

UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK
FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES

Trabajo de fin de carrera titulado:

**“CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO A ESCALA DE UNA PLANTA DE
TRATAMIENTO BIOLÓGICO EMPLEANDO MICROORGANISMOS PARA LA
DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES PROCEDENTES DE UNA INDUSTRIA
FARMACÉUTICA EN LA CIUDAD DE QUITO”**

Realizado por:

KATHERINE ELIANA ROBLES LARA.

Director del proyecto:

Ph.D. ALFONSO MOLINA

Como requisito para la obtención del título de:

INGENIERA EN BIOTECNOLOGÍA

Quito, 19 de Septiembre de 2013

DECLARACION JURAMENTADA

Yo, KATEHRINE ELIANA ROBLES LARA, con cédula de identidad # 172221540-5, declaro bajo juramento que el trabajo aquí desarrollado es de mi autoría, que no ha sido previamente presentado para ningún grado a calificación profesional; y, que ha consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración, cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su reglamento y por la normativa institucional vigente.



Katherine Eliana Robles Lara

C.C.: 172221540-5

DECLARATORIA

El presente trabajo de investigación titulado:

**“CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO A ESCALA DE UNA PLANTA DE
TRATAMIENTO BIOLÓGICO EMPLEANDO MICROORGANISMOS PARA LA
DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES PROCEDENTES DE UNA INDUSTRIA
FARMACÉUTICA EN LA CIUDAD DE QUITO”**

Realizado por:

KATHERINE ELIANA ROBLES LARA

Como Requisito para la Obtención del Título de:

INGENIERA EN BIOTECNOLOGÍA

Ha Sido dirigido por el profesor

Ph.D. ALFONSO MOLINA

Quien considera que constituye un trabajo original de su autor



Ph.D. ALFONSO MOLINA

DIRECTOR

LOS PROFESORES INFORMANTES

Los profesores informantes:

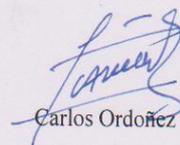
KATTY CORAL

CARLOS ORDOÑEZ

Después de revisar el trabajo presentado,
lo han calificado como apto para su defensa oral ante
el tribunal examinador



Katty Coral



Carlos Ordoñez

Quito, 19 de septiembre del 2013

DEDICATORIA

A Dios, mis padres, hermana y amigos por brindarme su apoyo incondicional durante la culminación de esta etapa de mi vida.

AGRADECIMIENTO

A Dios por permitirme recorrer exitosamente este camino

Al Ph.D. Alfonso Molina por el apoyo brindado durante la realización de este trabajo.

A mis profesores por todos los conocimientos impartidos y por ser un ejemplo de profesionalismo.

A mis amigos y compañeros que de alguna manera formaron parte de mi formación personal y profesional, a todos ellos Gracias.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CAPÍTULO I.....	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1. EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	1
1.1.1. Planteamiento del Problema.....	1
1.1.1.1. Diagnóstico del problema.....	1
1.1.1.2. Pronóstico	4
1.1.1.3. Control del pronóstico	6
1.1.2. Formulación del problema	7
1.1.3. Sistematización del problema.....	7
1.1.4. Objetivo General	8
1.1.5. Objetivos Específicos	8
1.1.6. Justificaciones	8
1.2. MARCO TEÓRICO	11
1.2.1. Estado actual del conocimiento sobre el tema	11
1.2.2. Adopción de una perspectiva teórica	16
1.2.3. Marco conceptual	16
1.2.3.1. Aguas Residuales.....	16
1.2.3.2. Aguas Residuales Industriales.....	17
1.2.3.3. Aguas Residuales farmacéuticas	18
1.2.3.4. Tratamiento de aguas residuales.....	23

1.2.3.5. Plantas de tratamiento.....	24
1.2.3.6. Tratamiento biológico de aguas residuales.....	25
1.2.3.7. Factores que afectan la eficiencia de los tratamientos biológicos	27
1.2.3.8. Biofiltración, estructura y funcionamiento de un biofiltro	28
1.2.3.9. Microorganismos depuradores de aguas residuales y formación de la biopelícula en un sistema de biofiltración	36
1.2.4. Hipótesis.....	39
1.2.5. Identificación y caracterización de variables	39
CAPÍTULO II	40
MÉTODO.....	40
2.1. NIVEL DE ESTUDIO.....	40
2.2. MODALIDAD DE INVESTIGACION	40
2.3. MÉTODO	40
2.4. POBLACIÓN Y MUESTRA	41
2.5. SELECCIÓN DE INSTRUMENTOS DE INVESTIGACION.....	42
2.5.1. Diseño y construcción de un modelo de planta de tratamiento biológico a escala de laboratorio.....	42
2.5.2. Análisis de Parámetros Físico-químicos:	42
2.5.3. Caracterización morfológica y bioquímica	44
2.5.4. Determinación de la eficiencia del tratamiento biológico.....	45
2.6. VALIDEZ Y CONFIABILIDAD DE LOS INSTRUMENTOS.....	49
2.7. OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES	50

2.7.1. Variables Dependientes.....	50
2.7.2. Variable Independiente:	56
2.8. PROCESAMIENTO DE DATOS	56
CAPÍTULO III.....	57
RESULTADOS.....	57
3.1. LEVANTAMIENTO DE DATOS	57
3.2. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	58
3.2.1. Resultados de los Parámetros físico-químicos iniciales de influente a tratar	59
3.2.2. Construcción de una planta de tratamiento biológico a escala de laboratorio ...	60
3.2.3. Desarrollo de la biopelícula.....	65
3.2.4. Pruebas bioquímicas (prueba de la catalasa) y morfológicas (tinción Gram y observación al microscopio).....	67
3.2.5. Resultados de los parámetros físico-químicos finales del efluente tratado por biofiltración	69
3.2.6. Evaluación de la eficiencia del tratamiento biológico aplicado (Biofiltración).	71
CAPÍTULO IV.....	81
DISCUSIÓN.....	81
4.1. CONCLUSIONES.....	89
4.2. RECOMENDACIONES	90
BIBLIOGRAFÍA.....	93

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Medicamentos encontrados en cuerpos de agua, aguas residuales y lodos.....	20
Tabla 2. Estructura molecular del Naproxeno.....	23
Tabla 3. Principales procesos de tratamiento biológico	26
Tabla 4. Campos de aplicación de la biofiltración	31
Tabla 5. Características de los materiales más usados en biofiltración	33
Tabla 6. Variables de la Investigación.	39
Tabla 7. Parámetros Físico-químicos	43
Tabla 8. Hoja de datos parámetros físico-químicos	57
Tabla 9. Hoja de datos para turbidez.....	58
Tabla 10. Hoja de datos- pruebas bioquímicas y morfológicas	58
Tabla 11. Resultados de los parámetros físico-químicos iniciales (Influente).....	59
Tabla 12. Resultados de la medición de turbidez del agua farmacéutica utilizada para la formación de la biopelícula.....	66
Tabla 13. Resultados de las pruebas bioquímicas (prueba de la catalasa) y morfológicas (tinción Gram y observación al microscopio) de la biopelícula establecida en el biofiltro.	68
Tabla 14. Resultados de los parámetros físico-químicos finales del efluente tratado.....	69
Tabla 15. Comparación de los parámetros físico-químicos iniciales y finales de las aguas residuales procedentes de una planta farmacéutica.....	70
Tabla 16. Resultados de la evaluación de la eficiencia del Tratamiento biológico aplicado (Biofiltración).....	72

Tabla 17. Idoneidad del Sistema (Inyección del Estándar)/Análisis Influyente.	73
Tabla 18. Concentración inicial de Naproxeno Sódico en el influente a tratar.....	75
Tabla 19. Idoneidad del Sistema (Inyección del Estándar)/Análisis efluente.....	77
Tabla 20. Concentración final de Naproxeno Sódico en el efluente tratado.....	79

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de una columna de biofiltración	32
Figura 2. Formación de película microbiana aerobia y anaerobia en el medio de soporte de un biofiltro.....	38
Figura 3. Diagrama general de la metodología a emplearse.	41
Figura 4. Componentes de la Planta de Tratamiento Biológico.....	61
Figura 5. Planta de Tratamiento Biológico a escala de laboratorio.	61
Figura 6. Material filtrante y empaque del Biofiltro	63
Figura 7. Esquema de un cono truncado	64
Figura 8. Reducción de turbidez del agua residual utilizada para la formación de la biopelícula	67
Figura 9. Tinción Gram y Observación al microscopio de la comunidad microbiana formadora de la biopelícula	68
Figura 10. Cromatogramas - Inyección Estándar/Análisis Influyente.	74
Figura 11. Cromatogramas: Inyección del Estándar-Muestra Influyente.	75
Figura 12. Cromatogramas - Inyección Estándar/Análisis Efluente	78
Figura 13. Cromatogramas: Inyección del Estándar-Muestra Efluente	80

RESUMEN

Con el fin de mitigar la problemática de la contaminación hídrica por la descarga de aguas industriales, se planteó la construcción de un modelo de planta de tratamiento biológico a escala de laboratorio, para la depuración de aguas contaminadas con productos farmacéuticos. Las aguas residuales procedentes de la industria farmacéutica presentan características especiales debido a su mecanismo de producción. La emisión de este tipo de aguas residuales es intermitente, fluctuante y poseen una composición altamente variable dependiendo del régimen de fabricación y de los productos elaborados. Pese a que se han generado estudios sobre la composición de las aguas residuales contaminadas con medicamentos, aún no existen los datos suficientes sobre la caracterización de este tipo de aguas.

El diseño de la planta constó de tres etapas: homogenización, biofiltración y almacenamiento, dentro de los parámetros de diseño se estimó un índice de biodegradabilidad de 0,6, correspondiente a material muy biodegradable, un volumen total de 99323,02 cm³, un área total 19018,5 cm², tiempo de retención hidráulica de 29,6 minutos y una carga hidráulica de 0,18 cm³/cm². min. Las aguas residuales tratadas se caracterizaron mediante un análisis físico-químico previo y posterior a su depuración, se obtuvieron mayores porcentajes de remoción en los parámetros: sólidos en suspensión, nitrógeno total y D.B.O₅. Los parámetros que aumentaron su valor fueron: pH, fósforo total y aceites y grasas. Sin embargo, todos los valores reportados se encontraron dentro de los límites permisibles, según la resolución N° 0002-DMA-2008 del Distrito Metropolitano de Quito, anexo D (Guía de Parámetros a Evaluar por Actividad Industrial, Comercial y Servicios). Con base en los resultados obtenidos, la biofiltración sobre cama de orgánica demostró ser eficiente en la remoción de materia orgánica y altas cargas de nitrógeno. La eficiencia de remoción de materia orgánica fue del 30,2 % para D.Q.O y 66,7% para sólidos en suspensión. También se estimaron la tasa de remoción superficial y la tasa de remoción volumétrica. En conclusión, la biofiltración se constituye como una alternativa eficiente y económicamente viable para la depuración de aguas residuales contaminadas con fármacos.

Palabras clave: Aguas residuales, productos farmacéuticos, planta de tratamiento biológico, biofiltración.

ABSTRACT

In order to mitigate the problematic contamination of the hydro industrial water discharged, was planned to build a model of biological treatment plant laboratory scale, this will help the depuration of wastewater contaminated with pharmaceuticals products.

The wastewater that comes from the pharmaceutical industry has particular characteristics due to its production mechanism. The issue of this type of wastewater is intermittent, fluctuating and have a composition highly variable depending on the production system and products made. Despite the studies that have been generated the composition of wastewater contaminated with medicines, there are not enough data yet to characterize the type of this water.

The design of the plant consists of three stages: homogenization, bio-filtration and storage, within the design of the estimated ranking of the biodegradability is 0,6, due to biodegradable material, a total volume of 99323,02 cm³, with a total area of 19018,5 cm², and a hydraulic retention time of 29,6 minutes also a hydraulic charge of 0,18 cm³/cm². min. The wastewater treated was characterized by a physic-chemical analysis before and after debugging, higher percentages were obtained of the removal of the parameters: solids in suspension, total nitrogen and D.B. O₅. The parameters that increased its value were: pH, total phosphorous, oils and greases. However, all reported values were found inside the permissible limits, according to the order N° 0002-DMA-2008 of the Metropolitan District of Quito; annex D (Guide to Evaluate Parameters for Activity Industrial, Commercial and Services). Based on the obtained results, the bio-filtration over the organic bed proved to be efficient in removing organic matter of nitrogen and high loads of nitrogen too. The removal efficiency of organic matter of nitrogen was the 30.2% D.Q.O and 66,7% of suspension solids. Also were estimated the rate of surface removal and volumetric removal rate.

In conclusion, bio-filtration is established as an alternative efficient and economically viable for the treatment of wastewater contaminated with medical drugs.

Keywords: Wastewater, pharmaceutical products, biological treatment plant, bio-filtration.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1.1. Planteamiento del Problema

1.1.1.1. Diagnóstico del problema

Los efectos inmediatos ocasionados por las aguas residuales no tratadas son la contaminación del medio ambiente y el patrimonio acuífero, provocando no únicamente la pérdida de ecosistemas que son benéficos para el hombre, sino también afectando la salud y bienestar del mismo. La costumbre de desechar las aguas residuales industriales y domésticas y mezclarlas con las aguas corrientes de los ríos, así como las condiciones generales de insalubridad han sido las principales causas de la diseminación y fácil contagio de enfermedades por medio del agua a beber (Sans & de Pablo, 1999).

Es así como en el transcurso de los años se ha hecho evidente la necesidad de implementar operaciones con el fin de mejorar la calidad del agua. En la actualidad, la mayoría de industrias ha desarrollado una gran variedad de procesos para el tratamiento de aguas residuales, cada uno de ellos se caracteriza por una serie de limitaciones relativas al grado de aplicabilidad, eficiencia y costes económicos (Arnáiz et al.2000).

Los tratamientos físicos como la precipitación, la adsorción o el arrastre por corriente de gas, entre otros, transfieren los contaminantes del agua a una segunda fase, pero sin eliminarlos (Arnáiz et al.2000). Son, por tanto, procesos no destructivos. Los tratamientos químicos tales como la oxidación húmeda, la ozonización, la radiación UV o el empleo de

CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO A ESCALA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO BIOLÓGICO EMPLEANDO MICROORGANISMOS PARA LA DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES PROCEDENTES DE UNA INDUSTRIA FARMACÉUTICA EN LA CIUDAD DE QUITO

agentes químicos oxidantes (cloro, permanganato potásico, peróxido de hidrógeno, etc.), actúan sobre aquellas moléculas susceptibles de oxidación. Por lo tanto, son procesos no selectivos, que elevan considerablemente los costes de implantación. Sin embargo, los tratamientos biológicos son preferidos siempre que sea posible, ya que tienen mayores rendimientos con menores costes económicos de explotación y mantenimiento, y destruyen completamente los contaminantes, transformándolos en sustancias inocuas como dióxido de carbono, metano, nitrógeno molecular y agua (Arnáiz et al.2000).La mineralización de compuestos contaminantes mediante microorganismos es, por tanto, un proceso destructivo completo. Los costes de inversión de los procesos biológicos son del orden de 5 a 20 veces menores que los químicos (Arnáiz et al. 2000)

Históricamente, las aguas residuales no han sido un factor intrínseco de la producción y se suponía que el medio ambiente era el encargado de absorberlas y darles un tratamiento natural, pero el progreso cultural e industrial acabó llevando esta práctica a situaciones extremas (Rigola, 1989).

La acelerada llegada de los procesos de industrialización trajo consigo una gran variedad de contaminantes, como resultado de estas prácticas se producen aguas residuales de diverso tipo, es decir, cada vez se requiere de tratamientos de aguas residuales más complejos o especializados (Ramalho, Jiménez, & De Lora, 2003).

Uno de los principales problemas de la industria farmacéutica actual es la carencia de soluciones tecnológicas eficientes y económicamente viables para el tratamiento de los residuos líquidos generados por las mismas. Existe una gran variedad de medicamentos lo que conlleva la generación de aguas residuales no caracterizadas ni evaluadas anteriormente en otros procesos industriales; la disposición de dichas aguas produce graves impactos en los

CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO A ESCALA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO BIOLÓGICO EMPLEANDO MICROORGANISMOS PARA LA DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES PROCEDENTES DE UNA INDUSTRIA FARMACÉUTICA EN LA CIUDAD DE QUITO

recursos hídricos y en muchos casos incumple con la legislación ambiental vigente (Ramos, et al. 2005).

Los fármacos producidos por la industria farmacéutica en presente estudio incluyen: antiinflamatorios, analgésicos, antibióticos, antivertiginosis, antihistamínicos, antidiarreicos, antimicóticos, queratolíticos, suplementos vitamínicos, antigripales y mucolíticos. Los mismos se encuentran en formulaciones como cremas, ungüentos, tabletas, tabletas recubiertas, óvulos, granulados, jaleas, geles, soluciones orales, soluciones tópicas, pomadas y cápsulas.

Actualmente, la sociedad es completamente dependiente de los productos químicos, es así como se puede encontrar en la naturaleza productos anteriormente inexistentes. La mayoría de los tratamientos empleados en la degradación de los contaminantes producidos en la industria farmacéutica son tecnologías que consumen cantidades excesivas de energía (lodos activados), con parámetros operacionales complejos y requerimientos de espacio exigentes (Cortacans et al. 2006).

La protección del medio ambiente es un objetivo primordial para la política ambiental, tanto de países desarrollados como en vías de desarrollo. Por estos motivos, en Ecuador se han impuesto normativas (p.e. la resolución N° 0002-DMA-2008 del Distrito Metropolitano de Quito) para regular la descarga de aguas residuales provenientes de las diferentes industrias. En economía industrial esto ha significado que las aguas residuales se conviertan en un costo de producción, al igual que otros subproductos (Rigola, 1989).

En el área farmacéutica este problema es mucho más delicado, ya que el agua se usa ampliamente como materia prima, ingrediente y disolvente en el procesamiento y análisis de medicamentos, lo que genera grandes cantidades de aguas residuales que además se caracterizan por presentar un alto grado de heterogeneidad, debido a que no solo provienen de

CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO A ESCALA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO BIOLÓGICO EMPLEANDO MICROORGANISMOS PARA LA DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES PROCEDENTES DE UNA INDUSTRIA FARMACÉUTICA EN LA CIUDAD DE QUITO

las instalaciones de producción como tal, sino también de diferentes secciones de la planta como baños, tocadores, regaderas o duchas, cocinas y laboratorios de análisis (Guaytarilla & Mangia, 2012).

Los límites respecto a los tipos y cantidades de determinados contaminantes orgánicos e inorgánicos garantizan que el agua contendrá tan solo cantidades pequeñas y seguras de las especies químicas potencialmente objetables (Guaytarilla & Mangia, 2012).

De esta manera, el tratamiento de aguas residuales es una de las operaciones indispensables en toda industria, pero los elevados costos de implementación y la falta de disponibilidad de ciertas tecnologías, hacen necesaria la búsqueda de un tratamiento de aguas residuales que implique la reducción de dichos costos y una alta eficiencia. Esto permitiría tanto el cumplimiento de la normativa ambiental como la posibilidad de recuperar recursos que representen una disminución en los gastos operativos.

Por los motivos anteriormente mencionados, lo que se desea implementar en la depuración de aguas residuales industriales procedentes de una planta farmacéutica es un tratamiento biológico que permita la reutilización de agua en actividades donde no se requiere de agua potable, como riego de jardines.

1.1.1.2.Pronóstico

Es de vital importancia mencionar algunas consecuencias propiciadas por la dispersión de aguas residuales sin ningún control. Primeramente se tiene la contaminación del agua potable y del medio ambiente en general, ya que se vierten contaminantes en grandes cuerpos de agua como: ríos, lagunas, etc. (Sans & de Pablo, 1999).

El equilibrio de los ecosistemas acuáticos se ha mantenido en las aguas naturales en las cuales no hay apreciable grado de contaminación; sin embargo, en estos ecosistemas se

CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO A ESCALA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO BIOLÓGICO EMPLEANDO MICROORGANISMOS PARA LA DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES PROCEDENTES DE UNA INDUSTRIA FARMACÉUTICA EN LA CIUDAD DE QUITO

vierten aguas residuales no tratadas, la carga orgánica es muy alta y se favorece la proliferación de bacterias que consumen esta materia orgánica. Si se siguen vertiendo aguas de desecho sin tratamiento, la carga orgánica del depósito acuático sigue incrementando y por lo tanto proliferan aún más las bacterias aeróbicas, las cuales consumen el oxígeno disuelto con mayor eficiencia que los peces y las plantas acuáticas, ocasionando su disminución en número y finalmente la muerte por carencia de oxígeno (Sans & de Pablo, 1999).

La abundante materia orgánica y otros componentes como nitrógeno y fósforo promueven el proceso conocido como eutrofización, esta palabra es entendida como una fertilización excesiva de un cuerpo de agua debido al crecimiento perjudicial de plantas acuáticas, tales como algas y macrófitas (Parra, 1989).

La eutrofización suele darse de manera natural, pero este proceso puede verse acelerado o propiciado por el vertido de aguas residuales sin un previo tratamiento. Aparte del material orgánico, las aguas industriales de desecho contienen otras sustancias como: jabones, detergentes sintéticos, aceites, grasas, solventes de pinturas, combustibles, aceites lubricantes y solventes industriales (Universidad Autónoma de Chihuahua, 2009).

Las aguas no tratadas ocasionan no sólo problemas de tipo ambiental, ya que también se encuentran íntimamente relacionadas con problemas de salud pública. Se sabe que las aguas residuales albergan un sinnúmero de microorganismos patógenos responsables de diversas enfermedades, incluyendo virus, protozoos y bacterias. La diarrea y la gastroenteritis se encuentran entre las tres principales causas de muerte en el mundo y en la región latinoamericana (Reynolds, 2002). La mala calidad del agua para consumo humano en su gran mayoría se debe a la descarga de aguas residuales sin tratar, este es un problema que está directamente relacionado con la presencia de enfermedades infecciosas tales como el cólera, hepatitis, disentería y muchas otras (Reynolds, 2002).

CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO A ESCALA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO BIOLÓGICO EMPLEANDO MICROORGANISMOS PARA LA DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES PROCEDENTES DE UNA INDUSTRIA FARMACÉUTICA EN LA CIUDAD DE QUITO

Una serie de descubrimientos a lo largo de la historia como los de Pasteur, Cock y otros, han sido la base para demostrar la relación entre enfermedad y bacterias en el agua, lo que indica los peligros potenciales que representa el contacto de las aguas residuales con el hombre y con sus recursos acuíferos (Universidad Autónoma de Chihuahua, 2009).

Para el caso específico de las aguas residuales generadas por la industria farmacéutica, muchos compuestos farmacológicos se han identificado en grandes cuerpos de agua, productos como analgésicos, antibióticos, antiepilépticos, antidepresivos, etc. De este grupo es importante destacar la presencia de antibióticos, estos medicamentos incrementan la toxicidad de los organismos acuáticos y provocan el surgimiento de bacterias con resistencia antibiótica (Ramos et al. 2005). Además muchos de estos productos presentan baja tasa de eliminación con el empleo de métodos de tratamiento convencional, exhibiendo efectos acumulativos que a mediano o largo plazo podrían resultar perjudiciales para la flora y fauna acuática y para la salud humana (Cortacans et al. 2006).

1.1.1.3. Control del pronóstico

Toda la problemática que engloba el descargar aguas residuales industriales sin un previo tratamiento ha promovido la necesidad de tomar medidas para controlar la disposición de las mismas en el medio ambiente. Es de vital importancia mitigar este problema mediante la implementación de operaciones que tengan por objetivo mejorar la calidad del agua, para lograr su integración al medio ambiente sin ocasionar daños ecológicos ni problemas en los habitantes que están expuestos a la misma (Universidad Autónoma de Chihuahua, 2009).

Por esta razón, lo que se implementará para el tratamiento de aguas residuales procedentes de una planta farmacéutica ubicada en la ciudad de Quito, cuyas actividades incluyen la fabricación, análisis y distribución de productos como: comprimidos, cápsulas

CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO A ESCALA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO BIOLÓGICO EMPLEANDO MICROORGANISMOS PARA LA DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES PROCEDENTES DE UNA INDUSTRIA FARMACÉUTICA EN LA CIUDAD DE QUITO

(gelatina dura), jarabes, suspensiones, óvulos, supositorios, cremas, geles, lociones, shampoos, jabones líquidos y bloqueadores solares, en un volumen de 12 millones de unidades al año, es un tratamiento biológico (biofiltración), que permita la obtención de agua, donde las sustancias perjudiciales hayan sido convertidas en sustancias inocuas para actividades donde no se requiera agua potable, y que adicionalmente brinde un alto rendimiento y menores costos de mantenimiento.

1.1.2. Formulación del problema

¿La biofiltración es un tratamiento biológico eficiente en la depuración de aguas residuales procedentes de una industria farmacéutica ubicada en la ciudad de Quito en el período 2012-2013?

1.1.3. Sistematización del problema

- ¿La biofiltración es un tratamiento biológico eficiente en la depuración de aguas residuales procedentes de una industria farmacéutica en la ciudad de Quito, periodo 2012-2013?
- ¿Qué características físico-químicas presentan las aguas residuales procedentes de una industria farmacéutica dedicada a la fabricación, análisis y distribución de antiinflamatorios, analgésicos, antibióticos, antivertiginosis, antihistamínicos, antidiarreicos, antimicóticos, queratolíticos, suplementos vitamínicos, antigripales y mucolíticos, en la ciudad de Quito, periodo 2012-2013?
- ¿Qué características presentan los microorganismos utilizados en la depuración de aguas residuales procedentes de una industria farmacéutica en la ciudad de Quito, periodo 2012-2013?

CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO A ESCALA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO BIOLÓGICO EMPLEANDO MICROORGANISMOS PARA LA DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES PROCEDENTES DE UNA INDUSTRIA FARMACÉUTICA EN LA CIUDAD DE QUITO

- ¿Cómo se puede evaluar la calidad de agua obtenida después del empleo de un tratamiento biológico para la depuración de aguas residuales procedentes de una industria farmacéutica en la ciudad de Quito, periodo 2012-2013?

1.1.4. Objetivo General

Construir a escala de laboratorio un modelo de planta de tratamiento biológico que emplee microorganismos para la depuración de aguas residuales procedentes de una Industria Farmacéutica en la ciudad de Quito, periodo 2012-2013.

1.1.5. Objetivos Específicos

- Caracterizar mediante un análisis físico-químico las aguas residuales procedentes de una industria farmacéutica antes y después del tratamiento biológico empleado.
- Diseñar y construir un modelo de planta de tratamiento biológico a escala de laboratorio para la depuración de aguas residuales.
- Caracterizar morfológica (tinción Gram y observación al microscopio) y bioquímicamente (prueba de la catalasa) la comunidad microbiana involucrada en el tratamiento biológico.

1.1.6. Justificaciones

Ecuador dispone de abundantes recursos acuíferos, distribuidos de manera irregular; existen zonas sumamente secas y otras muy ricas en recursos hídricos. Dichos recursos provienen principalmente de lluvias, escurrimiento superficial de ríos y reservas subterráneas (Da Ros, 1995). Todas las actividades del hombre se encuentran ligadas al consumo de agua, este recurso se encuentra involucrado en un sinnúmero de procesos industriales que han propiciado el desarrollo mercantil de la sociedad. Pero el progreso alcanzado se ha caracterizado no solo por el crecimiento económico, sino también por la generación de

CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO A ESCALA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO BIOLÓGICO EMPLEANDO MICROORGANISMOS PARA LA DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES PROCEDENTES DE UNA INDUSTRIA FARMACÉUTICA EN LA CIUDAD DE QUITO

desigualdades sociales, las cuales han generado una alteración significativa de los estándares de vida, la depredación del medio ambiente, y, en particular, el deterioro de la calidad del agua (Da Ros, 1995).

El crecimiento poblacional trae consigo el avance del sector industrial nacional, y es precisamente la industria una de las fuentes de contaminación hídrica, este tipo de contaminación se produce por vertidos químicos de las empresas y asume características alarmantes, sobre todo en las dos ciudades más industrializadas del país: Quito y Guayaquil. (Mézquita, 2009). La falta de una adecuada planificación, tanto industrial como tecnológica y de una apropiada zonificación (las industrias están ubicadas en forma caótica), han contribuido a crear dicha situación.

En Ecuador, la industria farmacéutica ocupa uno de los primeros lugares en la rama de negocios, superando incluso a las empresas dedicadas a la explotación petrolera. El Plan Nacional de Desarrollo del Ecuador contiene 12 Objetivos Nacionales, de los cuales el Objetivo 3 se refiere a mejorar la calidad de vida de la población, en este punto la salud juega un papel fundamental para alcanzar dicho objetivo. Por estos motivos el campo de la salud ha evolucionado favorablemente en los últimos años y ha crecido el mercado farmacéutico privado y nacional. Un mercado de aproximadamente 1300 millones es un poderoso motivador para la industria farmacéutica ecuatoriana (Quezada, 2011).

En el país existen aproximadamente seis mil farmacias, número excesivo para una población que bordea los 15 millones de habitantes, ya que la métrica internacional fija una farmacia por cada 10,000 habitantes. Existen aproximadamente cuatro veces más farmacias que las recomendadas. Según la Agencia de Regulación y Control Sanitario (ARCSA) (2013) existen 126 plantas productoras de fármacos y productos naturales, de las cuales aproximadamente 10 se dedican a la fabricación exclusiva de medicamentos. La industria

CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO A ESCALA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO BIOLÓGICO EMPLEANDO MICROORGANISMOS PARA LA DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES PROCEDENTES DE UNA INDUSTRIA FARMACÉUTICA EN LA CIUDAD DE QUITO

farmacéutica ecuatoriana está caracterizada por un complejo sistema de distribución, con una extensa cadena de valor (Quezada, 2011).

En la actualidad se vive un cambio acelerado en la conservación del medio ambiente, la contaminación del agua, del suelo y del aire, por lo que se debe buscar un futuro estable para los ecosistemas y es necesario crear consciencia sobre la contaminación de recursos indispensables para la vida, como el agua. Es precisamente de esta necesidad de la que surgen alternativas de consumo responsable como el tratamiento biológico de aguas industriales, el cual ofrece una alternativa que promueve el empleo de microorganismos que a lo largo de los años ya han brindado numerosos beneficios para el hombre (Mézquita, 2009).

Los tratamientos biológicos no involucran productos químicos, aumentan la productividad y reducen la labor y gastos de limpieza, permitiendo así la prevención de la contaminación física, química y bacteriológica del medio ambiente, ayudan al reciclaje de aguas, que una vez tratadas y depuradas pueden disponerse para fines tales como: riego de jardines, creación de áreas verdes, etc. (Universidad Autónoma de Chihuahua, 2009).

Los sistemas de biofiltración son considerados tecnologías limpias por la reducción del consumo energético y el empleo de sustancias peligrosas en su operación, además no presentan condiciones complejas de manejo y su costo de implementación es reducido. Esta tecnología permite la destrucción de los contaminantes y no simplemente la transformación de estos a sustancias que muchas veces resultan más tóxicas que las presentes originalmente en las aguas residuales tratadas (Bolívar, 2004).

Partiendo de este contexto, lo que se desea obtener mediante el empleo de un tratamiento biológico para la depuración de aguas residuales farmacéuticas es la reducción de los contaminantes presentes en las mismas, permitiendo la reutilización del agua e impulsando el desarrollo sostenible y el consumo responsable de los recursos naturales.

1.2. MARCO TEÓRICO

1.2.1. Estado actual del conocimiento sobre el tema

La contaminación de los recursos hídricos debido a la descarga de aguas industriales sin tratar ha sido un problema que no solo aqueja al Ecuador. En 1997 Proal et al. publicaron un estudio sobre el tratamiento de aguas residuales industriales con alto contenido de metales pesados, empleando la técnica de aglomeración esférica, con lo cual logró la disminución de estos contaminantes mediante la precipitación de los mismos.

Tilka (2000), publicó el estudio sobre el bioincremento, donde concluye que esta técnica le brinda al operador de una planta de depuración de efluentes un control adicional sobre el sistema de tratamiento, permitiéndole variar tanto la diversidad como la calidad de la población microbiana empleada. La elección de cepas selectivamente adaptadas puede atacar contaminantes particulares, mejorar la calidad del efluente tratado, mantener la estabilidad del proceso y reducir los costos operativos de la planta. También concluye que el bioincremento puede ser empleado en la biorremediación de problemas ambientales desde la acumulación de grasas en los sistemas de alcantarillado, formación de sulfuro de hidrógeno, etc.

Rodríguez et al. (2000), publicaron el estudio “Desnitrificación, sulfato reducción y metanogénesis durante la biomineralización de aguas residuales de la industria farmacéutica” donde emplearon microorganismos a los cuales les proporcionaron diferentes rangos de temperatura, iones sulfato y pH con el fin de establecer parámetros óptimos para la digestión anaerobia del agua residual generada por una industria productora de antibióticos. Concluyeron que a concentraciones menores de 1 g/L del ión sulfato no hay efecto negativo sobre la desnitrificación y la metanogénesis, el pH óptimo para las tres reacciones de interés fue de 7,0; la temperatura óptima fue 37 °C, logrando así un alto porcentaje de eficiencia.

CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO A ESCALA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO BIOLÓGICO EMPLEANDO MICROORGANISMOS PARA LA DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES PROCEDENTES DE UNA INDUSTRIA FARMACÉUTICA EN LA CIUDAD DE QUITO

La biofiltración puede emplearse para mejorar la calidad del efluente obtenido en tratamientos convencionales. Así, Rodríguez (2003) ejemplifica esto al utilizar un sistema de biofiltración para reutilizar aguas que no han sido recuperadas totalmente, este sistema demostró ser altamente eficiente en la remoción de materia orgánica, inorgánica, indicadores de contaminación fecal y nutrientes.

Esta tecnología no convencional también fue empleada en el estudio de Garzón (2004), para la depuración de diferentes tipos de agua residual industrial: agua de granja de puerco, agua coloreada con naranja ácido 24 (AO24) y agua de una industria petroquímica. Los parámetros de control estudiados fueron la carga hidráulica, el tiempo de retención hidráulico y la tasa de aireación. Los resultados obtenidos denotan la eficiencia de esta técnica en el tratamiento de aguas residuales de muy diferente procedencia.

Los biofiltros pueden utilizar distintos tipos de empaques dependiendo de las características del agua residual que se esté tratando, Lozano et al. (2005) probaron lechos de aserrín, turba y carbón mineral para la construcción de un biofiltro que permita biodetoxificar el agua contaminada con mercurio. Para esto emplearon el microorganismo *Pseudomonas aeruginosa*. Se logró disminuir la concentración de mercurio con una elevada eficiencia y se recuperó el metal particulado gracias a la capacidad de bioacumulación del microorganismo usado.

Los biofiltros también se emplean en la depuración de aire contaminado, Jiménez & Villegas (2005) desarrollaron un proceso para la eliminación del gas estireno, un contaminante orgánico generador de malos olores, para esto emplearon los microorganismos *Pseudomonas aeruginosa* y *Escherichia coli* adheridos a un soporte de piedra pómez. Se logró una remoción de hasta el 90% del contaminante.

CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO A ESCALA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO BIOLÓGICO EMPLEANDO MICROORGANISMOS PARA LA DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES PROCEDENTES DE UNA INDUSTRIA FARMACÉUTICA EN LA CIUDAD DE QUITO

Ramos et al. (2005) publicaron un estudio donde describen que principal problema que se presenta en esta industria es la carencia de soluciones tecnológicas para el tratamiento de residuos líquidos. Concluyen presentando diversas soluciones como tratamientos de película fija anaerobios y aerobios, así como la aplicación del ozono, los cuales describen como muy efectivos para la mitigación de este tipo de problemas.

Los productos farmacéuticos, pese a ser contaminantes poco estudiados, son compuestos que han formado parte de las aguas residuales industriales y domésticas desde hace mucho tiempo, la presencia de los mismos en cuerpos de agua ha sido demostrada en algunos estudios. Cortacans et al. (2006) encontraron sustancias farmacológicamente activas en aguas superficiales y subterráneas. Estudiaron el grado de eliminación real de distintos tipos de fármacos mediante diferentes técnicas de depuración de aguas residuales, así como la concentración de los mismos en los efluentes depurados. Las sustancias analizadas fueron: ibuprofeno, carbamacepina, bezafibrato, benzodiazepina, cocaína, metadona y opiáceos. Adicionalmente se probaron sistemas de tratamiento terciarios como filtración con membranas de diferente tamaño de poro para verificar la eficacia en la reducción de estas sustancias.

La biofiltración también se ha empleado para tratar efluentes de la industria textil. Melgoza & de la Cruz (2006) evaluaron la eficiencia de esta técnica en la eliminación de los diversos contaminantes recalcitrantes que contiene el agua residual proveniente de esta industria, para esto se utilizó un biofiltro discontinuo secuenciado aerobio/anaerobio y se obtuvo una eficiencia de 86-98% en la remoción de DQO y 93% en la remoción de colorantes. Esto permitió reutilizar el efluente tratado en otras operaciones de la industria.

CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO A ESCALA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO BIOLÓGICO EMPLEANDO MICROORGANISMOS PARA LA DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES PROCEDENTES DE UNA INDUSTRIA FARMACÉUTICA EN LA CIUDAD DE QUITO

Odegaard (2006) realizó un estudio en el que presenta una alternativa para tratamiento de aguas residuales empleando un *biofilm* de lecho móvil, el cual presentó buenos resultados y es muy utilizado en las plantas de tratamiento de aguas residuales europeas.

Sírtori (2007) publicó un estudio donde propone la integración de los procesos industriales, la reingeniería de los mismos y la aplicación de tratamientos especializados para cada tipo de efluente industrial, mediante este enfoque se logró un mejor aprovechamiento de insumos, menores costos de producción, mejor tratabilidad de los efluentes, menos cantidad de efluentes y menor inversión en la planta de tratamiento.

Romero et al. (2009) publicaron un estudio donde concluyen que los humedales artificiales son una buena alternativa para la remoción de la carga orgánica y de nutrientes, además presentan bajos costos de operación y mantenimiento.

Quesada (2009) realizó una comparación entre el uso de tecnologías convencionales como la adsorción y diversas tecnologías no convencionales como el ultrasonido, la oxidación húmeda catalítica y el proceso ADOX, empleando carbones activados como catalizadores, para el tratamiento de aguas contaminadas con productos farmacéuticos. Demostró que las propiedades de la superficie química del carbón activado juegan un papel importante en la adsorción de sustancias como la levodopa y el paracetamol, igualmente se comprobó que los efluentes obtenidos del proceso de oxidación húmeda catalítica no son inhibitorios y poseen buena asimilación por parte de los microorganismos presentes en lodos activados.

Villota (2009) presentó una disertación sobre la purificación de agua empleando un filtro con piroclastos en la comunidad de Vizcaya del cantón Baños. Con los resultados obtenidos se redujo la turbiedad del agua un 3-4% por lo que recomienda el uso de este tipo de filtros para el tratamiento de aguas residuales contaminadas con partículas de gran tamaño.

CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO A ESCALA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO BIOLÓGICO EMPLEANDO MICROORGANISMOS PARA LA DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES PROCEDENTES DE UNA INDUSTRIA FARMACÉUTICA EN LA CIUDAD DE QUITO

Beltrán et al. (2010) investigaron sobre la aplicación de tratamiento biológico en las aguas residuales domésticas de las poblaciones rurales del cantón Cotacachi, obteniendo excelentes resultados en cuanto a la remoción de contaminantes.

En la depuración de aguas residuales contaminadas con productos farmacológicos los microorganismos juegan un papel esencial. Casado (2010) analizó el proceso de degradación de los fármacos naproxeno y carbamazepina mediante el empleo de consorcios microbianos. Después de realizar numerosos experimentos logró aislar un consorcio microbiano con capacidad de crecer empleando estos fármacos como única fuente de carbono.

Los biofiltros también suelen emplearse para complementar procesos que generan malos olores como el compostaje. Por ejemplo, Arana (2010) propuso la mejora de un sistema de tratamiento de residuos sólidos mediante la implementación de un biofiltro que trata la corriente olorosa generada durante el proceso, de esta manera se minimizaron los olores generados una vez que la corriente era liberada a la atmósfera.

Llvisaca et al. (2011) presentaron un estudio en el que se realizó la caracterización de microorganismos con el objetivo de emplearlos en la remediación de aguas residuales producidas por la industria minera. El objetivo principal de esta investigación fue proporcionar la información necesaria para poder realizar futuros trabajos relacionados con la búsqueda de microorganismos empleados en biorremediación.

Sánchez et al. (2012) construyeron y evaluaron el comportamiento de un biofiltro de flujo ascendente y descendente con diferentes tiempos de retención hidráulica para la obtención de parámetros de calidad del agua óptimos para el cultivo de la trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*) en un sistema de recirculación acuícola (SRA). Los resultados obtenidos exponen ciertas diferencias entre el comportamiento de los biofiltros en cuanto a la remoción y calidad de los parámetros evaluados (pH, oxígeno disuelto, temperatura, etc.).

CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO A ESCALA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO BIOLÓGICO EMPLEANDO MICROORGANISMOS PARA LA DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES PROCEDENTES DE UNA INDUSTRIA FARMACÉUTICA EN LA CIUDAD DE QUITO

Cabrera & Ortiz (2012) publicaron una investigación en la cual realizaron estudios sobre la calidad de las aguas residuales y los posibles tratamientos de bajo costo y de tipo biológico aplicables. Estos estudios se desarrollaron para diagnosticar la problemática de la contaminación del agua proveniente de la parroquia San Pablo del Lago.

Finalmente, es importante mencionar que en Ecuador se ha promovido el desarrollo de estudios sobre el tratamiento biológico de efluentes, debido a la creciente conciencia ambiental que actualmente reconoce a la naturaleza como sujeto de derecho.

1.2.2. Adopción de una perspectiva teórica

Una vez analizada la situación actual, teniendo conocimiento sobre los diversos tratamientos aplicables para la depuración de las aguas residuales procedentes de una industria farmacéutica, se decide utilizar como tratamiento biológico la biofiltración, debido a las ventajas que esta tecnología presenta tanto a nivel operativo como económico.

1.2.3. Marco conceptual

1.2.3.1. Aguas Residuales

“Las aguas residuales pueden definirse como las aguas que provienen del sistema de abastecimiento de agua de una población, después de haber sido modificadas por diversos usos en actividades domésticas, industriales y comunitarias” (Mara, 1976).

Las aguas residuales se componen tanto de sustancias orgánicas como inorgánicas. Los microorganismos participan fundamentalmente en la degradación de materia orgánica. De acuerdo al origen, las aguas residuales estas podrían clasificarse en (Merli & Ricciuti, 2009):

- **Domésticas:** son aquellas utilizadas con fines higiénicos (baños, cocinas, lavanderías, etc.). Consisten básicamente en residuos humanos que llegan a las redes de

alcantarillado mediante las descargas de instalaciones hidráulicas de la edificación, también contienen residuos originados en establecimientos comerciales, públicos y similares (Merli & Ricciuti, 2009).

- **Industriales:** son los residuos líquidos generados en los diversos procesos industriales. Poseen una composición característica, dependiendo del proceso operativo de la industria que los emita (Merli & Ricciuti, 2009).
- **Infiltración y caudal adicionales:** las aguas de infiltración penetran en el sistema de alcantarillado a través de los empalmes de las tuberías, paredes de las tuberías defectuosas, tuberías de inspección y limpieza, etc. (Merli & Ricciuti, 2009).
- **Pluviales:** son agua de lluvia, parte de esta agua es drenada y otra escurre por la superficie, arrastrando arena, tierra, hojas y otros residuos que pueden estar sobre el suelo (Merli & Ricciuti, 2009).

1.2.3.2. Aguas Residuales Industriales

Las aguas residuales industriales son aquellas que proceden de cualquier actividad o negocio en cuyo proceso de producción, transformación o manipulación se utilice agua (Muñoz, 2008). Su caudal y composición son altamente heterogéneos ya que difieren dependiendo del proceso de la industria. Este tipo de aguas residuales poseen contaminantes recalcitrantes que requieren de diferentes y complejas tecnologías para su eliminación (Muñoz, 2008). En cuanto al caudal, las industrias no emiten vertidos de manera continua, los mismos pueden generarse durante determinadas horas del día o incluso épocas del año, ya que esto depende de los procesos operativos manejados, del volumen de producción requerido y de otros parámetros operativos (Muñoz, 2008).

Como se mencionó, las aguas de origen industrial son muy heterogéneas y la composición así como la naturaleza de las sustancias que acompañan el agua dependen completamente del o los procesos de transformación de la industria que desecha dichas aguas (Rocha, 2008). El origen y los posibles contaminantes de este tipo de aguas son: grasas, aceites, jabones, solventes químicos, diferentes materiales orgánicos, metales pesados y metales tóxicos, entre otros. Por lo tanto se puede considerar que las aguas residuales industriales presentan un alto contenido de sustancias que se pueden considerar contaminantes. Este tipo de contaminación es de tipo químico, físico y microbiológico. (Universidad Autónoma de Chihuahua, 2009). El tratamiento utilizado para la depuración de aguas industriales depende del caso específico con el que se esté trabajando.

1.2.3.3. Aguas Residuales farmacéuticas

El progreso de la sociedad trae consigo el incremento de las actividades industriales y, por lo tanto, la liberación al ambiente de una gran cantidad de sustancias químicas contaminantes que se integran al ciclo del agua a través de diferentes vías. El vertido de estas sustancias altera el equilibrio natural de los ecosistemas (Zuccato et al. 2005). Dentro de las diferentes industrias generadoras de residuos líquidos, la industria farmacéutica no es la excepción, ya que esta genera miles de compuestos farmacológicamente activos, los cuales son empleados mundialmente para combatir o prevenir enfermedades. Diariamente se sintetizan nuevos productos para reemplazar a otros ya obsoletos (Zuccato et al. 2005).

En los últimos años se ha demostrado que los fármacos constituyen una nueva clase de contaminantes, dentro de los compuestos más representativos tenemos los siguientes grupos terapéuticos (Cortacans et al. 2006):

CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO A ESCALA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO BIOLÓGICO EMPLEANDO MICROORGANISMOS PARA LA DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES PROCEDENTES DE UNA INDUSTRIA FARMACÉUTICA EN LA CIUDAD DE QUITO

- **Antiinflamatorios y analgésicos:** Se emplean para combatir el dolor, tienen propiedades analgésicas y antipiréticas. Actúan inhibiendo la síntesis de compuestos involucrados en la respuesta inflamatoria. Ejemplo: paracetamol, ácido acetilsalicílico, ibuprofeno y diclofenac.
- **Antidepresivos:** Los más comunes son las benzodiazepinas, las cuales aumentan la acción de determinados neurotransmisores inhibidores, reduciendo la actividad de ciertas áreas del cerebro. Producen somnolencia, disminución de la ansiedad y relajación de los músculos.
- **Antiepilépticos:** El más común es la carbamacepina. La carbamazepina evita el cúmulo excesivo, rápido y repetitivo de impulsos eléctricos, manteniendo normal la actividad cerebral.
- **Antineoplásicos:** Son fármacos empleados en el tratamiento del cáncer. Ejemplo: bisulfan, ciclofosfamidas, etc.
- **Antilipemiantes:** se utilizan para disminuir el nivel de colesterol en la sangre en personas que padecen arterioesclerosis. Los más comunes son los fibratos y las estatinas.
- **Betabloqueantes:** Bloquean los receptores beta que existen en el corazón, consiguiendo disminuir la necesidad de oxígeno, reducir el ritmo cardíaco, disminuir la fuerza de contracción del corazón, y reducir la contracción de los vasos sanguíneos. Se utilizan para combatir la hipertensión arterial, angina de pecho, arritmias cardíacas, etc. Ejemplo: atenolol, propanolol, metoprolol, etc.
- **Antiulcerosos y antihistamínicos:** Se emplean contra la acidez de estómago, úlceras y otras alteraciones estomacales. Ejemplo: ranitidina, famotidina, etc.

CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO A ESCALA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO BIOLÓGICO EMPLEANDO MICROORGANISMOS PARA LA DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES PROCEDENTES DE UNA INDUSTRIA FARMACÉUTICA EN LA CIUDAD DE QUITO

- **Antibióticos:** Entre los antibióticos más importantes se encuentran las sulfonamidas, fluoroquinolonas, cloranfenicol, tilosina y trimetopina.
- **Otras sustancias:** Aquí se incluye las sustancias psicotrópicas como: alcohol, marihuana, cocaína, barbitúricos, metadona, heroína y otros narcóticos, anfetaminas, LSD (dietilamina del ácido lisérgico) y la PCP (fenilciclidina).

Los fármacos contaminan el medio ambiente no solo mediante las excreciones, debido a que son metabolizados parcialmente por el organismo, sino también por la fabricación e inadecuada disposición de los desechos de estos (Boxall, 2004). Se han reportado fármacos en aguas superficiales, subterráneas e incluso en agua potable. Una vez en el medio ambiente estos productos pueden transportarse y distribuirse en todos los compartimentos ambientales, agua, aire, suelo o sedimentos. En la Tabla 1 se muestra la distribución de algunos de los principales medicamentos utilizados.

Tabla 1. Medicamentos encontrados en cuerpos de agua, aguas residuales y lodos (Quesada, 2009)

Fuente	Fármacos	Referencias
Ríos	Paracetamol, estrona, 17 α estradiol, 17 β estradiol, estriol, 17 α etinil estradiol, mestranol, ácido salicílico, ácido clofibrico, ibuprofeno, naproxeno, genfibrozil, 5 β coprostanol, ornidazol, sulfametoxazol, sulfametacina, norfloxacino, ofloxacino, ciprofloxacina, flumequina, iopromida, carbamazepina, salbutamol, cafeína, ácidos pipemídico, oxolínicomefenámico y nalidíxico.	Peng et al. 2008 Tamtam et al. 2008 (Sang et al. 2007)
Afluentes y efluentes de Plantas de tratamiento	Paracetamol, ibuprofeno, naproxeno, ketoprofeno, diclofenaco, indometacina, fenoprofeno, 17- β estradiol, estriol, estrona, trimetoprima, tetraciclina, clortetraciclina,	Spongberg &Witter, 2008 Thomas et al. 2007 Santos et al. 2007

CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO A ESCALA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO BIOLÓGICO EMPLEANDO MICROORGANISMOS PARA LA DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES PROCEDENTES DE UNA INDUSTRIA FARMACÉUTICA EN LA CIUDAD DE QUITO

y hospitales	cimetidina, ciprofloxacina, claritromicina, clindamicina, eritromicina, gemfibrozil, sulfadimetoxina, sulfametazina, sulfametiazol, sulfametoxazol, sulfatiazol, sulfisoxazol, paroxetina, salbutamol, metoprolol, propranolol, atenolol, metronidazol, ranitidina, carbamazepina, codeína, cotinina, cafeína, fluoxetina, ketorolaco, diltiazem, primidona, fenitoina, ácidosmefenámico, salicílico, clofíbrico	Al-Rifai et al. 2007 Bound & Voulvoulis, 2006 Lishman et al. 2006 Gómez et al. 2006
Lodos	Sulfapiridina, sulfametoxazol, trimetoprima, azitromicina, claritromicina, roxitromicina, carbamazepina, difenhidramina, fluoxetina	Gobel et al. 2005 Kinney et al. 2006

Las aguas residuales procedentes de la industria farmacéutica poseen ciertas características debido a su mecanismo de producción. Por ejemplo, la emisión de este tipo de aguas residuales es intermitente, fluctuante y poseen una composición altamente variable dependiendo del régimen de fabricación y de los productos elaborados (Quesada, 2009). La composición de las aguas residuales aportadas por los hospitales también es variable y depende del número de usuarios, tipos de enfermedades tratadas y otros aspectos a considerar. Pese a que se han generado estudios sobre la composición de las aguas residuales contaminadas con medicamentos, aún no existen los datos suficientes sobre la caracterización de este tipo de aguas (Quesada, 2009).

Los fármacos son compuestos particularmente difíciles de degradar puesto que son sintetizados con características específicas. Por ejemplo, 30% de los medicamentos son lipofílicos, por lo cual son insolubles en agua, esta característica les permite pasar a través de la membrana celular y ejercer su efecto en el interior de la célula. Adicionalmente, algunos de estos compuestos son diseñados para que persistan en el organismo durante períodos largos,

CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO A ESCALA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO BIOLÓGICO EMPLEANDO MICROORGANISMOS PARA LA DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES PROCEDENTES DE UNA INDUSTRIA FARMACÉUTICA EN LA CIUDAD DE QUITO

para así ejercer su acción terapéutica, lo que indica su persistencia en el medio ambiente a largo plazo (Quesada, 2009).

A continuación se mencionan otras características que contribuyen con la dificultad de eliminación de estos xenobióticos (Cortacans et al. 2006):

- Los fármacos están constituidos por moléculas grandes y químicamente complejas, de diferente peso molecular, estructura y funcionalidad.
- Son moléculas polares y tienen más de un grupo ionizable.
- Están diseñados para interaccionar con receptores específicos del hombre y animales, o para resultar tóxicos para microorganismos como bacterias, hongos, etc.

Por todas estas características, la presencia de fármacos en el medio ambiente puede traer graves consecuencias a corto y largo plazo, entre estas se tiene:

- Una vez liberados en el medio ambiente pueden afectar a los animales con similares órganos, tejidos, etc. (Fent et al. 2006).
- Los compuestos farmacológicos pueden bioacumularse en los diferentes compartimentos ambientales además de concentrarse en los tejidos de los animales que han sido expuestos a los mismos (Quesada, 2009).
- Los antibióticos pueden propiciar resistencia bacteriana y afectar el crecimiento, movilidad y reproducción de diferentes organismos (Quesada, 2009).
- Se han reportado alteraciones en el comportamiento y la fisiología de algunos insectos y el crecimiento e inhibición de plantas acuáticas y algas (Quesada, 2009).

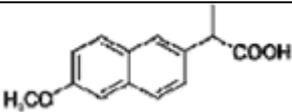
Debido a la preocupación que se ha generado por este tipo de contaminación, es necesario contar con tecnologías que ayuden a recuperar los recursos hídricos afectados, ya

CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO A ESCALA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO BIOLÓGICO EMPLEANDO MICROORGANISMOS PARA LA DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES PROCEDENTES DE UNA INDUSTRIA FARMACÉUTICA EN LA CIUDAD DE QUITO

que el tratamiento inadecuado o ineficiente de este tipo de efluentes conlleva, sin duda, al deterioro de los cuerpos de agua (Casado, 2010).

- **Naproxeno**: En el presente trabajo se utilizará como indicador de la actividad microbiana desarrollada en el biofiltro la degradación de naproxeno. Se ha seleccionado este compuesto porque es uno de los medicamentos más abundantes en aguas residuales farmacéuticas y cuerpos de agua en general. En la Tabla 2 se muestra la estructura molecular de este fármaco.

Tabla 2. Estructura molecular del Naproxeno (adaptado de Quintana et. al 2005)

Compuesto	Peso Molecular (g/mol)	Estructura Molecular
Naproxeno (N)	130.078	

El naproxeno (Ácido(S)-6-metoxi- α -metil-2-naftalenacético), es un ácido arilpropiónico, que pertenece a la clase de medicamentos llamados antiinflamatorios no esteroideos (AINE) de uso general, se utiliza para el tratamiento del dolor suave a moderado, la fiebre, la inflamación y en el tratamiento de la artritis osteo y reumatoide (Casado, 2010). Debido al expendio de este medicamento sin la necesidad de receta, ha sido detectado en agua superficial, subterránea e incluso potable (Casado, 2010).

1.2.3.4. Tratamiento de aguas residuales

A lo largo del tiempo, el hombre ha desarrollado diferentes métodos para tratar las aguas residuales, dependiendo de las características del agua residual y la calidad que deba

CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO A ESCALA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO BIOLÓGICO EMPLEANDO MICROORGANISMOS PARA LA DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES PROCEDENTES DE UNA INDUSTRIA FARMACÉUTICA EN LA CIUDAD DE QUITO

tener la descarga del efluente, se diseñan los métodos de tratamiento, en la mayoría de los casos se combinan los procesos de tratamiento (Muñoz, 2009). El objetivo principal del tratamiento es que el efluente producido pueda ser amigable para el medio ambiente. Para lograr esto, los contaminantes que contiene el agua residual pueden ser eliminados de diferentes maneras, ya sea por métodos físicos, químicos o biológicos (Muñoz, 2009).

El tratamiento primario contempla el uso de operaciones físicas tales como la sedimentación y el desbaste que permiten la eliminación de los sólidos sedimentables y flotantes presentes en el agua residual. En el tratamiento secundario se realizan procesos biológicos y químicos, los cuales se emplean para eliminar la mayor parte de la materia orgánica. Y por último, en el tratamiento terciario y avanzado se emplean combinaciones adicionales de los procesos y operaciones unitarias para remover esencialmente sustancias, cuya reducción con tratamiento secundario generalmente no es significativa (Muñoz, 2009).

1.2.3.5. Plantas de tratamiento

Los sistemas de tratamiento de aguas residuales, realizan la función de remover en el mayor grado posible los contaminantes presentes. La remoción no significa la desaparición o extinción de la sustancia indeseable, significa la conversión del contaminante a sustancias inocuas o menos objetables (Rocha, 2008).

Por mucho, la mayor cantidad de sustancias que se encuentran en el agua son residuos de tipo orgánico. Estos residuos se presentan como sólidos y son clasificados, de acuerdo a sus características como: sólidos disueltos, partículas coloidales y sólidos sedimentables (Rocha, 2008).

De una forma simple y muy general, se pueden describir los siguientes procesos en una planta de tratamiento de aguas residuales (Universidad Autónoma de Chihuahua, 2009):

CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO A ESCALA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO BIOLÓGICO EMPLEANDO MICROORGANISMOS PARA LA DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES PROCEDENTES DE UNA INDUSTRIA FARMACÉUTICA EN LA CIUDAD DE QUITO

- Un sistema para retención y remoción de los sólidos y partículas de gran tamaño (basura) que salen del drenaje junto con las aguas residuales.
- Un arenero y preaerador como tratamiento previo a la sedimentación primaria.
- Un sedimentador que separe del fluido principal, las partículas sólidas que se asientan fácilmente (sólidos sedimentables).
- Un sistema biológico y otra serie de procesos auxiliares, necesarios para lograr la calidad de agua deseada antes de que el efluente sea integrado al medio ambiente.

1.2.3.6. Tratamiento biológico de aguas residuales

El tratamiento biológico de aguas residuales consiste en la remoción de los contaminantes mediante la actividad biológica. El metabolismo microbiano se aprovecha para remover principalmente sustancias biodegradables, coloidales o disueltas, del agua residual, mediante su conversión en gases que escapan a la atmósfera y la generación de biomasa (Romero, 2004). Los principales objetivos de las plantas de tratamiento biológico son tres:

- Reducir el contenido en materia orgánica de las aguas.
- Reducir el contenido de nutrientes.
- Eliminar los patógenos y parásitos.

Estos objetivos se logran por medio de procesos aeróbicos y anaeróbicos en los cuales la materia orgánica es metabolizada por diferentes microorganismos (Rocha, 2008).

Los procesos biológicos pueden clasificarse en cuatro grupos principales (Merli & Ricciuti, 2009):

- Procesos aerobios.
- Procesos anóxicos.
- Procesos anaerobios.

CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO A ESCALA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO BIOLÓGICO EMPLEANDO MICROORGANISMOS PARA LA DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES PROCEDENTES DE UNA INDUSTRIA FARMACÉUTICA EN LA CIUDAD DE QUITO

- Procesos combinados (aerobios/anaerobios/anóxicos).

Cada grupo a su vez comprende diferentes tipos que dependen del proceso de crecimiento biológico: suspendido, adherido y combinado. De igual manera dependen del régimen de flujo, continuo o intermitente, y del tipo de mezcla, completa, flujo en pistón o flujo arbitrario. En la Tabla 3 se presentan los principales tratamientos biológicos:

Tabla 3. Principales procesos de tratamiento biológico (Romero, 2004)

Tipo	Crecimiento	Proceso	Uso principal
Aerobios	Suspendido	Lodos activados <ul style="list-style-type: none"> • Convencional • Mezcla completa • Aireación escalonada • Estabilización y contacto • Oxígeno puro • Tasa alta • Aireación prolongada • Proceso Krauss • Zanjón de oxidación 	Remoción de DBO y nitrificación
		Lagunas aireadas Digestión anaerobia Lagunas aerobias	Remoción de DBO y nitrificación Remoción de DBO - estabilización Remoción de DBO y nitrificación
	Adherido	Filtros percoladores <ul style="list-style-type: none"> • Tasa baja • Tasa alta Torres biológicas Unidades rotatorias de contacto biológico Reactores de lecho fijo	Remoción de DBO y nitrificación Remoción de DBO y nitrificación Remoción de DBO y nitrificación Remoción de DBO y nitrificación
Anóxicos	Suspendido adherido	Bardenpho Desnitrificación Desnitrificación	Remoción de DBO, N y P Remoción de nitrógeno Remoción de nitrógeno
Anaerobios	Suspendidos	Digestión anaerobia Anaerobio de contacto	Remoción de DBO – estabilización

CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO A ESCALA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO BIOLÓGICO EMPLEANDO MICROORGANISMOS PARA LA DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES PROCEDENTES DE UNA INDUSTRIA FARMACÉUTICA EN LA CIUDAD DE QUITO

			Remoción de DBO
	Híbrido	Lagunas anaerobias Manto de lodos-flujo Ascensional (PAMLA) o UASB	Remoción de DBO – estabilización Remoción de DBO y SS
	Adherido	Filtro anaerobio	Remoción de DBO- estabilización
		Lecho expandido	Remoción de DBO- estabilización

Según Sans (1999), los microorganismos más utilizados en los procesos de degradación biológica son: bacterias, hongos, algas, protozoos, rotíferos, crustáceos y virus. La contaminación del agua constituye el sustrato o alimento de la biocenosis o comunidad de microorganismos. Cuando existe la participación de elementos vivos, plantas o microorganismos en los procesos de descontaminación de aguas y suelos, al empleo de estos organismos se le denomina biorremediación (Arnáiz et al. 2000).

La biorremediación surge como una rama de la biotecnología que busca resolver los problemas de contaminación mediante el uso de seres vivos capaces de degradar compuestos que provocan desequilibrio en el medio ambiente (Arnáiz et al. 2000). El tratamiento biológico, es quizá el proceso más importante para la remoción de contaminantes.

1.2.3.7. Factores que afectan la eficiencia de los tratamientos biológicos

El límite de las técnicas de biorremediación es la biodegradabilidad de los pululantes, ya que mientras los compuestos biogénicos (generados por biosíntesis) son fácilmente biodegradables, los compuesto xenobióticos pueden ser más recalcitrantes y resistirse a la degradación microbiana total o parcial (Bolívar, 2004). También se deben considerar otros factores como (Muñoz, 2008):

- **Temperatura:** la actividad biológica se desarrolla de mejor manera entre los 12 - 38 °C (zona mesofílica).
- **pH:** las enzimas se encuentran activas en un estrecho rango de pH (6.2-8.5).
- **Homogenización:** se logra una mejor depuración biológica cuando se tiene homogeneidad del medio. Los sistemas de tratamiento más homogéneos son los lodos activados y los lechos bacterianos.
- **Inhibidores:** existen diversas sustancias que pueden inhibir la actividad enzimática, entre estas se tiene: sustancias que forman sales insolubles, iones de metales pesados, reactivos alcaloides, cloro y sus derivados, etc.
- **Cantidad mínima de nutrientes:** la concentración de nutrientes debe ser la adecuada para que se pueda realizar la depuración biológica, esta concentración puede estimarse mediante la relación DBO_5/N_{total} y DBO_5/P_{total} . La carencia total o parcial de nutrientes limita la actividad microbiana.

1.2.3.8. Biofiltración, estructura y funcionamiento de un biofiltro

La biofiltración es una tecnología no convencional, empleada en el tratamiento de gases, olores y aguas residuales; cuyo principio consiste en hacer pasar la corriente de aire y/o agua contaminada a través de una columna constituida por materia orgánica, sobre la cual se desarrolla una comunidad microbiana que utiliza los contaminantes como fuente de alimento (Garzón, 2004). La biofiltración sobre cama orgánica combina los principios de un filtro percolador y un biofiltro tradicional para olores. La cama orgánica actúa como un filtro natural de alta porosidad y presenta propiedades de adsorción y absorción, este medio filtrante a su vez permite el desarrollo de poblaciones microbianas encargadas de degradar los

CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO A ESCALA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO BIOLÓGICO EMPLEANDO MICROORGANISMOS PARA LA DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES PROCEDENTES DE UNA INDUSTRIA FARMACÉUTICA EN LA CIUDAD DE QUITO

contaminantes retenidos en el filtro, confiriéndole a este sistema propiedades depuradoras (Garzón, 2004).

En los sistemas de biofiltración de aguas residuales, el oxígeno se disuelve en la superficie de la capa del líquido en movimiento y es trasferido a través de la biopelícula formada, tanto el oxígeno como los nutrientes del líquido se difunden hacia interior de la película, donde son metabolizados por los microorganismos adheridos al medio (Garzón, 2004). Las partículas coloidales y en suspensión contenidas en la corriente contaminada se aglomeran y adsorben de igual manera en la película microbiana. Desde el punto de vista ingenieril, el sistema de biofiltración posee propiedades depuradoras al poner en contacto la fase gaseosa, el líquido y los microorganismos, logrando una alta eficiencia en la remoción de sustancias contaminantes. Las dimensiones del biofiltro dependerán de la naturaleza del medio filtrante y las características del agua residual a tratar. Por ejemplo, un biofiltro para aguas domésticas suele tener alrededor de dos metros de profundidad y diez metros de diámetro, mientras que uno para aguas residuales industriales podría medir hasta 40 metros de diámetro y 12 metros de profundidad (Rocha, 2008).

Cuando se inicia el funcionamiento de un sistema de biofiltración con un medio filtrante limpio, el desarrollo de la biopelícula se da en presencia de un sustrato y de las condiciones ambientales favorables; podría necesitarse de varias semanas para alcanzar un desarrollo completo sobre la superficie del empaque del biofiltro, este proceso es conocido como maduración o acondicionamiento. La lama o biopelícula puede desarrollarse a partir de los microorganismos presentes en las aguas residuales o en el medio orgánico empleado. También pueden emplearse inóculos microbianos desarrollados bajo condiciones de laboratorio. La eficiencia de la tecnología de biofiltración en etapas iniciales es baja pero aumenta a medida que la biopelícula madura; una vez que se ha desarrollado completamente,

CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO A ESCALA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO BIOLÓGICO EMPLEANDO MICROORGANISMOS PARA LA DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES PROCEDENTES DE UNA INDUSTRIA FARMACÉUTICA EN LA CIUDAD DE QUITO

se desprende del empaque debido a su peso y es arrastrada por el flujo de agua que circula por el sistema. Este fenómeno se denomina desprendimiento o autolimpieza del biofiltro (Rocha, 2008).

La película biológica está constituida principalmente por bacterias autótrofas (fondo) y heterótrofas (superficie), hongos, algas y protozoos. En el biofiltro adicionalmente se pueden encontrar organismos como gusanos, larvas, insectos y caracoles (Hernández, 2000). En el proceso de biofiltración con lecho orgánico se aprovecha la competencia que tienen ciertos microorganismos capaces de biodegradar los contaminantes presentes en las aguas residuales en CO_2 , N_2 y H_2O (Buelna, 2000). Este proceso de depuración se logra mediante cuatro mecanismos naturales que actúan simultánea y sinérgicamente: 1) filtración lenta y pasiva, 2) absorción, 3) biodegradación y 4) desinfección. El control de la carga hidráulica aplicada permite el crecimiento y decrecimiento de la biopelícula, evitando la formación excesiva de lodos residuales y permitiendo el reúso de la corriente tratada en actividades de infiltración, riego, lavado o integración a un cuerpo de agua receptor (Buelna et al. 2011).

La tecnología de la biofiltración proporciona un método de depuración de aguas residuales eficiente, estable, versátil y seguro, desde el punto de vista económico es rentable y de fácil operación y mantenimiento (Jiménez & Villegas, 2005). Por las ventajas anteriormente mencionadas, esta tecnología es aplicada en diferentes campos, los cuales se resumen a continuación:

Tabla 4. Campos de aplicación de la biofiltración(Arana, 2010)

CAMPOS DE APLICACIÓN DE LA BIOFILTRACIÓN	
<ul style="list-style-type: none"> • EDAR municipales. • Plantas de compostaje. • Plantas de tratamiento de biosólidos. • Plantas de biometanización. • Granjas y mataderos. • Vertederos. • Estaciones de bombeo de agua y alcantarillado. • Industria química. • Industria tabaquera. 	<ul style="list-style-type: none"> • Industria papelera. • Industria farmacéutica. • Industria del mueble. • Aplicación de pinturas y recubrimientos. • Manufactura de resinas. • Curtido de pieles. • Industria alimentaria. • Destilerías.

Estructura de un biofiltro: La estructura de un biofiltro de lecho orgánico se compone de un material de empaque (natural o sintético) y un medio filtrante o lecho biológico que actúa como soporte y fuente de nutrientes para la formación de la lama microbiana (Arana, 2010).

La selección del material de relleno constituido por estos dos componentes está directamente relacionado con el adecuado funcionamiento y eficiencia del sistema de biofiltración, la elección de un material sobre otro se determinará por las condiciones que favorezcan al desarrollo de la biopelícula, sin embargo también deben considerarse aspectos económicos. Algunos factores que debería considerarse para realizar una buena selección son (Arana, 2010):

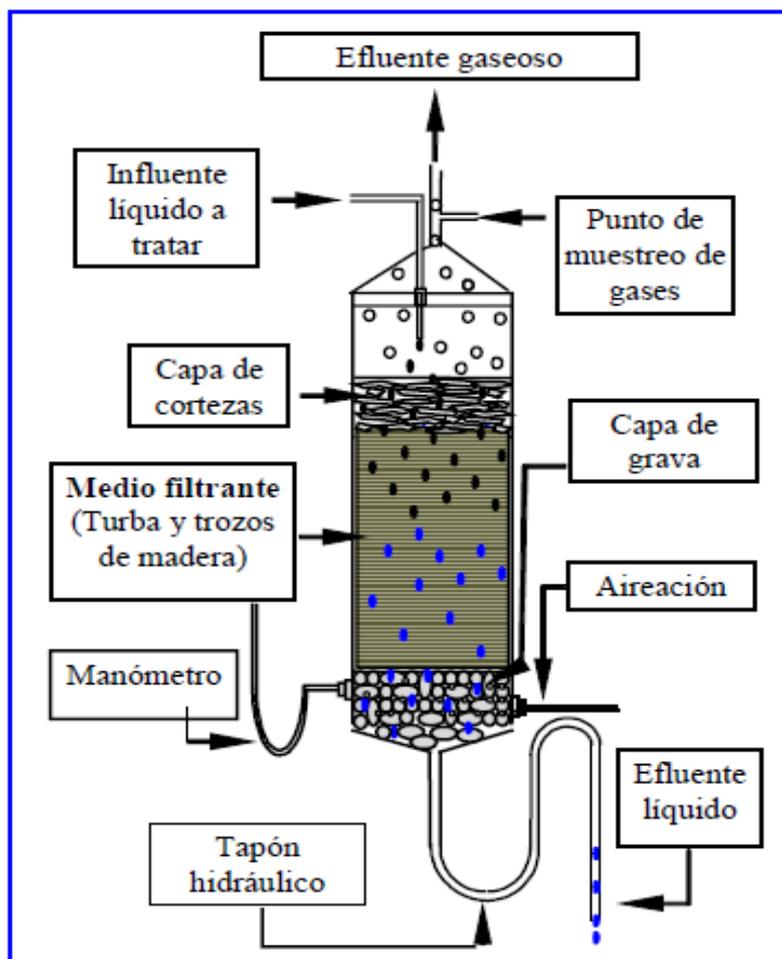
- Porosidad homogénea, entre el 40 y el 80% del total del lecho filtrante.
- Alta capacidad de retención de agua.

CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO A ESCALA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO BIOLÓGICO EMPLEANDO MICROORGANISMOS PARA LA DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES PROCEDENTES DE UNA INDUSTRIA FARMACÉUTICA EN LA CIUDAD DE QUITO

- pH cercano a la neutralidad.
- Alta superficie específica.
- Alta resistencia a la compactación.
- Presencia de nutrientes inorgánicos como N, P, K y S y alta concentración de microorganismos.
- Alto contenido de materia orgánica, entre el 35 y 55 %.

En la Figura 1 se muestra el esquema general de un biofiltro:

Figura 1. Esquema de una columna de biofiltración (Garzón, 2004)



CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO A ESCALA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO BIOLÓGICO EMPLEANDO MICROORGANISMOS PARA LA DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES PROCEDENTES DE UNA INDUSTRIA FARMACÉUTICA EN LA CIUDAD DE QUITO

Los materiales utilizados para la biofiltración pueden ser sólidos porosos orgánicos, sólidos inorgánicos naturales o materiales sintéticos. Dentro de los materiales orgánicos más utilizados se encuentra la turba, compost, viruta de madera, lodos residuales de tratamientos de agua y cortezas de distintas especies vegetales. Los materiales inorgánicos usualmente empleados son el carbón activado y greda volcánica (Etcharen, 2005). En la siguiente tabla se puede observar las características de los diferentes materiales empleados en el ensamblaje de un biofiltro:

Tabla 5. Características de los materiales más usados en biofiltración (Arana, 2010)

Parámetro	Compost	Turba	Suelo	Carbón activado, perlita	Materia l sintético
Densidad poblacional de microorganismos	Alta	Media-baja	Alta	Ninguna	Ninguna
Área superficial	Media	Alta	Baja-media	Alta	Alta
Permeabilidad al aire	Media	Alta	Baja	Media-alta	Muy baja
Contenido de nutrientes	Alta	Media-alta	Alta	Nninguna	Ninguna
Absorción de contaminantes	Media	Media	Media	Alta	Alta
Tiempo de vida útil	2-4 años	2-4 años	>30 años	>5 años	>15 años
Costo	Bajo	Bajo	Muy Bajo	Medio-alto	Muy alto

Otras características estructurales y funcionales que deben considerarse además del material de empaque y el medio filtrante, según Hernández (2010) son:

CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO A ESCALA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO BIOLÓGICO EMPLEANDO MICROORGANISMOS PARA LA DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES PROCEDENTES DE UNA INDUSTRIA FARMACÉUTICA EN LA CIUDAD DE QUITO

- **Distribución del agua:** el agua residual debe distribuirse a través del biofiltro de la manera más uniforme posible, por lo que debe evitarse paradas o estancamientos. Los aspersores pueden ser fijos o móviles. Los aspersores fijos requieren un dispositivo de distribución más complejo, los móviles consisten en brazos giratorios dispuestos radialmente, con boquillas incorporadas y movidos por la carga hidráulica.
- **Ventilación:** la ventilación puede ser natural o forzada. La ventilación natural se produce por la diferencia de temperatura existente entre el aire y el agua que circula por el biofiltro. El filtro biológico estará aireado cuando se produzca una diferencia térmica, entre agua y aire, superior a 2 °C. La ventilación forzada se emplea para evitar la falta de oxigenación en el lecho bacteriano.
- **Recogida de agua:** el agua tratada es recogida por un dispositivo de drenaje ubicado en el fondo de la columna de biofiltración.

En los sistemas de biofiltración se dificulta el control del microambiente en el que se desarrolla la biopelícula, ya que existen diversos factores que afectan el rendimiento de esta tecnología. Las variables que determinan el funcionamiento de un biofiltro inciden directamente en la eficiencia del mismo para eliminar los contaminantes presentes en las aguas residuales tratadas (Bolívar, 2004).

En general estos factores son: características de los contaminantes que deben depurarse, selección adecuada del medio filtrante, temperatura, humedad del lecho, selección de los microorganismos adecuados o correcto desarrollo de la biopelícula, pH y presencia de compuestos tóxicos o inhibitorios de la actividad microbiana (Vellén, 2011). Los factores más importantes se describen a continuación:

Efectos del pH: se puede considerar que para un buen funcionamiento del proceso de biofiltración debe mantenerse un rango de pH entre 6-9, debido a que este rango favorece al

desarrollo de la biopelícula y pueden llevarse a cabo las reacciones metabólicas encargadas de degradar los contaminantes (Arana, 2010). Durante el diseño del biofiltro deben considerarse los descensos de pH y por lo tanto hay que seleccionar un material de relleno que tenga propiedades tampón. La mayoría de materiales no poseen esta característica, por lo que es necesario adicionar materiales capaces de corregir el pH, se suele emplear carbonato de calcio mediante el mezclado del material de relleno con conchas marinas trituradas; otra posible solución para el mantenimiento de los niveles adecuados de pH es el uso de piedras volcánicas, este material resiste las variaciones de pH y no presenta problemas de compactación (Arana, 2010).

Efectos de la temperatura: una vez que la columna de biofiltración se encuentre en funcionamiento, se debe controlar la temperatura con el objetivo de mantenerla en un rango óptimo para el desarrollo de los microorganismos que conforman la biopelícula. Los microorganismos encargados de la biodegradación son de tipo mesófilo, por lo que necesitan temperaturas entre 15-41 °C, en los niveles superiores la velocidad de degradación aumentará y en los inferiores disminuirá. Las temperaturas menores a 15 °C inactivan el metabolismo microbiano, pero dicha actividad se reanuda cuando se establece una temperatura adecuada nuevamente. También se considera que temperaturas que superan los 24-25°C son las más óptimas para llevar a cabo procesos de biodegradación (Arana, 2010)

Microorganismos: como se ha mencionado anteriormente, los microorganismos pueden desarrollarse *in situ* o en condiciones de laboratorio para posteriormente ser inoculados; sin embargo, pese a que se han obtenido buenos resultados empleando inóculos bacterianos para el tratamiento de ciertos contaminantes, la técnica *in situ* presenta ciertas ventajas frente a estos. Los microorganismos desarrollados mediante este proceso son más resistentes, ya que son producto de la selección natural producida por las diferentes

interacciones microbianas que se dan en el interior del biofiltro. También están más aclimatados y son ligeramente más eficientes debido a su especialización bajo las condiciones ambientales del biofiltro (Vellén, 2011).

1.2.3.9. Microorganismos depuradores de aguas residuales y formación de la biopelícula en un sistema de biofiltración

Los microorganismos pueden ser observados únicamente mediante un microscopio, son las formas de vida más antiguas y primitivas conocidas en el planeta, por lo cual siempre han estado en constante interacción con el hombre (Rocha, 2008). Es habitual encontrar microorganismos en el agua ya que los mismos la requieren para su constitución. Algunas especies de microorganismos son patógenas y son las causantes de numerosas enfermedades transmitidas por el agua, sin embargo, la mayoría realizan procesos que sustentan la vida y actualmente brindan importantes beneficios en diferentes actividades antropogénicas (Rocha, 2008).

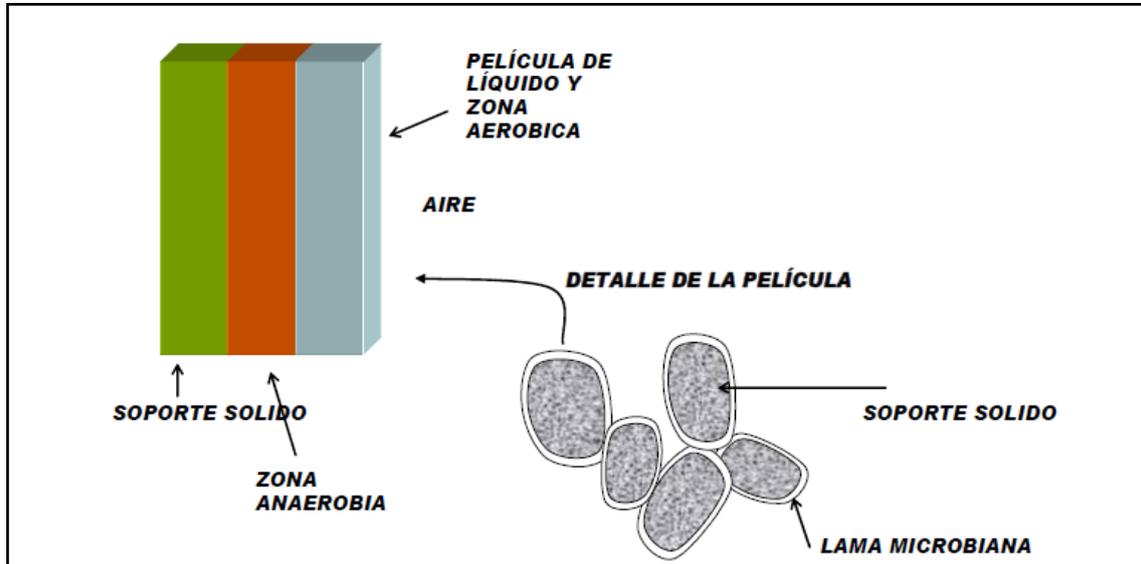
Los microorganismos responsables de la depuración de aguas residuales pueden emplearse en la mejora de un sistema de tratamiento. La importancia de estos microorganismos radica en que mediante la degradación permiten mineralizar los contaminantes orgánicos, utilizan el nitrógeno y el fósforo como sus nutrientes principales y son los responsables de la degradación y detoxificación de muchos contaminantes xenobióticos que se encuentran en las aguas residuales (Arnáiz et al. 2000). El tratamiento de aguas residuales implica distintas operaciones unitarias, dentro de las cuales los procesos biológicos cumplen el rol de mayor importancia, y por lo tanto se vuelve primordial comprender los mecanismos empleados por los microorganismos para la depuración de compuestos contaminantes.

La capacidad de los microorganismos de emplear la materia orgánica como sustrato para realizar sus funciones vitales es aprovechada por el hombre para la depuración de aguas residuales. En el tratamiento de aguas contaminadas los microorganismos se encargan de la remoción de la demanda bioquímica de oxígeno (DQO), la coagulación de sólidos coloidales y la estabilización de materia orgánica (Rocha, 2008). Estos organismos convierten una parte del material orgánico en nuevos tejidos y la otra parte es emitida en forma de gases. Otros organismos como los insectos, larvas y gusanos también intervienen en la degradación de la materia orgánica aunque de forma ineficiente, los residuos dejados por estos son eliminados por la actividad microbiana con una baja velocidad de digestión pero con alta eficiencia (Rocha, 2008). Durante la oxidación bacteriana la conversión de la materia orgánica en tejidos celulares nuevos y emisiones gaseosas se realiza mediante la digestión aeróbica, pero en ausencia de sustrato, el tejido celular se consume de manera endógena para llevar a cabo la respiración y obtener energía para las funciones vitales de la célula, adicionalmente el consumo de tejido celular también produce gases terminales (Rocha, 2008).

En un sistema de biofiltración se pone en contacto las aguas residuales a tratar con la biopelícula formada por una población heterogénea de microorganismos, las películas biológicas se forman sobre cualquier superficie donde se tenga los nutrientes y las condiciones ambientales necesarias (Rocha, 2008). En la siguiente figura se representa la formación de la biopelícula sobre el medio de soporte de una columna de biofiltración.

CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO A ESCALA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO BIOLÓGICO EMPLEANDO MICROORGANISMOS PARA LA DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES PROCEDENTES DE UNA INDUSTRIA FARMACÉUTICA EN LA CIUDAD DE QUITO

Figura 2. Formación de película microbiana aerobia y anaerobia en el medio de soporte de un biofiltro (Rocha, 2008)



Las condiciones de operación del sistema dictaminan la diversidad de microorganismos que forman la biopelícula, particularmente la carga hidráulica y la diversidad de nutrientes presentes en las aguas residuales, pero se debe destacar que las poblaciones microbianas que conforman la biopelícula de un sistema de biofiltración son ecológicamente más complejas que las existentes en los procesos de lodos activados (Rocha, 2008). El equilibrio ecológico de las especies de microorganismos presentes también varía por las condiciones ambientales, especialmente si la columna de biofiltración se encuentra ubicada al aire libre. Las interacciones que se producen a lo largo de la cadena alimenticia de este sistema afectan significativamente el funcionamiento y la eficiencia del mismo (Rocha, 2008).

El control de los parámetros de funcionamiento del biofiltro favorece al mantenimiento y la proliferación de los microorganismos, especialmente bacterias y hongos, existe una diversidad de especies formando la lama microbiana de un biofiltro. La estructura

CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO A ESCALA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO BIOLÓGICO EMPLEANDO MICROORGANISMOS PARA LA DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES PROCEDENTES DE UNA INDUSTRIA FARMACÉUTICA EN LA CIUDAD DE QUITO

de la comunidad microbiana es particular para cada sistema de biofiltración (Arana, 2010).

Sin embargo, en los sistemas de tratamiento aerobio de aguas residuales se pueden destacar los géneros *Bacillus*, *Alcaligenes*, *Moraxella*, *Flavobacterium*, *Acinetobacter*, *Pseudomonas*, *Arthrobacter*; *Aeromonas*, *Klebsiella*, *Haliscomenobacter* y *Gordona* (Arnáiz et al. 2000).

1.2.4. Hipótesis

El tratamiento biológico mediante biofiltración es eficiente en la depuración de aguas residuales procedentes de una industria farmacéutica, permitiendo su reutilización en riego de jardines.

1.2.5. Identificación y caracterización de variables

Tabla 6. Variables de la Investigación.

Variable Dependiente	<p>Parámetros Físico-químicos: pH, temperatura, color, sólidos en suspensión, sólidos sedimentables, DQO, DBO, aceites y grasas, arsénico total, fósforo total y nitrógeno total.</p> <p>Parámetros Biológicos:</p> <p><u>Puebas Bioquímicas:</u> Prueba de la catalasa.</p> <p><u>Caracterización morfológica de la población:</u> Tinción Gram y observación al microscopio.</p>
Variable Independiente	Tratamiento biológico

CAPÍTULO II

MÉTODO

2.1. NIVEL DE ESTUDIO

Experimental.

Se buscará experimentar con un tratamiento biológico (biofiltración) mediante la construcción de un modelo de planta de tratamiento biológico a escala de laboratorio, de esta manera se generaran los datos necesarios para evaluar la eficiencia de dicho tratamiento en la depuración de las aguas residuales procedentes de una planta farmacéutica ubicada en la ciudad de Quito.

2.2. MODALIDAD DE INVESTIGACION

De campo.

Se tomarán muestras de las aguas residuales producidas por las diferentes actividades que se llevan a cabo en una planta farmacéutica, esto se realizará durante 30 días laborables.

Proyecto Especial.

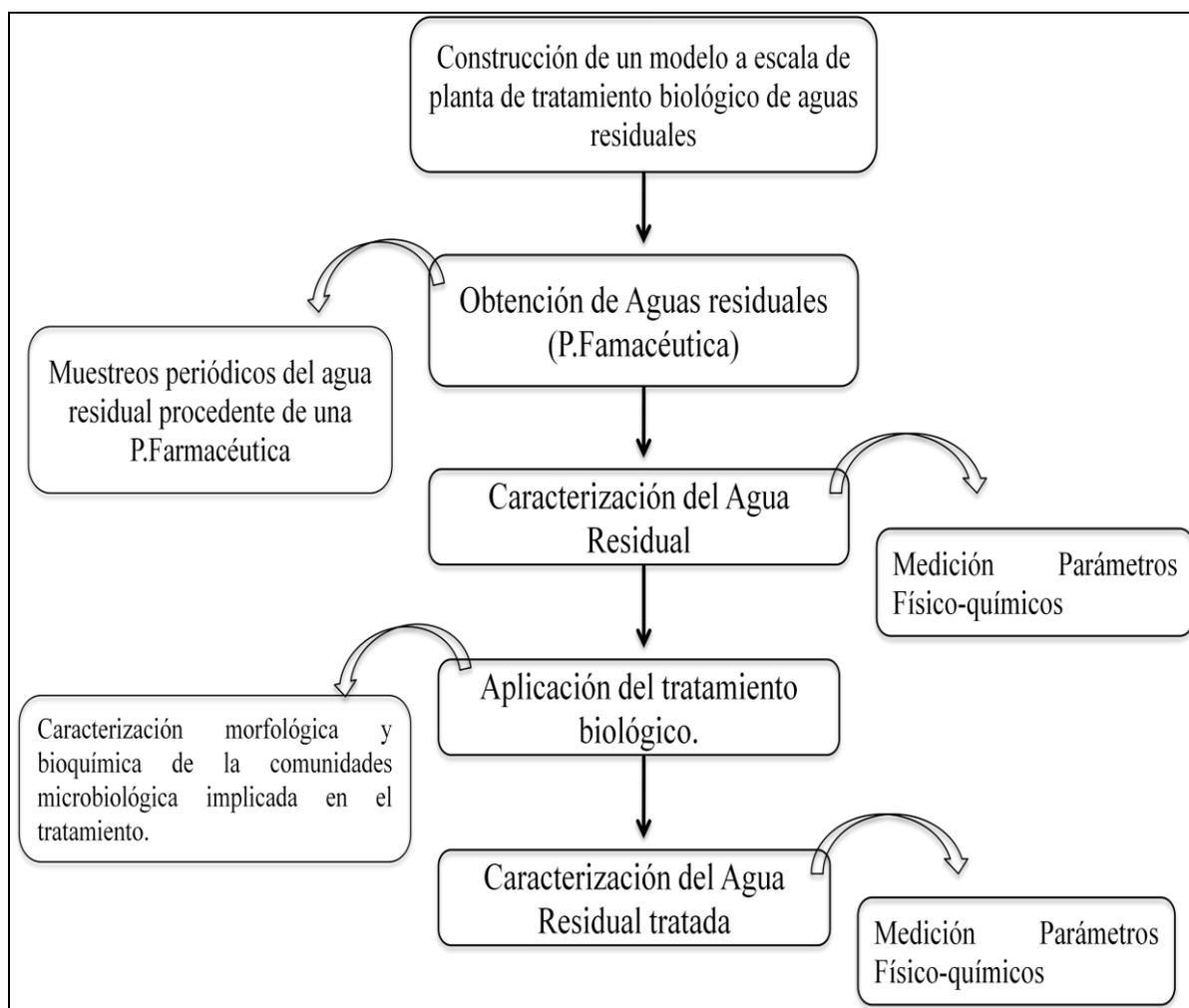
Se construirá una planta de tratamiento biológico a escala de laboratorio para evaluar la eficiencia de la biofiltración en el tratamiento de aguas residuales procedentes de una planta farmacéutica. De esta manera se planteará una opción eficiente y económicamente rentable que permita la reutilización de aguas residuales.

2.3. MÉTODO

Hipotético-Deductivo.

Mediante la experimentación con un tratamiento biológico se procederá a la evaluación de la eficiencia del mismo, caracterizando físico-químicamente las aguas residuales procedentes de una industria farmacéutica y empleando los resultados obtenidos para el establecimiento de la materia orgánica removida, la tasa de remoción superficial y la tasa de remoción volumétrica.

Figura 3. Diagrama general de la metodología a emplearse.



2.4. POBLACIÓN Y MUESTRA

Población: Aguas residuales procedentes de una industria farmacéutica ubicada en la ciudad de Quito.

Muestra: Se obtendrá mediante un sistema de muestreo a criterio, durante 30 días se tomará 1L/día de las aguas residuales procedentes de los tocadores, duchas, planta de producción, comedor y laboratorios de la planta farmacéutica. Posteriormente se homogenizaran las muestras para obtener una muestra compuesta en función del tiempo, que sea suficientemente representativa.

2.5. SELECCIÓN DE INSTRUMENTOS DE INVESTIGACION

2.5.1. Diseño y construcción de un modelo de planta de tratamiento biológico a escala de laboratorio

La planta de tratamiento a escala de laboratorio consta de tres partes principales: un tanque de homogenización, un tanque de biofiltración y finalmente uno de almacenamiento. La muestra es homogenizada en el primer tanque, el cual tiene una capacidad de hasta 30 L. Luego esta pasa al biofiltro mediante un sistema de aspersion estático, el biofiltro mide 1,50 m de altura y se le suministró oxígeno a través de dos entradas que están situadas en la parte inferior del mismo. Una vez que la muestra se ha tratado en el biofiltro se abre la válvula de paso y el líquido es drenado hacia el tanque de almacenamiento. El tanque de almacenamiento cuenta con una capacidad de 20 L. Para la construcción del biofiltro se emplearon cuatro tanques de plástico, un embudo, el cual fue colocado en la parte inferior para la recolección de la muestra tratada. Como medio filtrante se utilizó turba y trozos de madera, y como empaque se empleó roca volcánica. Todo el sistema se encontraba conectado mediante tubería PVC de $\frac{3}{4}$ pulgadas y se controló el paso de la muestra de una etapa a otra mediante válvulas de bola.

2.5.2. Análisis de Parámetros Físico-químicos:

CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO A ESCALA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO BIOLÓGICO EMPLEANDO MICROORGANISMOS PARA LA DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES PROCEDENTES DE UNA INDUSTRIA FARMACÉUTICA EN LA CIUDAD DE QUITO

Una vez realizada la homogenización de las muestras, se llevaron a cabo los análisis físico-químicos iniciales. Los mismos parámetros fueron evaluados una vez finalizado el tratamiento biológico. La muestra obtenida antes y después del tratamiento se analizó en el Laboratorio Analítico Ambiental de aguas-efluentes industriales (LASA), acreditado por el Organismo de Acreditación Ecuatoriana (OAE). En la Tabla 7 se presentan los parámetros analizados y los métodos empleados.

Tabla 7. Parámetros Físico-químicos

Ítem	Parámetro	Unidades	Método de Ensayo
1	Temperatura	°C	APHA 2550 B*
2	Color	U. de color	APHA 2120 B*
3	pH	-/-	PEE-LASA-FQ-03 APHA 4500 H+ B
4	Sólidos en suspensión	mg/L	PEE-LASA-FQ-05 APHA 2540-D
5	Sólidos sedimentables	ml/L	PEE-LASA-FQ-48 APHA 2540-F
6	D.Q.O Demanda Química de oxígeno	mg/L	PEE-LASA-FQ-04 APHA 5220-C
7	D.B.O ₅ Demanda Bioquímica de oxígeno	mg/L	PEE-LASA-FQ-07* APHA 5210 B
8	Aceites y grasas	mg/L	PEE-LASA-FQ-15 APHA 5520-B *
9	Arsénico total	mg/L	PEE-LASA-FQ-20c APHA 3114 C
10	Fósforo total	mg/L	APHA 4500 P C *
11	Nitrógeno Total	mg/L	PEE-LASA-FQ-06 APHA 4500 C

Los ensayos marcados con * están fuera del alcance de acreditación del Organismo de Acreditación Ecuatoriano (OAE)

2.5.3. Caracterización morfológica y bioquímica

La caracterización morfológica se realizó mediante tinción Gram y observación al microscopio, para la caracterización bioquímica se empleo la prueba de la catalasa. Con esto se pretende mencionar las características básicas de la comunidad microbiana establecida en el biofiltro.

Antes de iniciar la caracterización morfológica y bioquímica de la comunidad microbiana encargada de la biodegradación de los contaminantes, se confirmó el desarrollo de la biopelícula al observar la formación de lama sobre el medio filtrante y el empaque del biofiltro. Adicionalmente se realizaron ensayos de turbidez durante dos semanas. Los análisis bioquímicos y morfológicos se realizaron en el laboratorio de microbiología de la Universidad Internacional SEK, basándose en el guión de prácticas de microbiología de la Escuela Superior de Ciencias Experimentales y Tecnología (ESCET).

○ **Tinción Gram:**

Se prepararon varios frotis colocando en un portaobjeto la muestra de lama colectada por hisopado, se esperó a que la muestra seque y se fijó mediante calor (pasando tres veces el portaobjetos por la llama durante unos segundos), los frotis fueron teñidos con una solución de cristal violeta (1%) durante un minuto. Posteriormente, se eliminó el exceso del colorante con agua, se cubrió la placa con lugol (un minuto) y se retiro el exceso con agua; como decolorante se empleó etanol 96° hasta que la preparación dejó de perder color (aproximadamente 30 segundos). Se lavó la placa con abundante agua y se tiñó con safranina

CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO A ESCALA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO BIOLÓGICO EMPLEANDO MICROORGANISMOS PARA LA DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES PROCEDENTES DE UNA INDUSTRIA FARMACÉUTICA EN LA CIUDAD DE QUITO

(un minuto). De igual manera se retiró el exceso del colorante de contraste empleando agua.

Finalmente se utilizó aceite de inmersión y se observó al microscopio.

○ **Observación al microscopio**

Las placas con tinción Gram se examinaron al microscopio para identificar la morfología de los distintos tipos microbianos presentes en las muestras. Se inició la observación enfocando con el lente de menor aumento, posteriormente se paso a los lentes de mayor aumento 40x y 100x. Las imágenes presentadas en los resultados se realizaron con el objetivo 100x.

○ **Prueba de la catalasa:**

Se colocó una gota de peróxido de hidrógeno (3%) sobre las muestras analizadas. Se reportaron los resultados dependiendo del aparecimiento o no de burbujas. La rápida aparición y producción sostenida de burbujas de gas o efervescencia indica una prueba positiva.

2.5.4. Determinación de la eficiencia del tratamiento biológico

Basándose en los parámetros físico-químicos iniciales y finales se determinó la eficiencia del tratamiento biológico empleando las siguientes ecuaciones, obtenidas del estudio de Díaz & Giraldo (2005):

Materia Orgánica removida (M):

$$Ec. No. 1) M_{DQO} = (DQO_i - DQO_e) \times V_{ARD}$$

Donde:

M_{DQO} : Materia orgánica removida como D.Q.O (mg).

DQO_i : Demanda Química de Oxígeno en el agua residual del influente (mg/L).

DQO_e : Demanda Química de Oxígeno en el agua residual del efluente (mg/L).

CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO A ESCALA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO BIOLÓGICO EMPLEANDO MICROORGANISMOS PARA LA DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES PROCEDENTES DE UNA INDUSTRIA FARMACÉUTICA EN LA CIUDAD DE QUITO

V_{ARD} : Volumen de agua residual a tratar (L).

$$Ec. No. 2) M_{SST} = (SST_i - SST_e) \times V_{ARD}$$

Donde:

M_{SST} : Materia orgánica removida como Sólidos Suspendidos Totales (mg).

SST_i : Sólidos Suspendidos Totales en el agua residual del influente (mg/L).

SST_e : Sólidos Suspendidos Totales en el agua residual del efluente (mg/L).

V_{ARD} : Volumen de agua residual a tratar (L).

Tasa de Remoción Superficial (TRS):

$$Ec. No. 3) TRS_{DQO} = \frac{(DQO_i - DQO_e) \times V_{ARD}}{A_{biofiltro} \times TRH} = \frac{M_{DQO}}{A_{biofiltro} \times TRH}$$

Donde:

TRS: Tasa de Remoción Superficial en función del D.Q.O. ($\text{mg}/\text{cm}^2 \cdot \text{minuto}$).

TRH: Tiempo de Remoción Hidráulico (minutos).

$A_{biofiltro}$: Área del biofiltro (cm^2).

$$Ec. No. 4) TRS_{SST} = \frac{(SST_i - SST_e) \times V_{ARD}}{A_{biofiltro} \times TRH} = \frac{M_{SST}}{A_{biofiltro} \times TRH}$$

Donde:

TRS: Tasa de Remoción Superficial en función de los Sólidos Suspendidos Totales. ($\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{minuto}$).

Tasa de Remoción Volumétrica (TRV):

$$Ec. No. 5) TRV_{DQO} = \frac{(DQO_i - DQO_e) \times V_{ARD}}{V_{biofiltro} \times TRH} = \frac{M_{DQO}}{V_{biofiltro} \times TRH}$$

CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO A ESCALA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO BIOLÓGICO EMPLEANDO MICROORGANISMOS PARA LA DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES PROCEDENTES DE UNA INDUSTRIA FARMACÉUTICA EN LA CIUDAD DE QUITO

Donde:

TRV_{DQO} : Tasa de Remoción Volumétrica en función del D.Q.O.(mg/mL.minutos).

$V_{Biofiltro}$: Volumen total del biofiltro (mL).

$$Ec.No.6) TRV_{SST} = \frac{(SST_i - SST_e) \times V_{ARD}}{V_{biofiltro} \times TRH} = \frac{M_{SST}}{V_{biofiltro} \times TRH}$$

Donde:

TRV_{SST} : Tasa de Remoción Volumétrica en función de los Sólidos Suspendedos Totales (mg/mL.minutos).

También se llevaron a cabo análisis de cromatografía líquida (HPLC), en un laboratorio especializado perteneciente a una planta farmacéutica, con el objetivo de comprobar la degradación de los fármacos presentes en el agua residual. Se utilizó naproxeno sódico por ser uno de los medicamentos hallados con mayor frecuencia en este tipo de aguas residuales. La metodología analítica está basada en la Farmacopea Europea vigente (EDQM, 2013).

Se empleó un cromatógrafo líquido de alta resolución (HPLC), marca (WATERS, modelo 2695) y un detector de fotodiodos PDA (WATERS), modelo 2996. Las condiciones cromatográficas fueron: Columna Lichrospher 100 RP-8, 125 x 4,0 mm (5 μ m), temperatura de la columna 30 °C, temperatura de las muestras 20 °C, detector ultravioleta a 240 nanómetros, fase móvil Buffer pH 4,0/Acetonitrilo (40:60), flujo de 1,0 ml/min, volumen de inyección 20 μ L, modo de elución isocrático.

Preparación de reactivos: Buffer pH 4,0: se disolvieron 3,4 g. de fosfato monobásico de potasio (KH₂PO₄) en 500,0 mL de agua. Posteriormente, se agregaron 0,5 mL de

CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO A ESCALA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO BIOLÓGICO EMPLEANDO MICROORGANISMOS PARA LA DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES PROCEDENTES DE UNA INDUSTRIA FARMACÉUTICA EN LA CIUDAD DE QUITO

trietilamina y se ajustó el pH a 4,0 con ácido fosfórico (20%). Finalmente, se filtró a través de un filtro de membrana Millipore HLVPO4700 y se desgasificó.

Preparación de la solución estándar: 55,0 mg de Naproxeno Sódico se disolvieron en 30 mL de metanol. Se agitaron en un baño de ultrasonido durante 7 minutos. Después se dejó enfriar y se aforó con metanol. A continuación, se tomó una alícuota de 1,0 mL y se llevó a un balón de 20,0 mL, aforando con fase móvil. La concentración final del estándar fue de 0,055 mg/mL.

Preparación de la solución muestra: las muestras analizadas fueron centrifugadas a 3500 rpm durante 10 minutos para decantar los sólidos suspendidos presentes en la muestra. Posteriormente, las muestras fueron filtradas a través de papel filtro de celulosa (0,45 μ) y finalmente colocadas en un viales debidamente rotulados.

Identificación del analito (naproxeno sódico): tomando en cuenta que las muestras de agua analizadas contienen varias matrices, se realizaron pruebas para asegurar que las mismas no interfieran con el pico del naproxeno sódico, lo cual podría aumentar la concentración de este principio activo. Dichas pruebas consistieron en comparar el pico obtenido en la muestra analizada con el pico proyectado por una solución estándar de naproxeno sódico, con lo que se descartó cualquier inferencia en el pico del analito.

Cuantificación del analito: el software del equipo HPLC (WATERS, modelo 2695) nos brinda un cálculo automático basado en la siguiente fórmula:

$$Ec. No. 7) mg NaproxenoSódico = \frac{AmxCestx \left(\% \frac{P}{100} \right)}{AestxCm}$$

En donde:

Am: Área del pico de la muestra

Cest: Concentración del estándar corregida con pureza y humedad

Aest: Área del estándar

Cm: Concentración de la muestra

2.6. VALIDEZ Y CONFIABILIDAD DE LOS INSTRUMENTOS

Se utilizó una metodología de muestreo de aguas residuales que garantizara la obtención de una muestra representativa del caudal global generado por la planta farmacéutica y no solo del caudal generado en un determinado momento. Esto se logró al muestrear durante un periodo de 30 días laborables de la empresa, en los que se verificó la fabricación y el análisis de diversos productos farmacéuticos, los cuales son los contaminantes de principal interés en este tipo de aguas residuales. La muestra compuesta final se consideró representativa cuando contenía varias muestras simples combinadas. De igual manera, con el fin de lograr una adecuada homogenización de las aguas residuales, el punto de muestreo seleccionado fue un sitio con flujo turbulento al que llegan las diferentes corrientes de aguas residuales generadas en la planta.

Los recipientes de muestreo se rotularon con la fecha del muestreo. Las muestras colectadas fueron almacenadas apropiadamente bajo refrigeración (4 °C).

Los análisis físico-químicos realizados fueron seleccionados basándose en la resolución N° 0002-DMA-2008 del Distrito Metropolitano de Quito (DMQ), anexo D (Guía de Parámetros a Evaluar por Actividad Industrial, Comercial y Servicios).

El laboratorio donde se realizaron los análisis físico-químicos iniciales y finales de las aguas residuales farmacéuticas cumple con la norma ISO/IEC 17025 y se encuentra acreditado por el OAE, con la acreditación N° OAE LE 1C 06-002. Sus métodos se encuentran validados y los equipos cuentan con la certificación respectiva.

La metodología del análisis HPLC está basada en la monografía original de *Syntex*, M/QA *file* # 169. Método #DAM 360, perteneciente a la farmacopea europea actual. De igual manera el método se encuentra validado y los equipos utilizados calibrados.

Adicionalmente, se realizaron pruebas piloto para verificar el adecuado funcionamiento del modelo de planta de tratamiento biológico a escala de laboratorio, con el fin de evitar fallas en el momento de su funcionamiento con las muestras a tratar.

2.7. OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES

2.7.1. Variables Dependientes

Parámetros Físico-químicos

- **pH:** el pH es una medida de la concentración de iones hidrógeno, mide la naturaleza ácida o alcalina de la solución acuosa que puede afectar a los usos específicos del agua. La mayoría de aguas naturales tienen un pH entre 6 y 8. El intervalo adecuado de pH para la existencia de la mayor parte de la vida biológica está entre 5 y 9. Las aguas residuales con valores de pH menores a 5 y superiores a 9 son de difícil tratamiento mediante procesos biológicos. El pH del agua tratada debe ser ajustado antes de verterlo a la fuente receptora para que no altere su hábitat (Tchobanoglous & Crites, 2000).

El valor de este parámetro es importante para determinar la calidad del agua residual, debido a que el rango en el cual se desarrollan los procesos biológicos corresponde a un intervalo estrecho y crítico, no existiendo vida fuera del mismo por desnaturalización de las proteínas de los seres vivos. Es de señalar que por variación del pH, el agua puede convertirse en corrosiva respecto a los metales, o bien compuestos estables presentes en la misma pueden convertirse en tóxicos. Las aguas

residuales urbanas son ligeramente alcalinas. En las industriales, dependerá de los productos fabricados y materias primas utilizadas (Tchobanoglous & Crites, 2000).

- **Temperatura:** es un parámetro que afecta directamente las relaciones bioquímicas y las velocidades de reacción en los procesos de tratamiento. Los procesos de digestión aerobia y nitrificación se detienen cuando se alcanza los 250°C. La temperatura del agua residual es generalmente mayor que la del agua de abastecimiento por la incorporación de agua caliente de uso doméstico e industrial (Tchobanoglous & Crites, 2000).
- **Color:** el color en las aguas residuales es causado por sólidos suspendidos, material coloidal y sustancias en solución. El color es utilizado para estimar la condición general del agua residual. El color se determina en una muestra filtrada y se compara con el color producido por soluciones de diferente concentración de cloroplatinato de potasio, una unidad de color corresponde al producido por 1mg/L de platino. Si el color es café claro, el agua residual lleva aproximadamente seis horas después de su descarga. Un color gris claro es característico de aguas que han sufrido algún grado de descomposición o que han permanecido un tiempo corto en el sistema de recolección. Si el color es gris oscuro o negro, se trata en general de aguas sépticas que han sufrido una fuerte descomposición anaeróbica (Tchobanoglous & Crites, 2000).
- **Sólidos en suspensión (SS):** corresponden a los sólidos presentes en un agua residual, exceptuados los solubles y los sólidos en fino estado coloidal. Se considera que los sólidos en suspensión son los que tienen partículas superiores a un micrómetro y que son retenidos mediante una filtración en el análisis de laboratorio. Pueden ser:
 - Sedimentables (SSs), que por su peso pueden sedimentar fácilmente en un determinado período de tiempo.

CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO A ESCALA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO BIOLÓGICO EMPLEANDO MICROORGANISMOS PARA LA DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES PROCEDENTES DE UNA INDUSTRIA FARMACÉUTICA EN LA CIUDAD DE QUITO

- No sedimentables (SSn), que no sedimentan tan fácilmente por su peso específico próximo al del líquido o por encontrarse en estado coloidal (Tchobanoglous & Crites, 2000).
- **Sólidos sedimentables:** los sólidos sedimentables son sólidos de mayor densidad que el agua, se encuentran dispersos debido a fuerzas de arrastre o turbulencias. Cuando estas fuerzas y velocidades cesan y el agua alcanza un estado de reposo, precipitan en el fondo. Son los causantes de la turbidez debido a que producen dispersión de la luz que atraviesa la muestra de agua. Suelen eliminarse fácilmente por cualquier método de filtración (Tchobanoglous & Crites, 2000).
- **DQO:** es usada para medir el material orgánico susceptible de ser oxidado por una sustancia química. La principal ventaja de esta prueba es que se puede realizar en el mismo día, comparada con la DBO (Tchobanoglous & Crites, 2000).
- **DBO:** Se define como la cantidad de oxígeno requerido por los microorganismos presentes en el agua para oxidar la materia orgánica biodegradable presente en la misma. Es el método usado con mayor frecuencia en el tratamiento de aguas residuales. Si existe suficiente oxígeno disponible, la descomposición biológica aerobia de un desecho orgánico continuara hasta que el desecho se haya consumido. Se realiza mediante una prueba estándar, colocando una muestra de agua residual en una botella de DBO, se completa el volumen con agua saturada con oxígeno y con los nutrientes requeridos para crecimiento biológico. Antes de tapar la botella se mide la concentración de oxígeno. Después de incubar la botella cinco días a 20°C, se mide la concentración de oxígeno disuelto. La DBO de la muestra es la diferencia entre los dos valores obtenidos (Tchobanoglous & Crites, 2000).

- **Aceites y grasas:** la expresión grasas y aceites es muy usada para referirse a aceites, grasas, ceras y otros constituyentes similares encontrados en las aguas residuales. El contenido de grasas y aceites en aguas residuales se determina por extracción de la muestra de residuo con triclorotrifluoroetano (las grasas y aceites son solubles en esta sustancia). Debido a sus propiedades, la presencia de grasas y aceites en aguas residuales pueden causar muchos problemas en tanques sépticos, en sistemas de recolección y en el tratamiento de aguas residuales (Tchobanoglous & Crites, 2000).
- **Arsénico total:** puede estar presente en el agua en forma natural. Es un elemento muy tóxico para el hombre. Se encuentra en forma trivalente o pentavalente, tanto en compuestos inorgánicos como orgánicos. En cuanto a las especies oxidadas, generalmente las sales inorgánicas de As^{3+} son más tóxicas que las de As^{5+} y la solubilidad de los compuestos de arsénico inorgánico está relacionada con su toxicidad; todos los compuestos solubles son tóxicos. Se sospecha que el arsénico tiene efectos cancerígenos por la correlación encontrada entre la incidencia de hiperquetosis y cáncer de piel y la ingestión de aguas con más de 0,3 mg/L de arsénico (Tchobanoglous & Crites, 2000).
- **Nitrógeno total:** Debido a que el nitrógeno es un componente esencial de las proteínas, es necesario conocer la cantidad de este nutriente en el momento de evaluar la tratabilidad del agua residual mediante métodos biológicos. El contenido total de nitrógeno está compuesto por nitrógeno amoniacal, nitritos, nitratos y nitrógeno orgánico. El nitrógeno amoniacal puede existir en forma de ión amonio o en forma de amoniaco, dependiendo del pH de la solución. En aguas residuales con un bajo contenido de sólidos suspendidos, el nitrógeno amoniacal puede medirse por métodos colorimétricos al adicionarse el reactivo de Nessler, por titulación o con electrodos de

ión específico. El nitrógeno en forma de nitrito se determina por métodos colorimétricos, es bastante inestable y fácilmente oxidable a nitrato; a pesar de encontrarse en concentraciones bajas, los nitritos son de gran importancia en estudios de aguas residuales debido a su elevada toxicidad. El nitrógeno en forma de nitrato es la especie química más oxidada que se encuentra en las aguas residuales, se determina por métodos colorimétricos generalmente. El nitrógeno orgánico se determina por el método de Kjeldahl, en el cual la muestra líquida es hervida para eliminar el amoníaco y posteriormente se realiza una digestión por ebullición en ácido sulfúrico. El nitrógeno presente se convierte en amoníaco y posteriormente es destilado y medido por Nesslerización (Romero, 2004).

- **Fósforo total:** El fósforo es un nutriente esencial para en el desarrollo de organismos, se debe controlar su concentración en los cuerpos de agua para evitar procesos de eutrofización. Las formas más frecuentes de fósforo incluyen ortofosfatos, polifosfatos y fósforo orgánico. Analíticamente los ortofosfatos se pueden determinar por métodos gravimétricos, volumétricos y físico-químicos, los polifosfatos y el fósforo orgánico deben convertirse a ortofosfatos primeramente, para poder ser analizados (Romero, 2004).

Parámetros Biológicos

Pruebas Bioquímicas:

- **Prueba de la catalasa:** En los ambientes acuosos, que contienen oxígeno disuelto, como el citoplasma de las células, aparecen formas tóxicas derivadas del oxígeno. El peróxido de hidrógeno se forma como uno de los productos finales del metabolismo oxidativo aeróbico de los hidratos de carbono. Las bacterias que aparecen en medios aerobios necesitan un equipo enzimático capaz de neutralizar estas formas tóxicas,

entre estas enzimas se encuentra la catalasa, que convierte el peróxido de hidrógeno en agua y oxígeno molecular. La prueba de la catalasa es positiva cuando una bacteria con actividad catalasa entra en contacto con peróxido de hidrogeno al 3% y se producen burbujas de oxígeno. La mayoría de las bacterias aerobias y anaerobias facultativas poseen actividad catalasa (ESCET, 2001).

Caracterización Morfológica:

- **Tinción de Gram:** es uno de los primeros pasos que se realiza para cualquier identificación bacteriana. La técnica es capaz de diferenciar dos grandes grupos de eubacterias: Gram positivas y Gram negativas. El fundamento radica en la diferente estructura de la pared celular de ambos grupos: las bacterias Gram positivas tienen una gruesa capa de peptidoglicano en su pared, mientras que las bacterias Gram negativas tienen una capa de peptidoglicano más fina y una capa lipopolisacáridica externa (ESCET, 2001).
- **Observación al microscopio:** Aunque existen miles de especies de bacterias diferentes, los organismos individuales presentan una de las tres formas generales siguientes:
 - elipsoidal o esférica.
 - cilíndrica o en forma de bastón.
 - espiral o helicoidal.

Las bacterias esféricas o elipsoidales se denominan Cocos. Muchas bacterias con esta forma presentan modelos de agrupación que derivan de los diversos planos de división celular. Las células bacterianas cilíndricas se denominan Bacilos o Bastones y también presentan otros modelos de agrupación. Las bacterias helicoidales se presentan en general como células individuales, independientes; pero las células de las distintas

especies poseen notables diferencias de longitud, número, amplitud de las espiras y rigidez de la pared (ESCET, 2001).

2.7.2. Variable Independiente:

Tratamiento Biológico

El tratamiento biológico a emplearse es la biofiltración sobre cama orgánica, utilizando como medio filtrante turba y trozos de madera, y como empaque roca volcánica. De esta manera, se propiciara la formación de una biopelícula microbiana, encargada de la depuración de las aguas residuales a tratar. La eficiencia del tratamiento empleado se evaluará determinando la materia orgánica removida (M), la tasa de remoción superficial (TRS) y la tasa de remoción hidráulica (TRV), para el establecimiento de las mismas se emplearan los datos de los análisis físico-químicos realizados antes y después del tratamiento biológico aplicado.

2.8. PROCESAMIENTO DE DATOS

Los datos se han procesado mediante el paquete Microsoft Office (Word y Excel), los mismos son presentados en tablas y figuras para facilitar su interpretación. También se presentan las imágenes correspondientes a las construcción del la planta de tratamiento biológico y a las pruebas morfológicas realizadas.

CAPÍTULO III

RESULTADOS

3.1. LEVANTAMIENTO DE DATOS

Muestreo: para obtener una muestra compuesta representativa de las aguas residuales generadas en la planta farmacéutica se tomaron muestras simples (1L/día) durante 30 días laborables. El punto de muestreo fue el sitio al que llegan las diferentes corrientes de aguas residuales procedentes de los tocadores, duchas, planta de producción, comedor y laboratorios de la planta farmacéutica. Las muestras fueron homogenizadas y almacenadas bajo refrigeración para los análisis posteriores.

Análisis Físico-químicos: la información generada durante los análisis físico-químicos iniciales y finales fueron dispuestos siguiendo el siguiente esquema:

Tabla 8. Hoja de datos parámetros físico-químicos

Parámetros	Unidades	Muestra	Límites máximos permisibles Junio del 2010	Cumplimiento
pH				
Sólidos en suspensión				
Sólidos sedimentables				
Fósforo total				
Nitrógeno total				
Arsénico				
Temperatura				
Color				
Aceites y Grasas				
DBO ₅				
DQO				

CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO A ESCALA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO BIOLÓGICO EMPLEANDO MICROORGANISMOS PARA LA DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES PROCEDENTES DE UNA INDUSTRIA FARMACÉUTICA EN LA CIUDAD DE QUITO

Desarrollo de la biopelícula: para verificar el desarrollo de la biopelícula se tomaron datos de turbidez durante dos semanas. Se registró la fecha de la muestra tomada y se realizaron cuatro lecturas con las que se calculó un promedio y la desviación estándar, como se ejemplifica a continuación:

Tabla 9. Hoja de datos para turbidez

Resultados Medición de Turbidez					
Fecha	Lectura				Promedio \pm Desv. Estándar
	1	2	3	4	

Pruebas bioquímicas y morfológicas: los datos generados en las pruebas bioquímicas y morfológicas realizadas a varias muestras escogidas al azar, se registraron empleando el siguiente formato:

Tabla 10. Hoja de datos- pruebas bioquímicas y morfológicas

Nº de Muestra	Tinción Gram	Prueba de la Catalasa	Descripción Morfológica

3.2. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación se detallan los resultados obtenidos en la presente disertación. Primero, se presentaran los valores iniciales de los parámetros físico-químicos del influente a tratar, luego se describirá la construcción de una planta de tratamiento biológico a escala de laboratorio. Posteriormente, se presentará la comprobación del desarrollo de la biopelícula y

la caracterización morfológica y bioquímica de la comunidad microbiana que la conforma. Y por último, se presentan los valores de los parámetros físico-químicos del efluente tratado y la evaluación de la eficiencia del tratamiento biológico seleccionado (biofiltración).

3.2.1. Resultados de los parámetros físico-químicos iniciales de influente a tratar

Una vez finalizado el muestreo se homogenizaron las muestras simples con el fin de obtener una muestra compuesta final, la misma que fue analizada fisicoquímicamente para establecer los valores iniciales de estos parámetros y compararlos con los valores generados una vez que la muestra haya sido tratada mediante biofiltración. A continuación, en la Tabla 11 se presentan los resultados de los parámetros físico-químicos iniciales:

Tabla 11. Resultados de los parámetros físico-químicos iniciales (Influente)

Parámetros	Unidades	Muestra	Límites máximos permisibles (resolución N° 0002-DMA- 2008)	Cumplimiento
pH	-/-	7,1	5 a 9	Cumple
Sólidos en suspensión	mg/L	42,0	53	Cumple
Sólidos sedimentables	mL/L	0,5	1,0	Cumple
Fósforo total	mg/L	1,30	10	Cumple
Nitrógeno total	mg/L	38,2	40	Cumple
Arsénico	mg/L	0,0012	0,1	Cumple
Temperatura	°C	21,0	<35	Cumple
Color	U de color	91,0	Inapreciable en dilución 1/20	Cumple
Aceites y Grasas	mg/L	1,2	30	Cumple
DBO₅	mg/L	333,0	70	No cumple
DQO	mg/L	576,8	123	No cumple

CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO A ESCALA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO BIOLÓGICO EMPLEANDO MICROORGANISMOS PARA LA DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES PROCEDENTES DE UNA INDUSTRIA FARMACÉUTICA EN LA CIUDAD DE QUITO

Con los datos generados se realizó una comparación con los límites permisibles reportados en Resolución N° 0002-DMA-2008 del Distrito Metropolitano de Quito (DMQ), anexo D (Guía de Parámetros a Evaluar por Actividad Industrial, Comercial y Servicios). De esta manera, se determinó que los aspectos en los que debe hacer énfasis el tratamiento biológico aplicado son: la reducción de la Demanda Química de Oxígeno (D.Q.O) y la Demanda Bioquímica de Oxígeno (D.B.O).

A partir de estos dos parámetros (D.Q.O. y D.B.O.) se cálculo el índice de biodegradabilidad del agua residual generada por la farmacéutica, con el fin de determinar su idoneidad para el tratamiento biológico:

- Índice de biodegradabilidad (Romero, 2004):

$$\text{Relación DBO/DQO} = 333.0/576.8 = \mathbf{0,6}$$

*>0,5= material biodegradable

$$\text{Relación DQO/DBO} = 576.8/333.0 = \mathbf{1,7}$$

*1,5= material muy biodegradable.

*2= material moderadamente biodegradable

3.2.2. Construcción de una planta de tratamiento biológico a escala de laboratorio

Los resultados del índice de biodegradabilidad indican que las aguas residuales de esta industria pueden ser depuradas mediante tratamiento biológico. Por consiguiente se procedió a la construcción de la planta de biofiltración a escala de laboratorio que se muestra en las Figuras 4 y 5.

CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO A ESCALA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO BIOLÓGICO EMPLEANDO MICROORGANISMOS PARA LA DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES PROCEDENTES DE UNA INDUSTRIA FARMACÉUTICA EN LA CIUDAD DE QUITO

Figura 4. Componentes de la Planta de Tratamiento Biológico. A) Tanque de Homogenización: en este tanque se mezclan las muestras simples y obtiene la muestra compuesta a tratar; B) Estructura del biofiltro: constituido por cuatro tanques de plástico, presenta una altura de 1,50 m de altura; C) Tanque de almacenamiento: este tanque recepta el efluente tratado; D) Biofiltro empacado: se utilizó como medio filtrante turba mezclada con trozos de madera y roca volcánica como soporte.

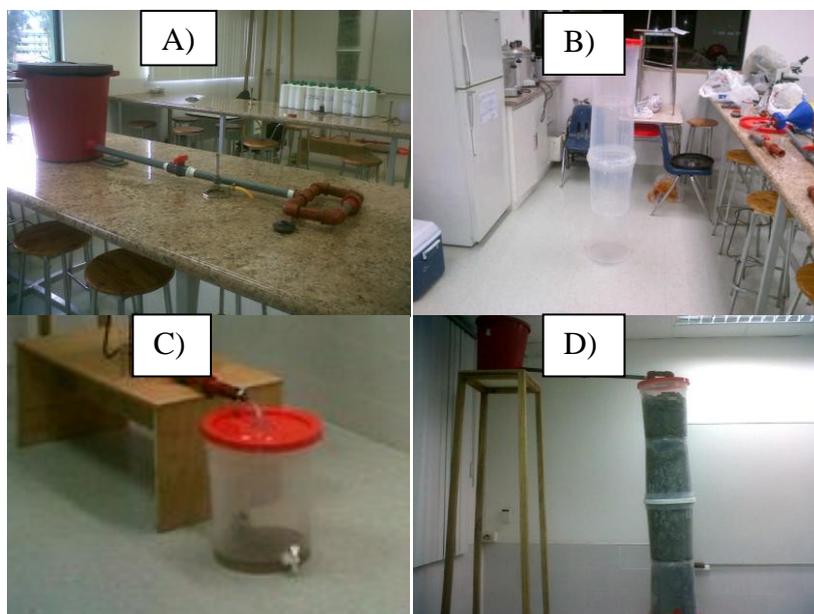


Figura 5. Planta de Tratamiento Biológico a escala de laboratorio. El influente circuló por la planta de tratamiento biológico por gravedad (utilizando la diferencia de altura), todo el sistema se encontraba interconectado por tubería PVC y válvulas de bola para regular el caudal. Se colocó una malla metálica en la parte inferior del biofiltro para evitar el arrastre de partículas gruesas y se suministró oxígeno mediante dos entradas localizadas en la parte lateral.

CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO A ESCALA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO BIOLÓGICO EMPLEANDO MICROORGANISMOS PARA LA DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES PROCEDENTES DE UNA INDUSTRIA FARMACÉUTICA EN LA CIUDAD DE QUITO

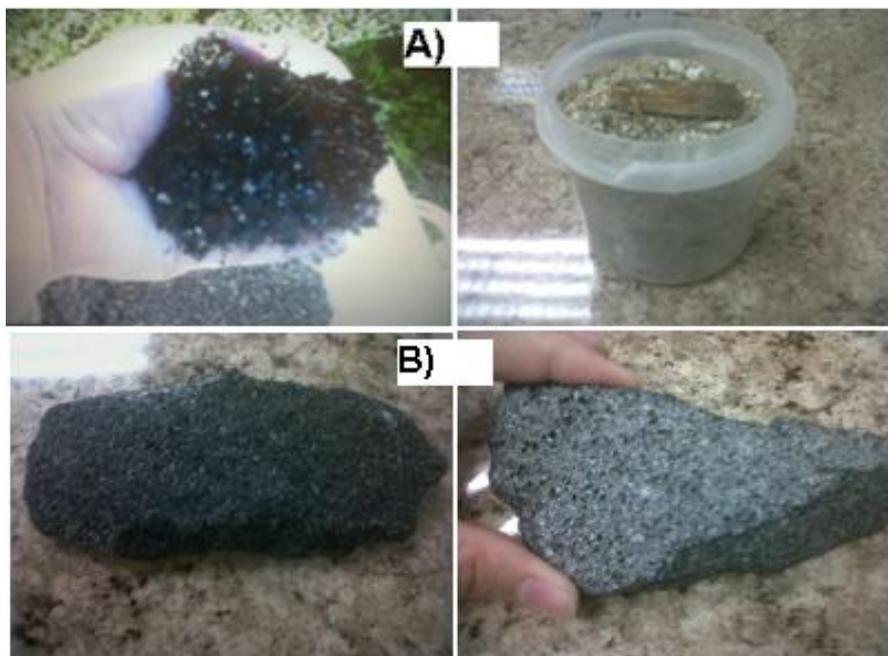


En la Figura 5 se muestra la estructura final de la planta de tratamiento biológico a escala de laboratorio. En el tanque de homogenización se encuentra el aspersor fijo a través del cual pasa el agua residual hacia el biofiltro para su depuración y finalmente las muestras tratadas son receptadas en el tanque de almacenamiento.

El medio filtrante se formó a partir de turba y restos de madera, el empaque empleado fue roca volcánica. La turba se mezcló con los trozos de madera para permitir un mejor flujo de oxígeno dentro del biofiltro; para el empaque las rocas fueron dispuestas por tamaños (grandes, medianas y pequeñas) en orden ascendente. En la Figura 6 se muestra las características de estos materiales:

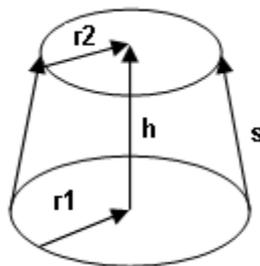
CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO A ESCALA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO BIOLÓGICO EMPLEANDO MICROORGANISMOS PARA LA DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES PROCEDENTES DE UNA INDUSTRIA FARMACÉUTICA EN LA CIUDAD DE QUITO

Figura 6. Material filtrante y empaque del Biofiltro. A) Turba y trozos de madera: se utilizaron como medio filtrante, los trozos de madera permiten una distribución más uniforme del agua y el oxígeno; B) Roca volcánica: se empleó como soporte. Posee propiedades de absorción por lo que ayuda a la fijación de la biopelícula, también permite a neutralizar el pH.



Se trabajó con un caudal de 3350 mL/min y se determinó el Tiempo de Retención Hidráulica (TRH), el volumen y el área del biofiltro, también se estimó la Carga Hidráulica (CH) y se estableció un tiempo de biodigestión de cuatro días según referencias bibliográficas (Díaz & Giraldo, 2005). Es importante destacar que el biofiltro se encuentra constituido por cuatro conos truncados unidos. Un cono truncado se dispone de la siguiente manera:

Figura 7. Esquema de un cono truncado



Donde:

r1 y r2: radios de las bases (cm)

h: altura

s: generatriz

A continuación, se presentan los valores de las variables mencionadas anteriormente obtenidas de Vellén (2011):

$$\text{Ec. No. 8) Volumen del biofiltro (V}_{\text{biofiltro}}) = \frac{h \times \pi}{3} \cdot (r1^2 + r2^2 + (r1 \cdot r2))$$

Donde:

h: altura (cm)

$$V_{\text{biofiltro}} = \frac{37,5 \times \pi}{3} \cdot (15,75^2 + 14,25^2 + (15,75 \cdot 13,25)) = 24830,76 \text{ cm}^3$$

$$V_{\text{total}} = 24830,76 \times 4 = 99323,02 \text{ cm}^3 / 0,1 \text{ m}^3$$

$$\text{Ec.No. 9) Área del biofiltro (A}_{\text{biofiltro}}) = \pi[r1^2 + r2^2 + (r1 + r2)s]$$

$$s^2 = (r1 + r2)^2 + h^2$$

$$s^2 = (15,75 + 13,25)^2 + 37,5^2$$

$$S = 37,58 \text{ cm}$$

CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO A ESCALA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO BIOLÓGICO EMPLEANDO MICROORGANISMOS PARA LA DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES PROCEDENTES DE UNA INDUSTRIA FARMACÉUTICA EN LA CIUDAD DE QUITO

$$A_{\text{biofiltro}} = \pi [15,75^2 + 13,25^2 + (15,75 + 13,25)58] = 4754,63 \text{ cm}^2$$

$$A_{\text{total}} = 4754,63 \times 4 = 19018,5 \text{ cm}^2 / 1,9 \text{ m}^2$$

Ec. No. 10) Tiempo de Retención Hidráulica (TRH): $\frac{V_{\text{biofiltro}}}{Q}$

Donde:

$V_{\text{biofiltro}}$: Volumen del biofiltro (cm^3).

Q : Caudal tratado (mL/minuto).

$$TRH = \frac{99323,02 \text{ cm}^3}{3350 \text{ mL}/\text{min}} = 29,6 \text{ min}$$

Ec. No.11) Carga Hidráulica (CH): $\frac{Q}{A_{\text{biofiltro}}}$

Donde:

$A_{\text{biofiltro}}$: Área del biofiltro (cm^2).

Q : Caudal tratado (mL/minuto).

$$CH = \frac{3350 \text{ mL}/\text{min}}{19018,5 \text{ cm}^2} = 0,18 \frac{\text{cm}^3}{\text{cm}^2 \cdot \text{min}}$$

3.2.3. Desarrollo de la biopelícula

Para el desarrollo de la biopelícula se estimó un tiempo de dos semanas, durante las cuales se recirculó agua residual farmacéutica propiciando la formación de lama sobre el medio filtrante y el empaque del biofiltro, esta lama se encuentra constituida por diversas poblaciones microbianas. El desarrollo de la biopelícula se estableció no sólo por la

CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO A ESCALA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO BIOLÓGICO EMPLEANDO MICROORGANISMOS PARA LA DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES PROCEDENTES DE UNA INDUSTRIA FARMACÉUTICA EN LA CIUDAD DE QUITO

formación de lama, sino también por la reducción en la emisión de malos olores y la disminución de la turbidez de las aguas residuales usadas.

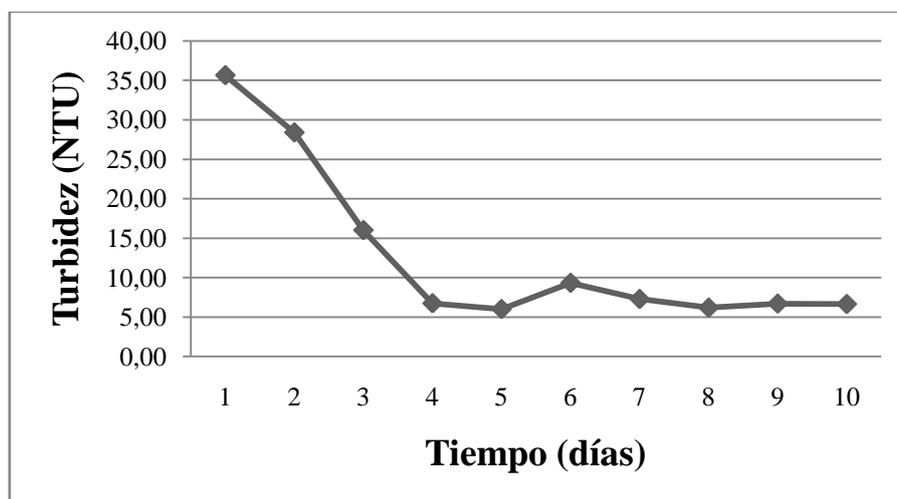
Se midió la turbidez durante dos semanas laborables (10 días) y se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 12. Resultados de la medición de turbidez del agua farmacéutica utilizada para la formación de la biopelícula.

RESULTADOS MEDICIÓN DE TURBIDEZ					
FECHA	LECTURA				PROMEDIO ± DESV.ESTÁNDAR
	1	2	3	4	
24-jun-13	35,94	37,16	34,81	34,61	35,63 ± 1,019
25-jun-13	29,05	27,45	28,53	28,48	28,38 ± 0,58
26-jun-13	15,87	15,97	16,07	16,06	15,99 ± 0,08
27-jun-13	6,84	6,82	6,68	6,55	6,72 ± 0,11
28-jun-13	6,08	6,13	5,89	5,83	5,98 ± 0,13
01-jul-13	8,53	8,58	8,57	11,58	9,31 ± 1,31
02-jul-13	7,82	7,52	7,02	6,69	7,26 ± 0,44
03-jul-13	6,41	6,12	5,89	6,24	6,16 ± 0,19
04-jul-13	6,8	6,67	6,33	6,92	6,68 ± 0,22
05-jul-13	6,91	6,73	6,65	6,21	6,62 ± 0,26

La Figura No. 8 muestra disminución de la turbidez en el transcurso de dos semanas. Se determinó que la biopelícula estaba suficientemente desarrollada cuando la remoción de la turbidez fue superior al 50 %.

Figura 8. Reducción de turbidez del agua residual utilizada para la formación de la biopelícula. (La Disminución de la turbidez del agua residual farmacéutica es un indicador del desarrollo de la biopelícula, ya que esta retiene los sólidos en suspensión y utiliza la materia orgánica presente en dichas aguas).



3.2.4. Pruebas bioquímicas (prueba de la catalasa) y morfológicas (tinción Gram y observación al microscopio)

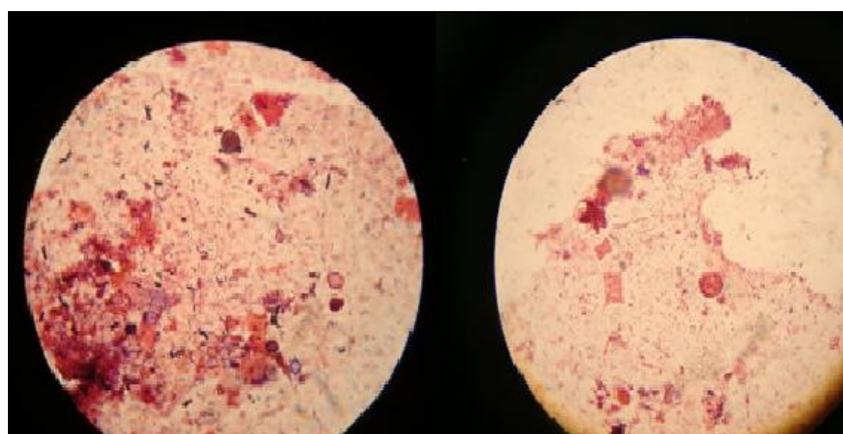
Las pruebas bioquímicas y morfológicas fueron realizadas a partir de cinco muestras tomadas al azar. Los resultados de la prueba de la catalasa fueron mayoritariamente positivos (Tabla No. 13), por lo tanto se confirma la presencia de bacterias aerobias y anaerobias facultativas, ya que la mayoría de estas bacterias presentan actividad catalasa. Las pruebas morfológicas denotaron la presencia de formas cilíndricas (bacilos) mayoritariamente, también se registraron cocos y bacterias helicoidales en menor proporción. Los microorganismos Gram negativos presentaron mayores porcentajes (55%, 70%, 60%, 80% y 90%) en las muestras observadas (Figura No 9).

CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO A ESCALA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO BIOLÓGICO EMPLEANDO MICROORGANISMOS PARA LA DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES PROCEDENTES DE UNA INDUSTRIA FARMACÉUTICA EN LA CIUDAD DE QUITO

Tabla 13. Resultados de las pruebas bioquímicas (prueba de la catalasa) y morfológicas (tinción Gram y observación al microscopio) de la biopelícula establecida en el biofiltro.

Nº de Muestra	Tinción Gram (%)	Prueba de la Catalasa	Descripción Morfológica
1	+ (45) / - (55)	positivo	<ul style="list-style-type: none"> • Bacilos • Cocos (estafilococos y diplococos)
2	+ (30) / - (70)	positivo	<ul style="list-style-type: none"> • Bacilos • Cocos (estafilococos)
3	+ (40) / - (60)	negativo	<ul style="list-style-type: none"> • Bacilos • Cocos
4	+ (20) / - (80)	positivo	<ul style="list-style-type: none"> • Bacilos • Cocos
5	+ (10) / - (90)	positivo	<ul style="list-style-type: none"> • Bacilos • Cocos • Bacterias helicoidales

Figura 9. Tinción Gram y Observación al microscopio de la comunidad microbiana formadora de la biopelícula. (Las imágenes presentadas se realizaron con el aumento 100x)



3.2.5. Resultados de los análisis físico-químicos finales del efluente tratado por biofiltración

Una vez tratadas las aguas residuales procedentes de la planta farmacéutica se tomó una muestra de un litro para realizar nuevamente los análisis físico-químicos efectuados en un inicio, y de esta manera evaluar la eficiencia del tratamiento biológico aplicado. La Tabla No. 14 muestra los valores registrados después del tratamiento biológico.

Tabla 14. Resultados de los parámetros físico-químicos finales del efluente tratado

Parámetros	Unidades	Muestra	Límites máximos permisibles (resolución N° 0002-DMA-2008)	Cumplimiento
pH	-/-	8,7	5 a 9	Cumple
Sólidos en suspensión	mg/L	14,0	53	Cumple
Sólidos sedimentables	mL/L	<0,5	1,0	Cumple
Fósforo total	mg/L	98	10	Cumple
Nitrógeno total	mg/L	4,2	40	Cumple
Arsénico	mg/L	0,00221	0,1	Cumple
Temperatura	°C	21	<35	Cumple
Color	U de color	2050	Inapreciable en dilución 1/20	Cumple
Aceites y Grasas	mg/L	10	30	Cumple
DBO₅	mg/L	131,5	70	No cumple
DQO	mg/L	402,6	123	No cumple

La Tabla 15 muestra la variación de los parámetros físico-químicos una vez que se ha aplicado el tratamiento biológico:

CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO A ESCALA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO BIOLÓGICO EMPLEANDO MICROORGANISMOS PARA LA DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES PROCEDENTES DE UNA INDUSTRIA FARMACÉUTICA EN LA CIUDAD DE QUITO

Tabla 15. Comparación de los parámetros físico-químicos iniciales y finales de las aguas residuales procedentes de una planta farmacéutica.

Parámetros	Unidades	Muestra Inicial	Muestra Final	Descripción
pH	-/-	7,1	8,7	Incremento (22,5%)
Sólidos en suspensión	mg/L	42,0	14,0	Reducción (66,7%)
Sólidos sedimentables	mL/L	0,5	<0,5	Reducción
Fósforo total	mg/L	1,30	98	Incremento (98,7%)
Nitrógeno total	mg/L	38,2	4,2	Reducción (89%)
Arsénico	mg/L	0,0012	0,0012	Se mantuvo
Temperatura	°C	21	21	Se mantuvo
Color	U de color	91,0	2050	Incremento
Aceites y Grasas	mg/L	1,2	10	Incremento (88%)
DBO₅	mg/L	333,0	131,5	Reducción (60,5%)
DQO	mg/L	576,8	402,6	Reducción (30,2%)

Parámetros como el pH, aceites y grasas, fósforo total y color aumentaron su valor; sin embargo, todos los valores reportados se encuentran dentro de los límites permisibles. La temperatura no presentó cambios significativos durante todo el tratamiento. Los sólidos en suspensión, sólidos sedimentables, D.B.O y D.Q.O fueron los parámetros que disminuyeron en mayor porcentaje, de acuerdo al objetivo del tratamiento biológico aplicado.

3.2.6. Evaluación de la eficiencia del tratamiento biológico aplicado (Biofiltración)

Como se mencionó anteriormente, la eficiencia del tratamiento biológico se evaluó a partir de la remoción de DQO y los sólidos suspendidos totales (SST):

Materia Orgánica removida (M):

$$Ec. No. 1) M_{DQO} = (DQO_i - DQO_e) \times V_{ARD}$$

$$M_{DQO} = (576,8 - 402,6)mg/L \times 20 L = \mathbf{3484 \text{ mg}}$$

$$Ec. No. 2) M_{SST} = (SST_i - SST_e) \times V_{ARD}$$

$$M_{SST} = \frac{(42 - 14)mg}{L} \times 20L = \mathbf{560mg}$$

Tasa de Remoción Superficial (TRS):

$$Ec. No. 3) TRS_{DQO} = \frac{(DQO_i - DQO_e) \times V_{ARD}}{A_{biofiltro} \times TRH} = \frac{M_{DQO}}{A_{biofiltro} \times TRH}$$

$$TRS_{DQO} = \frac{3484 \text{ mg}}{19018,5 \text{ cm}^2 \times 29,6 \text{ min}} = \mathbf{6,2 \times 10^{-3} \text{ mg/cm}^2 \cdot \text{minuto}}$$

$$Ec. No. 4) TRS_{SST} = \frac{(SST_i - SST_e) \times V_{ARD}}{A_{biofiltro} \times TRH} = \frac{M_{SST}}{A_{biofiltro} \times TRH}$$

$$TRS_{SST} = \frac{560 \text{ mg}}{19018,5 \text{ cm}^2 \times 29,6 \text{ min}} = \mathbf{9,9 \times 10^{-4} \text{ mg/cm}^2 \cdot \text{minuto}}$$

CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO A ESCALA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO BIOLÓGICO EMPLEANDO MICROORGANISMOS PARA LA DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES PROCEDENTES DE UNA INDUSTRIA FARMACÉUTICA EN LA CIUDAD DE QUITO

Tasa de Remoción Volumétrica (TRV):

$$Ec. No. 5) TRV_{DQO} = \frac{(DQO_i - DQO_e) \times V_{ARD}}{V_{biofiltro} \times TRH} = \frac{M_{DQO}}{V_{biofiltro} \times TRH}$$

$$TRV_{DQO} = \frac{3484 \text{ mg}}{99323,02 \text{ ml} \times 29,6 \text{ min}} = 1,2 \times 10^{-3} \text{ mg/ml} \cdot \text{minuto}$$

$$Ec. No. 6) TRV_{SST} = \frac{560 \text{ mg}}{99323,02 \text{ ml} \times 29,6 \text{ min}} = 1,9 \times 10^{-4} \text{ mg/ml} \cdot \text{minuto}$$

La Tabla No.16 muestra un resumen de los resultados obtenidos en la evaluación de la eficiencia del biofiltro:

Tabla 16. Resultados de la evaluación de la eficiencia del Tratamiento biológico aplicado (Biofiltración).

Materia Orgánica Removida (M) (mg)	D.Q.O	3484
	S.S.T	560
Tasa de Remoción Superficial (TRS) (mg/cm ² minuto)	D.Q.O	6,2x10 ⁻³
	S.S.T	9,9x10 ⁻⁴
Tasa de Remoción Volumétrica (TRV) (mg/mL. minuto)	D.Q.O	1,2x10 ⁻³
	S.S.T	1,9x10 ⁻⁴
Eficiencia de Remoción (%)	D.Q.O	30,2
	S.S.T	66,7

CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO A ESCALA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO BIOLÓGICO EMPLEANDO MICROORGANISMOS PARA LA DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES PROCEDENTES DE UNA INDUSTRIA FARMACÉUTICA EN LA CIUDAD DE QUITO

Los análisis de HPLC confirmaron la capacidad depuradora de los microorganismos presentes en la biopelícula establecida en el biofiltro. En la tabla 17 se presentan los valores obtenidos tras inyectar por duplicado el estándar de naproxeno sódico:

Tabla 17. Idoneidad del Sistema (Inyección del Estándar)/Análisis Influyente. (Para asegurar la idoneidad del sistema y su estabilidad durante el análisis, el coeficiente de variación entre las dos inyecciones del estándar debe ser menor al 2%, según la farmacopea europea vigente).

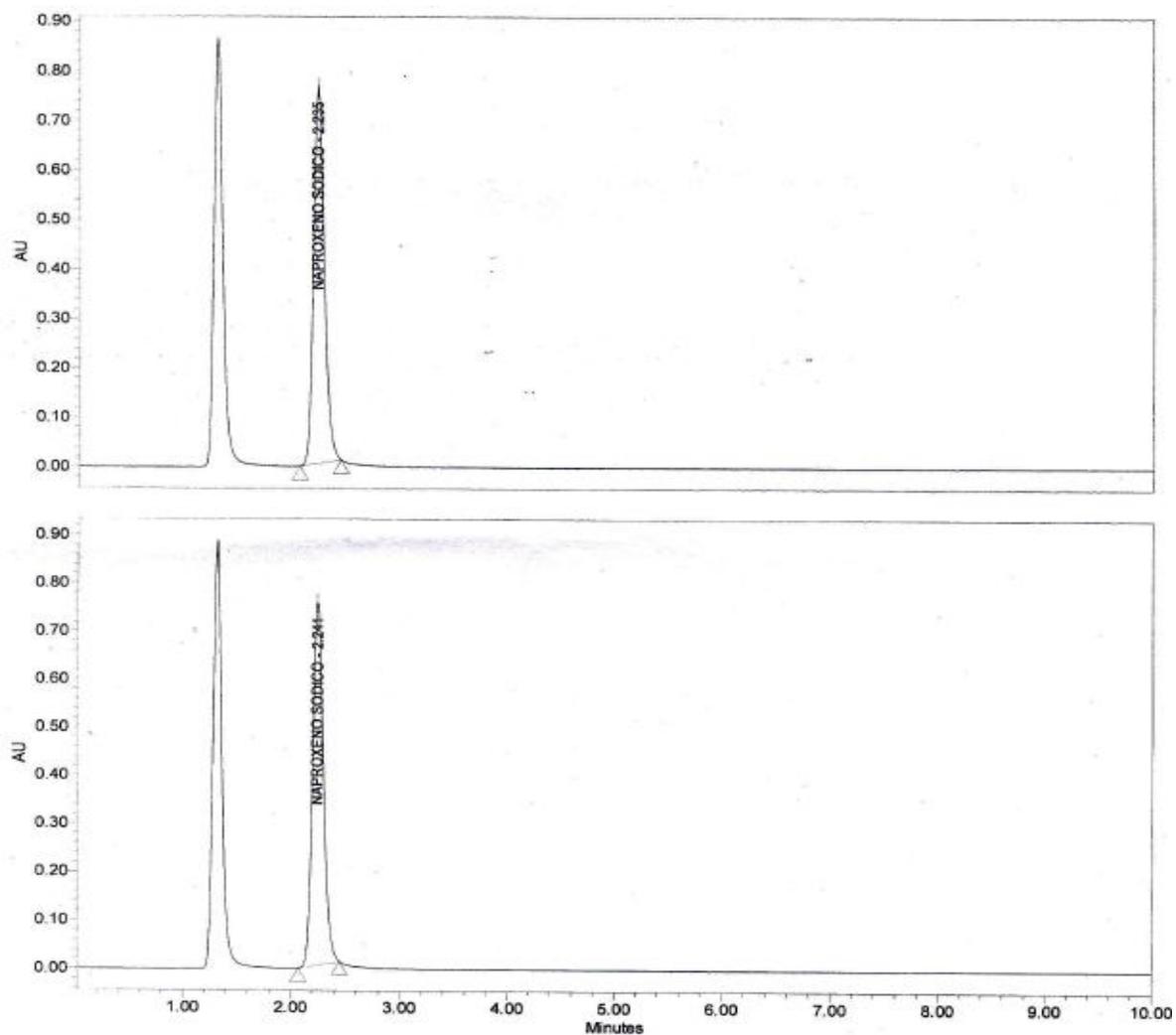
	Nombre de la muestra	Vial	Inj	Tiempo de retención (min)	Área	Cantidad	Unidades	RF
1	St. naproxeno	1	2	2,241	5166906	0,054781	mg/ml	94318989.5
2	St. naproxeno	1	1	2,235	5182875	0,054781	mg/ml	94610494.3
% RSD								0,2

Se obtuvo un coeficiente de variación de 0,2%, lo que indica la estabilidad del sistema.

A continuación, la Figura N0. 10 muestra los cromatogramas correspondientes a la inyección del estándar:

CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO A ESCALA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO BIOLÓGICO EMPLEANDO MICROORGANISMOS PARA LA DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES PROCEDENTES DE UNA INDUSTRIA FARMACÉUTICA EN LA CIUDAD DE QUITO

Figura 10. Cromatogramas - Inyección Estándar/Análisis Influyente. Los picos observados corresponden a la inyección por duplicado del estándar de naproxeno sódico que se utilizará para el análisis de las muestras del influente que aún no ha recibido tratamiento biológico



Una vez asegurada la estabilidad del sistema se realizó la inyección por duplicado de la muestra de agua antes de ser tratada, con lo cual se calculó la concentración inicial de naproxeno sódico en el influente, como se muestra en la Tabla No. 18.

CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO A ESCALA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO BIOLÓGICO EMPLEANDO MICROORGANISMOS PARA LA DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES PROCEDENTES DE UNA INDUSTRIA FARMACÉUTICA EN LA CIUDAD DE QUITO

Tabla 18. Concentración inicial de Naproxeno Sódico en el influente a tratar. (Se inyectó por duplicado el estándar de naproxeno sódico y la muestra de agua a tratar para calcular la concentración del principio activo en el influente).

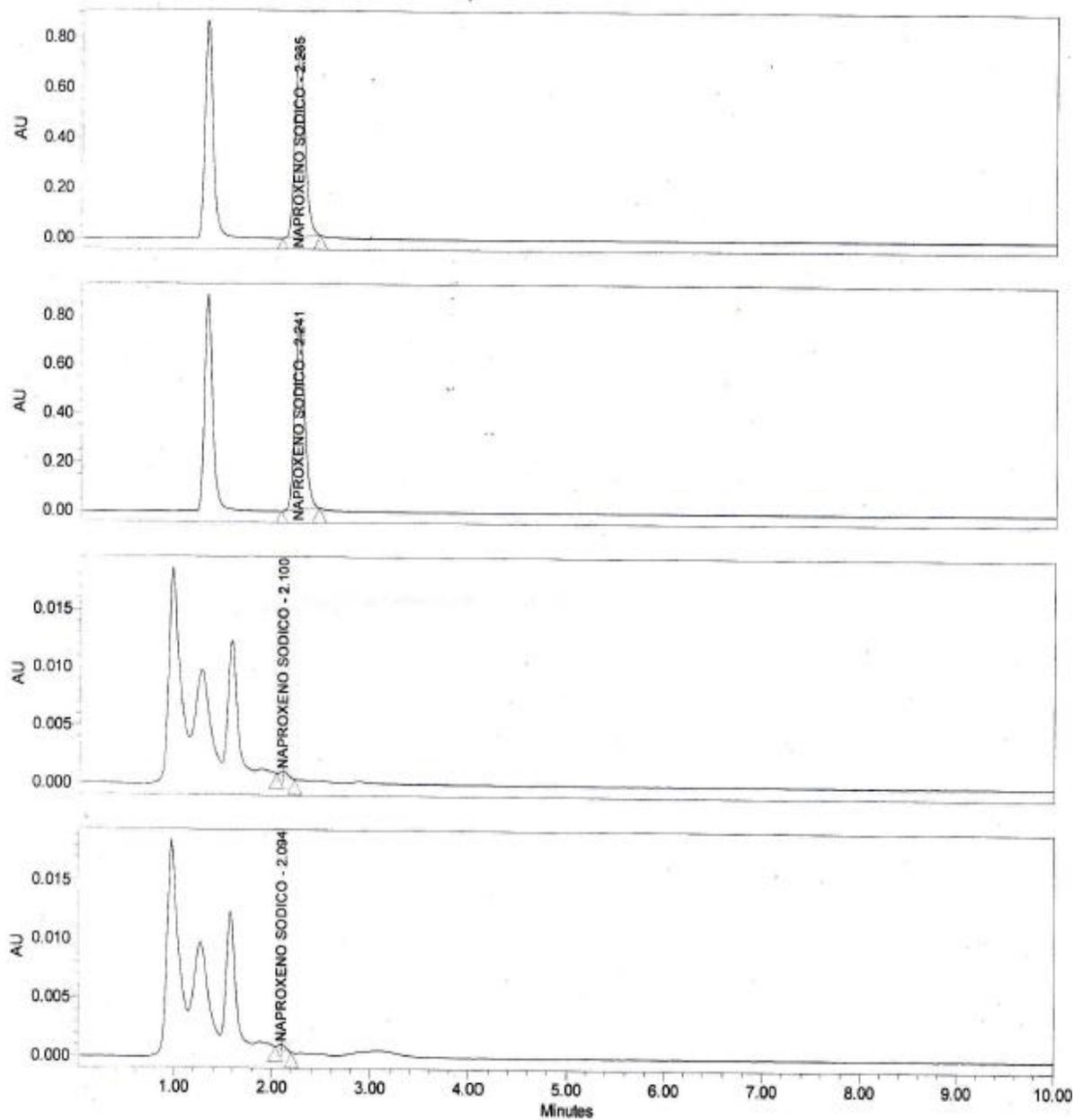
	Nombre de la muestra	Vial	Inj	Tiempo de retención (min)	Área	Cantidad	Unidades	RF
1	St. naproxeno	1	1	2,235	5182875	0,054781	mg/ml	94610494.3
2	St. naproxeno	1	2	2,241	5166906	0,054781	mg/ml	94318989.5
3	Agua_planta_d e tratamiento	49	1	2.100	1907	0,000033	mg/ml	57222529.7
4	Agua_planta_d e tratamiento	49	2	2.094	1797	0,000033	mg/ml	53907365.9
% RSD								30.0

La cantidad de naproxeno sódico encontrada fue de $3,3 \times 10^{-4}$ mg/ml, correspondiente al 0,6 %, este valor se comparó con la concentración final del principio activo en la muestra de agua tratada. En la Figura No. 11 se muestran los cromatogramas correspondientes a la inyección del estándar y la muestra del influente:

Figura 11. Cromatogramas: Inyección del Estándar-Muestra Influyente.

Los dos primeros cromatogramas corresponden a la inyección del estándar y los siguientes a la inyección de la muestra del agua residual sin tratamiento, se comparan para comprobar la presencia y cuantificar la concentración de este principio activo en la muestra de agua a tratar.

CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO A ESCALA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO BIOLÓGICO EMPLEANDO MICROORGANISMOS PARA LA DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES PROCEDENTES DE UNA INDUSTRIA FARMACÉUTICA EN LA CIUDAD DE QUITO



Se realizaron análisis de HPLC al efluente una vez tratado, bajo el mismo esquema de los análisis iniciales. En la Tabla No.19 se presentan los valores obtenidos tras inyectar por duplicado el estándar de naproxeno sódico:

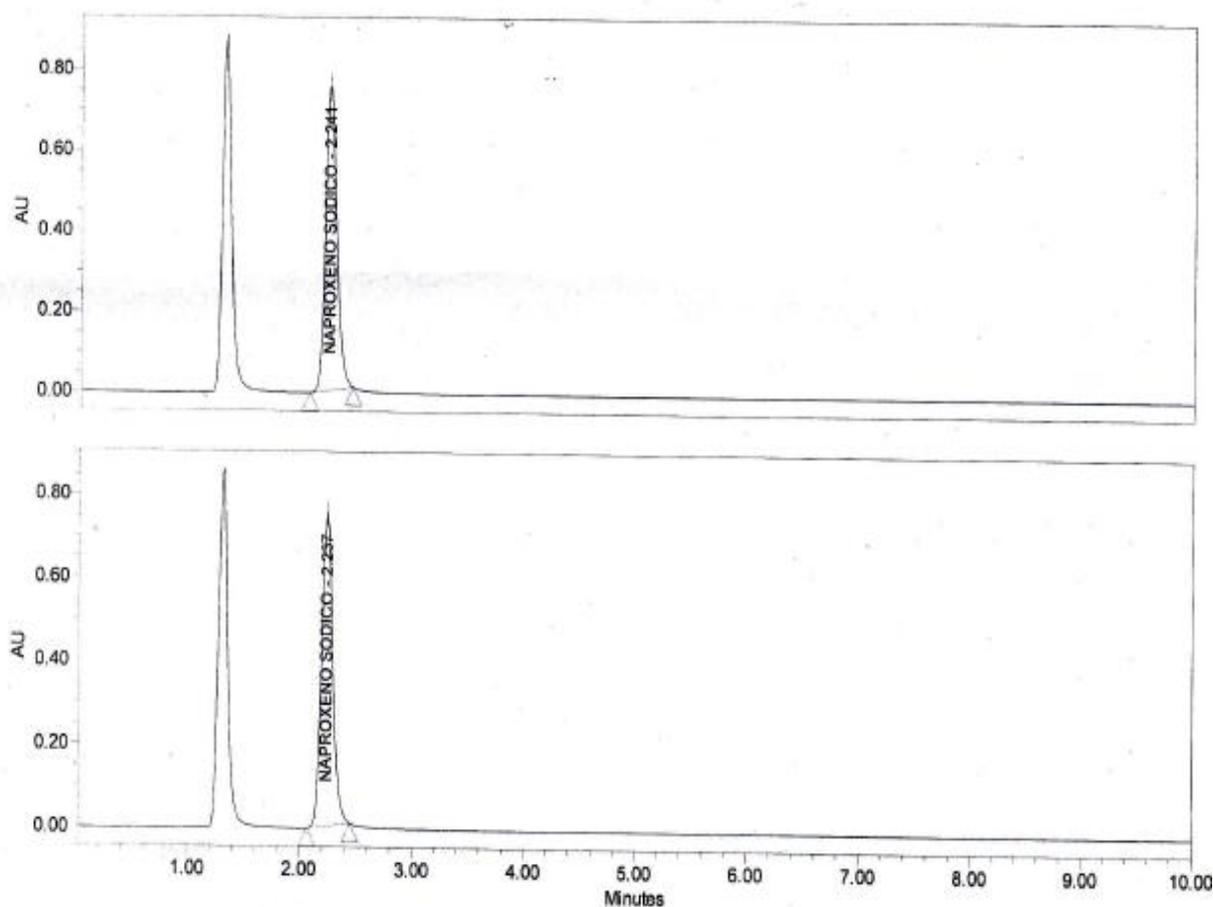
CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO A ESCALA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO BIOLÓGICO EMPLEANDO MICROORGANISMOS PARA LA DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES PROCEDENTES DE UNA INDUSTRIA FARMACÉUTICA EN LA CIUDAD DE QUITO

Tabla 19. Idoneidad del Sistema (Inyección del Estándar)/Análisis efluente. (Para asegurar la idoneidad del sistema y su estabilidad durante el análisis, el coeficiente de variación entre las dos inyecciones del estándar debe ser menor al 2%, según la farmacopea europea vigente).

	Nombre de la muestra	Vial	Inj	Tiempo de retención (min)	Área	Cantidad	Unidades	RF
1	St. naproxeno	1	2	2,240	5165916	0,054770	mg/ml	94315972.5
2	St. naproxeno	1	1	2,237	5182774	0,054770	mg/ml	94810596.4
% RSD								0,3

El coeficiente de variación es menor al 2% por lo que se puede confirmar la estabilidad del sistema durante el análisis. A continuación, en la Figura No. 12 se presentan los cromatogramas correspondientes a la inyección del estándar:

Figura 12. Cromatogramas - Inyección Estándar/Análisis Efluente. (Los picos observados corresponden a la inyección por duplicado del estándar de naproxeno sódico que se utilizará para el análisis de las muestras del efluente tratado mediante biofiltración).



Posteriormente, se inyectó por duplicado la muestra del efluente y no se detectó concentración del principio activo en la muestra tratada (Tabla No. 20).

CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO A ESCALA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO BIOLÓGICO EMPLEANDO MICROORGANISMOS PARA LA DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES PROCEDENTES DE UNA INDUSTRIA FARMACÉUTICA EN LA CIUDAD DE QUITO

Tabla 20. Concentración final de Naproxeno Sódico en el efluente tratado. (Se inyectó por duplicado el estándar de naproxeno sódico y la muestra de agua tratada mediante biofiltración para calcular la concentración del principio activo en el efluente.

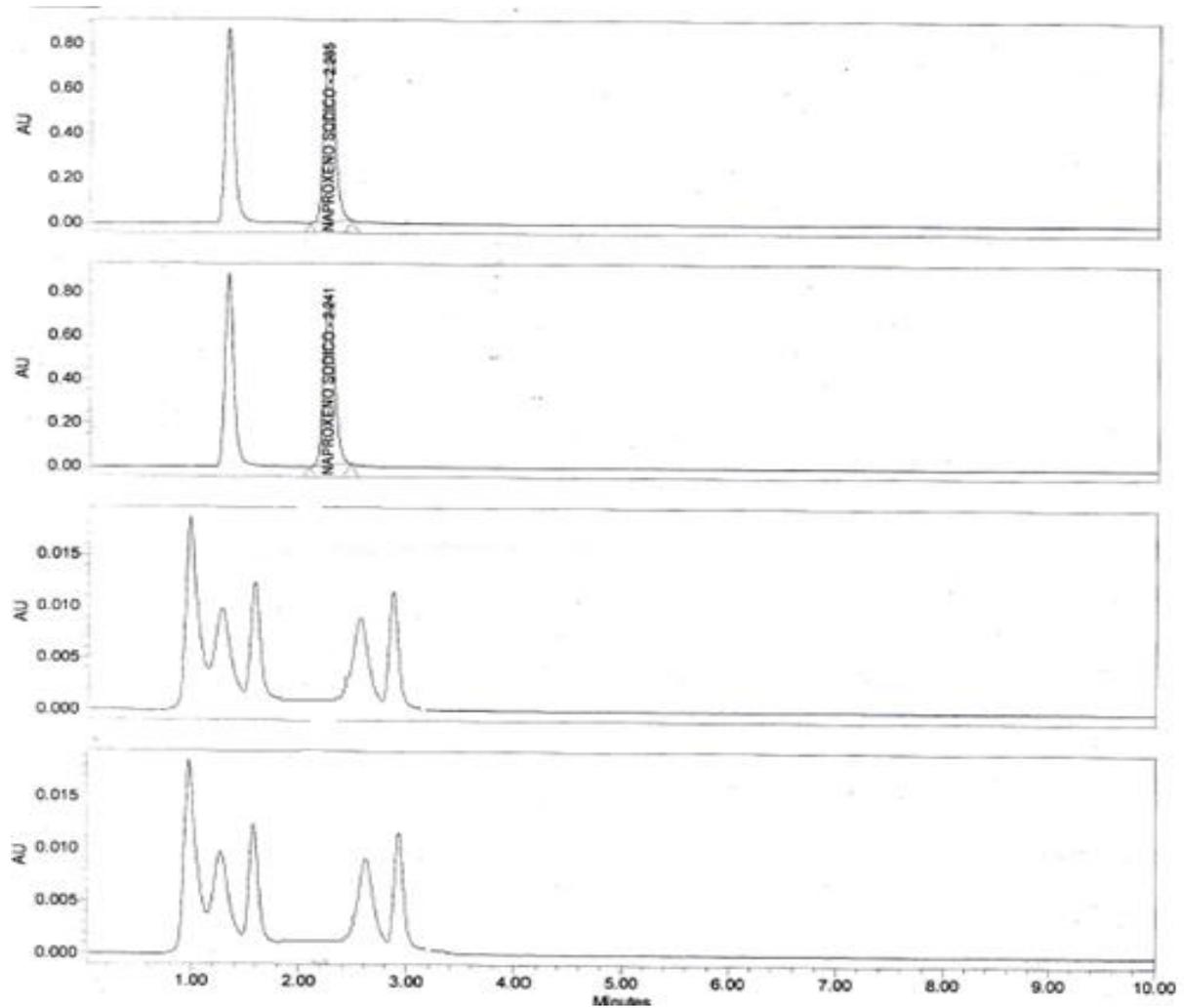
	Nombre de la muestra	Vial	Inj	Tiempo de retención (min)	Área	Cantidad	Unidades	RF
1	St. naproxeno	1	2	2,240	5165916	0,054770	mg/ml	94315972.5
2	St. naproxeno	1	1	2,237	5182774	0,054770	mg/ml	94810596.4
3	Agua_planta_de tratamiento	35	1	-/-	N/D	N/D	mg/ml	N/D
4	Agua_planta_de tratamiento	35	2	-/-	N/D	N/D	mg/ml	N/D
% RSD								0,3

N/D=No Detectable.

En la Figura No. 13 se muestran los cromatogramas correspondientes a la inyección del estándar y la muestra del efluente tratado:

CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO A ESCALA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO BIOLÓGICO EMPLEANDO MICROORGANISMOS PARA LA DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES PROCEDENTES DE UNA INDUSTRIA FARMACÉUTICA EN LA CIUDAD DE QUITO

Figura 13. Cromatogramas: Inyección del Estándar-Muestra Efluente. (Los dos primeros cromatogramas corresponden a la inyección del estándar y los siguientes a la inyección de la muestra del agua residual tratada mediante biofiltración, no se detectó la presencia de naproxeno sódico, los picos observados corresponden a otras matrices presentes en la muestra de agua).



CAPÍTULO IV

DISCUSIÓN

Las aguas residuales de origen industrial se encuentran contaminadas con una diversidad de productos tóxicos, los cuales deber ser tratados antes de su descarga al medio ambiente (Arnáiz et al. 2000). Actualmente se han desarrollado una gran variedad de procesos para el tratamiento de aguas residuales (Romero, 2004); sin embargo, muchos de estos presentan limitaciones de aplicabilidad, eficiencia y costos. Los tratamientos físico-químicos son procesos no selectivos que elevan considerablemente los costos de implementación; no obstante, los tratamiento biológicos presentan mejores rendimientos con menores costes económicos de operación y mantenimiento, este tipo de tratamiento transforma los contaminantes en sustancias inocuas como CO₂, metano, nitrógeno y agua (Arnáiz et al. 2000).

Uno de los principales problemas de la industria farmacéutica es la carencia de tecnologías eficientes y viables desde el punto de vista económico; debido a la elevada producción de medicamentos se generan aguas residuales no caracterizadas. Además, la heterogeneidad de las mismas dificulta el establecimiento de una composición característica o de métodos de tratamiento preestablecidos (Ramos et al. 2005). La mayoría de los tratamientos empleados en la depuración de aguas contaminadas con fármacos son tecnologías que consumen cantidades excesivas de energía, como el tratamiento por lodos activados, presentando parámetros operacionales complejos y grandes requerimientos de espacio (Cortacans et al. 2006).

CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO A ESCALA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO BIOLÓGICO EMPLEANDO MICROORGANISMOS PARA LA DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES PROCEDENTES DE UNA INDUSTRIA FARMACÉUTICA EN LA CIUDAD DE QUITO

El tratamiento con lodos activados es una tecnología convencional que usualmente no es suficiente para disminuir el poder contaminante de la mayoría de fármacos, por esto las plantas de tratamiento convencional no son capaces de eliminar muchos fármacos presentes en las aguas residuales, ya que están fundamentalmente diseñadas para la remoción de fosfatos y nitratos (Harder, 2003; Boxall, 2004).

Algunas de las desventajas del sistema de lodos activados frente a la biofiltración incluyen: la dependencia de parámetros como la temperatura, pH y presencia de compuestos tóxicos en el efluente a tratar, el riesgo de taponamiento de los dispositivos de aireación, la sedimentabilidad de los lodos, si estos no precipitan rápidamente son arrastrados con el efluente y aumentan el valor de la D.B.O, hinchamiento (*bulking*) del lodo, desfloculación, formación de espuma espesa, requerimientos de control operativo permanente, altos costos de operación, bajo abatimiento bacteriológico (en términos de coliformes fecales), requerimientos grandes de instalaciones y equipos electromecánicos, elevada producción de lodos, los cuales requieren tratamiento posterior (Rivera & Valencia, 2003).

Los sistemas de biofiltración presentan un bajo consumo energético, no necesitan de aireación constante, presentan elevados rendimientos, buena adaptación a la variación de carga, requieren de superficies menores para su instalación en relación con los tratamientos convencionales, flexibilidad respecto a la carga hidráulica y reducidos costos de inversión (Sekoulov et al. 2009).

En cuanto a la problemática de la contaminación hídrica con fármacos, se debe establecer un plan de control, pero la información en la literatura es escasa y las leyes nacionales no contemplan ni priorizan este tipo de polución, pese a los impactos que estos ocasionan en el medio ambiente. Es necesario tomar en cuenta la cantidad de fármacos que se produce, la toxicidad y la actividad biológica de estos compuestos en los cuerpos de agua y

CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO A ESCALA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO BIOLÓGICO EMPLEANDO MICROORGANISMOS PARA LA DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES PROCEDENTES DE UNA INDUSTRIA FARMACÉUTICA EN LA CIUDAD DE QUITO

los hábitos de consumo por parte de la población para poder monitorear y sancionar este tipo de contaminación. Para esto es importante contar con información sobre el grado y la velocidad de degradación de estos compuestos en las aguas superficiales y en las plantas de tratamiento. Se debe recalcar que la información generada en este aspecto sobre algunos fármacos ha sido estimada bajo condiciones de laboratorio y por lo tanto diferirán de los valores generados en condiciones reales (Zuccato et al. 2004, 2005; Andreozzi et al. 2003).

También hay que considerar que la tendencia mundial apunta hacia el aumento en el consumo de medicamentos, conforme la población envejece (Tauxe, 2005). Estas razones denotan la vitalidad de la aplicación del principio de precaución, que establece que cualquier contaminación por pequeña que sea tiene efectos negativos sobre la naturaleza, y por lo tanto se debe tomar medidas antes de contar con pruebas concretas sobre los impactos ocasionados por esta clase de productos (Jones et al. 2005). En este punto se debe destacar la implementación de medidas como: el control de fármacos en la fuente, la segregación de las aguas contaminadas con estos productos, el desarrollo de nuevos tratamientos de depuración y el mejoramiento de los sistemas de tratamiento existentes (Quesada, 2009). Entre los compuestos prioritarios a controlar y tratar constan: agentes citostáticos y compuestos inmunosupresores, debido a sus propiedades carcinogénicas y mutagénicas, antibióticos y desinfectantes, por su toxicidad bacteriana y potencial para inducir resistencia, clorofenoles y compuestos clorados, debido a su escasa biodegradabilidad y analgésicos y sedativos, por su elevado consumo (Kummerer, 2001).

Al aplicar un tratamiento biológico para la depuración de aguas contaminadas con fármacos, los mismos pueden ser biodegradados y mineralizarse rápidamente o permanecer invariables, por lo tanto pese a que se comprobó la biodegradación del principio activo naproxeno sódico (Tabla No. 20 y Figura No 13) al presentar una concentración no

detectable, esto no implica la degradación de todos los fármacos presentes en el agua residual. Aunque los estudios sobre la degradación de este fármaco son escasos, se han reportado porcentajes de eliminación muy variables, desde la inalteración del principio activo (Boyd et al. 2005), niveles medios de eliminación (Carballa et al. 2007; Rodríguez et al. 2003; Nakada et al. 2006) hasta una eliminación completa (Bendez et al. 2005; Vieno et al. 2005). También se ha planteado que la biodegradación de este fármaco varía por condiciones ambientales como la temperatura, el pH entre otros (Matamoros et al. 2008).

Muchos compuestos hidrofílicos pueden ser resistentes a la biodegradación y tienden a bioacumularse, permaneciendo disueltos en el agua o absorbiéndose en los fangos. Otros compuestos como los agentes perfumantes y el estradiol pueden eliminarse por las propiedades de adsorción que presenta el biofiltro, moléculas como el ibuprofeno y el naproxeno permanecen en fase acuosa y pueden ser degradados por la biopelícula establecida en el biofiltro (Carballa et al. 2004).

Los tratamientos biológicos han conseguido eficiencias de depuración para diversos medicamentos entre el 30% y 75%, para el caso de antiinflamatorios y antibióticos (Carballa et al. 2004). Otros estudios realizados con analgésicos, antilipemiantes y anticonvulsivos han demostrado que para estos fármacos excepto los antiepilépticos, se logra una buena degradación con fangos o biopelículas maduras (Cortacans et al. 2006). Por lo tanto las eficiencias de remoción de materia orgánica y biodegradación presentadas por el biofiltro no son las máximas ya que la biopelícula establecida es joven y no ha alcanzado un desarrollo completo. Se deben realizar estudios con un mayor tiempo de funcionamiento para optimizar las variables de operación y establecer el rendimiento máximo del biofiltro. Así como otros parámetros que incluyen el tiempo de descanso y el fenómeno de taponamiento del mismo.

El establecimiento de la biopelícula es uno de los elementos fundamentales para el adecuado funcionamiento de un biofiltro, la misma es dinámica y su composición y características varían con el tiempo; su morfología y fisiología difiere de los microorganismos en estado libre. La estructura de las poblaciones microbianas que conforman la biopelícula es propia para cada biofiltro, la diversidad de microorganismos presentes conforman un sistema mixto que depende de factores como: la carga hidráulica, la carga orgánica, factores ambientales, disponibilidad de oxígeno y la composición del agua residual que circula a través del biofiltro (Cordero et al.2008).

Inicialmente se pueden encontrar bacterias filamentosas y no filamentosas, posteriormente microorganismos como bacterias nitrificantes y protozoos. Cuando el agua residual contiene gran cantidad de materia orgánica se pueden encontrar bacterias Gram negativas y Gram positivas de manera proporcional; sin embargo, cuando la carga orgánica se reduce, disminuye la diversidad, y predominan las bacterias Gram negativas. El encontrar mayor porcentaje de bacterias Gram negativas en las muestras de lama analizadas puede deberse a que las mismas fueron colectadas una vez que el agua residual había sido tratada y retirada del biofiltro, lo que implica la disminución de la carga orgánica del mismo (Cordero et al. 2008).

La presencia de microorganismos aerobios y anaerobios facultativos, corroborada mediante la prueba de la catalasa (Tabla No. 13), puede deberse a la formación de zonas aerobias y anaerobias en la biopelícula conforme esta aumenta su espesor y madurez. La comunidad microbiana presente en la biopelícula es una mezcla de diversos géneros de bacterias, hongos y protozoos. La capacidad de formar una biopelícula no se restringe a algún grupo específico de microorganismos, ya que se considera que bajo las condiciones adecuadas la gran mayoría de microorganismos pueden coexistir en una (Nazar, 2007). Recientemente,

con ayuda del microscopio láser confocal y la investigación de los genes involucrados en las propiedades de adhesión y formación de biopelículas, se ha incrementado la comprensión acerca de la constitución de la misma (Nazar, 2007).

La matriz de la biopelícula se encuentra constituida principalmente por exopolisacaridos (EPS) y en menor proporción por proteínas, ácidos nucleicos y productos de la lisis celular (Nazar, 2007). La producción de EPS se ve condicionada por la disponibilidad de nutrientes, grandes concentraciones de carbono aumentan el número de células adheridas, mientras que concentraciones limitadas de nitrógeno, potasio o fosfatos propician la producción de EPS. La estructura tridimensional de la biopelícula ocasiona la formación de diversos ambientes en el interior de la misma, generando gradientes de pH y oxígeno, siendo las áreas superficiales metabólicamente más activas (Nazar, 2007).

En cuanto a las especies identificadas como biodegradadoras de productos farmacéuticos, Rodarte-Morales et al. (2010) reportó que diferentes cepas de *Bjerkandera* sp. y *Phanerochaete chrysosporium* fueron capaces de degradar la carbamazepina y naproxeno en su totalidad (Casado, 2010).

La eficiencia del sistema de biofiltración fue evaluada empleando la medición de parámetros físico-químicos; con los resultados obtenidos se calculó primeramente el índice de biodegradabilidad, dado por la relación DBO_5/DQO , el valor obtenido fue de 0,6 y a pesar de que corresponda a material fácilmente biodegradable, no supone la total degradación de la materia orgánica presente, ya que se ha demostrado que productos como el clofibrato o la carbamazepina abandonan las plantas de tratamiento biológico sin sufrir modificación alguna (Quesada, 2009).

Parámetros como el pH, aceites y grasas, fósforo total y color aumentaron su valor; sin embargo, todos los valores reportados se encuentran dentro de los límites permisibles. El

CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO A ESCALA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO BIOLÓGICO EMPLEANDO MICROORGANISMOS PARA LA DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES PROCEDENTES DE UNA INDUSTRIA FARMACÉUTICA EN LA CIUDAD DE QUITO

aumento en el valor del pH de 7,1 a 8,7 puede deberse al empleo de roca volcánica como empaque del biofiltro, ya que esta posee propiedades neutralizadoras y carbonatos dentro de su composición, la oxidación biológica ocasiona descensos de pH y por lo tanto es importante utilizar materiales de relleno que tengan propiedades tampón; la roca volcánica es resistente a variaciones de pH. Es importante el control de este parámetro ya que condiciona la actividad biológica dentro de la biopelícula, el mismo debe hallarse en un rango de 6-9.

Los aceites y grasas son moléculas de difícil biodegradación, por lo tanto para su eliminación se debería contar con una unidad de sedimentación primaria o a su vez el agua tratada debería pasar a una etapa de sedimentación posterior. El funcionamiento del biofiltro puede verse seriamente afectado por los aceites y grasas, ya que interfieren con la transferencia de oxígeno del líquido al interior de las células. La separación de las grasas y aceites se dificulta en sistemas como la biofiltración, debido a que es un proceso de gran velocidad, y el escaso tiempo de contacto de la biopelícula con el efluente a tratar limita la capacidad de este sistema para remover estos contaminantes. Este problema puede solucionarse incrementado el tiempo de biodigestión y/o implementado un sistema de recirculación (Barba, 2002).

El fósforo es un nutriente vital para el desarrollo de los organismos acuáticos, su concentración debe controlarse ya que promueve el proceso de eutrofización; pese a que el valor hallado se encuentra dentro de los límites permisibles se debe tener especial cuidado con este parámetro, debido a que la descarga de 1 g de fósforo puede permitir la formación de 100 g de biomasa, lo cual representa una D.B.O de 150 g de oxígeno para su oxidación aerobia total (Muñoz, 2008).

El incremento en las unidades de color se debe al medio filtrante, la turba y los trozos de madera incrementan el color del efluente, no es necesario la remoción completa de la

CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO A ESCALA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO BIOLÓGICO EMPLEANDO MICROORGANISMOS PARA LA DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES PROCEDENTES DE UNA INDUSTRIA FARMACÉUTICA EN LA CIUDAD DE QUITO

coloración ya que el agua se destinará a riego. Sin embargo, la biofiltración es un tratamiento secundario y el agua tratada puede pasar a posteriores etapas (tratamiento terciario) para la disminución del color.

La temperatura no presentó cambios significativos durante todo el tratamiento (Tabla No. 15), pero debe ser monitoreada ya que es uno de los factores limitantes de la actividad microbiana en el biofiltro. El nitrógeno total, los sólidos en suspensión, la D.B.O y D.Q.O fueron los parámetros que disminuyeron en mayor porcentaje (Tabla No. 15), presentando una reducción del 89%, 66,7%, 60,5% y 30,2% respectivamente, de acuerdo al objetivo del tratamiento biológico aplicado.

Los parámetros D.Q.O y sólidos suspendidos totales se utilizaron para determinar la eficiencia del sistema de biofiltración, pero como se mencionó anteriormente los valores alcanzados no son los máximos debido a la edad de la biopelícula, la carencia de un sistema automático de recirculación y la necesidad de optimizar las variables de operación del sistema. Buelna et al. (2011) reportaron una reducción de más del 95% de D.B.O₅ y sólidos suspendidos, y más del 90% del nitrógeno total, empleando biofiltración sobre cama orgánica para el tratamiento de aguas residuales institucionales, sanitarias y municipales y también para la depuración de efluentes pertenecientes a la industria porcícola y agroalimentaria. La configuración que presenta un biofiltro lo protege contra los efectos de las variaciones de carga y temperatura, por lo que es considerado como una tecnología de gran estabilidad operacional. También cabe destacar que este tratamiento biológico permitió desodorizar el efluente tratado.

Los resultados obtenidos para la Materia Orgánica Removida (M), la Tasa de Remoción Superficial (TRS) y la Tasa de Remoción Volumétrica (TRV) solo evidencian la eficiencia del tratamiento en un determinado periodo de tiempo y bajo ciertas condiciones;

estos valores pueden variar dependiendo de las características del agua residual, factores ambientales y variables operacionales. Puede mejorarse el rendimiento del proceso controlando la carga hidráulica, el tiempo de digestión e implementado un sistema de recirculación automática, el cual permitiría un mejor contacto de del efluente con la biopelícula y una distribución más uniforme del agua residual (Muñoz, 2008).

4.1. CONCLUSIONES

- Se construyó una planta de tratamiento biológico a escala de laboratorio, constituida por un tanque de homogenización, un biofiltro y un tanque de almacenamiento, para la depuración de aguas residuales procedentes de una industria farmacéutica.
- El diseño constó de tres etapas: homogenización, biofiltración y almacenamiento. La muestra se homogenizó en el primer tanque, luego pasó al biofiltro, mediante un sistema de aspersion estático. El biofiltro contó con dos entradas de oxígeno situadas en la parte inferior del mismo, como medio filtrante se utilizó turba y trozos de madera, y como empaque se empleó roca volcánica. Finalmente, el líquido se drenó hacia el tanque de almacenamiento utilizando válvulas de paso. Todo el sistema se interconectó mediante tubería PVC y se controló el paso de la muestra de una etapa a otra mediante válvulas de bola.
- Dentro de los parámetros de diseño se estimó un índice de biodegradabilidad de 0,6, correspondiente a material muy biodegradable, un volumen total de $0,1 \text{ m}^3$, un área total $1,9 \text{ m}^2$, tiempo de retención hidráulica de 29,6 min y una carga hidráulica de $0,17 \text{ cm}^3/\text{cm}^2 \cdot \text{min}$.
- Se caracterizó mediante un análisis físico-químico las aguas residuales antes y después del tratamiento biológico, se obtuvieron mayores porcentajes de remoción en los

CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO A ESCALA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO BIOLÓGICO EMPLEANDO MICROORGANISMOS PARA LA DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES PROCEDENTES DE UNA INDUSTRIA FARMACÉUTICA EN LA CIUDAD DE QUITO

parámetros: sólidos en suspensión, nitrógeno total y D.B.O₅. Los parámetros que aumentaron su valor fueron: pH, fosforo total y aceites y grasas. Sin embargo, todos los valores reportados se encontraron dentro de los límites permisibles.

- Con base en los resultados obtenidos, la biofiltración sobre cama de orgánica demostró ser eficiente en la remoción de materia orgánica y altas cargas de nitrógeno. La eficiencia de remoción de materia orgánica fue del 30,2 % para D.Q.O y 66,7% para sólidos en suspensión. También se estimó la tasa de remoción superficial y la tasa de remoción volumétrica.
- La caracterización morfológica y bioquímica develó la presencia de bacterias Gram positivas y Gram negativas, aerobicas y anaeróbicas facultativas con actividad catalasa.
- A pesar de que existió la eliminación del principio activo naproxeno sódico, esto no implica la total eliminación de fármacos en el agua residual tratada.
- La biofiltración es un tratamiento biológico eficiente y económicamente viable para la depuración de aguas residuales contaminadas con fármacos, presentando numerosas ventajas frente a las tecnologías convencionales comúnmente empleadas. Puede emplearse de manera individual o a su vez utilizarse conjuntamente con otros métodos de tratamiento para alcanzar mejores resultados.

4.2. RECOMENDACIONES

- Es recomendable probar diferentes medios orgánicos filtrates con el fin de seleccionar el más idoneo para depuración de aguas contaminadas con productos farmacéuticos.
- Se podrían implementar otras etapas de tratamiento como sedimentación, que ayuden a mejorar el rendimiento de la planta de biofiltración.

CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO A ESCALA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO BIOLÓGICO EMPLEANDO MICROORGANISMOS PARA LA DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES PROCEDENTES DE UNA INDUSTRIA FARMACÉUTICA EN LA CIUDAD DE QUITO

- Reemplazar el aspersor fijo por un aspersor giratorio un ayude a distribuir el agua de manera más homogénea.
- Mejorar el diseño del biofiltro de manera que se facilite el muestreo del material filtrante y la medición de parámetros físico-químicos como la temperatura, humedad y pH.
- Colocar en la parte inferior del biofiltro mallas con menor tamaño de poro, para evitar el arrastre del material filtrante en la corriente de agua tratada.
- Se recomienda tomar un mayor número de muestras para obtener resultados más significativos respecto al análisis de los parámetros físico-químicos antes y después de aplicar el tratamiento biológico.
- Es recomendable reairzar análisis cromatográficos que permitan establecer el tipo y la concentración de fármacos presentes en los residuos líquidos generados por la planta farmacéutica, con el fin de implementar un tratamiento de aguas eficiente a nivel operativo y económico.
- Los parámetros físico-químicos deberían ser monitoreados permanentemente para optimizar las variables de operación de la planta de biofiltración.
- Se recomienda realizar pruebas moleculares para establecer la estructura y composición de la comunidad microbiana que forma la biopelícula establecida en el biofiltro.
- El tiempo de contacto del agua residual con la biopelícula debe incrementarse para obtener mejores resultados en cuanto a la remoción de materia orgánica.
- Se debería trabajar con diferentes tiempos de biodigestión para establecer el valor óptimo de funcionamiento del biofiltro.

CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO A ESCALA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO BIOLÓGICO EMPLEANDO MICROORGANISMOS PARA LA DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES PROCEDENTES DE UNA INDUSTRIA FARMACÉUTICA EN LA CIUDAD DE QUITO

- Es recomendable implementar un sistema automático de recirculación del efluente para obtener una mayor reducción de parámetros como D.B.O₅, D.Q.O y fósforo total.

BIBLIOGRAFÍA

- Al-Rifai, J., Gabelish, C., & Schafer, A. (2007). Occurrence of pharmaceutically active and nonsteroidal estrogenic compounds in three different wastewater recycling schemes in Australia. *Chemosphere* , 803-815.
- Andreozzi, R., Marotta, R., & Nicklas, P. (2003). Pharmaceuticals in STP effluents and their solar photodegradation in aquatic environment. *Chemosphere* 50 , 1319-1330.
- Arana, Á. (2010). Biofiltro edificio de tamices de la E.D.A.R. de Arazuri: Estudio y propuesta de mejoras. *Universidad Pública de Navarra* , 139.
- Arnáiz, C., Isac, L., & Lebrato, J. (2000). Tratamiento biológico de aguas residuales. *Revista Tecnología del Agua* , 1-7.
- Barba, L. (2002). Conceptos básicos de la contaminación del agua y parámetros de medición . *Universidad del Valle* , pp 48.
- Bendez, D., N, P., Ginn, T., & Loge, F. (2005). Occurrence and fate of pharmaceutically active compounds in the environment, a case study: Hoje River in Sweden. *J Hazard Mater* , 195–204.
- Bolívar, F. (2004). *Fundamentos y casos exitosos de la biotecnología moderna*. México D.F: El Colegio Nacional.
- Bound, J., & Voulvoulis, N. (2006). Predicted and measured concentrations for selected pharmaceuticals in UK rivers: Implications for risk assessment. *Water Res* , 2885-2892.
- Boxall, A. (2004). The environmental side effects of medication. How are human and veterinary medicines in soils and water bodies affecting human and environmental health? *EMBO reports* 5 , 12.
- Boyd, G., Zhang, S., & Grimm, D. (2005). Naproxen removal from water by chlorination and biofilm processes. *Water Res* , 668–676.
- Buelna, G. (2000). Biofilter for purification of wastewater and waste gases and method therefore . *US patent 6100 081* .
- Buelna, G., Garzón, M., & Moeller, G. (2011). Los Biofiltros de empaque orgánico: una alternativa simple, robusta y eficiente para el tratamiento de aguas residuales en zonas rurales. *Ide@s CONCYTEG* , 540-551.
- Carballa, M., Omil, F., Lema, J., Llompарт, M., Garcia, C., Rodríguez, I., y otros. (2004). Behavior of pharmaceuticals cosmetics and hormones in a sewage treatment plant. *Water Research*, 38, 2918-2926.
- Carballa, M., Omil, F., & Lema, J. (2007). Calculation methods to perform mass balances of micropollutants in sewage treatment plants. Application to pharmaceutical and personal care products (PPCPs). *Environ Sci Technol* , 884–890.
- Casado, C. (2010). Degradación de naproxeno y carbamazepina por tratamientos biológicos . *Universidad Rey Juan Carlos* , 59.

CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO A ESCALA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO BIOLÓGICO EMPLEANDO MICROORGANISMOS PARA LA DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES PROCEDENTES DE UNA INDUSTRIA FARMACÉUTICA EN LA CIUDAD DE QUITO

- Cordero, C., Guerrero, D., & Sinche, P. (2008). Determinación de la eficiencia de un tratamiento aerobio de aguas residuales, con la aplicación de un sistema de contactor biológico rotante (biodisco). *Universidad Politécnica Salesiana* , 150.
- Cortacans, J., Hernández, A., del Castillo, I., Montes, E., & Hernández, A. (2006). Presencia de fármacos en aguas residuales y eficacia de los procesos convencionales en su eliminación. *Universidad Politécnica de Madrid* , 1-13.
- Da Ros, G. (1995). *La contaminación de aguas en Ecuador: Una aproximación económica*. Quito: ABYA YALA.
- Díaz, F., & Giraldo, E. (2005). Vertical-flow constructed wetland system improvement by using biofilters. *26th Annual Meeting: Society of Wetland Scientists* , 1-10.
- EDQM-Dirección Europea de la calidad del medicamento y cuidado de la salud. Todos los derechos reservados. Copyright 2000-2013.
- Escuela Superior de Ciencias Experimentales y Tecnología. (2001). *Guión de prácticas de Microbiología*. Madrid: Área de Biología y Conservación Universidad Rey Juan Carlos.
- Etcharen, P. (2005). Diseño de un sistema de biofiltración para la eliminación de olores en la fábrica Lubascher y Krause. *Universidad Católica de Temuco, Tesis doctoral* .
- Fent, K., Weston, A., & Caminada, D. (2006). Ecotoxicology of human pharmaceuticals. *Toxicol.Aquat* , 122-159.
- Garzón, M. A. (2004). La biofiltración sobre cama de turba, un tratamiento eficiente para diferentes tipos de agua residual industrial. *Revista de Ingeniería Sanitaria y Ambiental* , 1-8.
- Gobel, A., Thomsen, A., Mc Ardell, C., Alder, A., Giger, W., Theib, N., y otros. (2005). Extraction and determination of sulfonamides, macrolides, and trimethoprim in sewage sludge. *J. Chromatogr* , 179-189.
- Gómez, J., Petrovic, M., Fernández, A., & Barceló, D. (2006). Determination of pharmaceuticals of various therapeutic classes by solid-phase extraction and liquid chromatography–tandem massspectrometry analysis in hospital effluent wastewaters. *J. Chromatogr* , 224-233 .
- Guaytarilla, E., & Mangia, C. (2012). *Diseño y simulacion de un sistema purificador de agua de pozo para inyectables con capacidad de produccion de 2500 litros/hora, mediante el proceso de ósmosis reversa*. Quito: Universidad Politécnica Salesiana.
- Harder, B. (2003). Extracting estrogens. *Science News* , 67-68.
- Hernández, A. (2000). *Manual de depuración Uralita*. España: Thompson Learning.
- Jiménez, E., & Villegas, A. (2005). Diseño de un sistema de biofiltración para la remoción de estireno. *Revista EIA* (3), 9-20.
- Jones, O., Lester, J., & Voulvoulis, N. (2005). Pharmaceuticals: A threat to drinking water? *Scheme Biotechnology* , 164 -167.

CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO A ESCALA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO BIOLÓGICO EMPLEANDO MICROORGANISMOS PARA LA DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES PROCEDENTES DE UNA INDUSTRIA FARMACÉUTICA EN LA CIUDAD DE QUITO

- Kinney, C., Furlong, E., Zaugg, S., Burkhardt, M., Werner, S., Cahill, J., y otros. (2006). Survey of organic wastewater contaminants in biosolids destined for land application. *Environ Sci Technol* , 7207-7215.
- Kummerer, K. (2001). Drugs in the environment: emission of drugs, diagnostic aids and disinfectants into wastewaters by hospitals in relation to others sources- A review. *Chemosphere* , 957-969.
- Lishman, L., Smyth, S., Sarafin, K., Kleywegt, S., Toito, J., Peart, T., y otros. (2006). Occurrence and reductions of pharmaceuticals and personal care products and estrogens by municipal wastewater treatment plants in Ontario, Canada. *Sci. Total Environ* , 544-558 .
- Lozano, L., Rivera, E., & Torres, L. (2005). Diseño de un biofiltro para la detoxificación de mercurio (Hg) mediante la utilización del microorganismo (*Pseudomona aeruginosa*). *Boletín Científico Entérese* , 22-26.
- Mara, D. D. (1976). *Sewage Treatment in Hot Climates* . Londres: John Wiley and Sons.
- Matamoros, V., García, J., & Bayona, J. (2008). Organic micropollutant removal in a full-scale surface flow constructed wetland fed with secondary effluent. *Water Res* , 653–660.
- Melgoza, R., & de la Cruz, R. (2006). Tratamiento de un efluente textil por medio de un biofiltro discontinuo secuenciado anaerobio/aerobio. *Universidad Autónoma del Estado de Morelos* , 1-10.
- Merli, G., & Ricciuti, N. (2009). *Microbiología de las aguas residuales-aplicación de biosólidos en suelo*. eduTecNe.
- Mézquita, A. (Junio de 2009). CIAP. Recuperado el 1 de Noviembre de 2012, de Centro de Información de actividades porcinas: <http://www.ciap.org.ar>
- Muñoz, A. (2008). *Cracterización y Tratamiento de Aguas Residuales*. Hidalgo: Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.
- Muñoz, R. (14 de Mayo de 2009). CIRIA UDLAP. Recuperado el 1 de Noviembre de 2012, de Fundamentos del Tratamiento Biológico: <http://catarina.udlap.mx>
- Nakada, N., Tanishima, T., Shinohara, H., Kiri, K., & Takada, H. (2006). Pharmaceutical chemicals and endocrine disrupters in municipal wastewater in Tokyo and their removal during activated sludge treatment. *Water Res* , 3297–3303.
- Nazar, J. (2007). Biofilms bacterianos. *Revista de otorrinolaringología y cirugía de cabeza y cuello* , 61-72.
- Parra, O. O. (1989). La Eutroficación de la Laguna Grande de San Pedro, Concepción, Chile: un caso de estudio. *Ambiente y Desarrollo* , 117-136.
- Peng, X., Yu, Y., Tang, C., Tan, J., Huang, Q., & Wang, Z. (2008). Occurrence of steroid estrogens, endocrine-disrupting phenols, and acid pharmaceutical residues in urban riverine water of the Pearl River Delta, South China. *Sci. Total Environ* , 158-166.

CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO A ESCALA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO BIOLÓGICO EMPLEANDO MICROORGANISMOS PARA LA DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES PROCEDENTES DE UNA INDUSTRIA FARMACÉUTICA EN LA CIUDAD DE QUITO

- Quesada, I. (2009). Métodos no convencionales para el tratamiento de aguas contaminadas con productos farmacéuticos . *Instituto Nacional Politécnico de Toulouse-Escuela Nacional Superior de Ingenieros en Artes Químicas y Tecnológicas* , 177.
- Quezada, A. (2011). La Industria Farmacéutica en el Ecuador: mirando hacia adelante. *ESPAE Y EMPRESA* , 7-11.
- Quintana, J., Weiss, S., & Reemtsma, T. (2005). Pathways and metabolites of microbial degradation of selected acidic pharmaceutical and their occurrence in municipal wastewater treated by a membrane bioreactor. *Water Res* , 2654–2664.
- Ramalho, R., Jiménez, D., & De Lora, F. (2003). *Tratamiento de Aguas Residuales*. Barcelona: Reverté, S.A.
- Ramos, C., Espinosa, M., López, M., & Pellón, A. (2005). Tratamiento de las aguas residuales provenientes de la industria de medicamentos. *Revista CENIC Ciencias Químicas, Vol 36* (No 1), 39-44.
- Resolución N° 0002-DMA-2008. Distrito Metropolitano de Quito: Sustitutiva del Título V, “Del Medio Ambiente”, Libro Segundo, Código Municipal.
- Reynolds, K. A. (2002). Tratamiento de Aguas Residuales en Latinoamérica Identificación del Problema. *Revista Agua Latinoamerica* , 16-20.
- Rigola, M. (1989). *Tratamiento de Aguas Industriales: Aguas de proceso y residuales*. Barcelona: Alfaomega Grupo editor .
- Rivera, N., & Valencia, N. (2003). Estudio preliminar para el tratamienro de lixiviados en un reactor de lodos activados. *Universidad Nacional de Colombia*, pp 112.
- Rocha, E. (2008). *Ingeniería de Tratamiento de Aguas Residuales*. México: Universidad Autónoma de Chihuahua.
- Rodarte, A., Moreira, M., Feijoo, G., & J, L. (2010). Evaluation of two fungal strains for the degradation of pharmaceuticals and personal care products (ppcps). *Chemical Engineering Transactoins* , 31-36 .
- Rodriguez, I., J, Q., Carpinteiro, J., Carro, A., Lorenzo, R., & Cela, R. (2003). Determination of acidic drugs in sewage water by gas chromatography-mass spectrometry as tertbutyldimethylsilyl derivatives. *J Chromatogr* , 265–274.
- Rodríguez, T. (2003). Biofiltros, una opción para mejorar las características de las aguas residuales provenientes de tratamientos convencionales. *Seminario Internacionale sobre métodos naturales para el tratamiento de agua residuales* , 4.
- Romero, J. (2004). *Tratamiento de Aguas Residuales, Teoría y Principios de Diseño* (Tercera edición ed.). Colombia: Editorial Escuela Comlombiana de Ingeniería.
- Sánchez, I., García, R., & Guerrero, C. (2012). Montaje y Evaluación preliminar de biofiltros de flujo ascendente y descendente para tratamiento de aguas residuales de un sistema de recirculación acuícula para cultivo de trucha arcoiris . *Revista Investigación Pecuaria* , 108-117.

CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO A ESCALA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO BIOLÓGICO EMPLEANDO MICROORGANISMOS PARA LA DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES PROCEDENTES DE UNA INDUSTRIA FARMACÉUTICA EN LA CIUDAD DE QUITO

- Sang, K., Jeewon, C., In, K., Brett, V., & Shane, S. (2007). Occurrence and removal of pharmaceuticals and endocrine disruptors in South Korean surface, drinking, and waste waters. *Water Res* , 1013-1021.
- Sans, R. (1999). *Ingeniería ambiental: Contaminación y Tratamientos*. México: Alfaomega.
- Sans, R., & de Pablo, J. (1999). *Ingeniería Ambiental: Contaminación y tratamientos* . Barcelona: MARCOMBO S.A.
- Santos, J., Aparicio, I., & Alonso, E. (2007). Occurrence and risk assessment of pharmaceutically active compounds in wastewater treatment plants. A case study: Seville city (Spain). *Environ. Int* , 596-601.
- Sekoulov, I., Rüdiger, A., & Barz, M. (2009). Biofiltración innovadora para el tratamiento de aguas residuales. *TerraViva Tec S.L.* , 1-14.
- Spongberg, A., & Witter, J. (2008). Pharmaceutical compounds in the wastewater process stream in Northwest Ohio. *Sci. Total Environ* , 148-157.
- Tamtam, F., Mercier, F., Le Bot, B., Eurin, J., Dinh, Q., Clément, M., y otros. (2008). Occurrence and fate of antibiotics in the Seine River in various hydrological conditions. *Sci.Total Environ* , 84-95.
- Tauxe, W. (2005). Wastewaters: occurrence of pharmaceutical substances and genotoxicity. *Tesis para optar al Grado de Doctor en Ingeniería Química. Lausanne* , 263 p.
- Tchobanoglous, G., & Crites, R. (2000). *Sistemas de Manejo de Aguas Residuales para Núcleos Pequeños y Descentralizados*. Bogotá: Editorial Mc. Graw Hill.
- Thomas, K., Dye, C., Schlabach, M., & Langford, K. (2007). Source to sink tracking of selected human pharmaceuticals from two Oslo city hospitals and a wastewater treatment works. *J. Environ. Monit* , 1410-1418.
- Universidad Autónoma de Chihuahua. (Octubre de 2009). *OoCities.org*. Recuperado el 8 de Octubre de 2012, de <http://www.oocities.org>
- Vellén, L. (2011). *Diseño de un Biofiltro* . Universidad Politécnica de Catalunya .
- Vieno, N., Tuhkanen, T., & Kronberg, L. (2005). Seasonal variation in the occurrence of pharmaceuticals in effluents from a sewage treatment plant and in the recipient water. *Environ Sci Technol* , 8220–8226.
- Zuccato, E., Castiglioni, S., Fanelli, R., Bagnati, R., Reitano, G., & Calamari, D. (2004). *Risk related to the discharge of pharmaceuticals in the environment: Further research is needed*. Berlin: Springer-Verlag.
- Zuccato, E., Castiglioni, S., & Fanelli, R. (2005). Identification of the pharmaceuticals for human use contaminating the italian aquatic environment. *J. Hazard. Mater* , 205-209.