entrada a la salida, los niveles de remoción más bajos correspondieron al mes de Agosto de 2012 y el valor más alto reportado fue en el mes de octubre del mismo año, aumentando el porcentaje de remoción del decantador a la Salida en un valor promedio de 16.8%, estos valores se colocan por encima del estándar de remoción de bacterias con potencial patógeno por lodos activados, el cual oscila

alrededor de un 50% (Poch, 1999), la disminución gradual de pH, el aumento en las concentraciones de oxígeno disuelto y lodos metabólicamente activos, son los factores principales para la eliminación de bacterias enteropatógenicas (Chuchon y Aybar, 2008).

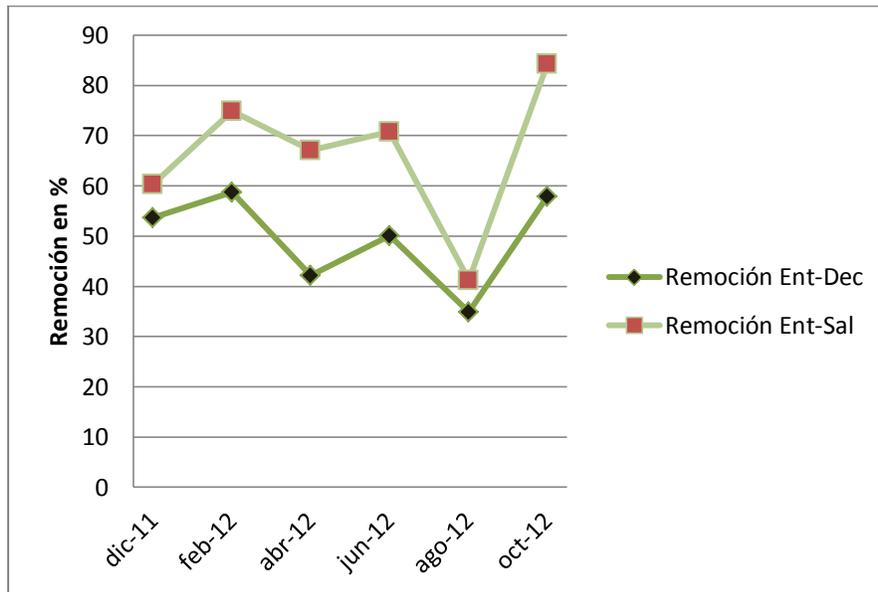


Fig. 11 Porcentaje de Remoción de Coliformes Fecales

6.3.9 Coliformes totales

Con los resultados de coliformes totales de la entrada y del decantador, y de la entrada con la salida, se calculó el porcentaje de remoción (Fig. 12).

En la figura 12 se observan los porcentajes de remoción de la coliformes totales, obtenidos durante los 6 muestreos realizados, los cuales varían entre un 26.8% y un 42.4% de la entrada al decantador y de un 41.2% a un 84.3% de la entrada a la salida, los niveles de remoción más bajos correspondieron al mes de agosto de 2012 y el valor más alto reportado fue en el mes de octubre del mismo año, aumentando el porcentaje de remoción del decantador a la salida en un valor promedio de 18.7%, los valores de remoción de coliformes totales también se ven afectados por los mismos factores ambientales que los coliformes fecales.

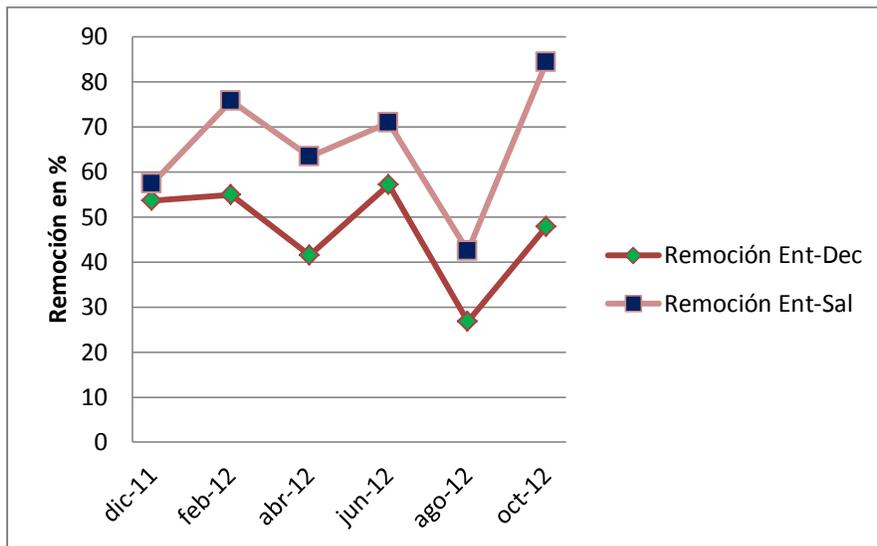


Fig. 12 Porcentaje de Remoción de Coliformes Totales

6.3.10 Remoción promedio de cada proceso

Calculando los valores promedio de cada parámetro se puede apreciar los porcentajes de remoción en la tabla 6

Tabla 6. Valores de remoción promedio de los contaminantes evaluados.

Parámetro	Entrada-Decantador (%)	Entrada-Salida (%)
DBO ₅	95.5	97.6
DQO	89.2	95.7
Nitrógeno Total K.	73.8	81.8
Fosforo Total	59.5	68.2
Ortofosfatos	77.8	77.7
Solidos Suspendedos	60.1	76.1
Solidos Sedimentables	88.5	85.9
Coliformes Fecales	47.7	66.4
Coliformes Totales	46.9	65.7

En esta tabla se puede apreciar que el agua residual después de pasar por el sistema de lodos activados (decantador) presenta una buena remoción de materia orgánica sin embargo los coliformes solo se remueven escasamente la mitad.

Después de pasar por los filtros las remociones se incrementan ligeramente

6.4 Análisis de correlación

Aplicando el modelo de correlación de Pearson, en donde los niveles de $P \geq 0.05$ se considera que no hay correlación. Y en valores de $P < 0.05$ si hay correlación significativas. La correlación puede ser negativa o positiva, siendo la correlación positiva directamente proporcional y la negativa inversamente proporcional con valores cercanos al 1.00 y al -1.00, respectivamente.

En el primer caso la relación es perfecta positiva y en el segundo perfecta negativa. Decimos que la correlación entre dos variables X e Y es perfecta positiva cuando exactamente en la medida que aumenta una de ellas aumenta la otra. Esto sucede cuando la relación entre ambas variables es funcionalmente exacta.

Se dice que la relación es perfecta negativa cuando exactamente en la medida que aumenta una variable disminuye la otra. Igual que en el caso anterior esto sucede para relaciones funcionales exactas,

De acuerdo a los valores de correlación obtenidos los parámetros con alta correlación fueron los siguientes (Tabla 7):

En la entrada el pH con los nitratos presentaron una correlación inversa, es decir, conforme aumentaban los niveles del pH los nitratos disminuían y conforme el pH disminuía los nitratos aumentaban, debido posiblemente a la actividad acelerada de las bacterias nitrificantes.

Los coliformes totales con los coliformes fecales tuvieron una relación positiva directa, lo cual es congruente dado a que los coliformes fecales están incluidos en el grupo de los coliformes totales.

En el decantador hubo una correlación negativa entre el oxígeno disuelto y los nitratos, esto indica que el oxígeno disuelto disminuye conforme aumentan los nitratos, lo cual es lógico ya que los nitratos y nitritos son formas oxidadas del nitrógeno y sin la presencia de oxígeno no se podrían llevar a cabo estas reacciones, también existe una correlación positiva entre la DBO_5 y la conductividad, es decir el agua residual conforme aumenta la tasa metabólica de los microorganismos aumenta la dureza en el agua; también en este punto los coliformes totales y fecales estuvieron altamente correlacionados en forma directa.

En la salida los sólidos suspendidos y la temperatura presentaron una correlación positiva, de manera que los sólidos suspendidos aumentaron en temperaturas altas, posiblemente originadas en estaciones calurosas con un mayor aporte de sólidos provenientes del exterior por causas del ambiente, así como los coliformes totales con los fecales tuvieron una correlación directa nuevamente.

Los demás parámetros dentro de cada proceso presentaron diferencias significativas ($p \geq 0.05$).

Entre la salida y el decantador el pH y la DBO_5 mantuvieron una correlación negativa, esto es causado por el aporte inusualmente alto en comparación con aguas residuales domésticas de productos químicos ácidos utilizados en la planta de tratamiento y por parte de la acción microbiana de los lodos activados durante el proceso de remoción de contaminantes; lo mismo sucedió con el nitrato y el OD. Mientras que los que los valores con una correlación directa positiva fueron la DBO_5 , nitratos, nitrógeno total y fósforo total de salida con la DBO_5 nitratos, nitrógeno total y fósforo total del decantador, esto también es coherente ya que conforme avanza el proceso de remoción de materia orgánica, la tasa metabólica de los microorganismos aumenta y produce una gran cantidad de productos derivados de su crecimiento, como los son las formas oxidadas del nitrógeno y los fosfatos.

Los valores que también demostraron una correlación directa positiva fueron la conductividad, nitrógeno total, temperatura, temperatura y conductividad de la

entrada con respecto a la DBO₅, DBO₅, Sólidos suspendidos, temperatura y conductividad de salida respectivamente, parámetros que dependen inherentemente unos de otros, como ya se ha revisado.

Tabla 7 Parámetros que presentaron correlación.

	E- pH	S-pH	D-OD	D-DBO5	S-DBO5	S- Sol sus	E- Temp	E-Col tot	D-Col tot	S-Col tot	D- N total	D- P total	D- NO3	E-Cond	D-Cond
D-DBO5		-0,91													
S-DBO5		-0,93		0,97											
E- Temp.						0,99									
S-Temp						0,92	0,93								
E-Col fecal								0,99							
D-Col fecal									0,93						
S-Col fecal										0,98					
E- N total					0,95										
S- N total											0,99				
S- P total												0,99			
E-NO3	-0,90														
D-NO3			-0,91												
S-NO3			-0,94										0,99		
E-Cond				0,98	0,94										
D-Cond				0,93										0,92	
S-Cond				0,92										0,90	0,98

6.5 Análisis de varianza (ANOVA)

Se realizó un ANOVA para conocer la variación espacial y temporal de los parámetros estudiados.

Los resultados obtenidos tanto por proceso como mes, se presentan en la tabla 8

Tabla 8. Resultados del ANOVA

Parámetro	Origen	F	P	
pH	Proceso	4.78	0.035	P< 0.05, si hay dif
	Mes	1.33	0.326	p> 0.05, no hay dif
Oxígeno disuelto	Proceso	4.00	0.053	p> 0.05, no hay dif
	Mes	1.93	0.175	p> 0.05, no hay dif
DBO ₅	Proceso	49.27	0.000	P< 0.05, si hay dif
	Mes	1.00	0.466	p> 0.05, no hay dif
Sólidos suspendidos	Proceso	3.47	0.072	p> 0.05, no hay dif
	Mes	0.47	0.793	p> 0.05, no hay dif
Temperatura	Proceso	62.17	0.000	P< 0.05, si hay dif
	Mes	11.57	0.001	P< 0.05, si hay dif
Nitrógeno total	Proceso	2.88	0.103	p> 0.05, no hay dif
	Mes	2.31	0.121	p> 0.05, no hay dif
Fósforo total	Proceso	0.80	0.476	p> 0.05, no hay dif
	Mes	2.11	0.147	p> 0.05, no hay dif
DQO	Proceso	42.01	0.000	P< 0.05, si hay dif
	Mes	1.30	0.338	p> 0.05, no hay dif
Nitratos	Proceso	6.42	0.016	P< 0.05, si hay dif
	Mes	4.42	0.022	P< 0.05, si hay dif
Conductividad	Proceso	11.08	0.003	P< 0.05, si hay dif

	Mes	36.15	0.000	P< 0.05, si hay dif
Coliformes totales	Proceso	37.67	0.000	P< 0.05, si hay dif
	Mes	0.50	0.772	p> 0.05, no hay dif
Coliformes fecales	Proceso	39.75	0.000	P< 0.05, si hay dif
	Mes	0.39	0.842	p> 0.05, no hay dif

Si el valor de p es menor al límite de 0.05 la hipótesis nula es rechazada, o sea que no se acepta la igualdad de las medias y las variables presentan diferencias significativas.

Si el valor de p es mayor de 0.05 la hipótesis nula se acepta o sea que se acepta la igualdad de las medias y las variables no presentan diferencias significativas.

De acuerdo a la tabla 8 de ANOVA para los procesos se encontró que los parámetros pH DBO₅, temperatura, DQO, nitratos, conductividad, coliformes fecales y totales si presentaron diferencias significativas ($p < 0.05$); esto indica que estos parámetros presentaron variaciones importantes entre los procesos.

Respecto a la variación mensual la temperatura, los nitratos y la conductividad si presentaron diferencias significativas ($p < 0.05$), lo que indica que la estación climática del año si influye en las variaciones espaciales del proceso de tratamiento para estos parámetros; el resto de los parámetros no tuvieron diferencias significativas para el mes como origen ($p > 0.05$) (Tabla 8).

6.6 Comparación de los valores promedio de los parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos en la Salida con la NOM-03

Las medias de la DBO, Coliformes fecales, y sólidos suspendidos se compararon con la norma oficial NOM-003-ECOL- 1997.

Tabla 9. Comparación entre los valores promedio obtenidos en el efluente y la norma oficial mexicana.

SALIDA	DBO ₅ (mg/L)	Sólidos Suspendidos (mg/L)	Coliformes Fecales (NMP/100 ml) Media geométrica
Media	5.88	20.3	498917
Límite permisible (NOM-003-ECOL-1997) Servicios al público con contacto directo	20	20	240
Límite permisible (NOM-003-ECOL-1997) Servicios al público con contacto indirecto u ocasional	30	30	1000

Como se indica en la Tabla 9 los resultados obtenidos en DBO₅ del agua residual tratada se situaron debajo de los límites permitidos por la Norma Oficial Mexicana NOM-003-ECOL-1997, considerándose de esta forma como agua tratada apta para ser utilizada en servicios al público con contacto directo e indirecto, en el caso de los Sólidos Suspendidos los resultados estuvieron levemente por encima del límite admitido, siendo por lo tanto no apta para su uso en servicios al público

con contacto directo pero si admisible para utilizarse en servicios al público con contacto indirecto u ocasional y en el caso de los valores reportados de coliformes fecales, es inadmisibles para usarse en cualquiera de los dos casos, debido a los elevados niveles de NMP/100mL que se sitúan muy por encima de los valores permitidos.

Con un valor promedio de 20.3 mg/L de sólidos suspendidos en el efluente final, con excepción de los meses donde hubo incremento, los resultados se sitúan muy ligeramente por encima del límite máximo permitido por la normatividad mexicana para el uso del agua residual en servicios al público con contacto directo y siendo aceptable para el uso de agua residual en servicios públicos con contacto indirecto u ocasional.

7. CONCLUSIONES

El tratamiento de aguas residuales industriales mediante lodos activados tiene una buena eficiencia en la remoción de materia orgánica, sin embargo para las bacterias coliformes la remoción es pobre incluso después de los filtros, lo cual dependiendo del uso será muy importante el proceso de la cloración. En el caso de esta planta no requiere la desinfección pues solo se reusa para el mismo proceso. No obstante aún posee el problema en la remoción de nutrientes, por lo que es necesario implementar modelos experimentales que permitan optimizar el tratamiento biológico en los tiempos de fase aerobia, fase anaerobia y equilibrar los niveles de pH, para eliminar el problema de aumento de fósforo.

El mantenimiento y limpieza de las instalaciones también juegan un papel importante, debido a que aportes externos o acumulación de residuos inciden en el aumento indeseable de los niveles de sólidos suspendidos, totales y sedimentables, por lo que es conveniente planear un periodo de limpieza en las instalaciones, así como una mejora en el tratamiento primario de cribado.

Al comparar los valores obtenidos de DBO₅, Sólidos Suspendidos y Coliformes fecales con la norma oficial mexicana NOM-003-ECOL-1997 que establece los límites máximos permitidos para dichos parámetros, el agua residual tratada es

inaceptable para su reúso en Servicios al público con contacto directo y Servicios al público con contacto indirecto u ocasional, debido a los niveles elevados de coliformes fecales y de sólidos suspendidos, únicamente los valores de DBO_5 se ubican dentro de la normatividad.

El sistema de lodos activados en conjunto con los procesos de filtración funcionan bien para este tipo de industria permitiendo la recuperación del agua filtrada en los procesos de teñido y acabado de esta industria lo que en términos generales genera un ahorro sustancial en el consumo de este recurso liberando el uso de agua potable para el consumo humano. Sin embargo aún muestra deficiencias en la remoción de contaminantes causantes de eutrofización en cuerpos de agua como lo son los fosfatos y otras formas oxidadas del nitrógeno, por lo que es necesario ampliar y optimizar el sistema de lodos activados de modo que se enfoque también en la remoción de estos contaminantes.

Implementar un sistema de cloración en el agua residual tratada permitirá mejorar su calidad microbiológica y poder mantenerse a niveles aceptables.

8. REFERENCIAS

APHA (American Public Health Association), 1998. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 20nd edition. Washington D.C. 1325 pp.

Arango, R. A. y Garcés, G. L. F., 2007. Tratamiento de aguas residuales de la industria láctea. Corporación Universitaria Lasallista. México.

Basulto S. Y., Giácoman V. G., Pacheco A. J., Quintanal F. C. Ponce C. C., 2010. Cuantificación de las principales bacterias patógenas presentes en aguas residuales domésticas crudas y tratadas de la Ciudad de Mérida Yucatán, México. Memorias del 2nd IWA Mexico Young Water Professional Conference 2010. Instituto de Ingeniería UNAM y Young Water Professionals. 12 a 14 abril de 2010. Campo Juriquilla Querétaro México.

Caldera, Y., Gutierrez, E. y Luengo, M., 2010. Evaluación del sistema de tratamiento de aguas residuales de industria avícola. Rev. cient. Maracaibo. 20 (4): 409-416.

Castillo B., E., R., Bolio R., A., Méndez N., R., I., Osorio R., J., H., Pat C., R., Remoción de materia orgánica en aguas residuales de rastro por el proceso de Contactor Biológico Rotacional, 2012. Revista-Ingeniería. Académica de la Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma de Yucatán, Vol. 16, No.2, 2012, ISSN 1665-529-X.

Collí J., Sugita H., Yamaoka M. y Ruiz H., 2002. Aireación intermitente para remoción biológica de nitrógeno en sistemas de tratamiento de aguas residuales de una sola etapa. XXVIII. Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Cancún, México.

Cuevas-Aragón D., Garzón-Zúñiga M.A., 2010. Tratamiento de aguas residuales de la industria textil que contienen colorantes utilizando un proceso combinado de oxidación avanzada y un proceso biológico de biofiltración sobre material orgánico. Memorias del 2nd IWA Mexico Young Water Professional Conference 2010. Instituto de Ingeniería UNAM y Young Water Professionals. 12 a 14 abril de 2010. Campo Juriquilla Querétaro México.

Chuchón, M., S., A. y Aybar, E., C., A., 2008. Evaluación de la capacidad de remoción de bacterias coliformes fecales y demanda bioquímica de oxígeno de la planta de tratamiento de aguas residuales "la totora", Ayacucho, Perú *Ecología Aplicada*, 7(1,2), 2008 ISSN 1726-2216. Departamento Académico de Biología, Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú.

Díaz, f., J., P., 2003. Investigación sobre el efecto de la temperatura en los procesos biológicos por fangos activos. Tesis Doctoral, E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos UPM.

Di Marzio W., Sáenz M., E., Tortorelli, M., del C y Alberdi J., L., 2009). Control de organismos filamentosos mediante selección cinética y metabólica en sistemas de lodos activados. *Revista Argentina de Ecotoxicología* 1: 52-66.

Dobson D., W., Mulkerrins D. and Coleran E., 2004. Parameters affecting biological phosphate removal from wastewaters. En: *Environmental International*. Vol. 30, 2004; p. 249-259.

Erijman L., Figuerola E. L. M., Guerrero L., D. y Ayarza J. M., 2011. Impacto de los recientes avances en el análisis de comunidades sobre el control del proceso de tratamiento de efluentes. *Revista Argentina de Microbiología* 43:127-135.

Gonzalez, M. y Saldarriaga, J., C., 2008. Remoción biológica de materia orgánica, nitrógeno y fósforo en un sistema tipo anaerobio-anóxico-aerobio. Escuela de

Ingeniería de Antioquia, Medellín Colombia. Revista EIA, ISSN 1794-1237 No. 10, p. 45-53.

Guerrero, M., 2006, El agua. Sexta Edición., Ed. Fondo de cultura económica, S.A de C.V. Av de la Universidad 975; 03100 México, D.F. 48 pp.

Herrera, Lenín, Yabroudi, Suher, Cardenas, Carmen *et al.*, 2007. Tratamientos biológicos de efluentes de industrias procesadoras de cangrejo azul usando lodos activados. INCI. 32 (7): 490-495.

Jiménez C. B.E., 2001. La Contaminación Ambiental en México. Ed Limusa. Méx. 925 p.

Jiménez B. D., De Lora F., Sette R. R., 2003. Introduction to Wasterwater Treatment Processes, Second Edition. Ed. Reverté. España. 705 pp.

Madigan T.M., Martinko M.J., Dunlap V.P., Clark P.D., 2009. Brock. Biología de los microorganismos. Duodécima edición. Pearson. México. 1296 pp.

Mantis I., Voutsas D., Samara C., 2005. Assessment of the environmental hazard from municipal and industrial wastewater treatment sludge by employing chemical and biological methods. Ecotoxicol. Environ. Saf. 62: 397–407.

Marchand Pajares, Edgard Orlando. Microorganismos indicadores de la calidad del agua de consumo humano en Lima Metropolitana. En línea http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtual/tesis/basic/marchand_p_e/anteced.htm 10/10/2013.

Martínez H. S., Coronel O. C., Hernández M. A., Miranda L. J. M. y Rodríguez Á. J. A., 2008. Control de la calidad del agua tratada en una depuradora a través de

los Bioindicadores bacterianos *Escherichia coli* y *Pseudomonas aeruginosa*. Laboratorio de Ciencias Ambientales.

Molina, A., M. y Tigreros G., J., L., 2005. Evaluación preliminar de la remoción de sólidos suspendidos en el sistema de tratamiento de aguas residuales del municipio de Arauca, trabajo de investigación. Universidad Nacional de Colombia sede Arauca Ingeniería Ambiental Arauca.

Moreta, P. J.C., 2008. La eutrofización de los lagos y sus consecuencias Ibarra 2008. Universidad técnica del norte, Facultad de Ciencias de la salud, Escuela de nutrición y salud comunitaria, Tecnología en saneamiento ambiental. Ibarra Ecuador.

Muñoz, C., A., 2008. Caracterización y tratamiento de aguas residuales, Tesis de Licenciatura, Instituto de de Ciencias básicas e Ingeniería Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Mineral de la reforma, Hidalgo, México.

Nodal E., 2001. Procesos biológicos aplicados al tratamiento del agua residual. Ingeniería hidráulica y ambiental, Vol. 22, No. 4, 52 – 56.

Pacheco S. V. F. Pavón S. T. B. Sánchez M. J. C. y Mejía P G. V., 2006. Reingeniería de una planta de tratamiento de lodos activados para abatir el fenómeno del esponjamiento. Memorias del III Simposio Internacional en Ingeniería y Ciencias para la sustentabilidad ambiental. 2006 UAM Atzacapozalco.

Palma A. M. J. y Manga C., J., 2005. Simulación de un sistema de fangos activados en discontinuo (SBR) para aguas residuales con altos contenidos en Nitrógeno. Ingeniería y desarrollo Julio-Diciembre. No. 018 Universidad del norte, Barranquilla Colombia.

Pérez M. L., 2002. Remoción de fosforo y nitrógeno en aguas residuales utilizando un reactor discontinuo secuencial (SBR). XXVIII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental Cancún, México, 27 al 31 de octubre, 2002.

Pérez S., 2002. Estudio dinámico de un proceso por lodos activados bajo condiciones limitantes en oxígeno disuelto. XXVIII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental Cancún, México, 27 al 31 de octubre, 2002.

Poch M., 1999. Las calidades del agua, 1ª Ed. Rubes España 117-144 pp.

Quevauviller, Philippe, Thomas, Oliver, Vander, Beken y André., 2006. Water quality series: Wastewater quality. Monitoring and treatment. England. Ed. Wiley & Sons, Ltd. p.394.

Ramahlo R. S., 1996. Tratamiento de aguas residuales. 1ªEd. Reverté, España 50-64 pp.

Reyes, L., M., I., Guido, Z., A., Bernal, G., M., Ramírez, B., L., I., Padrón, L., R., M., Salgado, B., I., Genescá, L., J. y Durán de Bazúa, C., 2011. Remoción de fósforo de aguas residuales en un sistema de humedales artificiales a escala de laboratorio, Laboratorios 301, 302 y 303 de Ingeniería Química Ambiental y Química Ambiental, LIQAYQA, Facultad de Química, UNAM, Paseo de la Investigación Científica s/n, 04510 México D. F., México. Revista Latinoamericana el Ambiente y las Ciencias, 2 (1):76-93, 2011.

Robles V., E., González A., M., E., Sáinz M., M., G., Martínez P., M., E., Ayala P., R., 2008. Análisis de Aguas. Métodos fisicoquímicos y bacteriológicos. 1ª ed. FESI, UNAM México, 188 p.

Robles E., Ramírez E., Martínez B., Ayala R., González M.E., Alarid B. 2006. Remoción de materia orgánica y bacterias coliformes en el sistema de lodos activados en la planta de Ciudad Universitaria. Memorias del III Simposio

Internacional en Ing y Ciencias para la Sustentabilidad Ambiental. UAM Atzacapozalco.

Salazar G., L., Crespi, R., M., Salazar, R., 2009. Tratamiento de aguas residuales textiles mediante un biorreactor de membrana, Barranquilla, Colombia Universidad del Norte, Laboratorio de Aguas Revista de Ingeniería y desarrollo No. 26 Julio-diciembre, 2009 pp. 83-100.

Saldarriaga, J., C., Hoyos, D., A. y Correa, M., A., 2011. Evaluación de procesos biológicos unitarios en la remoción simultánea de nutrientes para minimizar la eutrofización, Revista EIA, ISSN 1794-1237 No. 15, p. 129-140. Julio 2011, Escuela de Ingeniería de Antioquia, Medellín Colombia.

SEMARNAP (Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, Norma Oficial Mexicana NOM-03-ECOL-1997 que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público. Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 23 de abril de 2003.

Seoánez, C., M., 2005. Depuración de las aguas residuales por tecnologías ecológicas y de bajo costo, Colección Ingeniería del medio ambiente, Ed. Mundi-Prensa, Madrid, España, 212-223 pp.

Suárez, J. y Jácome, A., 2007. Eliminación de fósforo en los procesos de depuración de aguas residuales, Departamento de ingeniería del agua Universidad de Coruña España.

Tchobanoglous G., Burton F.L., Stensel H.D., 2003. Wastewater engineering: Treatment and reuse. Metcalf and Eddy. McGraw-Hill Professional, Nueva York. 1848 p.

Tejero G. J.L., Cuevas D. J., González B. J.L., Ávila J. C., Carrión J. J.M., 2007. Análisis del reactor de lodos activados de la Planta de Tratamiento Centenario. *Caos Conciencia* 1: 63-71.

Terry, B., C., C., Gutierrez, D., J., B. y Abo, B., M., 2010. Manejo de aguas residuales en la gestión ambiental, Ed Cigea, Calle 20 no.4107 esq. 18 A, Playa, La Habana, Cuba.

Tortora J., Gerard, Funke R., Berdell, Case L., Christine., 2007. Introducción a la Microbiología. Buenos Aires. 9ª edición. Ed. Médica Panamericana., p. 959

Tracy, K., D., y Flammino, A., 1987. Biochemistry and energetics of biological phosphorusremoval. *Biological Phosphate Removal from Wastewater Advances Water Pollution Control* 4: 12-25.

Vargas B., Rámos J., Manzanero L., Rincones M., 1992. Estudio de las comunidades bacterianas en un sistema de lodos activados, Sociedad Venezolana de Ecología, *Revista Nacional Venezolana Ecotropicos* 5: 1-10.

Referencias en línea:

Pseudomonas aeruginosa. En línea¹

<http://www.bvsde.paho.org/cd-gdwq/.../Bacterias%20PDF/Pseudomonas.pdf>

Consulta 14/10/13

CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) Distribución los recursos hídricos. En línea²

<http://www.cna.gob.mx/>. Consulta 18/01/12

SEMARNAT (Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales) Recursos hídricos y su disponibilidad, En línea³

<http://www.semarnat.gob.mx/Pages/Inicio.aspx>. Consulta 18/01/12

Metcalf y Eddy. Procesos biológicos unitarios. En línea⁴ [http://cidta.usal.es/residuales/libros/logo/pdf/Procesos biologicos unitarios .pdf](http://cidta.usal.es/residuales/libros/logo/pdf/Procesos_biologicos_unitarios.pdf). Consulta 29/02/2012