



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES IZTACALA  
LICENCIATURA BIOLÓGICA**

**“Valoración de la eficiencia de remoción de contaminantes en diferentes  
mezclas de agua residual doméstica-industrial en un reactor de lodos  
activados a escala de laboratorio”**

**TESIS  
PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
BIÓLOGO  
PRESENTA:  
RAÚL ALBERTO RAMÍREZ RIVERA**

**DIRECTOR DE TESIS:  
ESPERANZA DEL S. ROBLES VALDERRAMA**

**LOS REYES IZTACALA, 2016**

**NAUCALPAN, ESTADO DE MÉXICO**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**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 mis padres: Alberto y Hermelinda***

No sólo por este logro, si no por todo su apoyo, cariño y confianza que todo momento he tenido de ustedes, muchas gracias por creer en mí y por todo el amor que siempre me han brindado ¡Los amo!

### ***Al resto de mi familia***

Gracias **Rubí** por tus consejos y por la confianza que siempre nos hemos tenido para todo, gracias **Rair** por la confianza que me tienes, por soportarme en los momentos difíciles y espero ser tu ejemplo a seguir, gracias **Erandy** por tu cariño que siempre me has demostrado y por ser la alegría de la casa

### ***A mis amigos y compañeros***

A cada uno de mis amigos y compañeros con los que compartí buenos momentos y experiencias dentro y fuera de la carrera, gracias por su amistad: Fernando, Álvaro, Beto y Luis.

A mis compañeros de laboratorio de la UIICSE, Lore, Javier, Luis, Pedro y Alan, por el conocimiento que adquirí junto a ustedes, así como por los gratos momentos que pasamos en el laboratorio.

### ***Y por supuesto a ti Tania***

Nunca imagine que me encontraría en la FESI con esa persona tan especial la cual me llena de felicidad, gracias por todo tu cariño y por ser mi motor el cual me motiva a seguir adelante en mis proyectos, por todos los viajes y las locuras que hemos vivido durante este tiempo y sobre todo por tu invaluable ayuda en este trabajo... ¡te amo mucho pintu!

## **Agradecimientos**

### **A la QFB Esperanza Robles Valderrama**

Por aceptar dirigir este proyecto de tesis, muchas gracias por compartir sus conocimientos, por su apoyo y paciencia que me brindo durante este tiempo.

### **A la Biol. María de Guadalupe Sáinz y a la Biol. Blanca Martínez**

Por todos los conocimientos que adquirí de ustedes durante mi estancia en el laboratorio y por sus valiosas aportaciones en la realización de esta investigación.

### **A la M. en C. María Elena Pérez**

Por todas las técnicas que me enseñó y los consejos que me brindo durante mi etapa en el laboratorio.

### **A la M. en C. Elizabeth Ramírez Flores y al Dr. Victor Manuel Rivera Aguilar**

Por sus valiosas aportaciones para lograr concluir este trabajo de manera satisfactoria.

## ÍNDICE.

| <b>CONTENIDO</b>  | <b>pág.</b> |
|---|-------------|
| RESUMEN   | 1           |
| 1. INTRODUCCIÓN   | 2           |
| 2. MARCO TEÓRICO  | 5           |
| 2.1. Parámetros de importancia en el tratamiento de aguas residuales                  | 5           |
| 2.1.1. Demanda bioquímica de oxígeno (DBO <sub>5</sub> )                              | 5           |
| 2.1.2. Demanda química de oxígeno (DQO)   | 6           |
| 2.1.3. Nitrógeno  | 7           |
| 2.1.3.1. Nitrógeno amoniacal  | 7           |
| 2.1.3.2. Nitratos   | 8           |
| 2.1.3.3. Nitritos   | 8           |
| 2.1.4. Fósforo Total  | 8           |
| 2.1.5. Coliformes Totales y Fecales   | 9           |
| 2.2. Principales tipos de aguas residuales  | 10          |
| 2.2.1. Agua residual doméstica  | 10          |
| 2.2.2. Agua residual agrícola y ganadera  | 10          |
| 2.2.3. Agua residual industrial   | 11          |
| 2.3. Microorganismos presentes en las aguas residuales e indicadores de contaminación | 11          |
| 2.3.1. Indicadores de contaminación   | 13          |
| 2.3.2. Bacterias  | 14          |
| 2.4. Tratamiento de aguas residuales  | 15          |
| 2.4.1. Proceso de lodos activados   | 16          |
| 2.5. Características del agua de los procesos de la industria textil                  | 17          |
| 2.5.1. Proceso de teñido  | 17          |
| 2.5.2. Proceso de acabado   | 18          |
| 2.6. Antecedentes   | 19          |

|   |    |
|---|----|
| 3. JUSTIFICACIÓN  | 21 |
| 4. OBJETIVOS  | 23 |
| 4.1. Objetivo general   | 23 |
| 4.2. Objetivos particulares   | 23 |
| 5. METODOLOGÍA  | 24 |
| 5.1. Descripción del área de estudio  | 24 |
| 5.2. Muestreo y técnicas analíticas   | 26 |
| 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN   | 28 |
| 6.1. Resultados de los parámetros en la entrada (E) y salida (S)  | 28 |
| 6.1.1. DBO <sub>5</sub>   | 28 |
| 6.1.2. DQO  | 31 |
| 6.1.3. Sólidos Suspendidos Totales  | 35 |
| 6.1.4. NH <sub>3</sub> y NO <sub>3</sub>  | 39 |
| 6.1.5. Fósforo total  | 43 |
| 6.1.6. Coliformes totales y fecales   | 46 |
| 6.2. Porcentajes de remoción  | 50 |
| 6.2.1. DBO <sub>5</sub>   | 50 |
| 6.2.2. DQO  | 52 |
| 6.2.3. Nitrógeno amoniacal (NH <sub>3</sub> )   | 54 |
| 6.2.4. Sólidos suspendidos totales  | 56 |
| 6.2.5. Fósforo total  | 57 |
| 6.2.6. Coliformes totales y fecales   | 60 |
| 6.3. Coeficiente de correlación   | 61 |
| 6.4. Comparación de los valores de los parámetros físico-químicos y bacteriológicos en la salida con la NOM-003-ECOL-1997 | 63 |
| 7. CONCLUSIONES   | 65 |
| 8. BIBLIOGRAFÍA   | 67 |

## ÍNDICE DE FIGURAS.

|  |    |
|--|----|
| Figura 1. Reactor utilizado en el presente estudio   | 26 |
| Figura 2. Valores de la DBO <sub>5</sub> , en la etapa doméstica                               | 28 |
| Figura 3. Valores de la DBO <sub>5</sub> , con la mezcla 90% doméstica y 10% textil            | 29 |
| Figura 4. Valores de la DBO <sub>5</sub> , con la mezcla 80% doméstica y 20% textil            | 29 |
| Figura 5. Valores de la DBO <sub>5</sub> , con la mezcla 60% doméstica y 40% textil            | 29 |
| Figura 6. Valores de la DBO <sub>5</sub> , con la mezcla 40% doméstica y 60% textil            | 30 |
| Figura 7. Valores de la DBO <sub>5</sub> , con la mezcla 30% doméstica y 70% textil            | 30 |
| Figura 8. Valores de la DBO <sub>5</sub> , con la mezcla 20% doméstica y 80% textil            | 30 |
| Figura 9. Valores de la DQO, en la etapa doméstica   | 32 |
| Figura 10. Valores de la DQO, con la mezcla: 90% doméstica +10% textil                         | 32 |
| Figura 11. Valores de la DQO, con la mezcla: 80% doméstica +20% textil                         | 32 |
| Figura 12. Valores de la DQO, con la mezcla: 60% doméstica +40% textil                         | 33 |
| Figura 13. Valores de la DQO, con la mezcla: 40% doméstica +60% textil                         | 33 |
| Figura 14. Valores de la DQO, con la mezcla: 40% doméstica +60% textil                         | 33 |
| Figura 15. Valores de la DQO, con la mezcla: 30% doméstica +70% textil                         | 34 |
| Figura 16. Valores de la DQO, con la mezcla: 30% doméstica +70% textil                         | 34 |
| Figura 17. Valores de la DQO, con la mezcla: 20% doméstica +80% textil                         | 34 |
| Figura 18. Valores de los SST, en la etapa doméstica   | 36 |
| Figura 19. Valores de los SST, en la mezcla: 90% doméstica +10% textil                         | 36 |
| Figura 20. Valores de los SST, en la mezcla: 80% doméstica +20% textil                         | 36 |
| Figura 21. Valores de los SST, en la mezcla: 60% doméstica +40% textil                         | 37 |
| Figura 22. Valores de los SST, en la mezcla: 40% doméstica +60% textil                         | 37 |
| Figura 23. Valores de los SST, en la mezcla: 30% doméstica +70% textil                         | 37 |
| Figura 24. Valores de los SST, en la mezcla: 20% doméstica +80% textil                         | 38 |
| Figura 25. Valores de los NH <sub>3</sub> y NO <sub>3</sub> , de la etapa doméstica            | 39 |
| Figura 26. Valores de los NH <sub>3</sub> y NO <sub>3</sub> , mezcla: 90% doméstica+10% textil | 40 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 27. Valores de los NH <sub>3</sub> y NO <sub>3</sub> , mezcla: 80% doméstica+20% textil | 40 |
| Figura 28. Valores de los NH <sub>3</sub> y NO <sub>3</sub> , mezcla: 60% doméstica+40% textil | 41 |
| Figura 29. Valores de los NH <sub>3</sub> y NO <sub>3</sub> , mezcla: 40% doméstica+60% textil | 41 |
| Figura 30. Valores de NO <sub>3</sub> , en la mezcla: 30% doméstica +70% textil                | 41 |
| Figura 31. Valores de NO <sub>3</sub> , en la mezcla: 20% doméstica +80% textil                | 42 |
| Figura 32. Valores de fósforo total, en la etapa doméstica                                     | 43 |
| Figura 33. Valores de fósforo, en la mezcla: 90% doméstica +10% textil                         | 44 |
| Figura 34. Valores de fósforo, en la mezcla: 80% doméstica +20% textil                         | 44 |
| Figura 35. Valores de fósforo, en la mezcla: 60% doméstica +40% textil                         | 44 |
| Figura 36. Valores de fósforo, en la mezcla: 40% doméstica +60% textil                         | 45 |
| Figura 37. Valores de fósforo, en la mezcla: 20% doméstica +80% textil                         | 45 |
| Figura 38. Coliformes totales y fecales en la etapa doméstica                                  | 46 |
| Figura 39. Coliformes T. y F. en la mezcla: 90% doméstica +10% textil                          | 47 |
| Figura 40. Coliformes T. y F. en la mezcla: 80% doméstica +20% textil                          | 47 |
| Figura 41. Coliformes T y F. en la mezcla: 60% doméstica + 40%textil                           | 47 |
| Figura 42. Coliformes T. y F. en la mezcla: 40% doméstica +60% textil                          | 48 |
| Figura 43. Coliformes T. y F. en la mezcla: 20% doméstica +80% textil                          | 48 |
| Figura 44. Remoción de DBO5 en la etapa doméstica  | 50 |
| Figura 45. Remoción de DBO5 en la etapa doméstico-textil                                       | 50 |
| Figura 46. Remoción de DQO en la etapa doméstica   | 52 |
| Figura 47. Remoción de DQO en la etapa doméstico-textil  | 52 |
| Figura 48. Remoción de DQO en la etapa doméstico-textil  | 53 |
| Figura 49. Remoción de NH3 en la etapa doméstica y doméstico-textil                            | 54 |
| Figura 50. Remoción de SST en la etapa doméstica   | 56 |
| Figura 51. Remoción de SST en la etapa doméstica-textil  | 56 |
| Figura 52. Remoción de fósforo en la etapa doméstica y doméstico-textil                        | 58 |
| Figura 53. Remoción de coliformes T y F. en la etapa doméstica                                 | 60 |



|  |    |
|--|----|
| Figura 54. Remoción de coliformes T. y F. en la etapa doméstico-textil | 60 |
|--|----|

### **ÍNDICE DE TABLAS.**

|   |    |
|---|----|
| Tabla 1. Mezclas utilizadas en cada muestreo con su respectivo ciclo  | 25 |
| Tabla 2. Técnicas analíticas de los parámetros físico-químicos y Bacteriológicos  | 27 |
| Tabla 3. Análisis de correlación con muestreo completo  | 62 |
| Tabla 4. Análisis de correlación con muestreo sólo de DBO5 y DQO  | 62 |
| Tabla 5. Análisis de correlación sin DBO <sub>5</sub> , los parámetros que se muestran                                      | 63 |
| Tabla 6. Comparación de las medias de DBO, sólidos suspendidos y coliformes fecales del efluente, con la NOM-003- ECOL-1997 | 64 |

## **RESUMEN.**

La industria textil consume una gran cantidad de agua en sus procesos, además de energía y productos químicos, genera una considerable cantidad de efluentes que son variables y complejos, que poseen elevadas concentraciones de contaminantes altamente tóxicos. Por estas razones, surge la necesidad de evaluar el comportamiento y eficiencia para este tipo de efluentes industriales. Uno de estos sistemas es el de lodos activados, por lo que en este trabajo el objetivo fue evaluar la mejor mezcla de agua doméstico-textil en función a la remoción de materia orgánica, nutrientes y coliformes, para definir las características físico-químicas del efluente líquido a tratar y así generar efluentes con una mejor calidad biológica y físico-química.

Se tomaron muestras en el influente y efluente de un bioreactor a escala de laboratorio, usando diferentes porcentajes de mezclas de agua doméstico-textil. Los resultados que se obtuvieron del efluente fueron comparados con la NOM-003-ECOL-1997 y el agua residual tratada es inaceptable para su reuso debido a los elevados valores de coliformes fecales, mientras que la DBO<sub>5</sub> y los sólidos suspendidos generalmente cumplieron la norma o se situaron ligeramente arriba de los límites permitidos.

En cuanto a la eficiencia de remoción, las mezclas que presentaron las mejores remociones de materia orgánica, fueron la de 90D+10T con ciclo de 6h, y la 40D+60T con ciclo de 12h, que alcanzaron remociones de 91.78- 96.21% para DQO, 98.79 - 98.9% para DBO<sub>5</sub> y 93.4 - 99.15% para sst. Por lo cual se concluye que en general hubo una buena eficiencia de remoción de materia orgánica, mientras que la remoción de nutrientes y coliformes es intermitente y deficiente respectivamente.

## 1. INTRODUCCIÓN

El agua cubre aproximadamente el 75% de la superficie de la tierra, el volumen total de agua en el planeta es de aproximadamente 1,390 millones de km<sup>3</sup>, éstas son las reservas de agua de la Tierra, y de ellas sólo el 0.26% es directamente utilizable por la especie humana. El agua es fundamental para los procesos tanto ambientales como sociales, e indispensable para el surgimiento y desarrollo de la vida (CONAGUA, 2013).

El agua en México se extrae principalmente de los cuerpos de agua superficiales y de los acuíferos, de los cuales se obtiene aproximadamente un volumen total de 186 km<sup>3</sup> anuales, que están destinados primordialmente para las actividades agrícolas, domésticas, industriales y de acuicultura intensiva (CONAGUA, 2013).

Actualmente, uno de los problemas que más preocupa a la humanidad es la gran cantidad de contaminantes que se desechan en el agua, convirtiéndolas en aguas residuales, esta contaminación ha propiciado que se limiten los usos del agua, además de que se impacte la salud pública y el entorno ambiental de muchas comunidades (Ramírez, 1998; Pacheco, *et al*; 2004).

Las aguas residuales o también llamadas aguas negras, son una mezcla compleja que contienen contaminantes orgánicos e inorgánicos, tanto en suspensión como disueltos, los cuales se colectan en un sistema de alcantarillado público. Estas aguas son generadas inevitablemente por las actividades realizadas por el hombre, y las características de sus componentes son muy diversas, debido a que dependen del tipo de descarga de la cual se originan. Entre las más comunes se encuentran la sanitaria, municipal, industrial y agropecuaria (Romero, 2004; CEA Jalisco, 2013).

Aproximadamente un 59% del agua total utilizada en los países desarrollados, es destinado para actividades industriales, el 30% a usos agrícolas y un 11% a actividades o usos domésticos. El sector productor además de ser el que más

agua utiliza, también es el que más contamina. Cerca de un 80% de desechos peligrosos en el mundo son producidos en los países industrializados, mientras que en países en vías de desarrollo, alrededor de un 70% de los desechos generados por fábricas, son vertidos en cuerpos de agua sin algún tratamiento previo, agravando aún más la calidad de los recursos hídricos disponibles (ONU, 2003).

En cuanto a nuestro país, el uso predominante del agua es el agropecuario con el 76% de total del agua extraída, seguido por el uso público urbano con el 14% y el uso en actividades industriales con un 10% (SEMARNAT, 2004). Se estima que en las industrias en todo el país, se descargan anualmente un aproximado de 8 km<sup>3</sup> de aguas residuales (CONAGUA, 2004).

Entre el sector industrial, la industria textil es una de las que consumen más cantidad de agua en sus procesos, además de energía y productos químicos; por lo cual también generan una gran cantidad de agua residual. Sus efluentes poseen elevadas concentraciones de colorantes, contaminantes orgánicos, compuestos tóxicos, componentes inhibidores, tensoactivos y componentes clorados. Por lo cual, se les clasifica como los efluentes de más complejo tratamiento (Salazar *et al.*, 2009).

El tratamiento de estas aguas residuales es de gran importancia ya que ofrece una alternativa para eliminar los contaminantes y así poder reutilizar éstas aguas. El tratamiento de aguas residuales es un proceso que incorpora técnicas físicas, químicas y biológicas, en los cuales se remueven contaminantes del agua, ya sea de origen doméstico, agrícola o industrial. Algunos métodos más utilizados son los tratamientos biológicos que involucran microorganismos debido a que son económicos, eficientes y no generan subproductos contaminantes (Ramírez, 1998; Martínez, 2014).

El tratamiento biológico o secundario en el agua residual, tiene como objetivo transformar la materia biodegradable disuelta y particulada en productos finales ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  y lodos de desecho), remover sólidos suspendidos y coloidales, principalmente la biomasa encargada de degradar la materia orgánica, remoción de nutrientes, principalmente nitrógeno y fósforo, y en algunas ocasiones remover trazas de compuestos orgánicos específicos (Metcalf y Eddy, 2003). Es decir, se utiliza para eliminar los desechos o sustancias que, con la sedimentación no se eliminaron, y para remover la materia orgánica medida a través de la demanda bioquímica de oxígeno ( $\text{DBO}_5$ ). El procedimiento más habitual es un proceso biológico en el que se facilita que las bacterias aerobias digieran la materia orgánica que llevan las aguas. Este proceso suele hacerse llevando el efluente que sale del tratamiento primario, a tanques en los que se mezclan con agua cargada de lodos activados (CEA Jalisco, 2013).

El tratamiento biológico por lodos activados, es el proceso más utilizado en el país; la mayor parte del agua tratada recibe tratamiento secundario mediante este proceso, así como por lagunas de estabilización, estas técnicas llegan a tener una eficiencia de 80 y 90% en la remoción la demanda bioquímica de oxígeno ( $\text{DBO}_5$ ) (Martínez, 2014). De las 1833 plantas en operación en el país en el año 2008, el 46.19% funcionaban por medio del sistema de lodos activados (CONAGUA, 2010). Un sistema de lodos activados es un tratamiento biológico de depuración de efluentes líquidos, el principio básico de la depuración biológica consiste en un proceso físico-biológico, en el cual las aguas residuales se ponen en contacto con bacterias y microorganismos (protozoos, rotíferos, amibas, etcétera) en forma de suspensión de flóculos en un sistema aireado y agitado (Winkler, 1999; Martínez, 2014). Los microorganismos responsables de remover grandes cantidades de materia orgánica en los procesos biológicos aerobios, son las bacterias, en su mayoría aerobias y facultativas heterótrofas, éstas al estar presentes en los lodos activados remueven la materia orgánica disuelta principalmente en su contenido de carbono, nitrógeno y fósforo (González y Saldarriaga, 2008; Torrescano, 2009).

En ocasiones la operación de los sistemas de tratamiento de agua residual, se efectúa de manera empírica, sin tomar en cuenta los parámetros que sirvieron de base para el diseño, y que en la mayoría de los casos son los que se deberían utilizar para la operación del sistema, causando con esto eficiencias de tratamiento por debajo del diseño, asimismo el agua de la industria textil al ser de difícil tratamiento no se recomienda ser tratada al 100% de su pureza (Torrescano, 2009), por lo anterior, este trabajo busca evaluar los sistemas de depuración de aguas residuales realizando mezclas de agua residual doméstico-industrial mediante lodos activados a escala de laboratorio, así como determinar que porcentajes de mezclas de agua residual industrial y doméstica tiene las mejores eficiencias de remoción en cuanto a materia orgánica, nutrientes y bacterias.

## **2. MARCO TEÓRICO**

### **2.1 Parámetros de importancia en el tratamiento de aguas residuales.**

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

La DBO<sub>5</sub> es la cantidad de oxígeno que requiere la población bacteriana para oxidar (estabilizar) la materia orgánica biodegradable en condiciones aerobias. Se basa en la comparación del oxígeno disuelto inicial cuantificado en la muestra, con el existente en una muestra similar, después de haber sido incubada por cinco días a una temperatura estándar de 20°C. Estos cinco días son el tiempo patrón, para que las bacterias digieran la materia orgánica presente en la muestra. El resultado es DBO<sub>5</sub> se expresa en miligramos de oxígeno disuelto por litro (mg O<sub>2</sub>/ L) (Romero, 2004).

La DBO<sub>5</sub> es el parámetro más usado para medir la calidad de aguas residuales y superficiales, entre las funciones más importantes de esta técnica esta que sirve para determinar la cantidad de oxígeno requerido para estabilizar biológicamente la materia orgánica del agua, para diseñar unidades de tratamiento biológico, para evaluar la eficiencia de los procesos de tratamiento y fijar las cargas orgánicas permisible en fuentes receptoras (Romero, 2004). La mayor parte de las aguas usadas para acueductos contiene DBO<sub>5</sub> estándar menor de 7 mg/L. Es un

parámetro necesario en la evaluación de aguas residuales, de los procesos de tratamiento y de los efectos de contaminación. No se usa como parámetro de control en aguas potables (Romero, 2002).

Si se descargan aguas con una  $DBO_5$  alta en un cuerpo de agua, las bacterias y otros microorganismos de una rica fuente de alimentos, permiten su rápida reproducción y crecimiento, a lo cual entre más grande es la población, será mayor su consumo de oxígeno del agua. Por consiguiente los niveles de oxígeno en el cuerpo receptor disminuirán de tal forma que los peces y otros organismos acuáticos podrán morir de asfixia (CEA Jalisco, 2013; Romero, 2008).

### 2.1.2 Demanda química de oxígeno (DQO)

La DQO se usa para medir el oxígeno equivalente para oxidar la materia orgánica oxidable químicamente mediante un agente oxidante fuerte, por lo general dicromato de potasio, en un medio ácido y a alta temperatura. Específicamente representa el contenido orgánico e inorgánico total de la muestra, oxidable por dicromato en solución ácida. El ensayo tiene la ventaja de ser más rápido que la  $DBO_5$  así como para poder determinar las concentraciones necesarias en los ensayos de la  $DBO_5$  y no está sujeto a tantas variables como las que pueden presentarse en el ensayo biológico. Todos los compuestos orgánicos, con unas pocas excepciones, pueden ser oxidados a  $CO_2$  y agua mediante la acción de los agentes oxidantes, en condiciones ácidas (CEA Jalisco, 2013).

La oxidación de la materia orgánica e inorgánica se efectúa mediante la ebullición de la muestra, con una mezcla de ácido sulfúrico y un exceso de dicromato de potasio. Esta mezcla es sometida a reflujo por dos horas, durante este tiempo el material orgánico e inorgánico oxidable reduce una cantidad equivalente de dicromato; el dicromato remanente se determina mediante titulación con sulfato ferroso. La cantidad de dicromato reducida es una medida de la materia orgánica oxidada (Romero, 1999).

### 2.1.3 Nitrógeno

Nutriente esencial para el crecimiento de protistas y plantas, se presenta en diferentes formas en las aguas naturales y contaminadas, las formas de interés en aguas residuales son: nitrógeno orgánico, nitrógeno amoniacal, nitrógeno en forma de nitritos y de nitratos. El nitrógeno total, es la suma del nitrógeno amoniacal y orgánico presentes en las muestras, también conocido como *nitrógeno Kjeldahl*. Este nutriente es emitido ampliamente por las industrias, incrementando los suministros de nitratos y nitritos en el suelo y el agua. Su alta concentración es causa de eutrofización, además de que puede cambiar la composición de las especies en los cuerpos de agua debido a la susceptibilidad de ciertos organismos a los compuestos del nitrógeno (CEA Jalisco, 2013; Romero, 2004).

La evaluación del nitrógeno es necesaria para evaluar la tratabilidad de las aguas residuales por tratamientos biológicos; la forma predominante del nitrógeno en aguas residuales domésticas frescas es el nitrógeno orgánico; las bacterias rápidamente descomponen el nitrógeno orgánico en nitrógeno amoniacal y, si el medio es aerobio, en nitritos y nitratos. El predominio de nitratos indica que el residuo se ha estabilizado con respecto a su demanda de oxígeno (Romero, 2004; Romero, 2008).

#### 2.1.3.1 Nitrógeno amoniacal

El amoniaco es uno de los componentes transitorios del agua, puesto que es parte del ciclo del nitrógeno y se ve influenciado por la actividad de microorganismos, es el producto natural de descomposición de los compuestos orgánicos nitrogenados.

Los iones amonio tienen pocas acciones tóxicas por sí solas, pero su presencia, aún en bajas concentraciones puede representar un alto contenido de bacterias fecales, microorganismos patógenos, entre otros. Tiene procedencia en las aguas residuales industriales, agua de lluvia, tras periodos de sequía, en aguas residuales agrícolas, en la descomposición de productos nitrogenados orgánicos del suelo, inclusive en la putrefacción de plantas.



Algunos de sus efectos que se tienen con su presencia es la dificultad para clorar el agua, además altera el cobre para la formación de complejos solubles, de igual manera puede llegar a afectar la coloración del agua debido a la formación de compuestos complejos (CEA Jalisco, 2013; Arcos *et al*, 2005).

#### 2.1.3.2 Nitratos

El nitrato se encuentra en bajas concentraciones en las aguas residuales, sin embargo, después de un tratamiento biológico desnitrificante, se puede encontrar en concentraciones de hasta 30 mg/L. el nitrato es un nutriente fundamental para muchos autótrofos fotosintéticos, así como determinante para su crecimiento.

Una alta concentración de nitratos nos indica una etapa de mayor mineralización de los compuestos nitrogenados, asimismo su presencia en el efluente refleja una buena desnitrificación en el sistema de tratamiento. En aguas residuales crudas, derivadas de la agricultura se pueden generar nitratos debido a las bacterias o los pesticidas presentes en esta actividad (CEA Jalisco, 2013; Arcos *et al*, 2005).

#### 2.1.3.3 Nitritos

Considerado una etapa intermedia en el ciclo del nitrógeno, su presencia puede estar por el resultado de la descomposición biológica de materiales proteicos. En las aguas residuales crudas su presencia indica contaminación, también se pueden producir en las plantas de tratamiento como consecuencia de la acción de las bacterias sobre el nitrógeno amoniacal.

El nitrito puede entrar en un sistema de abastecimiento, por uso como inhibidor de corrosión en agua. En aguas residuales domésticas la concentración de nitritos generalmente es menor de 1 mg/L (CEA Jalisco, 2013; Romero, 2004).

#### 2.1.4 Fósforo Total

En general el fósforo se encuentra en forma de fosfato en las aguas ya sean naturales, de origen residual y tratadas. Su origen proviene de una diversa

variedad de fuentes, tales como detergentes, productos de limpieza, fertilizantes, y procesos biológicos entre otros.

El fósforo es un micronutriente esencial para el crecimiento de organismos, por esta razón es un parámetro importante, ya que su descarga en cuerpos de agua, puede estimular el crecimiento de organismos fotosintéticos. Si se encuentran en una cantidad excesiva, pueden incitar el crecimiento inmoderado de algas y otros organismos, provocando la eutrofización de las aguas. Los microorganismos, al descomponer estas algas, agotan el oxígeno del agua, provocando que no sea posible la vida para los demás organismos acuáticos, teniendo como resultado un agua inutilizable y con olor desagradable. De igual manera una concentración alta de fosfatos puede provocar daños a la salud como es daño a los riñones y osteoporosis (CEA Jalisco, 2013).

#### 2.1.5 Coliformes totales y fecales.

El grupo coliforme contiene a aquellas bacterias en forma de bacilo, aeróbicas y facultativas anaeróbicas, Gram-negativas, no formadoras de esporas, las cuales fermentan la lactosa con formación de gas en un periodo de 48 horas a  $35^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ , el grupo consta de 4 géneros principalmente *Enterobacter*, *Escherichia*, *Citrobacter* y *Klebsiella* (CEA Jalisco, 2013; Romero, 2002).

Los coliformes fecales se denominan termo-tolerantes, debido a su capacidad de resistir temperaturas más elevadas. Gracias a esta característica se pueden distinguir los coliformes fecales de los totales. Los coliformes fecales son un subgrupo que forman parte de los coliformes totales, tienen la capacidad de fermentar la lactosa a  $44.5^{\circ}\text{C}$ .

*Escherichia coli* es la bacteria indicadora por excelencia del grupo coliforme fecal, debido a su presencia permanente en la flora intestinal del hombre y de los animales de sangre caliente; es una bacteria gram negativa, facultativa anaerobia,

de forma bacilar, de 0,5 a 2  $\mu\text{m}$  de tamaño. La *E. coli* patógena causa diarrea, especialmente en niños y en viajeros (Romero, 2002).

El grupo coliforme es constante, abundante y casi exclusivo de la materia fecal, no obstante, las características de sobrevivencia y su capacidad de reproducirse fuera del intestino, además de encontrarse en aguas potables, lo hace un indicador ideal de contaminación del agua; mientras mayor sea su presencia, mayor es la posibilidad de tener contaminación reciente.

## **2.2 Principales tipos de aguas residuales.**

### **2.2.1 Agua residual doméstica.**

Este tipo de aguas contienen residuos fisiológicos, del lavado de ropa, limpieza doméstica, preparación de alimentos, además del riego de calles, servicio de bomberos etc. Cabe resaltar que tienen una elevada cantidad de microorganismos provenientes de la descomposición de los residuos orgánicos. Entre sus componentes se pueden citar: microorganismos, urea, albumina, proteínas, ácidos acéticos y lácticos; bases jabonosas, aceites animales, vegetales y minerales; gases: sulfhídrico, metano; sales: bicarbonatos, sulfatos, fosfatos, nitritos, nitratos, etcétera.

Usualmente pueden contener materiales peligrosos y tóxicos similares a los industriales, usados en el entorno doméstico (disolventes, aceites, pinturas, ácidos, bases, tensoactivos, fitosanitarios, etc.), de los cuales se debe evitar la eliminación por vertido ya que dificultan o impiden una buena depuración (Muñoz, 2008; Seoáñez, 2012).

### **2.2.2. Agua residual agrícola y ganadera**

Las aguas superficiales y subterráneas se contaminan con restos de abonos, productos fitosanitarios de uso agrícola y materia orgánica proveniente de las explotaciones ganaderas.

Se caracteriza en general por ser una contaminación difusa, sin unos focos determinados de vertido que la harían mucho más predecible y con unos tratamientos o acciones preventivas mucho más eficaces. En zonas con agricultura y/o ganadería intensiva aumentan los problemas de nitrificación y se agrava la situación si el riego se efectúa con aguas subterráneas. La contaminación agrícola contribuye a la eutrofización (Muñoz, 2008; Arcos *et al*, 2005).

### 2.2.3. Agua residual industrial

Las aguas residuales industriales proceden de diversas actividades o negocios que en sus procesos de producción, transformación o manipulación se utilice agua. Sus procesos incorporan al agua productos y subproductos de proceso así como del mismo tratamiento o acondicionamiento de la misma. Son más contaminadas que las aguas residuales urbanas, además que sus componentes llegan a inhibir los procesos para su tratamiento.

Las industrias más contaminantes son la química, textil (tinturas), curtido de pieles, papeleras, minera, refinado de petróleo, petroquímica, siderometalúrgicas, tratamiento de superficies y alimentación. Se vierten más de 500.000 substancias contaminantes, el vertido de muchas de ellas está regulado y algunas debido a su dificultad de tratamiento, efecto inhibitor o bioacumulación su regulación es muy estricta. Entre ellas podemos encontrar: hidrocarburos, compuestos halogenados, pesticidas, monómeros, metales pesados. Su alta carga, aunado a su enorme variabilidad que tienen, hace que su tratamiento sea complicado, incluso siendo necesario un estudio específico para cada caso (Romero,1999; Muñoz, 2008).

## **2.3 Microorganismos presentes en las aguas residuales e indicadores de contaminación.**

El desarrollo y tipo de bacterias están relacionados directamente con la naturaleza de la materia orgánica. Este tipo de microorganismos, en especial las bacterias, pueden ser perjudiciales, útiles o inofensivas para el hombre. El

desarrollo y tipo de bacterias están directamente relacionados con la naturaleza de la materia orgánica (Vargas, 1996).

Los microorganismos patógenos identificados en aguas residuales son muy diversos, encontrando principalmente bacterias, virus, protozoos, nemátodos y platelmintos (Romero, 2008).

Entre bacterias patógenas presentes podemos encontrar: *Escherichia coli*, *Yersinia enterocolitica* y *Campilobacter jejuni* causantes de gastroenteritis; *Salmonella typhi* que produce fiebre tifoidea; *Salmonella paratyphi* produce fiebre paratifoidea; *Shigella dysenteriae* ocasiona disentería bacteriana; *Vibrio cholerae* causante de cólera; *Leptospira* que produce ictericia y fiebre; y *Legionella pneumophila* origina enfermedades respiratorias agudas. *Pseudomonas aeruginosa* causa diversos daños, puede colonizar partes dañadas del organismo, el aparato respiratorio de personas enfermas y causar lesiones destructivas o septicemia y meningitis (Tortora *et al*, 2007; Romero, 2008).

En cuanto a los virus, podemos encontrar Adenovirus, Enterovirus, Echo y Reo causantes de enfermedades respiratorias y gastroenteritis: Polio que produce poliomielitis y meningitis; Coxsackie A y B causantes de anomalías cardíacas, y meningitis, entre otros (Romero, 2008).

Los protozoos más comunes son *Balantidium coli*, *Cryptosporidium*, *Entamoeba histolytica* y *Giardia lamblia*, que causan principalmente diarreas, náuseas e indigestión (Romero, 2008; Seoáñez, 2012).

Respecto a los nemátodos, *Ascaris lumbricoides*, *Enterobius vericularis* y *Fasciola hepática*, producen lombrices, oxiuros y lombriz del hígado respectivamente. Mientras que los platelmintos más frecuentes son *Hymenolepis nana*, *Taenia saginata*, *Taenia solium*, que producen himenolepiasis y teniasis (Romero, 2008; Seoáñez, 2012).

### 2.3.1 Indicadores de contaminación

Existe una gran dificultad para determinar la presencia de todos los microorganismos patógenos implicados en los procesos de contaminación ambiental. Dicha determinación implica costos elevados, tiempo, y laboratorios especializados. Frente a estas dificultades y a la necesidad de hacer una evaluación rápida y fiable de la presencia de patógenos en el agua, se ha planteado la necesidad de trabajar con determinados grupos indicadores (Arcos *et al*, 2005; Seoáñez, 2012).

Los microorganismos indicadores son aquellos que tienen un comportamiento similar a los patógenos, concentración y reacción frente a factores ambientales, pero son más fáciles, rápidos y económicos de identificar. Una vez se ha demostrado la presencia de grupos indicadores, se puede inferir que los patógenos se encuentran presentes en la misma concentración y que su comportamiento frente a diferentes factores como pH, temperatura, presencia de nutrientes, tiempo de retención hidráulica o sistemas de desinfección es similar a la del indicador (Campos, 1999).

Un microorganismo indicador de contaminación fecal ideal debe reunir las siguientes características (Fernández, 2001):

- Ser un constituyente normal de la flora intestinal de individuos sanos.
- Estar presente, de forma exclusiva, en las heces de animales homeotérmicos.
- Estar presente cuando los microorganismos patógenos intestinales lo están.
- Presentarse en número elevado, facilitando su aislamiento e identificación.
- Debe ser incapaz de reproducirse fuera del intestino de los animales homeotérmicos.
- Su tiempo de supervivencia debe ser igual o un poco superior al de las bacterias patógenas, su resistencia a los factores ambientales debe ser igual o superior al de los patógenos de origen fecal.
- Debe ser fácil de aislar y cuantificar.
- No debe ser patógeno.

### 2.3.2 Bacterias

Las bacterias que se encuentran más frecuentemente en el agua son las bacterias entéricas que colonizan el tracto gastrointestinal del hombre y son eliminadas a través de la materia fecal. Cuando estos microorganismos se introducen en el agua, las condiciones ambientales son muy diferentes y por lo tanto su capacidad de reproducirse y de sobrevivir son limitadas.

Debido a que su detección y recuento a nivel de laboratorio son lentos y laboriosos, se ha usado el grupo de las bacterias coliformes como indicadores, ya que su detección es más rápida y sencilla (Arcos *et al*, 2005; Craun *et al*, 1997; Steiner *et al*; 1997).

El grupo de microorganismos coliformes es adecuado como indicador de contaminación bacteriana debido a que estos son contaminantes comunes del tracto gastrointestinal tanto del hombre como de los animales de sangre caliente, están presentes en el tracto gastrointestinal en grandes cantidades, permanecen por más tiempo en el agua que las bacterias patógenas y se comportan de igual manera que los patógenos en los sistemas de desinfección (Prescott *et al*; 1996).

Los microorganismos que conforman el grupo de los coliformes totales; *Escherichia*, *Enterobacter*, *Klebsiella*, *Serratia*, *Edwardsiella* y *Citrobacter*, viven como saprófitos independientes o como bacterias intestinales; los coliformes fecales (*Escherichia*) son de origen intestinal. Todos pertenecen a la familia Enterobacteriaceae, son bacilos Gram negativos, anaerobios facultativos, no esporulantes, fermentadores de lactosa con producción de gas; constituyen aproximadamente el 10% de los microorganismos intestinales de los seres humanos y otros animales (Seoáñez, 2012).

Entre otras bacterias indicadoras están los Estreptococos fecales, actualizados taxonómicamente como *Enterococcus* incluyen un número de especies que se encuentran en las heces de los humanos y animales de sangre caliente. Esto es muy importante, ya que la contaminación fecal causada por animales puede involucrar riesgos sanitarios, por lo que hay que tener en cuenta los

microorganismos más abundantes y frecuentes en las heces de los animales, en todos ellos se encuentran coliformes y Estreptococos fecales, aunque son más abundantes los estreptococos fecales (Fernández, 2001). Son importantes en situaciones donde se sabe que hay contaminación fecal y no se detectan coliformes, como ocurre cuando las descargas son intermitentes o más antiguas, de modo que mueren los coliformes fecales y *E. coli*, y permanecen los estreptococos. Las especies más comunes son *Enterococcus faecalis*, *Enterococcus faecium* y *Enterococcus durans* (Environmental Agency, 2002).

Las *Pseudomonas* son bacilos Gram-negativos no esporulados, de unos 3 x 0.5µm, presentan flagelos polares para su locomoción que pueden producir un pigmento fluorescente, son oxidasa positivo, utilizan la glucosa oxidativamente y no forman gas. Se hallan comúnmente en el suelo y en el agua y algunas especies son clasificadas como patógenos y patógenos oportunistas, para el hombre y los animales. Algunas de las especies más importantes son: *P. aeruginosa*, *P. fluorescens*, *P. putida*, *P. maltophilia*, *P. stutzeri* (Coliins, 1989).

## 2.4 Tratamiento de aguas residuales

El tratamiento de aguas residuales se divide en un pre-tratamiento y tres etapas de tratamiento que son primario, secundario y terciario.

- **Tratamiento preliminar:** es destinado a la eliminación de residuos fácilmente separables y en algunos casos un proceso de pre-aireación.
- **Tratamiento primario:** que comprende procesos de sedimentación y tamizado.
- **Tratamiento secundario:** comprende procesos biológicos aerobios y anaerobios y físico-químicos (floculación) para reducir la mayor parte de la DBO.



- **Tratamiento terciario o avanzado** que está dirigido a la reducción final de la DBO, metales pesados y/o contaminantes químicos específicos y la eliminación de patógenos y parásitos (Ramírez, 1998; Martínez, 2014).

#### 2.4.1. Proceso Lodos Activados

Su nombre proviene de la producción de una masa activada de microorganismos capaz de estabilizar un residuo en medio aerobio. Los lodos activados son agregados de partículas y bacterias aeróbicas, las cuales forman estructuras microscópicas llamadas flóculos, los cuales se mantienen en un reactor biológico o aeróbico por agitación mecánica externa. Este método está provisto de un sistema de recirculación y eliminación de lodos (González y Saldarriaga, 2008; Méndez *et al*, 2004).

Las bacterias que integran los flóculos degradan la materia orgánica disuelta principalmente en su contenido de carbono, nitrógeno y fósforo. La eficiencia de remoción de materia orgánica en el sistema se evalúa en términos de la remoción de la DBO<sub>5</sub>. En cuanto al nitrógeno, se libera por medio de reacciones de oxidación y reducción como nitrógeno gaseoso en un subsistema anóxico. Por otra la remoción del fósforo se da por mecanismos aeróbicos-anaeróbicos, en los cuales las bacterias lo asimilan eliminándolo del medio líquido (Torrescano, 2009; Jiménez, 2001).

El proceso se lleva a cabo de la siguiente manera: El residuo entra al reactor o aireador en el que se encuentra un cultivo de microorganismos, en su mayoría bacterias en suspensión, las cuales en su conjunto se les conoce como licor mezclado. El medio ambiente aerobio así como la mezcla de sustrato y de microorganismos, se mantiene mediante el uso de aeración mecánica o inyección de aire por sopladores. Después de un determinado tiempo de retención, el licor mezclado pasa a un tanque de sedimentación secundaria, donde se lleva a cabo la separación de microorganismos (en forma de flóculos) del agua, la cual sale por la parte superior del tanque, terminando aquí su proceso de tratamiento

secundario. Una parte de la biomasa sedimentada es retornada al tanque de aeración para mantener una concentración deseada de sólidos suspendidos volátiles en el licor mezclado y la otra es retirada del sistema como desecho, siendo este lodo, principalmente la materia orgánica que se le ha quitado al agua afluyente (Seoáñez, 2012; Méndez *et al*, 2004; Torrescano, 2009).

La materia orgánica que contiene el agua residual, actúa como fuente de alimento para los microorganismos, en un sistema de lodos activados; por lo tanto un cambio significativo en las características del agua (por ejemplo carga de demanda bioquímica de oxígeno DBO<sub>5</sub> o demanda química de oxígeno DQO) afecta el crecimiento de los microorganismos en el sistema de tratamiento. Si la carga de DBO<sub>5</sub> se incrementa significativamente, entonces habrá demasiado alimento para los microorganismos (Torrescano, 2009).

## **2.5 Características del agua de los procesos de la industria textil.**

Los vertidos de las fábricas textiles dependen del tipo de proceso a los que se sometan los distintos materiales empleados en la empresa textil. Se puede dividir las materias primas en tres grandes grupos: lana, algodón y fibras químicas. En general el agua residual de esta industria sin tratar presenta un pH alcalino, una elevada temperatura, alta conductividad, así como baja degradabilidad comparada con el agua residual doméstica. Existen varios procesos en las textileras, sin embargo a continuación se describen los de importancia para este estudio (Muñoz, 2008).

### **2.5.1 Proceso de teñido.**

En este proceso los colorantes son fijados con agua a altas temperaturas (hasta 100°C, con colorantes dispersos en ollas de presión, donde, en cada operación, se coloca la tela, colorantes y los aditivos necesarios, tales como sustancias que aumentan la solubilidad y dispersantes que evitan que las partículas de colorante se aglutinen entre sí. Las ollas son abiertas cuando la temperatura baja a 60°C. Para teñir entre 150 y 300 kilogramos, se utilizan alrededor de 4000 litros de agua, El proceso tiene una duración media de cuatro horas, con una temperatura de

régimen de 130°C. En general, después del teñido, la tela se enjuaga dentro del mismo recipiente para eliminar los colorantes que han quedado adheridos a ella pero que no penetraron en la fibra. Finalmente se retira la tela y se expulsa el agua, quedando el equipo “listo” para el siguiente proceso, aunque quedan residuos de los colorantes utilizados.

El agua residual generada en el proceso de teñido es inodora y de color negro, se vierte en cárcamos para que la temperatura disminuya, posteriormente es enviada por la tubería para mezclarse con el agua residual del proceso de acabado. En esta etapa se ocupan alrededor de 100 productos químicos diferentes (Ibarra, 2015; Maldonado 2005).

#### 2.5.2 Proceso de acabado.

El acabado de los textiles constituye el área más variable en el proceso de producción. Actualmente existen en el mercado una amplia y siempre creciente diversidad de acabados que mejoran las propiedades de la prenda, por ejemplo proporcionando resistencia a las arrugas, o las propiedades de “rendimiento”, incluyendo agentes biocidas para impedir que la ropa interior o de deporte emita olores (Walters *et al*, 2005).

El proceso de acabado consiste en dar las propiedades adecuadas a las telas para el control de calidad, por medio de lavados, aclarados y planchados. Se utilizan primordialmente 3 tipos de químicos: Foryl (espumante), Dequilan (detergente) y Lomigly (intermediario) en proporciones 1:1:0.5 /metro lineal de tela. La cantidad de agua que se utiliza en este proceso depende de la capacidad de la máquina; en promedio se ocupan 700 litros. Hay dos tipos de lavados y en uno de ellos también se hace planchado a dos temperaturas: a 40°C y a 92°C. el agua que se genera en este proceso sale con una temperatura promedio de 40°C, presenta espuma, es inodora y de un color gris claro; se vierte a otras trincheras diferentes de las de teñido y después se une al agua residual del primer proceso (Ibarra, 2015).

## 2.6 Antecedentes

En el 2014, Martínez evaluó la remoción de bacterias, nutrientes y materia orgánica en un sistema de tratamiento biológico de aguas residuales en una industria textil en el Estado de México. Se realizaron seis muestreos bimensuales, en los cuales se cubrió un total de catorce parámetros fisicoquímicos y dos bacteriológicos.

Durante los muestreos la  $DBO_5$  presentó una buena remoción, estos valores oscilaron entre 92.4% y 99.66%. De igual manera los sólidos presentaron una eficaz remoción con un promedio de 96.7%. La remoción de DQO osciló de 82.4% a 92.4%, por lo cual también fue buena, sin embargo para nutrientes y bacterias la remoción fue baja.

Los resultados obtenidos en el efluente de la planta de tratamiento se compararon con la normatividad vigente, NOM-003-SEMARNAT-1997, (SEMARNAT, 2003) teniendo a la  $DBO_5$  y a los sólidos suspendidos por debajo de los límites permisibles en todos los muestreos. En el caso de los parámetros bacteriológicos, en la gran mayoría de las veces se situaron por encima de los límites máximos.

En el 2010, Nájera evaluó el efecto de la aplicación de altas cargas orgánicas en sistemas de lodos activados para el tratamiento de aguas residuales municipales para su reutilización en riego agrícola conforme a la normatividad mexicana. Se realizó en un sistema experimental con reactores de volumen útil de 33.6 L con distintos tiempos de retención (2, 3 y 4 horas).

Los resultados demostraron eficiencia en el sistema con lodos activados; la remoción de materia orgánica como  $DBO_5$  obtuvo valores de remoción de 66-78%, siendo la de mayor eficiencia la de mayor tiempo de retención. En cuanto a Nitratos, las concentraciones más bajas en el efluente fueron de 0.1 a 1.3 mg/L. con respecto a otros contaminantes como fósforo total, grasas y aceites, y coliformes fecales, se obtuvo una buena calidad del efluente para uso en riego

agrícola de acuerdo a la NOM-001-SEMARNAT-1996. (SEMARNAT, 2003). Se concluyó que el empleo de un sistema de lodos activados para afluentes con alta carga orgánica es eficiente para la eliminación de materia orgánica y disminución de nutrientes en el efluente.

En el 2009, Villegas estudió los efectos del efluente del proceso de teñido de hilos en el sistema de lodos activados a nivel piloto de una industria textil, se utilizaron dos parámetros que fueron demanda química de oxígeno (DQO) y sólidos suspendidos totales (SST) para determinar la efectividad del proceso aun con los contaminantes de difícil tratamiento que se tienen en las textileras. El estudio se realizó en dos reactores aerobios con capacidad de 10 litros, con tiempos de retención hidráulica (TRH) de 12.5 horas. Debido a los componentes químicos del proceso de teñido, se observaron variaciones en el efluente, lo que repercute directamente en el tratamiento. Las mayores remociones fueron de 67% para SST y de 66% para DQO.

En el 2008, Varila y Díaz diseñaron, construyeron y pusieron en operación un bioreactor de lodos activados para el tratamiento de aguas residuales a escala laboratorio. El reactor construido cuenta con un volumen total de 18 litros de capacidad, de los cuales 12 litros corresponden a la zona de aireación y 6 litros a la zona de sedimentación. La funcionalidad del sistema fue evaluada con un agua residual sintética de baja carga y de composición conocida, simulando las características del agua residual doméstica. Los tiempos de retención hidráulica oscilaron entre las 5 y 36 horas. En las dos primeras semanas la DQO del efluente osciló entre 76 y 58 mg/L, alcanzando eficiencias de remoción de hasta el 80%. Mientras que para la tercera y cuarta semana, la DQO logró estabilizarse entre 31 y 35 mg/L durante la operación del sistema, alcanzando eficiencias de remoción de hasta el 90%. El contenido promedio mensual de materia orgánica en términos de DQO del afluente fue de 290 mg/L.

En el 2010, Rincones *et al.*, diseñaron, construyeron, operaron y evaluaron un sistema de lodos activados a escala laboratorio, para establecer el tratamiento del efluente líquido proveniente de una industria papelera. La aclimatación de los microorganismos se logró alimentando el reactor por carga, con una mezcla de agua residual de origen doméstico y efluente previamente sedimentado de la empresa papelera. El sistema se sometió a tres cargas hidráulicas. En cada fase se realizaron determinaciones de Sólidos suspendidos volátiles al licor mezclado (SSVLM) y oxígeno disuelto en el reactor y, pH, sólidos, DQO, DBO<sub>5, 20</sub>, nitrógeno y fósforo en el afluente y efluente. Los resultados mostraron que en la etapa de estabilización se dio una remoción promedio de DQO de 65%, teniendo en el efluente concentraciones entre 160 y 286 mg/L.

En el 2000, Finamore *et al.*, utilizaron un sistema de lodos activados a escala laboratorio conformado por un tanque de aeración de 30 L y un sedimentador de 10 L y alimentado con líquido residual municipal. El sistema fue operado durante 8 meses con tiempos de retención hidráulico entre 5 y 17 horas. La información generada por estos análisis permitió visualizar la estabilidad alcanzada en cada etapa de evaluación, además de definir mediante los porcentajes de remoción de materia orgánica, la eficiencia de cada etapa, siendo el rango obtenido entre 65 y 90 % para DQO y entre 63 y 88% para DBO<sub>5</sub>. La DQO en el efluente tuvo valores de 29 a 101 mg/L, mientras que para la DBO, los valores oscilaron entre 15 y 42 mg/L.

### **3. JUSTIFICACIÓN**

El tratamiento de las aguas residuales es una cuestión prioritaria a nivel mundial, ya que es importante disponer de agua de calidad y en cantidad suficiente, lo que permitirá una mejora del ambiente, la salud y la calidad de vida. En México, debido a la insuficiente infraestructura, los altos costos, la falta de mantenimiento y de personal capacitado, sólo 36 % de las aguas residuales generadas reciben tratamiento, lo cual crea la necesidad de desarrollar tecnologías para su depuración. Los lodos activados son una alternativa de

tratamiento debido a su alta eficiencia de remoción de contaminantes y a su bajo costo de instalación y mantenimiento (Romero-Aguilar *et al*; 2009)

Las aguas residuales, en particular las relacionadas a las fábricas textiles, se caracterizan por ser efluentes difíciles de tratar, debido a que su composición es variable y compleja, además de que tienen colorantes, los cuales son compuestos difíciles de biodegradar y que también pueden llegar a formar compuestos altamente tóxicos (García, 2012) .

Por estas razones, surge la necesidad de evaluar el comportamiento y eficiencia para este tipo de efluentes industriales, del sistema de lodos activados con diferentes mezclas de agua doméstico-industrial, para definir las características físico-químicas del efluente líquido a tratar, evaluar la eficiencia de remoción de la materia orgánica biodegradable y nutrientes en cada etapa, en mezclas a distintos porcentajes (García, 2012).

En la industria textil hay varios procesos y diferentes tipos de contaminantes en sus descargas dependiendo de cada proceso, pudiendo ser algunos más tóxicos que otros, de tal manera que no resulta conveniente el tratamiento con lodos activados con estas aguas residuales al 100% de su concentración, siendo necesario y recomendable hacer diluciones. Para lograr una óptima remoción de nutrientes y materia orgánica, para cumplir con la normatividad establecida para su descarga o su reuso, es importante buscar las mejores mezclas con las que el sistema biológico pueda brindar la mejor remoción de nutrientes y materia orgánica, y de esta manera tener efluentes de mayor calidad para su reutilización, asimismo incrementar los estudios en los sistemas de depuración de aguas residuales mediante lodos activados a escala de laboratorio.

## **4. OBJETIVOS**

### **4.1 Objetivo General**

Evaluar el funcionamiento de un sistema de lodos activados con mezclas de agua doméstico-textil en la remoción de materia orgánica, nutrientes y coliformes.

### **4.2 Objetivos particulares**

Determinar cuáles son las mejores mezclas y ciclos de agua residual doméstico-textil en la que se obtengan las mejores remociones de materia orgánica y sólidos suspendidos mediante un reactor de lodos activados a escala de laboratorio.

Determinar los parámetros físico-químicos: DBO<sub>5</sub>, DQO, Nitratos, nitritos, fosfatos y sólidos suspendidos totales.

Determinar los parámetros bacteriológicos: coliformes totales y coliformes fecales .

Calcular el porcentaje de remoción de los parámetros analizados.

Realizar un análisis de correlación de Pearson para identificar que parámetros están relacionados.

Comparar los valores obtenidos en el efluente del sistema con los límites permisibles establecidos por la NOM-003-ECOL-1997. (SEMARNAT, 2003).



## **5. METODOLOGÍA.**

### **5. 1 Descripción del biorreactor**

Este trabajo se realizó en un reactor piloto de lodos activados a escala laboratorio, el cual constaba de un recipiente de vidrio, con una capacidad de trabajo de 3 L, (biorreactor), aerobio (con control de aireación) y con control de tiempo para ajustar los ciclos y el volumen de entrada; que en la primera etapa inició con la aclimatación del reactor con los lodos procedentes de una planta de tratamiento de aguas residuales domésticas, utilizando como influente el agua residual cruda de la misma planta (Figura 1).

Posteriormente para las primeras semanas de la etapa doméstico-textil se utilizó agua combinada (mezcla de tintorería y acabado) proveniente de una planta de tratamiento de una industria textil, se utilizó de esta manera debido a la disponibilidad de la planta de tratamiento. Para las siguientes semanas se estableció usar agua del proceso de teñido y acabado en distintos porcentajes. Debido a la toxicidad y agresividad del agua del proceso de teñido para los microorganismos se decidió bajar la cantidad de esta agua y aumentar la del proceso de acabado que es menos tóxico, esto se hizo cuando la cantidad de agua textil fue aumentando su proporción en comparación del agua residual doméstica. Se realizaron éstas combinaciones de agua residual doméstica, acabado y teñido a lo largo del estudio con la finalidad de obtener mejores remociones, asimismo también el tiempo del ciclo varió dependiendo el comportamiento con cada mezcla utilizada en el reactor.

El tiempo del ciclo para cada muestreo se adaptó a la necesidad de la mezcla, generalmente fue aumentando conforme fue incrementando la cantidad de agua textil utilizada. Para las últimas semanas se utilizaron ciclos de 24 horas con la finalidad de aumentar el contacto del agua residual con la microbiota y así generar una mayor eficiencia en la remoción de los contaminantes.

La toma de las muestras regularmente se tomó al siguiente día de haber hecho el cambio de mezcla, y cuando ese porcentaje se mantenía por un largo periodo, se realizaban varios muestreos a lo largo de ese lapso. En la tabla 1 se muestran todas las mezclas y ciclos realizados en cada muestreo. Cabe mencionar que se utilizó la DQO como parámetro base en para determinar la eficiencia del reactor, y así establecer en qué momento se realizaba el muestreo completo.

Tabla 1. Mezclas utilizadas en cada muestreo con su respectivo ciclo.

| <b>SEMANA O<br/>FECHA</b>                 | <b>DILUCIÓN</b>                                    | <b>CICLO</b> |
|---|--|--------------|
| 1   | 100% DOMÉSTICA                                     | 6 HRS        |
| 2   | 100% DOMÉSTICA                                     | 6 HRS        |
| 3   | 100% DOMÉSTICA                                     | 6 HRS        |
| 4   | 100% DOMÉSTICA                                     | 4 HRS        |
| 6   | 90% DOMÉSTICA + 10% TEXTIL                         | 4 HRS        |
| 7   | 90% DOMÉSTICA + 10% TEXTIL                         | 6 HRS        |
| 9   | 90% DOMÉSTICA + 5% TINTORERÍA + 5%<br>HOMOGENIZADA | 6 HRS        |
| 10  | 80% DOMÉSTICA + 10% TEXTIL + 10% HOMOGENIZADA      | 6 HRS        |
| 12  | 60% DOMÉSTICA + 20% TINTORERÍA + 20% ACABADO       | 6 HRS        |
| 14  | 60% DOMÉSTICA + 20% TINTORERÍA + 20% ACABADO       | 12 HRS       |
| 03- DIC-14<br>13- ENE- 15                 | 60% DOMÉSTICA + 20% TINTORERÍA + 20% ACABADO       | 12 HRS       |
| 03- FEB- 15<br>05- MAR- 15                | 60% DOMÉSTICA + 20% TEÑIDO + 20% ACABADO           | 12 HRS       |
| 18- MAR- 15<br>15- ABR- 15<br>29- ABR- 15 | 40% DOMÉSTICA + 50% ACABADO + 10% TEÑIDO           | 12 HRS       |

|  |   |        |
|--|---|--------|
| 4- MAY-15  | 30% DOMÉSTICA + 50% ACABADO + 20 TEÑIDO | 12 HRS |
| 16-MAY-15  | 30% DOMÉSTICA + 65% ACABADO+ 5% TEÑIDO  | 12 HRS |
| 01- JUL-15<br>10-AGO-15<br>12-AGO-15<br>19-AGO-15<br>26-AGO-15 | 30% DOMÉSTICA + 65% ACABADO+ 5% TEÑIDO  | 24 HRS |
| 21- SEP-15   | 20% DOMÉSTICA + 75% ACABADO + 5% TEÑIDO | 24 HRS |



Figura 1. Reactor utilizado en el presente estudio.

## 5.2 Muestreo y técnicas analíticas

Se realizaron muestreos y análisis físico-químicos y bacteriológicos del influente (entrada) y efluente (salida) del reactor, en cada cambio de dilución o tiempo de retención hidráulica, de acuerdo con las técnicas normalizadas (Tabla 1). (Robles *et al.*, 2008; APHA-AWWA-WEF., 2012).

Tabla 2. Técnicas analíticas de los parámetros físico-químicos y bacteriológicos.

| <b>PARÁMETRO</b>                                  | <b>TÉCNICA</b>       |
|---|----------------------|
| Coliformes totales (CT)                           | NMP                  |
| Coliformes fecales (CF)                           | NMP                  |
| Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO <sub>5</sub> ) | Dilución             |
| Demanda Química de Oxígeno (DQO)                  | Reflujo              |
| Nitrógeno Total                                   | Digestión, Kjeldahl  |
| Nitratos (NO <sub>3</sub> )                       | Columna cobre-cadmio |
| Nitritos (NO <sub>2</sub> )                       | Diazotización        |
| Fósforo total                                     | Cloruro Estanoso     |
| Sólidos suspendidos (SST)                         | Gravimétrica         |

Con los resultados obtenidos se calculó el porcentaje de remoción de cada parámetro.

También se calcularon los coeficientes de correlación de Pearson entre los porcentajes de remoción. Los coeficientes de correlación son medidas que indican la situación relativa de los mismos sucesos respecto a las dos variables, es decir, son la expresión numérica que nos indica el grado de relación existente entre las 2 variables y en qué medida se relacionan.

La correlación puede ser positiva o negativa. Las dos variables tiene correlación positiva cuando al aumentar o disminuir el valor de una de ellas entonces el valor correspondiente a la otra aumentará o disminuirá respectivamente, es decir, cuando las dos variables aumentan en el mismo sentido. Y dos variables pueden tener correlación negativa cuando al aumentar o disminuir el valor de una de ellas entonces el valor de la otra disminuirá o aumentará respectivamente, es decir, una variable aumenta y otra disminuye o viceversa.

El coeficiente de correlación tiene un valor acotado entre -1 y +1. Los valores cercanos a cero indican que no hay asociación entre las variables. Valores cercanos a uno indican una asociación fuerte, mientras que los valores cercanos a menos uno indican una asociación fuerte pero inversa. (Suárez, 2012).

Por último los resultados del efluente se compararon con los límites máximos permisibles de la Norma oficial NOM-03-ECOL- 1997 (SEMARNAT, 2003)

## 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 6.1 Resultados de los parámetros realizados en la entrada (E) y salida (S).

#### 6.1.1. DBO<sub>5</sub>.

En la figura 2 se muestran los valores de DBO<sub>5</sub>, obtenidos en la entrada y salida del biorreactor usando el agua residual 100% doméstica.

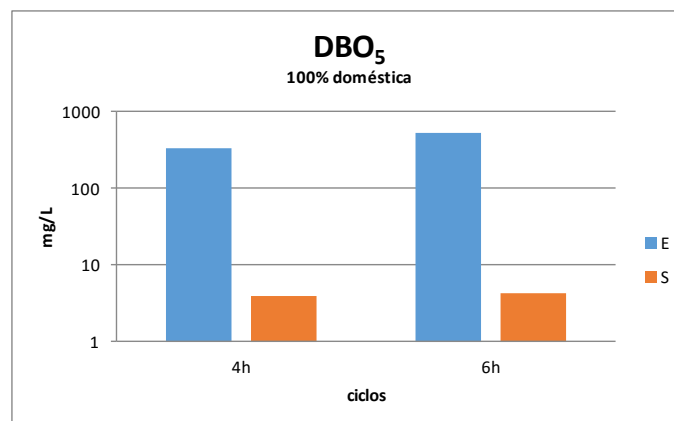


Figura 2. Valores de la DBO<sub>5</sub>, en la etapa doméstica.

De las figuras 3 a la 8 se presentan los resultados de DBO<sub>5</sub> con las diferentes mezclas de doméstica y la textil.

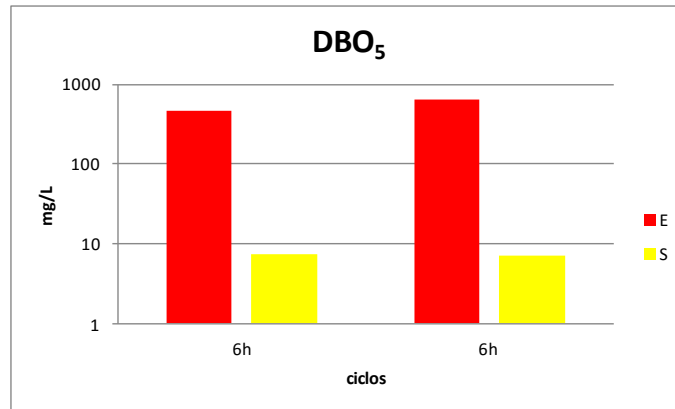


Figura 3. Valores de la DBO<sub>5</sub>, con la mezcla 90% doméstica y 10% textil; en el segundo muestreo, el agua textil se componía de un 5% combinada y 5% de teñido. El agua denominada combinada es una mezcla de los procesos de acabado y teñido.

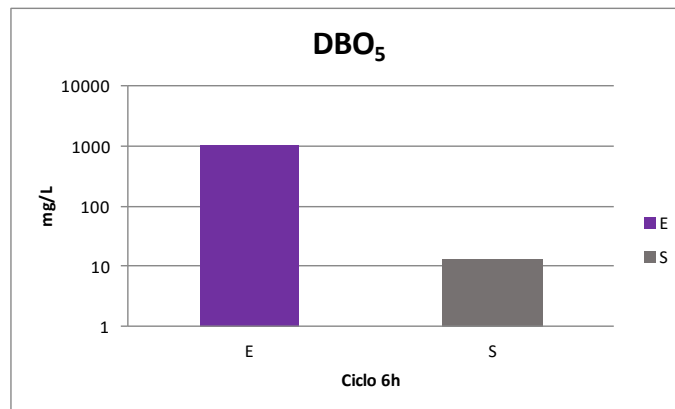


Figura 4. Valores de la DBO<sub>5</sub>, con la mezcla 80% doméstica y 20% textil (10% teñido + 10% combinada).

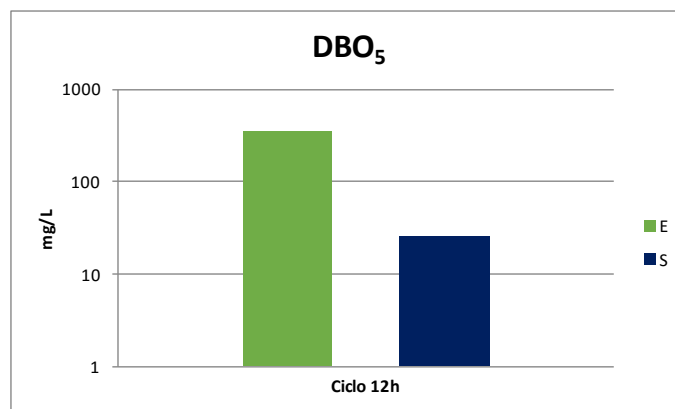


Figura 5. Valores de la DBO<sub>5</sub>, con la mezcla 60% doméstica y 40% textil (20% teñido + 20% acabado).

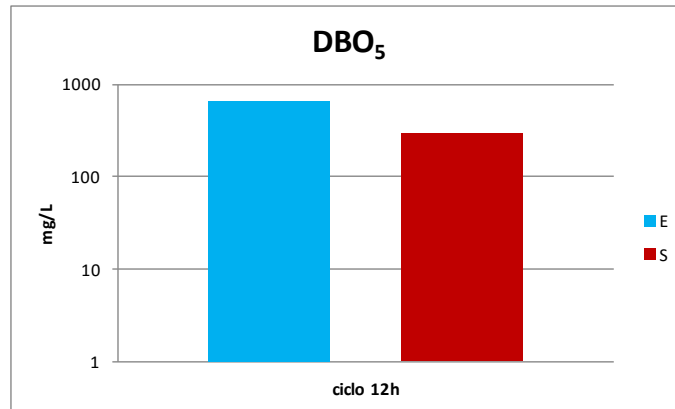


Figura 6. Valores de la DBO<sub>5</sub>, con la mezcla 40% doméstica y 60% textil (10% teñido + 50% acabado).

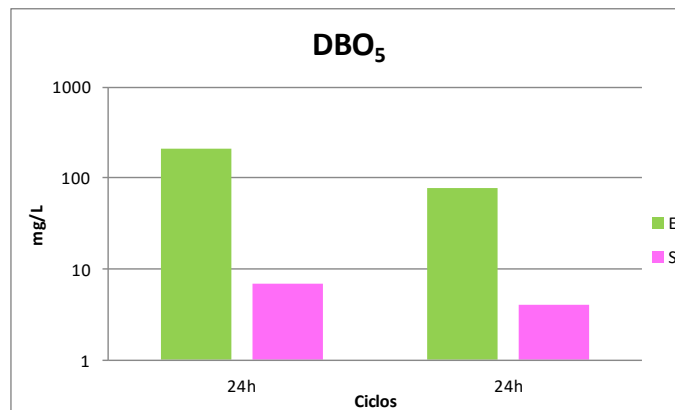


Figura 7. Valores de la DBO<sub>5</sub>, con la mezcla 30% doméstica y 70% textil (5% teñido + 65% acabado).

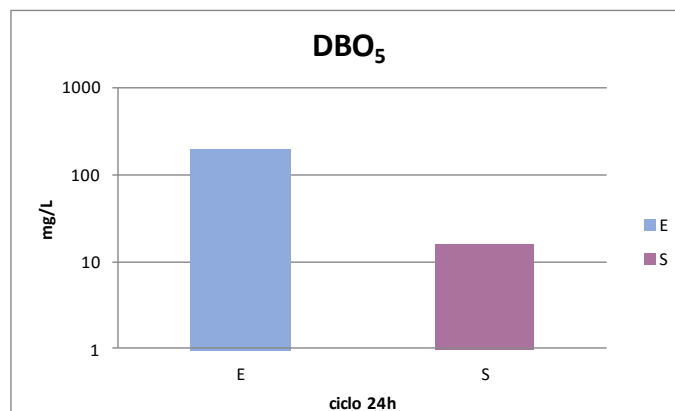


Figura 8. Valores de la DBO<sub>5</sub>, con la mezcla 20% doméstica y 80% textil (5% teñido + 75% acabado).

En la figura 2 se puede observar que en la entrada, la DBO<sub>5</sub> se mantuvo con valores similares en la etapa doméstica, de 339 mg/L y de 534 mg/L, sin embargo

al iniciar las mezclas con agua residual textil (figura 3-8), los valores tendieron a ser muy intermitentes entre las etapas, oscilando entre 76.25 mg/L y 1047 mg/L. Éstas concentraciones son por lo regular más altas que las reportadas por Martínez (2014), quien realizó un estudio de valoración de la remoción con agua residual de una textilera, a pesar que nuestras mezclas no eran 100% textiles .

En la salida, en esta etapa doméstica se infiere una rápida adaptación de los microorganismos de los lodos, debido a los resultados obtenidos, en los cuales la disminución de la DBO<sub>5</sub> es considerable, obteniendo valores en el efluente de 3.95 mg/L y 4.29 mg/L. Sin embargo cuando se inician las mezclas con agua textil, los valores de DBO<sub>5</sub> también incrementaron en la salida, especialmente al inicio de cada cambio de mezcla, incluso en el primer cambio y en varios muestreos más, no se obtuvieron resultados de DBO<sub>5</sub>, al agotarse el oxígeno disuelto disponible en las muestras de la entrada y salida. En los próximos cambios los valores fueron más altos que en la etapa doméstica, con valores que oscilaron de 7.1 hasta 293 mg/L en las diferentes mezclas realizadas. Estas concentraciones son aún más altas que las de Nájera-Flores (2012), el cual reporta valores en el efluente de 24 a 62 mg/L, en aguas residuales con alta carga orgánica.

### **6.1.2. DQO**

En la figura 9 se muestran los valores de DQO, obtenidos en la entrada y salida del biorreactor usando el agua residual 100% doméstica.



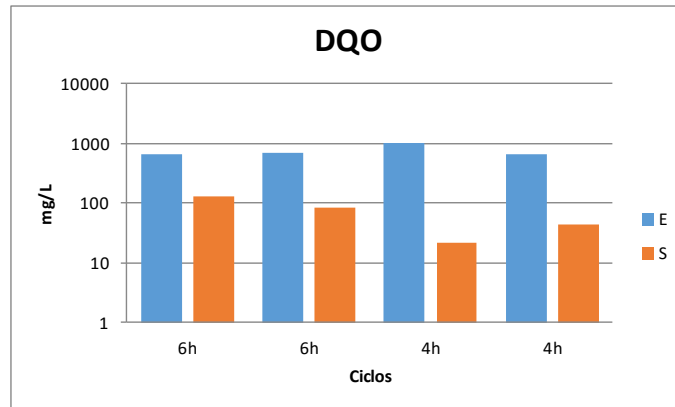


Figura 9. Valores de la DQO, en la etapa doméstica.

Las figuras 10 a la 17 muestran los valores de DQO, obtenidos en la entrada y salida respectivamente en cada una de las mezclas realizadas en el biorreactor.

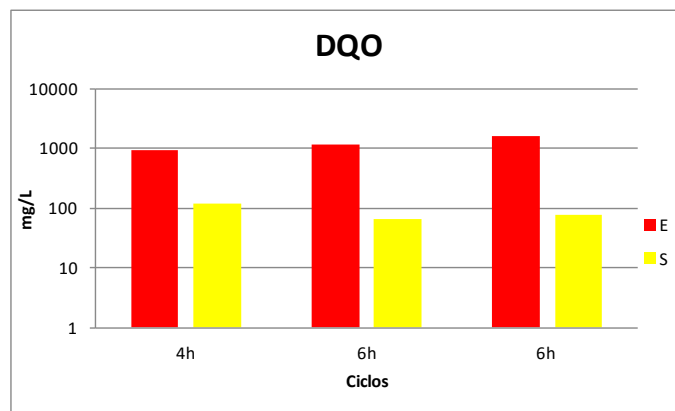


Figura 10. Valores de la DQO, con la mezcla: 90% doméstica +10% textil. En el tercer muestreo, el agua textil se componía de un 5% combinada y 5% de teñido.

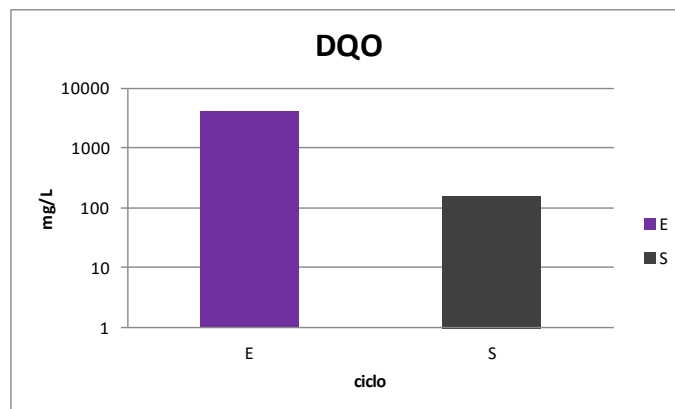


Figura 11. Valores de la DQO, con la mezcla: 80% doméstica +20% textil (10% textil +10% combinada).

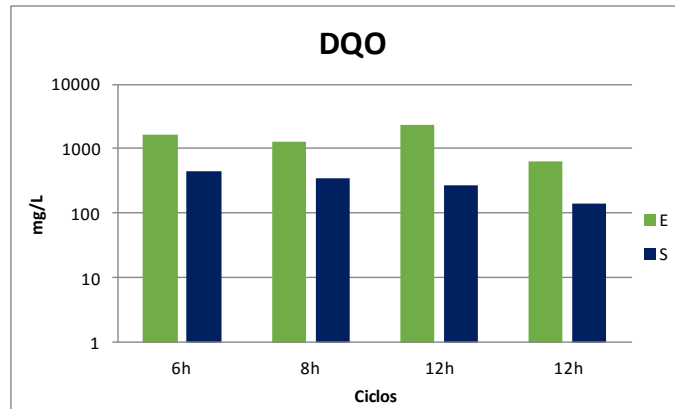


Figura 12. Valores de la DQO, con la mezcla: 60% doméstica +40% textil (20% teñido + 20% acabado).

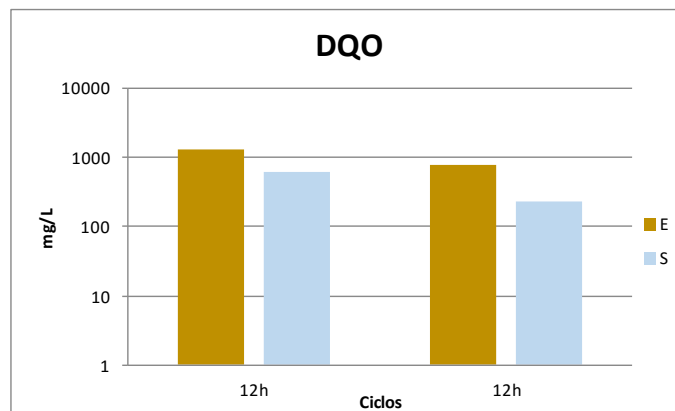


Figura 13. Valores de la DQO, con la mezcla: 40% doméstica +60% textil (20% teñido +40% acabado).

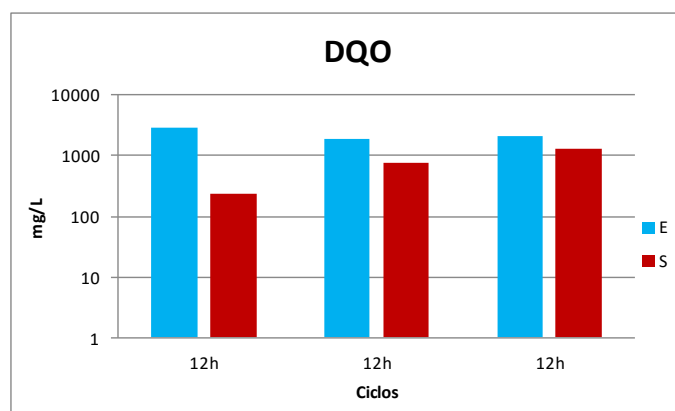


Figura 14. Valores de la DQO, con la mezcla: 40% doméstica +60% textil (10% textil + 50% acabado).

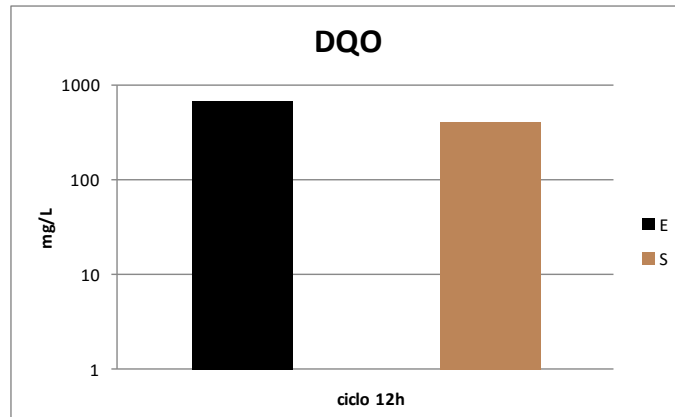


Figura 15. Valores de la DQO, con la mezcla: 30% doméstica +70% textil (20% teñido + 50% acabado).

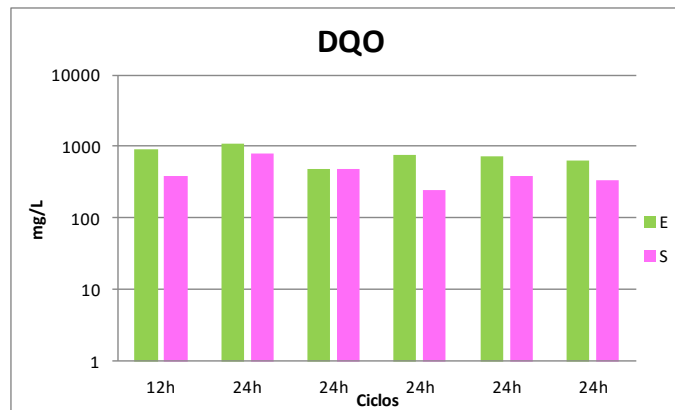


Figura 16. Valores de la DQO, con la mezcla: 30% doméstica +70% textil (5% teñido + 65% acabado).

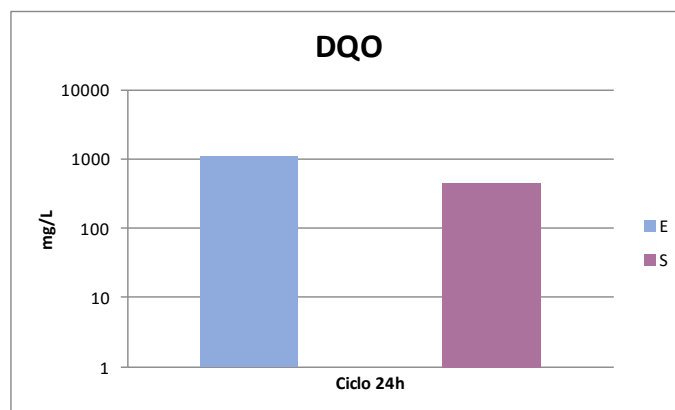


Figura 17. Valores de la DQO, con la mezcla: 20% doméstica +80% textil (5% teñido + 75% acabado).

En la figura 9, que muestra la etapa doméstica, los valores de DQO en la entrada fueron de 646 mg/L a 1011.5 mg/L, lo cual es mayor a lo indicado por Romero (1999), que menciona una concentración media de 500 mg/L en aguas residuales domésticas; mientras que al iniciar las mezclas con agua residual textil (figura 10-17), los valores generalmente aumentaron en las etapas, oscilando los valores entre 656 mg/L y 4033 mg/L, esto se deriva generalmente por todos los productos utilizados en este tipo de industria, los cuales aumentan considerablemente los niveles de DQO, tales como limpiadores a base de amonio, blanqueadores, colorantes, adhesivos, emulsionantes y productos en aerosol, que de igual manera elevan los valores de Nitrógeno Total (Martínez, 2014).

En la salida, en la etapa doméstica, mientras el sistema se fue adaptando se pudo observar que los valores de DQO en el efluente disminuyeron conforme fueron avanzando los muestreos, con efluentes de 21.5 mg/L a 130 mg/L. Sin embargo en los efluentes con agua doméstico-industrial los resultados fueron muy variables y generalmente más elevados que en la etapa doméstica con valores que fluctúan entre 65 mg/L y 1386 mg/L. Estos valores en la salida son más elevados que los reportados por Martínez (2014) con aguas residuales textiles, en los cuales obtuvieron efluentes de 14.7 a 70 mg/L, con una media de 44.2 mg/L.

### **6.1.3. Sólidos Suspendidos Totales.**

En la figura 18 se muestran los valores de los sólidos suspendidos totales, obtenidos en la entrada y salida del biorreactor usando el agua residual 100% doméstica.

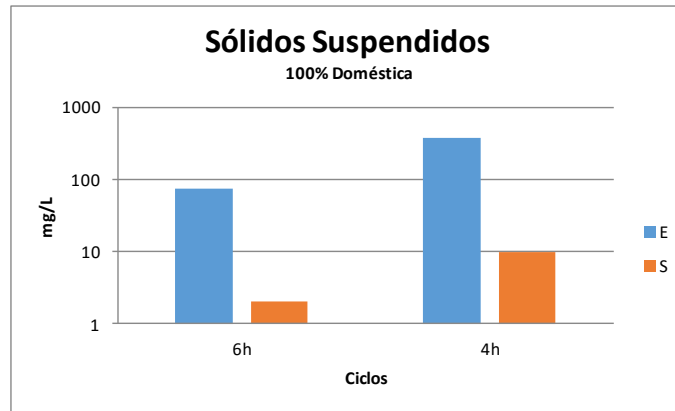


Figura 18. Valores de los SST, en la entrada y salida de la etapa doméstica.

Las figuras 19 a 24 muestran los valores de los sólidos suspendidos totales (SST), obtenidos en la entrada y salida respectivamente en cada una de las mezclas realizadas en el biorreactor.

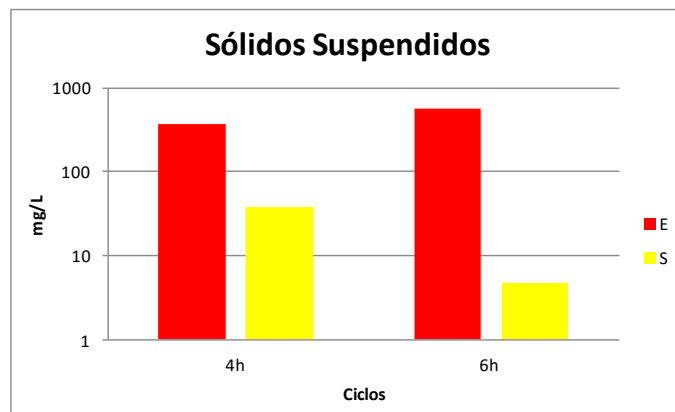


Figura 19. Valores de los SST, en la mezcla: 90% doméstica +10% textil. En el segundo muestreo el agua textil se componía de 5% combinada y 5% de teñido.

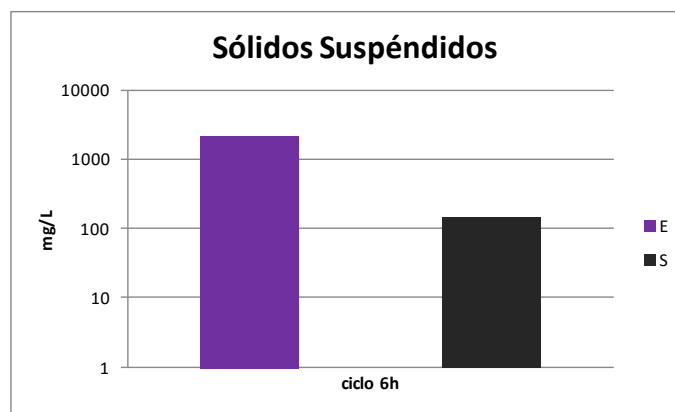


Figura 20. Valores de los SST, en la mezcla: 80% doméstica +20% textil (10% teñido + 10% combinada).

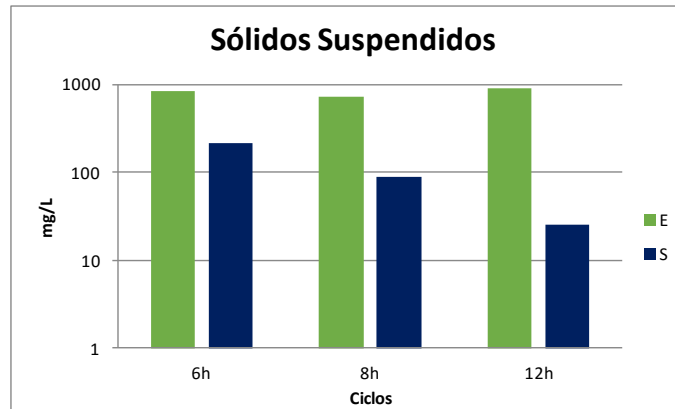


Figura 21. Valores de los SST, en la mezcla: 60% doméstica +40% textil (20% teñido + 20% acabado).

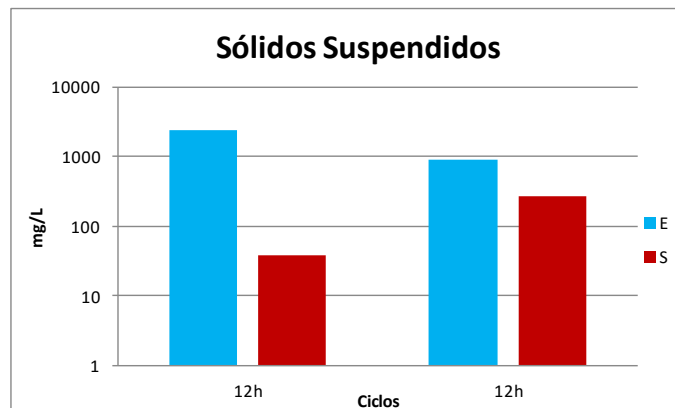


Figura 22. Valores de los SST, en la mezcla: 40% doméstica + 60% textil (10% teñido + 50% acabado).

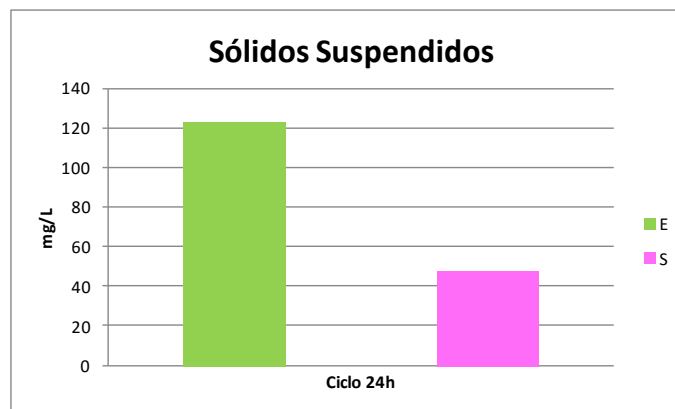


Figura 23. Valores de los SST, en la mezcla: 30% doméstica + 70% textil (5% teñido + 65% acabado).

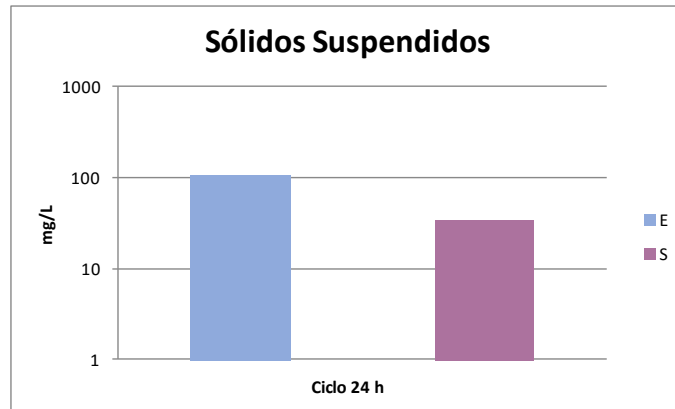


Figura 24. Valores de los SST, en la mezcla: 20% doméstica + 80% textil (5% teñido + 75% acabado).

En general se puede observar un incremento en la entrada de los SST al comenzar con las mezclas con agua residual textil, debido a la elevada cantidad materia orgánica e inorgánica que se encuentra en este tipo de agua, generada por los productos utilizados en las textileras. Los sólidos suspendidos representan una gran importancia como contaminantes, ya sea por la materia orgánica e inorgánica por los que están formados, así como por los microorganismos patógenos transportados en éstas partículas (Jiménez, 2001).

Los valores en la entrada en la etapa doméstica (figura 16) se encontraron entre los 75 y 380 mg/L, siendo menores a lo indicado por Romero (1999) en un sistema con agua residual doméstica, que son de 720 mg/L. Mientras que para la etapa de mezclas doméstico-textil (figuras 17-22), los SST estuvieron entre 123.3 y 2367mg/L, estos últimos son mayores a los reportados por Martínez (2014) en aguas textiles, y a lo dicho por Romero (1999), en donde incluso, la media de la segunda etapa, que es de 900.75 mg/L, está por encima de ese estudio.

Referente a los valores de la salida para la etapa doméstica fueron de 2 y 10 mg/L. En el caso de la etapa de mezclas doméstica - textil los valores fluctuaron entre 4.67 y 271.6 mg/L. Siendo el valor más alto con la mezcla 40% Doméstica + 60% Textil (figura 20).

En general para la etapa doméstica, los valores de SST en la salida son más bajos comparado a lo reportado por Olea (2013), el cual evaluó una PTAR en Couatepec, Veracruz con aguas residuales de origen doméstico que tuvo en la salida concentraciones de 182 a 633 mg/L, con un promedio de 318.83 mg/L.

Los sólidos presentes en las aguas residuales industriales son principalmente de naturaleza orgánica, por poseer carbono, oxígeno e hidrógeno, mientras que los sólidos inorgánicos son debido a las sales (Martínez, 2014), por lo cual por todos los procesos y productos utilizados en la industria textil, se deriva un incremento en la concentración de los SST.

#### 6.1.4. NH<sub>3</sub> y NO<sub>3</sub>.

La figura 25 a muestra los valores de nitrógeno amoniacal (NH<sub>3</sub>) y de nitratos (NO<sub>3</sub>), obtenidos en la entrada y salida del biorreactor usando el agua residual 100% doméstica.

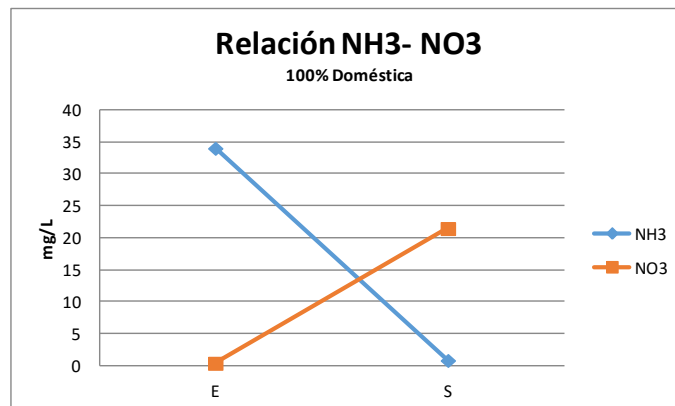


Figura 25. Valores de los NH<sub>3</sub> y NO<sub>3</sub>, de la etapa doméstica.



Las figuras 26 a la 31 muestran los valores de  $\text{NH}_3$  Y  $\text{NO}_3$ , obtenidos en la entrada y salida respectivamente en cada una de las mezclas realizadas en el biorreactor.

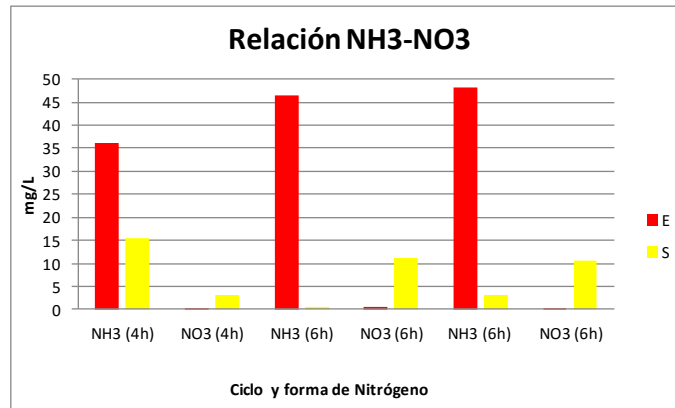


Figura 26. Valores de los  $\text{NH}_3$  y  $\text{NO}_3$ , en la mezcla: 90% doméstica + 10% textil. En el tercer muestreo el agua textil estuvo compuesta de 5% teñido y 5% combinada. En algunos muestreos la concentración de  $\text{NH}_3$  y  $\text{NO}_3$  es muy baja que no se alcanza a percibir bien en la gráfica.

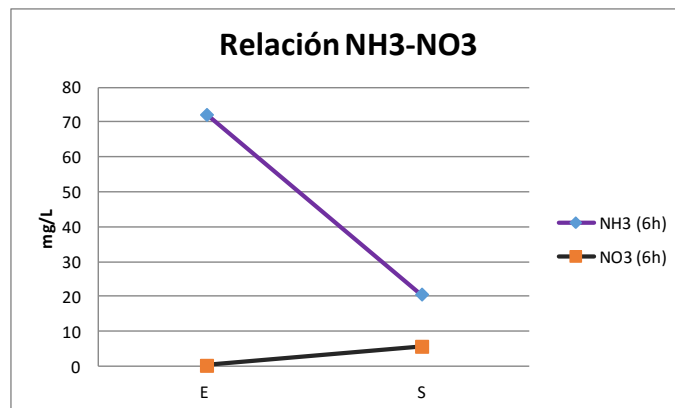


Figura 27. Valores de los  $\text{NH}_3$  y  $\text{NO}_3$ , en la mezcla: 80% doméstica + 20% textil (10% teñido + 10% combinada).

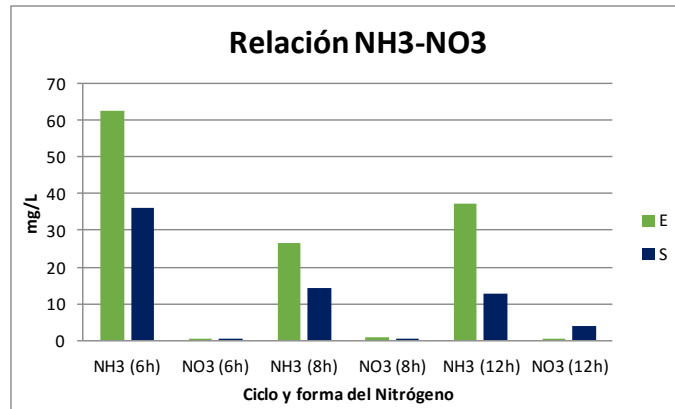


Figura 28. Valores de los NH<sub>3</sub> y NO<sub>3</sub>, en la mezcla: 60% doméstica + 40% textil (20% teñido + 20% acabado).

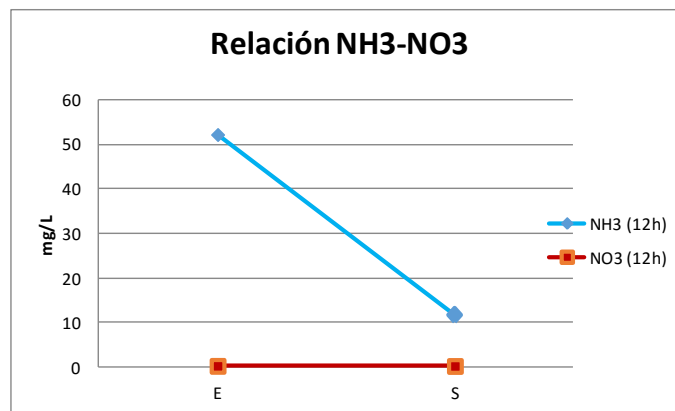


Figura 29. Valores de los NH<sub>3</sub> y NO<sub>3</sub>, en la mezcla: 40% doméstica + 60% textil (10% teñido + 50% acabado).

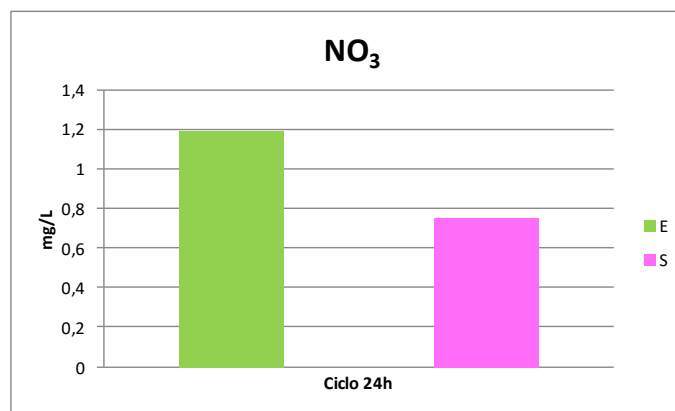


Figura 30. Valores de NO<sub>3</sub>, en la mezcla: 30% doméstica + 70% textil (5% teñido + 65% acabado).

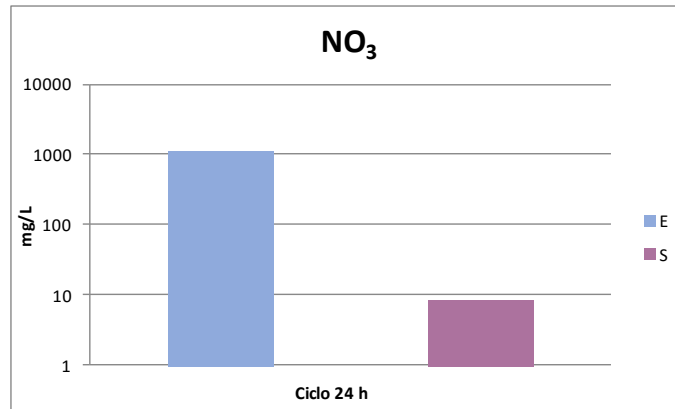


Figura 31. Valores de NO<sub>3</sub>, en la mezcla: 20% doméstica + 80% textil (5% teñido + 75% acabado).

Las figuras 25 a 31, muestran en general en ambas etapas, un descenso del nitrógeno amoniacal (NH<sub>3</sub>), en mayor o menor grado, de la entrada a la salida, mientras que para los nitratos (NO<sub>3</sub>) solo en algunos casos se vio que su valor bajo de entrada se viera incrementado hacía la salida, así tenemos que en la etapa doméstico-textil, hubo 3 muestreos en los cuales la concentración de estos no aumentó (figuras 29, 30).

Las veces en que el nitrógeno amoniacal disminuyo en la salida y los nitratos se incrementaron indica que se dio el proceso de oxidación y nitrificación, en el cual el nitrógeno orgánico es convertido a nitrógeno amoniacal por la acción microbiana, y después en el aireador con la presencia de oxígeno, es degradado por las bacterias nitrificantes tales como *Nitrosomas sp* y *Nitrobacter sp* a nitritos y después a nitratos en el proceso de depuración. Por lo tanto el aumento de nitratos en la salida es el resultado de la buena oxidación (Gedardi, 2002).

Los casos en los que los nitratos permanecieron bajos en la salida pudo ser derivado por problemas en el biorreactor, como lo es la aireación, lo cual pudo afectar la oxidación de la materia orgánica.

La concentración de NH<sub>3</sub> en aguas residuales con alta carga orgánica se encuentra alrededor de los 45 mg/L (Nájera-Flores, 2012); lo cual llega a coincidir con los valores en el influente de nuestra sistema, que estuvieron en un rango de

26.61 a 72.24 mg/L, siendo los valores medios similares a la concentración estándar.

La cantidad de  $\text{NO}_3$  en la entrada de la etapa doméstico-textil osciló 0.29 a 1.104 mg/L, en relación a la salida, las concentraciones se encontraron de 0.209 a 11.15 mg/L. Estos valores de la entrada y salida son más bajos a los reportados por Martínez (2014) en aguas residuales textiles, trabajo en el cual obtuvieron concentraciones de  $\text{NO}_3$  en la entrada de 0.848 a 3.5 mg/L. y para la salida de 2.55 a 32.2, con una media de 16.9 mg/L.

### 6.1.5. Fósforo Total.

Las figura 32 muestra los valores de los Fósforo total, obtenidos en la entrada y salida con agua 100% doméstica.

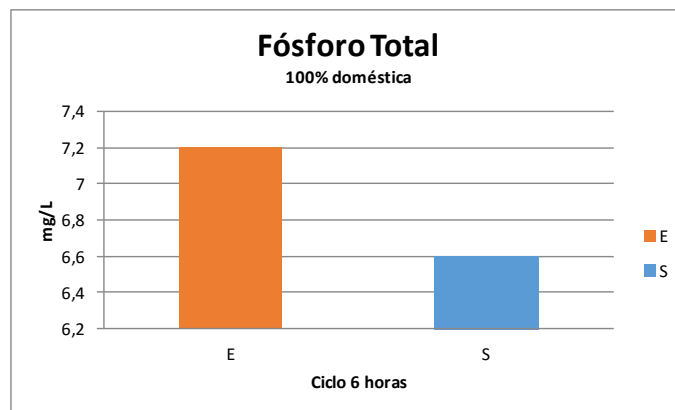


Figura 32. Valores de fósforo total, en la etapa doméstica.

Las figuras 33 a 37 muestran los valores de los Fósforo total, obtenidos en la entrada y salida en cada una de las mezclas realizadas en el biorreactor.

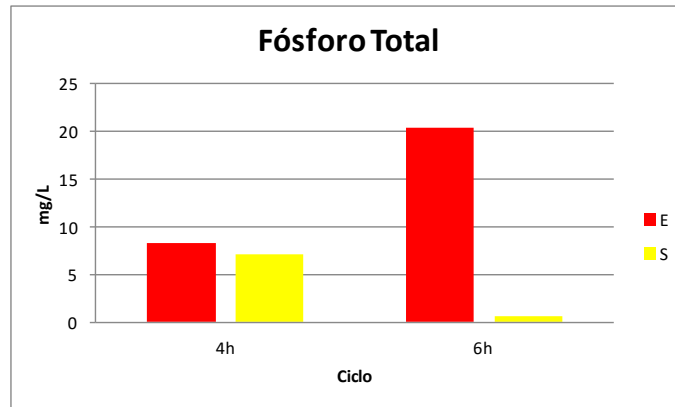


Figura 33. Valores de fósforo total, en la mezcla: 90% doméstica + 10% textil. En el segundo muestreo el agua textil estuvo compuesta de 5% teñido y 5% combinada.

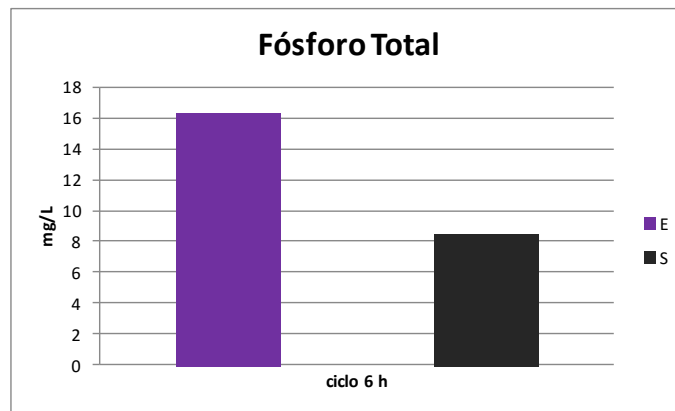


Figura 34. Valores de fósforo total, en la mezcla: 80% doméstica + 20% textil (10% teñido + 10% combinada).

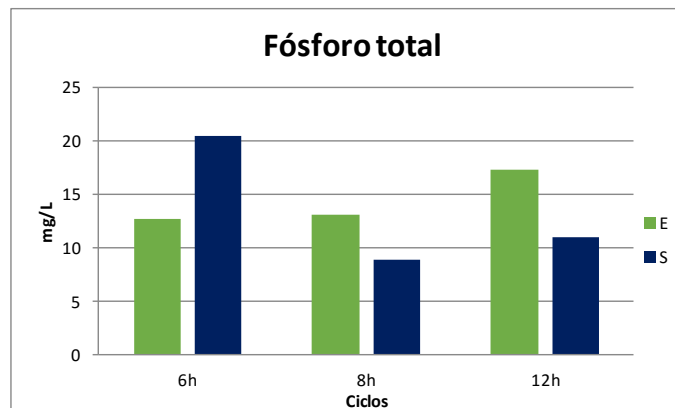


Figura 35. Valores de fósforo total, en la mezcla: 60% doméstica + 40% textil (20% teñido + 20% acabado).

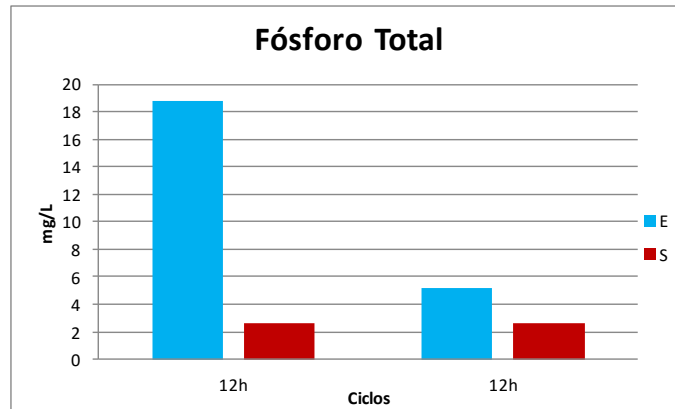


Figura 36. Valores de fósforo total, en la mezcla: 40% doméstica + 60% textil (10% teñido + 50% acabado).

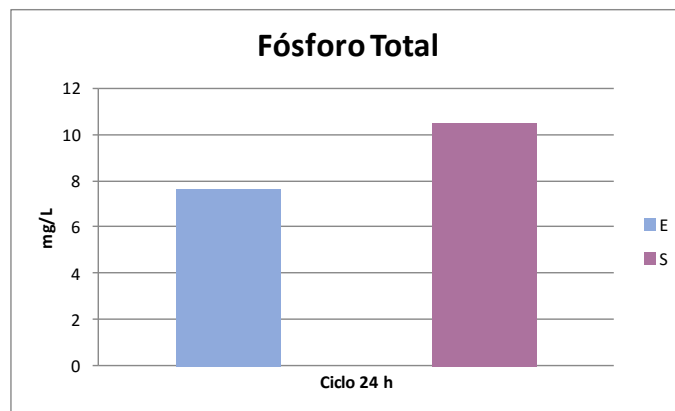


Figura 37. Valores de fósforo total, en la mezcla: 20% doméstica + 80% textil (5% teñido + 75% acabado).

En la etapa doméstica (figura 32) se obtuvo una concentración de fósforo en la entrada de 7.71 mg/L, mientras que en la salida el valor fue de 5.9 mg/L. En tanto a la etapa de la mezcla doméstica- textil (figuras 33-37), los valores en la entrada por lo general aumentaron, oscilando entre 5.2 y 20.33 mg/L. En relación con la salida, en algunos muestreos se observaron valores incluso más altos que los de la entrada (figuras 35, 37), el fósforo total en la salida estuvo entre 0.643 y 20.39 mg/L.

Se pudo observar un incremento del fósforo total en los cambios de mezclas de agua, esto debido a la mayor concentración de sólidos y nutrientes del agua de

textilera. La concentración de fósforo en el agua después de un tratamiento convencional oscila entre 6 y 11 mg/L de P (Suárez y Jácome, 2007), lo cual coincidió con la mayoría de los muestreos, en los cuales incluso se obtuvieron valores por debajo de este rango, sin embargo en la mezcla de 60% doméstica + 40% textil, se registró en la salida la concentración más alta, siendo de 20.39 mg/L. En los muestreos donde hubo una mayor concentración de fósforo en la salida que en la entrada, se pudo dar debido a un aporte extra en el biorreactor, lo cual derivó en un aumento de la concentración en la salida (Suárez y Jácome, 2007).

### 6.1.6. Coliformes Totales y Fecales.

La figura 38 muestra los valores de los coliformes totales y fecales convertidos a logaritmos para su mejor manejo, obtenidos en la entrada y salida tanto en el agua residual 100% doméstica.

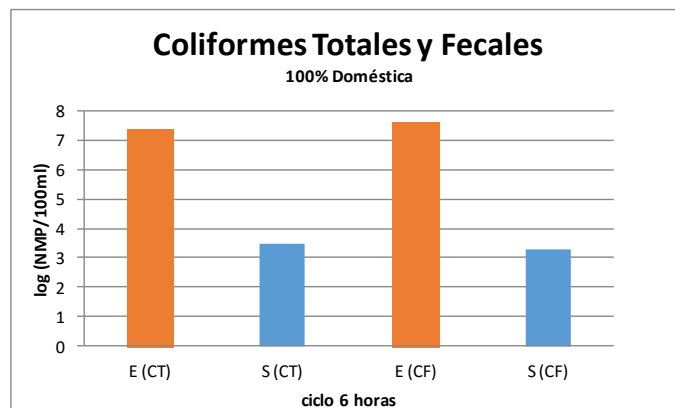


Figura 38. Coliformes totales y fecales en la etapa doméstica.

Las figuras 39 a la 43 muestran los valores de coliformes totales y fecales convertidos a logaritmos para su mejor manejo, obtenidos en la entrada y salida respectivamente en cada una de las mezclas realizadas en el biorreactor.

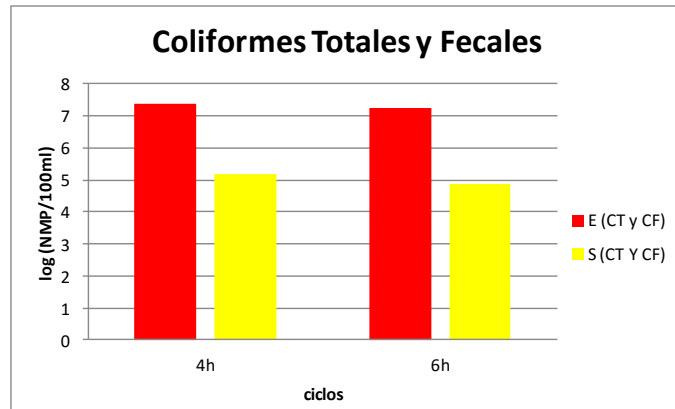


Figura 39. Coliformes totales y fecales en la mezcla: 90% doméstica +10 % textil.

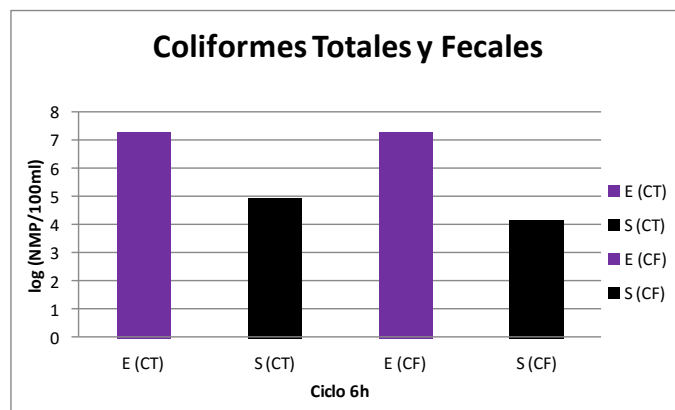


Figura 40. Coliformes totales y fecales en la mezcla: 80% doméstica +20% textil (10% teñido + 10% combinada).

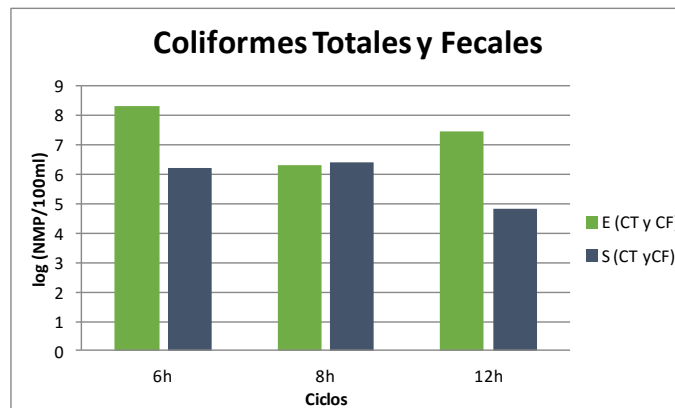


Figura 41. Coliformes totales y fecales en la mezcla: 60% doméstica + 40% textil (20% teñido + 20% acabado).



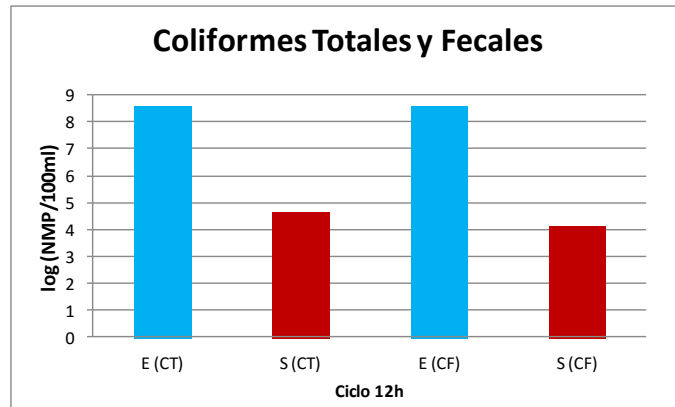


Figura 42. Coliformes totales y fecales en la mezcla: 40% doméstica + 60% textil (10% teñido + 50% acabado).

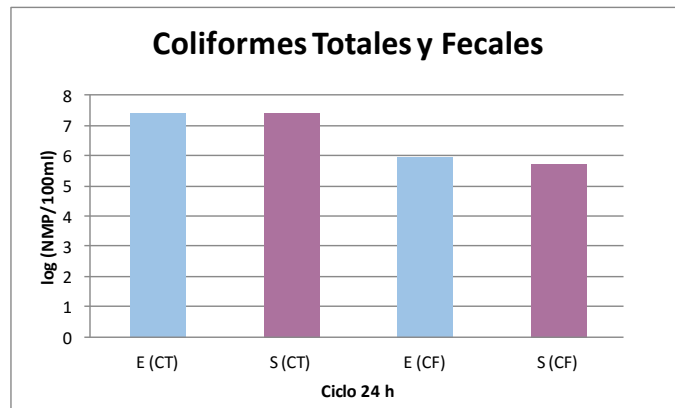


Figura 43. Coliformes totales y fecales en la mezcla: 20% doméstica + 80% textil (5% teñido + 75% acabado).

En las figuras 38-43 se aprecia que en las 2 etapas los valores de entrada tanto para coliformes totales y fecales fueron similares, incluso para la etapa doméstico-textil sólo se llegó a elevar dos escalas logarítmicas en dos muestreos (figuras 39, 41). En la etapa doméstica, la concentración de coliformes totales y fecales osciló de  $8 \times 10^6$  a  $4 \times 10^7$ , respecto a la segunda etapa los valores fluctuaron de  $2.4 \times 10^7$  a  $3.5 \times 10^8$ ; valores dentro del rango de contaminación media a fuerte a los reportados por Metcalf y Eddy (2004), que mencionan concentraciones en el efluente de  $10^7$  a  $10^{10}$  para coliformes totales y  $10^5$  a  $10^8$  para coliformes fecales.

En relación con los valores de salida, estos se encontraron entre  $2.1 \times 10^3$  y  $4 \times 10^3$  para la etapa doméstica y  $1.4 \times 10^4$  y  $2.4 \times 10^6$  para la etapa doméstico-textil. Los valores de la etapa doméstica fueron incluso mejores que los reportados por Chuchón y Aybar (2008), donde evacuaron efluentes de  $1.29 \times 10^5$ , mientras que la segunda etapa se mantuvo un poco más arriba de ese rango en algunos muestreos.

Los elevados valores de coliformes totales y fecales provienen generalmente de las aguas negras originadas en sanitarios o zonas de ganado, por lo cual siempre están presentes en las aguas residuales (Martínez *et al*, 2008). También la presencia de coliformes totales y fecales en el agua residual textil se puede originar por la contaminación de las materias primas utilizadas, las cuales pueden estar compuestas de tejidos orgánicos de origen animal, así como la forma en la que se transportan puede llegar a contaminar la materia (Martínez, 2014; Arcos *et al*; 2005).

## 6.2. Porcentajes de remoción.

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

$$\% \text{ remoción} = 100 - \frac{(\text{valor de la salida}) \times 100}{\text{valor de la entrada}}$$

### 6.2.1. DBO<sub>5</sub>.

Con los resultados de la DBO<sub>5</sub> se calculó el porcentaje de remoción de los dos ciclos analizados en la etapa doméstica (figuras 44, 45).

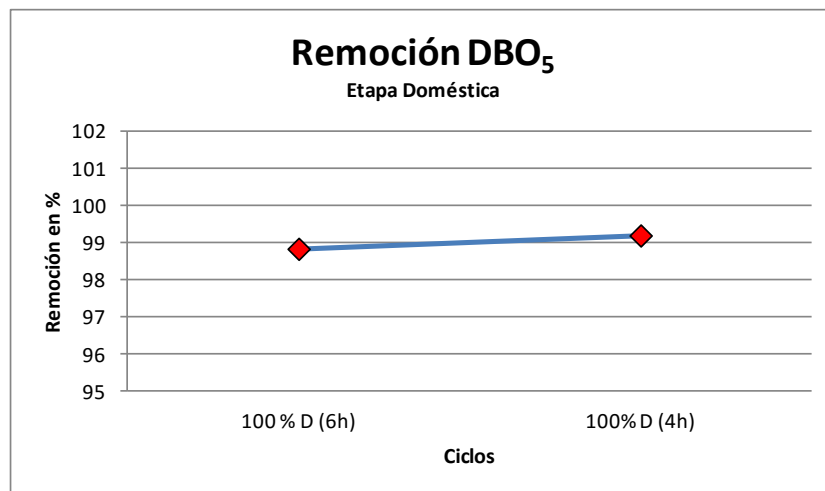


Figura 44. Remoción de DBO<sub>5</sub> en la etapa doméstica.

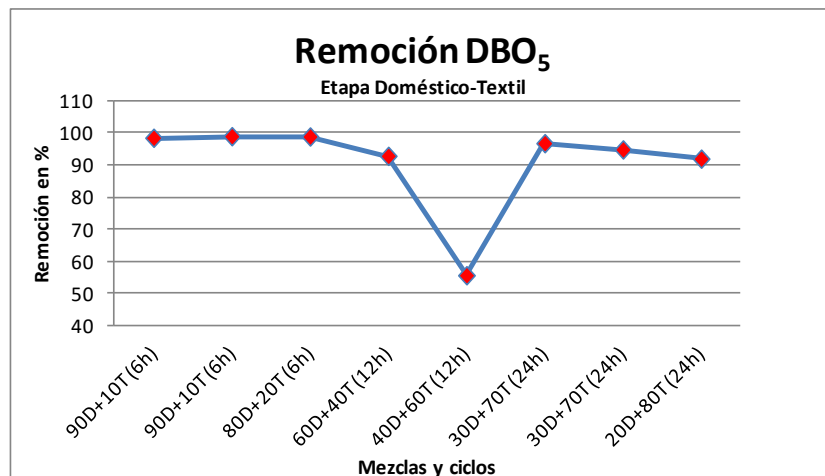


Figura 45. Remoción de DBO<sub>5</sub> en la etapa doméstico-textil.

En la figura 44 se aprecia, que en la etapa doméstica (D), los valores de remoción de la  $DBO_5$  oscilaron entre 98.87 y 99.19%, siendo superior al estándar de remoción que propone Torrescano, (2009) de 85-95% para un tratamiento convencional. Mientras que en la figura 45 se observa que en la etapa doméstico-textil (D-T), las remociones oscilaron entre 55.6 a 98.89%, observándose la remoción más alta con la mezcla 90% D + 10% T, mientras que la remoción más baja se dio con la mezcla 40% D + 60% T con un ciclo de 12 horas. Cabe resaltar que no se obtuvieron remociones en todos los muestreos, ya que en algunos, la  $DBO_5$ , consumió todo el oxígeno disuelto disponible en la salida, por lo cual los valores de  $DBO_5$  se perdieron pues rebasaron las cantidades de dilución contempladas, lo cual se asocia con una alta carga orgánica derivada básicamente del agua residual de la textilera y por lo tanto incrementó la  $DBO_5$  y la DQO.

La media de los porcentajes de remoción para la etapa de mezclas fue de 90.97% lo cual nos indica que la eficiencia de remoción fue buena, ya que el estándar de acuerdo a Torrescano (2009) se encuentra entre el 85-95% de remoción.

Por lo general, las bajas remociones obtenidas en la etapa de mezclas comparada con la etapa doméstica, como la mezcla 40D+60T, se deben a la gran cantidad de productos químicos que se usan en la textilera como lo son los limpiadores con bases de amonio, productos en aerosol, y blanqueadores, colorantes, adhesivos y emulsionantes. Estos productos químicos afectan la actividad microbiana de los lodos activados, produciendo una menor eficiencia de remoción de materia orgánica en la  $DBO_5$ , de igual manera elevan las concentraciones de DBO en el influente (Muñoz, 2008; Cuevas y Garzón-Zúñiga, 2010).

Las diferencias de remoción, así como los valores de la entrada y salida, también se vieron afectados por las variaciones de los volúmenes y contaminantes del efluente, ya que dependiendo de los procesos para los cuales fue utilizada el agua en la textilera, su composición puede tener mayor o menor carga orgánica y contaminantes (Muñoz, 2008).

Las remociones en la segunda etapa fueron altas a comparación de lo obtenido por Awasthi y Prakash (2014), que reportaron una remoción promedio de 79% en aguas residuales de origen textil.

### 6.2.2. DQO.

Con los resultados de la DQO se calculó su porcentaje de remoción para este parámetro (figuras 46, 47, 48).

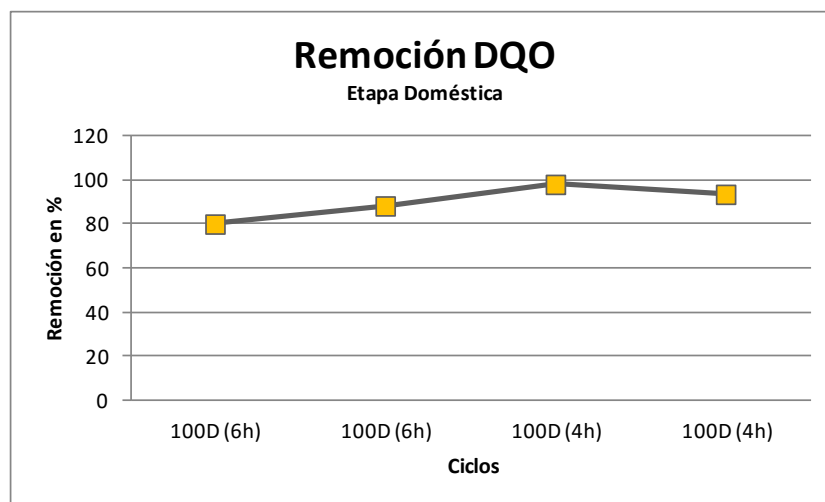


Figura 46. Remoción de DQO en la etapa doméstica.

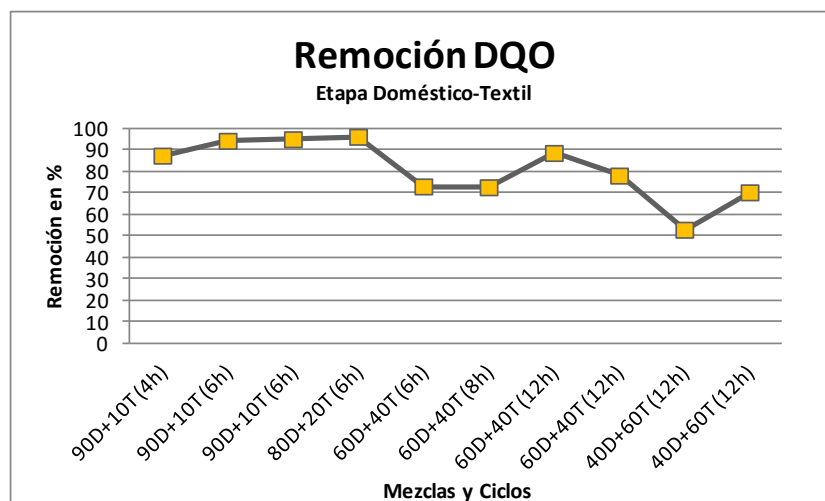


Figura 47. Remoción de DQO en la etapa doméstico-textil.

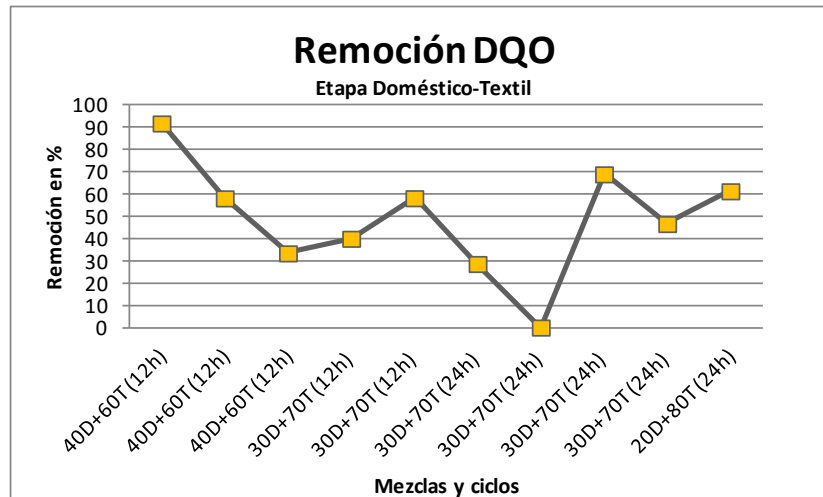


Figura 48. Remoción de DQO en la etapa doméstico-textil.

En la figura 46 se pueden observar las remociones de la DQO, en la etapa doméstica, estos valores estuvieron en un rango de 79.87 a 97.87%, con una media de 89.79%, lo cual infiere una rápida adaptación de los microorganismos para la etapa doméstica. Mientras que para la siguiente etapa, las figuras 47 y 48 muestran que los valores de remoción de DQO oscilaron entre 0 y 96.21%, siendo el valor de remoción más bajo con la mezcla 30% D y 70% T con ciclo de 24h; mientras que la mejor remoción se dio con la mezcla de 80% D y 20% T con ciclo de 6h.

Al igual que la  $DBO_5$ , los valores de la DQO se vieron afectados al realizarse las mezclas con el agua proveniente de la industria textil, por la gama de productos químicos que se utilizan, que anteriormente fueron mencionados, lo cual por consecuencia aumenta la cantidad de materia oxidable. En la segunda etapa (doméstico-textil), se fue aumentando el tiempo del ciclo, lo cual ayudó a que los microorganismos presentes en los lodos se pudieran adaptar mejor a los contaminantes gracias al incremento en el tiempo, lo cual permite mayor contacto del agua residual con la microbiota (Muñoz, 2008). El valor promedio de remoción de DQO en la segunda etapa fue de 64.76%, el cual queda por debajo del promedio de remoción en aguas industriales que es de 70% (Malmqvist *et al.*; 1998), este valor está directamente relacionado con la  $DBO_5$ , ya que ambos procesos dependen directamente de la eficiencia microbiana, condiciones

favorables de oxígeno disuelto, temperatura y pH (Arango y Garcés, 2007). En las mezclas en las que se observan bajas o nulas remociones como la mayoría de la figura 48, se pudo dar debido a que la toxicidad del agua de teñido afectó a los microorganismos que componen los lodos activados, asimismo las remociones se pudieron ver afectadas debido al corto tiempo de adaptación de los microorganismos con la mezcla de agua, ya que en algunas ocasiones se realizó el muestreo al día siguiente de hacer el cambio de mezcla.

Crespi y Cegarra (1980) mencionan que si la relación DQO/DBO  $\leq 2$ , las aguas residuales podrán ser depuradas biológicamente, probablemente con extraordinarios resultados; si la DQO/DBO  $\leq 8$ , los vertidos aún son aptos para un sistema de tratamiento biológico; mientras que si la relación DQO/DBO  $> 10$  no es aconsejable utilizar un tratamiento de tipo biológico. Al hacer esta relación con nuestros resultados, en la etapa doméstica, la relación siempre es menor a 2, lo cual coincide con las buenas remociones que se obtuvieron, mientras que para la etapa de mezclas, la relación estuvo más en el rango de mayor a 2 y menor a 8, esto nos indica que aún es apta para este tipo de tratamiento, sin embargo como lo muestran las gráficas, la eficiencia de remoción es generalmente más baja.

### 6.2.3. Nitrógeno Amoniacal NH<sub>3</sub>.

Con los resultados de NH<sub>3</sub>, se calculó el porcentaje de remoción para este parámetro (figura 49).

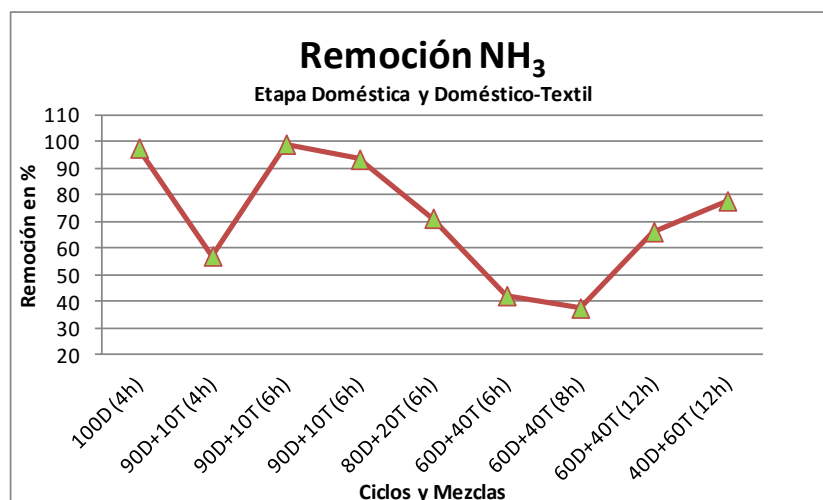


Figura 49. Remoción de  $\text{NH}_3$  en la etapa doméstica y doméstico-textil.

En la figura 49 se observa que en la etapa doméstica sólo se tuvo una medición de éste parámetro, el cual su valor de remoción fue de 97.58%. Mientras que para la etapa posterior, los rendimientos de remoción del nitrógeno fueron muy variables, encontrándose entre 37.64 (60D+40T) y 99.04% (90D+10T). El valor más bajo se dio en la mezcla 60% D y 40% T con ciclo de 8h, y el valor de remoción más alto se obtuvo con la mezcla de 90% D y 10% T, con un ciclo de 6h.

El valor medio del porcentaje de remoción de  $\text{NH}_3$  fue de 68.09%, lo cual indica en la mayoría de los muestreos una buena nitrificación y desnitrificación en el sistema. Las concentraciones de nitratos han presentado muchas variaciones a lo largo del estudio. Entre las razones de esta variación se encuentran las elevadas concentraciones de nitrógeno amoniacal en el influente en la etapa doméstico-textil, con un amplio rango de variación en las diferentes mezclas, afectando la eficiencia de los distintos ciclos hidráulicos.

El nitrógeno presente en un agua residual urbana se encuentra mayoritariamente en forma de nitrógeno amoniacal; su transformación y eliminación biológicas incluyen generalmente una primera fase de nitrificación, en la que el nitrógeno amoniacal es oxidado a nitratos, seguida de una segunda fase de desnitrificación, en la que los nitratos son reducidos a nitrógeno gas. El proceso de nitrificación consta a su vez de una primera etapa en la que el nitrógeno amoniacal es oxidado a nitritos, seguida de otra etapa en que éstos son oxidados a nitratos. Estos procesos los llevan a cabo principalmente dos grupos de bacterias autótrofas aerobias llamadas, respectivamente, *Nitrosomonas* y *Nitrobacter* (Escaler y Mujeriego, 2001). El rendimiento del proceso de nitrificación depende de la velocidad específica de nitrificación, que viene determinada por los siguientes parámetros: 1) la temperatura, 2) el oxígeno disuelto, 3) el pH, 4) la relación materia orgánica/nitrógeno y 5) la presencia de determinadas sustancias inhibitoras y tóxicas (Randall *et al*; 1992; García y Fernández-Polanco, 1996; Teira, 1996).



En el caso de este estudio, cuando se tuvieron bajas remociones se pudo atribuir a la presencia de sustancias tóxicas que afectan a las bacterias que participan en el proceso de nitrificación. Otro factor que puede explicar los bajos valores de remoción, es el proceso de decoloración, el cual utiliza compuestos como el hidróxido de amonio, que puede originar un aporte excesivo de nitrógeno, que los microorganismos no pueden sintetizar (Collí et al., 2002).

#### 6.2.4. Sólidos Suspendidos Totales.

Con los resultados de los SST, se calculó su porcentaje de remoción (Fig. 44, 45).

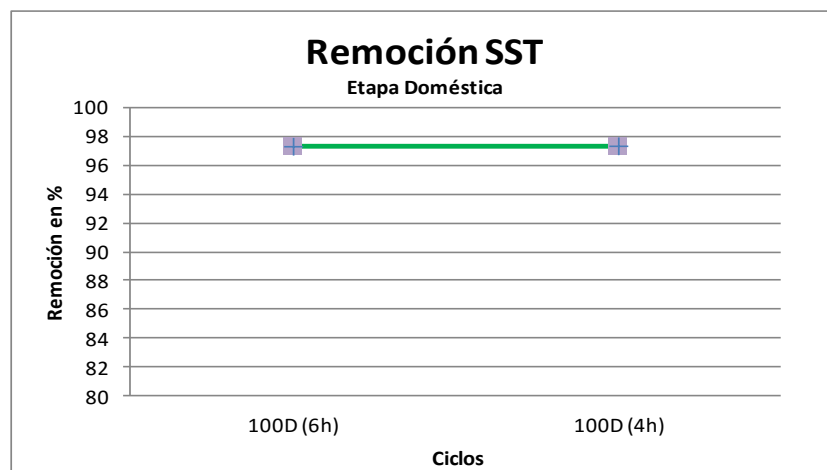


Figura 50. Remoción de SST en la etapa doméstica.

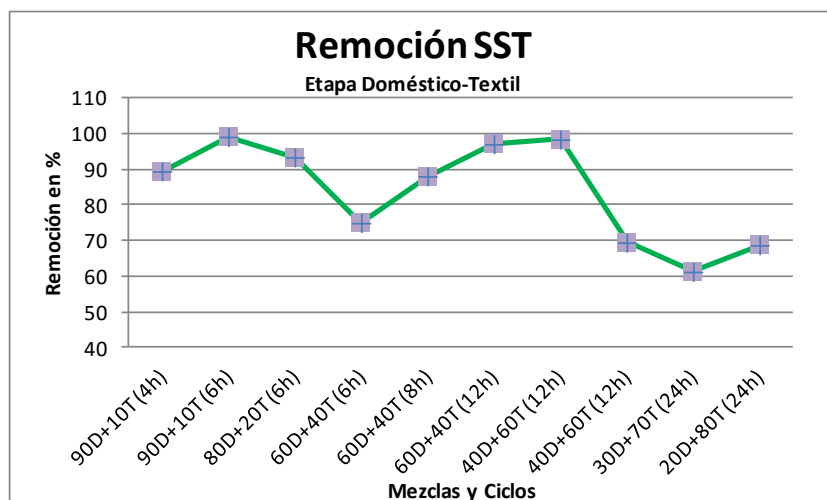


Figura 51. Remoción de SST en la etapa doméstica-textil.

Los sólidos suspendidos totales (SST), en la etapa doméstica (figura 50) presentaron una remoción de 97.33 y 97.36%. En cuanto a la etapa doméstico-textil, los porcentajes oscilaron entre 68.73 y 99.15% (figura 51).

La remoción más baja se reportó con la mezcla de 20% D y 80% T, quizá por el aporte excesivo de sólidos provenientes de la textilera, el sistema se saturó, por lo cual no fue posible para los microorganismos una degradación óptima (Chuchón y Aybar, 2008). La mejor remoción fue con la mezcla 90% D y 10% T y el promedio de remoción de la segunda etapa fue de 83.99%, el cual es superior comparado con el porcentaje de remoción reportado por Awasthi y Prakash (2014) en aguas residuales textiles, que es del 80%.

Generalmente la cantidad de SST de la entrada aumentó con el agua de la textilera, estos sólidos de aguas residuales domésticas e industriales son mayoritariamente de origen orgánico, por poseer carbono, hidrógeno y oxígeno, los cuales fungen como sustrato y alimento para muchos microorganismos; mientras que los sólidos inorgánicos son originados principalmente por las sales (Molina y Tigreros, 2005). Los SST son un factor importante en el proceso de lodos activados, ya que de su disminución depende una óptima remoción de bacterias y nutrientes (González y Saldarriaga, 2008).

#### **6.2.5. Fósforo Total.**

Con los resultados del Fósforo total, se calculó el porcentaje de remoción de este parámetro (Fig. 52).

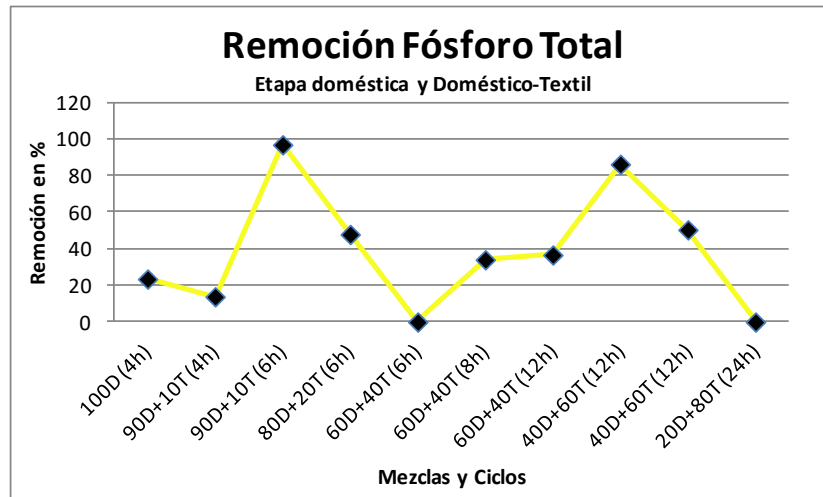


Figura 52. Remoción de fósforo total en la etapa doméstica y doméstico-textil.

En la figura 52 se observan las remociones Fósforo total en la etapa doméstica y doméstico-textil. En la etapa doméstica sólo hubo un muestreo, del cual se obtuvo una remoción de 23.47%. En referencia a la segunda etapa, las remociones se encontraron entre 0 y 96.83%. Las remociones más bajas se dieron con las mezclas de 60D+40T; y 20D+80T; en cuanto a la remoción más alta fue la de la mezcla de 90D+10T. El valor promedio de remoción en la segunda etapa es de 40.63%, lo cual es aceptable comparado con el estándar de Metcalf y Eddy, (1995) que mencionan que el porcentaje de fósforo eliminado durante un tratamiento secundario de éstas características oscila entre el 10 y 30% de la cantidad total inicial. La eliminación biológica de fósforo, en cantidades superiores a las observadas en condiciones normales de depuración, es debida a la actividad de ciertos microorganismos que asimilan un exceso de fósforo en condiciones aeróbicas y lo almacenan en forma de gránulos de polifosfatos (Neethling, 1995).

La remoción biológica del fósforo se basa en concentrar el fósforo en el interior de los microorganismos y eliminarlo con la purga de lodo en exceso, para la mayor parte de los microorganismos (Sedlak, 1991). Por lo cual, el crecimiento de la biomasa en un proceso biológico produce un consumo natural del fósforo del agua residual. El proceso de eliminación biológica de fósforo consta de dos fases. La primera fase requiere la existencia de un medio en condiciones anaeróbicas, y la

segunda fase tiene lugar en un medio en condiciones aeróbicas, y consiste en la asimilación de los compuestos orgánicos almacenados en la fase anterior, en la cual una parte de la energía obtenida de este proceso es utilizada por los microorganismos para la asimilación y acumulación, en forma de polifosfatos, de los ortofosfatos disponibles en el líquido de mezcla, de forma que el efluente obtenido de este proceso contiene una concentración de fósforo menor que la del agua residual influente (Nájera, 2012).

Los factores determinantes del proceso de eliminación biológica de fósforo son: 1) la naturaleza y la disponibilidad de materia orgánica, 2) la presencia de oxígeno disuelto en las diferentes etapas del proceso, 3) la presencia de nitratos durante la fase anaeróbica, 4) el pH, 5) la temperatura y 6) la presencia de sustancias inhibitoras y tóxicas (Randall et al., 1992; García y Fernández-Polanco, 1996; Teira, 1996). En el caso de nuestro estudio, las sustancias tóxicas pudieron afectar la actividad microbiana y así disminuir las eficiencias de remoción, de igual manera en los muestreos en los que no hubo remoción de fósforo, se pueden deber a una combinación de los lodos del reactor con la salida, ya que el día de los muestreos el tanque de la salida tenía poco volumen, lo que ocasionó que se mezclara la muestra con el sedimento que se genera, y así, tener un aumento de este nutriente en la salida.

Otro punto importante para la adecuada remoción de fósforo en el sistema, es la competencia por el espacio entre las bacterias nitrificantes y las bacterias acumuladoras de fósforo, ya que el aumento de bacterias nitrificantes reduce la tasa de las bacterias acumuladoras de fósforo, principalmente del género *Acetivobacter*. Esto generalmente produce una buena remoción de nitrógeno y por ende una mala remoción del fósforo. Para conseguir una mayor remoción, es necesario recurrir a tratamientos complementarios o terciarios de eliminación, pudiendo ser estos de tipo físico-químico o bien de carácter biológico (Suárez y Jácome, 2007).

### 6.2.6. Coliformes Totales y Fecales.

Con los resultados de los coliformes totales y fecales, se calculó su porcentaje de remoción (Fig. 53, 54).

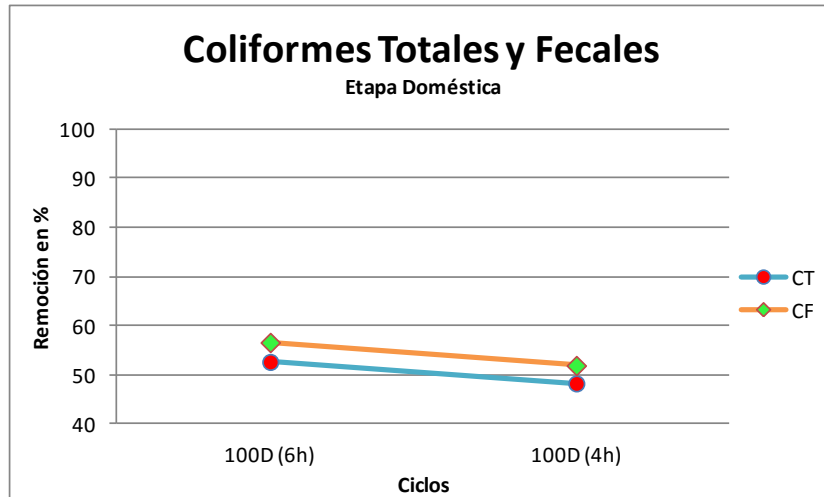


Figura 53. Remoción de coliformes totales y fecales en la etapa doméstica.

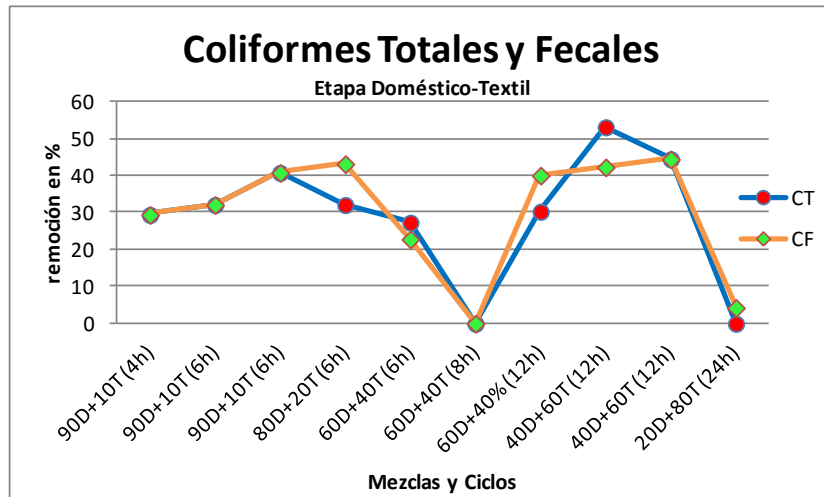


Figura 54. Remoción de coliformes totales y fecales en la etapa doméstico-textil.

En la figura 53, se observa que la media de remoción de los coliformes totales y fecales en la etapa doméstica fue de 50.42 y 54.22% respectivamente. Respecto a la etapa doméstico-textil (figura 54), los valores de remoción oscilaron entre 0 y 53.27% para coliformes totales; y entre 0 y 44.57% para coliformes fecales. Con una media de 29.04% para c. totales y 30.01% para c. fecales. El estándar para

remoción de coliformes según Poch (1999) es del 50%, por lo cual, las medias de remoción estuvieron cercanas a dicho estándar. La disminución gradual del pH, concentraciones altas de oxígeno disuelto y lodos metabólicamente activos, son los principales factores para la eliminación de estas bacterias enteropatógenicas (Chuchon y Aybar, 2008). Las remociones bajas en nuestro caso se pueden relacionar con los lodos activados, ya que al estar en contacto con los contaminantes de la textilera, su tasa metabólica se pudo ver afectada.

Los coliformes totales y fecales, su presencia proviene de las aguas negras originadas principalmente en baños, como grupo cosmopolita siempre están presentes en aguas residuales. Estudios como el de Chuchón y Aybar (2008), obtuvieron un promedio de 99.98%, de remoción de coliformes, sin embargo su efluente presentó un valor promedio de  $1,29 \times 10^5$  NMP/100 ml, lo cual no coincide en cuanto a la remoción, sin embargo la cantidad evacuada en el efluente si coincide. Cabe mencionar que en este estudio no hay proceso de cloración.

### **6.3 Coeficiente de correlación.**

En este estudio se aplicó el modelo de correlación de Pearson con los porcentajes de remoción de cada parámetro analizado, y se realizaron 3 análisis de acuerdo al número de muestreos realizadas para cada parámetro (tabla 3, 4, 5).

Los parámetros que presentaron correlación son los que estuvieron por encima del valor significativo en el cual conforme más se acerquen los valores de  $r$  a 1 para existirá una correlación y entre más se alejen de 1, no habrá correlación.

Tabla 3. Análisis de correlación con muestreo completo.

|                                 | <i>DBO</i>  | <i>DQO</i> | <i>NH3</i>  | <i>CT</i>   | <i>CF</i> | <i>SST</i> | <i>P</i> |
|---------------------------------|-------------|------------|-------------|-------------|-----------|------------|----------|
| DBO                             | 1           |            |             |             |           |            |          |
| DQO                             | <b>0,98</b> | 1          |             |             |           |            |          |
| NH3                             | 0,65        | 0,52       | 1           |             |           |            |          |
| CT                              | 0,64        | 0,51       | <b>0,99</b> | 1           |           |            |          |
| CF                              | 0,67        | 0,78       | -0,12       | -0,13       | 1         |            |          |
| SST                             | -0,14       | -0,29      | 0,65        | 0,66        | -0,82     | 1          |          |
| P                               | 0,65        | 0,52       | <b>0,99</b> | <b>0,99</b> | -0,11     | 0,65       | 1        |
| VALOR SIGNIFICATIVO: <b>0,9</b> |             |            |             |             |           |            |          |

Como se muestra en la tabla 3, la  $DBO_5$  y la DQO presentan correlación positiva ( $r = 0.98$ ), esto es congruente, ya que como se mencionó son parámetros que a medida que alguno de ellos incrementa o disminuye su remoción, el otro también lo hará del mismo modo por ser los dos dependientes de la remoción de la materia orgánica presente en el agua residual. El  $NH_3$  y el fósforo total también presentaron una correlación positiva alta de  $r = 0.99$ , debido que por ser nutrientes, su remoción depende de la eficacia de las bacterias o microorganismos que los utilizan. De igual manera, los coliformes totales con el  $NH_3$  y el fósforo total tienen correlación positiva de  $r = 0.99$ , esto debido a que conforme avanza el proceso de remoción de nutrientes, la tasa metabólica de los microorganismos aumenta (Muñoz, 2008).

Tabla 4. Análisis de correlación con muestreo sólo de  $DBO_5$  y DQO

|                                  | <i>DBO</i>  | <i>DQO</i> |
|----------------------------------|-------------|------------|
| DBO                              | 1           |            |
| DQO                              | <b>0,73</b> | 1          |
| VALOR SIGNIFICATIVO: <b>0,63</b> |             |            |

En la tabla 4 se observa la correlación positiva entre la  $DBO_5$  y DQO,  $r = 0.74$ , como se mencionó antes, la eficiencia de estos dos parámetros dependen de la actividad de los microorganismos para degradar la materia orgánica, este análisis

es correspondiente a 10 muestreos en los cuales solo se realizaron sólo estos dos parámetros (Muñoz, 2008).

Tabla 5. Análisis de correlación sin DBO<sub>5</sub>, los parámetros que se muestran

|     | <i>DQO</i>  | <i>NH3</i>                       | <i>CT</i>   | <i>CF</i> | <i>SST</i> | <i>P</i> |  |
|-----|-------------|----------------------------------|-------------|-----------|------------|----------|--|
| DQO | 1           |                                  |             |           |            |          |  |
| NH3 | <b>0,87</b> | 1                                |             |           |            |          |  |
| CT  | <b>0,76</b> | <b>0,86</b>                      | 1           |           |            |          |  |
| CF  | <b>0,87</b> | <b>0,86</b>                      | <b>0,94</b> | 1         |            |          |  |
| SST | <b>0,79</b> | 0,71                             | 0,37        | 0,53      | 1          |          |  |
| P   | 0,56        | 0,56                             | 0,22        | 0,27      | 0,74       | 1        |  |
|     |             |                                  |             |           |            |          |  |
|     |             | VALOR SIGNIFICATIVO: <b>0,75</b> |             |           |            |          |  |

En la tabla 5 se aprecia correlación positiva de la DQO con el NH<sub>3</sub>,  $r = 0.87$ , con sst,  $r = 0.79$ , con coliformes totales,  $r = 0.77$ , y con coliformes fecales,  $r = 0.88$ , esto debido a que si la remoción de materia orgánica es eficiente, de igual manera la mayoría de estos parámetros tendrán igual o similar eficiencia en su remoción. También como se mencionó anteriormente cuando se tiene correlación positiva de NH<sub>3</sub> con los coliformes totales y fecales, es debido a que la remoción de los nutrientes depende del aumento de la población y de la tasa metabólica de los microorganismos; así como también su relación como constituyentes de la materia orgánica y en consecuencia de su remoción. De igual manera los coliformes totales y fecales presentaron una correlación positiva, lo cual es congruente ya que los coliformes fecales están incluidos en el grupo de los coliformes totales (Arango y Garcés, 2007).

#### **6.4 Comparación de los valores de los parámetros físico-químicos y bacteriológicos en la salida con la NOM-003- ECOL-1997.**

Los valores de la DBO, sólidos suspendidos y coliformes fecales se compararon con la norma oficial NOM-003.



Tabla 6. Comparación de las medias de DBO, sólidos suspendidos y coliformes fecales del efluente, con la NOM-003- ECOL-1997

| ETAPA Y LÍMITE DE LA NOM-003  | DBO5 (mg/L) | SÓLIDOS SUSPENDIDOS (mg/L) | COLIFORMES FECALES (NMP/100 ml) |
|---|-------------|----------------------------|---------------------------------|
| Límite permisible. Servicios al público con contacto directo.               | 20          | 20                         | 240                             |
| Límite permisible. Servicios al público con contacto indirecto u ocasional. | 30          | 30                         | 1000                            |
| Media 100% doméstica  | 4.12        | 6                          | 2050                            |
| Media 90% Doméstica + 10% Textil  | 7.28        | 21.63                      | 1x10 <sup>5</sup>               |
| Media 80% Doméstica + 20% Textil  | 12.6        | 140.7                      | 1.4x10 <sup>4</sup>             |
| Media 60% Doméstica + 40% Textil  | 25.24       | 108.73                     | 1.34x10 <sup>4</sup>            |
| Media 40% Doméstica + 60% Textil  | 157         | 155.1                      | 1.6x10 <sup>3</sup>             |
| Media 30% Doméstica + 70% Textil  | 5.5         | 47.77                      | —                               |
| Media 20% Doméstica + 80 Textil   | 15.89       | 33.33                      | 50x10 <sup>4</sup>              |

Como se puede observar en la tabla 6, los valores de la DBO<sub>5</sub> se mantuvieron dentro del límite, salvo para la mezcla 60% doméstica y 40% textil, en la cual la media obtenida fue de 157 mg/L, y sobrepasó los valores permisibles; de esta manera, las demás mezclas se consideran como agua tratada apta para servicios públicos de contacto directo e indirecto. En el caso de los sólidos suspendidos totales, la etapa doméstica es la única que cumple la norma para los dos casos,

mientras que la mezcla 90% doméstica y 10% textil es apta para contacto indirecto u ocasional; las demás mezclas estuvieron por encima del límite admitido. Y en cuanto a los valores reportados de los coliformes fecales, el efluente es inadmisibles para usarse en cualquiera de los dos casos ya que se obtuvieron elevados valores que se sitúan muy por encima de los límites establecidos. Sin embargo hay que también tomar en cuenta que en este sistema no hay el proceso de desinfección.

## **7. CONCLUSIONES**

El tratamiento de aguas residuales doméstico-textil mediante lodos activados mostró buena eficiencia de remoción de materia orgánica, mientras que la remoción de nutrientes fue intermitente, sin embargo la remoción de coliformes es deficiente, para lo cual será importante un proceso de cloración para su reuso.

Las mezclas y los ciclos que tuvieron una mayor efectividad en cuanto a remoción de DBO<sub>5</sub>, DQO y SST, fueron la de 90D+10T con ciclo de 6 horas, con remociones de 98.9% (DBO<sub>5</sub>), 95.05% (DQO), 99.15% (SST); la mezcla 80D+20T con ciclo de 6 horas obtuvo remociones de 98.79% (DBO<sub>5</sub>), 96.21% (DQO), 93.4% (SST); mientras que para las mezclas con mayor porcentaje de agua textil, la que consiguió mejores resultados fue la de 40D+60T con ciclo de 12 horas, que alcanzó remociones de 91.78% (DQO) y 97.08% (SST).

De acuerdo con la norma oficial mexicana NOM-003-ECOL-1997, que establece los límites máximos permitidos para éstos parámetros, el agua residual tratada es inaceptable para su reuso en servicios al público con contacto directo y servicios al público con contacto indirecto u ocasional, debido a los elevados valores de coliformes fecales, mientras que la DBO<sub>5</sub> y los sólidos suspendidos generalmente cumplieron la norma o se situaron ligeramente arriba de los límites permitidos.

El tiempo del ciclo juega un papel muy importante en la remoción de la materia orgánica y los nutrientes, durante el periodo de adaptación, sobre todo cuando iniciaron las mezclas y el influente presentó mayor carga orgánica.

Es posible utilizar el lodo activado de una planta de tratamiento de agua residual doméstica para iniciar una planta de tratamiento de aguas residuales industriales previa adaptación de los lodos a los desechos industriales.

En general el proceso de lodos activados coincide con lo reportado en la literatura en relación a su óptima eficiencia en la remoción de materia orgánica y su baja eficiencia en la remoción de bacterias, siendo necesario por lo mismo poner un proceso de desinfección para su eliminación.

Se recomienda seguir con el estudio para determinar hasta qué capacidad de agua textil el sistema es eficiente con la remoción de materia orgánica y nutrientes, asimismo es aconsejable implementar un sistema de cloración para mejorar la calidad microbiológica del agua.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

APHA, AWWA, WEF. 2012. Standard Methods (for the examination of water and wastewater). 22<sup>a</sup>. Joint Editorial Board. Washington, DC.

Arango R. y Garcés G. 2007. Tratamiento de aguas residuales de la industria láctea, Corporación Universitaria Lasallista, 7p.

Arcos M, Ávila S., Estupiñan S. y Gómez A. 2005. Indicadores microbiológicos de contaminación de las fuentes de agua. NOVA ISSN: 1794-2470 3(4):1-116

Awasthi G. y Prakash J. 2014. Biodegradation of textile waste by bacterial strains. Journal of Global Biosciences ISSN 2320-1355, 3(1): 379-384.

Campos C. 1999. Indicadores de contaminación fecal en la reutilización de aguas residuales para riego agrícola. Tesis doctoral. Facultad de Biología. Universidad de Barcelona. 250 p.

Comisión Estatal del Agua Jalisco (CEA Jalisco). 2013. Operación y mantenimiento de plantas de tratamiento de aguas residuales con el proceso de lodos activados, Tomo 1; Dirección de Operación de Plantas de Aguas Residuales; 256p.

Chuchón M. S y Aybar C. 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 Totorá", Ayacucho, Perú, Ecol. apl. 7(1 y 2):165-171.

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, 8p.

Collins C. y Lyne P. 1989. Métodos microbiológicos. Ed, Acribia, Zaragoza, España.

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). 2004. Distribución de los recursos hídricos.

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). 2010. Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización Y de Tratamiento de aguas Residuales en operación. México, 250 p.

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA); 2013. Estadísticas de agua en México; Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT); México. [www.conagua.gob.mx](http://www.conagua.gob.mx)

Craun G., Berger P., Calderón, R. 1997. Coliform bacteria and waterborne disease outbreaks. J. Am. Water Works Ass; 89: 96-104.

Crespí M. y Cegarra J. 1980. La contaminación de los vertidos en la industria textil algodónera. Bol. Inst. Inv. Textil Terrasa, No. 78: 25-36.

Cuevas D. y Garzón-Zúñiga M. 2010. Tratamiento de aguas residuales que contienen colorantes utilizados en la industria textil mediante un proceso combinado de oxidación avanzada y un proceso biológico, Congreso Nacional de Biotecnología y Bioingeniería, VII Simposio Internacional de producción de alcoholes y levaduras.

Environment Agency. Standing Committee of Analysts, The Microbiology of Drinking Water, Part 1, 2002. Water Quality and Public Health, Methods for the Examination of Waters and Associated Materials. United States: Environment Agency; 2002.

Escaler M. y Mujeriego R. 2001. Eliminación biológica de nutrientes (nitrógeno y fósforo) mediante un proceso discontinuo de fangos activados. *Ingeniería del agua*, 8(1): 67-77.

Fernández A., Molina M., Alvarez A., Alcántara M. y Espigares A. 2001. Transmisión fecohídrica y virus de la hepatitis A. *Higiene y Sanidad Ambiental*; 1: 8-24.

Finamore C., Blanco H. y López E. 2000. Constantes cinéticas en un sistema de lodos activados a escala laboratorio, XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental, Brasil, 7 pp.

García J. 2012. Tratamiento de aguas residuales de la industria textil mediante bio-filtros percoladores empacados con turba y nanopartículas de  $\text{TiO}_2\text{MgO}$ , Tesis de Ingeniería, México, 93pp.

García P. y Fernández-Polanco F. 1996. Denitrification with biosorbed organic matter in a SBR system, First IAWQ Specialized Conference on Sequencing Batch Reactor Technology, Munich, 18a 20 de marzo de 1996, pp. 539-545.

Gerardi M. H. 2002. *Nitrification and Denitrification in the Activated Sludge Process*, Wiley- Interscience, ISBN: 0-471-06508-0, 63-68.

González M. y Saldarriaga C. 2008. Remoción biológica de materia orgánica, nitrógeno y fósforo en un sistema tipo anaerobio-anóxico-aerobio, *Revista EIA*; No. 10: 45-53.

Ibarra D. 2015. Presencia y distribución de gimnamebas en un sistema de lodos activados que trata agua residual de una industria textil lanera. Tesis de Maestría, Posgrado en ciencias biológicas, Facultad de Estudios Superiores Iztacala, 19-20 p.

Jiménez C. 2001. La contaminación ambiental en México. Ed Limusa. México, 925 p.

Maldonado E. 2005. Optimización del proceso de teñido de telas, Tesis de Doctorado, Universidad Nacional de Quilmes, 115 p.

Malmqvist A., Gunnarsson L. y Tostenson C. 1998. Lab and pilot scale test as tools for upgrading- Copasison with full scale results, Water Science and Technology, 37(9): 25-31.

Martínez D. 2014. Remoción de bacterias, nutrientes y materia orgánica en un sistema de tratamiento biológico de aguas residuales de una industria textil, Tesis de Licenciatura, UNAM, México.

Méndez L., Miyashiro V., Rojas R., Cotrado M. y Carrasco N. 2009. Tratamiento de aguas residuales mediante lodos activados a escala de laboratorio.

Metcalf y Eddy, 2003. Wastewater engineering treatment and reuse. 4<sup>th</sup>. Ed. McGraw- Hill, New York, 1819 p.

Metcalf y Eddy. 1995. Ingeniería de Aguas Residuales. Tratamiento, vertido y reutilización. Vol. 1, 3ra edición. Ed. McGraw Hill, Madrid. 1334 p.

Metcalf y Eddy. 2004. Wastewater Engineering treatment and reuse. 4ta edición, McGraw Hill, Ney York. 1817 p.

Molina M. y Tigreros 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.

Muñoz A. 2008. Caracterización y tratamiento de aguas residuales, Tesis de Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 305 p.

Najera M. 2012. Efectos de la aplicación de altas cargas orgánicas en sistemas de lodos activados. Tesis de Maestría, UNAM, 133 p.

Neethling, J. 1995. Biological nutrient removal with activated sludge systems, Informe técnico.

Nelson K. 2003. Concentrations and inactivation of *Ascaris* eggs and pathogen indicator organisms in wastewater stabilization pond sludge. *Water Sci Technol*;48:89-95.

NOM-003-ECOL-1997, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público.

Olea R. 2013. Evaluación de la planta de tratamiento de aguas residuales del municipio de Coatepec, Veracruz. Tesis de Ingeniería, Universidad Veracruzana. 101 p.

Organización Naciones Unidas (ONU), 2003. Primer informe sobre el desarrollo de los recursos hídricos del mundo: Agua para todos, agua para la vida. Nueva York: ONU.

Pacheco J., Cabrera A. y Pérez R.; 2004. Diagnóstico de la calidad de agua subterránea en los sistemas municipales en el estado de Yucatán; *Ingeniería* 8(2): 165-179.

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



Prescott L, Harley J. y Klein D. 1996. Microbiología. Editorial McGraw-Hill. Madrid, España.

Ramírez E. 1998. Sistemas de tratamiento de aguas residuales. En: *Hacia una renovación ambiental en México*; SEP, 91-99.

Randall, C., Barnard L. y Stensel D. 1992. Designand retrofit of wastewater treatment plants for biological nutrient removal, Technomic Publishing Co., Inc., vol. 5.

Rincones M., Pereyra E. y Blanco H. 2010. Lodos activados a escala laboratorio para el tratamiento de efluentes de una industria papelera, Universidad Central de Venezuela, 8 pp.

Robles E., González M., Sáinz M., Martínez E. y Ayala R. 2008. Análisis de Aguas: Métodos fisicoquímicos y bacteriológicos. FESI UNAM. 189 p.

Romero J. 1999. Calidad del agua, Editorial Omega, México, 430 p.

Romero J. 2004. Tratamiento de aguas residuales, teoría y principios de diseño. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, cuarta edición, Bogotá. 1248p.

Romero J. 2002. Calidad del agua. Editorial Escuela Colombiana de ingeniería. Primera Edición. Bogotá. 410 p.

Romero-Aguilar M., Colín-Cruz A., Sánchez-Salinas E. Y Ortiz-Hernández M., 2009. Tratamiento de aguas residuales por un sistema piloto de humedales artificiales: evaluación de la remoción de la carga orgánica, Rev. Int. Contam. Ambient. 25(3): 157-167.

Salazar G., Crespi R. 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, 83-100 p.

Schwartzbrod L. 2000. Effect of human viruses on public health associated with the use of wastewater and sludge in agriculture and aquaculture. WHO Collaboration Centre for Microorganisms in wastewater. Geneva: Université de Nancy. World Health Organization; 178 p.

Sedlak R. 1991. Phosphorus and Nitrogen Removal from Municipal Wastewater, Principles and Practice, 2ª edición, Lewis Publishers. Florida.

Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). 2003. Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEARNAT-1997, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público.

Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), 2004. Recursos Hídricos y su disponibilidad

Steiner T., Thielman N. y Guerrant R. 1997. Protozoal agents. What are the dangers for the public water-supply. Annu. Rev. Med; 48: 329-340.

Suárez M. 2012. Correlación y regresión empleando excel y graph, Universidad Técnica del Norte TAPIA, Fausto Ibarra, Ecuador. 44 p.

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.

Teira R. 1996. Bases microbiológicas. Microorganismos nitrificantes, desnitrificantes y con capacidad para acumular fósforo, 2o Curso de Ingeniería Ambiental: Eliminación biológica de nutrientes en aguas residuales, Lleida, 28 a 30 de octubre de 1996, 1-21 p.

Torrescano J. 2009. Parámetros de operación en el proceso de tratamiento de agua residual por lodos activados; *Aquaforum*; No. 52: 14-19.

Varila J. y Díaz F. 2008. Tratamiento de aguas residuales mediante lodos activados a escala laboratorio, *Revista de Tecnología (Journal of Technology)*, ISSN1692-1399, 7(2): 21-28

Vargas C., Rojas R. y Joseli J. 1996. Control y Vigilancia de la Calidad del Agua de Consumo humano. Textos Completos. CEPIS; 27p.

Villegas J. 2009. Efecto del efluente del proceso de teñido de hilos en el sistema de lodos activados a nivel piloto de una industria textil, Tesis de Licenciatura, UNAM, México.

Walters A., Santillo D. y Johnston, P. 2005. El tratamiento de textiles y sus repercusiones ambientales, Laboratorio de Investigación de Greenpeace, Departamento de Ciencias Biológicas, Universidad de Exeter, 32 p.

Winkler M. 1999. Tratamiento biológico de aguas de desecho. Limusa, 187 p.

World Health Organization and UNICEF. 2005. Water for life. Making it happen. France WHO press; 44 p.