

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

## **FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AGROINDUSTRIA**

### **ESTUDIO DE LA REMOCIÓN DE CARGAS CONTAMINANTES DE LAS AGUAS RESIDUALES PROVENIENTES DE UNA FÁBRICA DE FRITURAS MEDIANTE UNA BIO TORRE CON LECHO ESTÁTICO DE POLI (ETILEN TEREFALATO)**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO  
QUÍMICO**

**DIEGO GUSTAVO GRANDA ALBUJA**

**(diego-r-g@hotmail.com)**

**DIRECTOR: ING. LUCÍA MARGARITA MONTENEGRO AGUAS Msc.**

**(lucia.montenegro@epn.edu.ec)**

**Quito, noviembre 2016**

© Escuela Politécnica Nacional (2016)  
Reservados todos los derechos de reproducción

## **DECLARACIÓN**

Yo, Diego Gustavo Granda Albuja, declaro que el trabajo aquí escrito es de mi autoría, que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

---

Diego Gustavo Granda Albuja

## **CERTIFICACIÓN**

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Diego Gustavo Granda Albuja, bajo mi supervisión.

---

**Ing. Lucía Montenegro Aguas MsC.**

**DIRECTORA DE PROYECTO**

## **AGRADECIMIENTOS**

A mis padres Cecilia e Iván.

A mis hermanos y mis sobrinos.

A Jessy.

A mi directora Ing. Lucía Montenegro

A mis amigos Andre, Eve, Néstor y Pancho.

A Gaby y Marcelo.

A Marco Cordero y COMSAJU Snacks.

## **DEDICATORIA**

Trabajo dedicado a las personas interesadas en un método innovador de  
tratamiento de aguas.

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

	<b>PÁGINA</b>
<b>1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>1</b>
1.1. Efluentes de las industrias de alimentos	1
1.1.1. Principales contaminantes de los efluentes de la industria de alimentos	1
1.1.2. Normativa legal vigente	4
1.2. Tratamientos de efluentes en la industria alimenticia	5
1.2.1. Tratamientos físicos	5
1.2.2. Tratamientos químicos	10
1.2.3. Tratamientos biológicos	12
<b>2. PARTE EXPERIMENTAL</b>	<b>23</b>
2.1. Establecimiento de las etapas de acondicionamiento de las aguas residuales provenientes de una fabrica de frituras previo al desarrollo de la película bacteriana	23
2.1.1. Definición de la composición inicial de las aguas residuales	23
2.1.2. Evaluación de la remoción de sólidos suspendidos totales	26
2.1.3. Evaluación de pH y biodegradabilidad del efluente del desarenador	29
2.2. Desarrollo de una biopelícula de bacterias serobias en el lecho estático de PET	30
2.2.1. Construcción del bioreactor a escala laboratorio	30
2.2.2. Evaluación del crecimiento bacteriano	32
2.2.3. Conteo de las bacterias que conforman la biopelícula bacteriana	34
2.3. Evaluación de la eficiencia de la bio torre con lecho estático de PET impregnado con una biopelícula de bacterias aerobias	35
<b>3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	<b>37</b>
3.1. Establecimiento de las etapas de acondicionamiento de las aguas residuales provenientes de una fábrica de frituras previo al desarrollo de la película bacteriana	37
3.1.1. Definición de la composición inicial de las aguas residuales	37
3.1.2. Evaluación de la remoción de sólidos suspendidos totales	41
3.1.3. Evaluación de pH y biodegradabilidad del efluente del desarenador.	45
3.2. Desarrollo de la biopelícula bacteriana sobre el lecho estático de PET	46
3.2.1. Construcción del bioreactor a escala laboratorio	46
3.2.2. Evaluación del crecimiento bacteriano	48
3.2.3. Conteo de las bacterias que conforman la biopelícula bacteriana	59
3.3. Evaluación de la eficiencia de la bio torre con lecho estático de PET impregnado con una biopelícula de bacterias aerobias	62

<b>4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	73
4.1. Conclusiones	73
4.2. Recomendaciones	75
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	76
<b>ANEXOS</b>	81

## ÍNDICE DE TABLAS

		PÁGINA
<b>Tabla 1.1.</b>	Límites máximos permisibles para parámetros físico-químicos de la industria alimentaria.	5
<b>Tabla 1.2.</b>	Criterios de diseño de un desarenador de flujo horizontal.	7
<b>Tabla 1.3.</b>	Características de los medios de soporte más utilizados en un BAS	15
<b>Tabla 1.4.</b>	Ventajas y desventajas del uso de una bio torre de aire sumergido a nivel industrial	21
<b>Tabla 2.1.</b>	Número de muestras simples en función del tiempo de trabajo del emisor de la descarga	24
<b>Tabla 2.2.</b>	Parámetros y métodos de caracterización del agua residual proveniente de una fábrica de frituras	25
<b>Tabla 2.3.</b>	Datos utilizados para la construcción del desarenador	26
<b>Tabla 2.4.</b>	Relación de biodegradabilidad de un efluente	30
<b>Tabla 2.5.</b>	Condiciones de funcionamiento de los bioreactores	31
<b>Tabla 2.6.</b>	Condiciones de funcionamiento de la bio torre	36
<b>Tabla 3.1.</b>	Determinación del tiempo necesario para llenar un recipiente de 3 litros de cada muestra simple durante los 3 días de muestreo	38
<b>Tabla 3.2.</b>	Determinación del caudal de cada muestra simple durante los 3 días de muestreo	39
<b>Tabla 3.3.</b>	DBO, DQO, SST y aceites y grasas obtenidos de las tres muestras compuestas	40
<b>Tabla 3.4.</b>	Dimensiones del desarenador	41
<b>Tabla 3.5.</b>	pH del efluente recuperado desde el desarenador durante 3 repeticiones	45
<b>Tabla 3.6.</b>	Coeficiente de biodegradabilidad sobre el DBO Y DQO, de las tres muestras compuestas obtenidas	46
<b>Tabla 3.7.</b>	Características físicas de los reactores	47

<b>Tabla 3.8.</b>	Masa de melaza y DQO agregados a la muestra de agua restante en el Reactor A	52
<b>Tabla 3.9.</b>	Masa de melaza y DQO agregados a la muestra de agua restante en el Reactor B	53
<b>Tabla 3.10.</b>	Datos obtenidos para la determinación del orden de la impregnación en el Reactor A	54
<b>Tabla 3.11.</b>	Datos obtenidos para la determinación del orden de la impregnación en el Reactor B	55
<b>Tabla 3.12.</b>	Cantidad de bacterias encontradas en un litro de agua para un total de 220 pedazos del lecho estático de PET	59
<b>Tabla 3.13.</b>	Cantidad de bacterias encontradas en un m <sup>2</sup> del lecho estático de PET	60
<b>Tabla 3.14.</b>	DBO, DQO, SST y aceites y grasas obtenidos de las tres muestras compuestas para la evaluación de la bio torre	62
<b>Tabla 3.15.</b>	Evaluación del SST obtenidos de las tres muestras compuestas para la evaluación de la bio torre	63
<b>Tabla 3.16.</b>	pH del efluente recuperado desde el desarenador para la evaluación de la bio torre	64
<b>Tabla 3.17.</b>	Coefficiente de biodegradabilidad sobre el DBO y DQO, de las tres muestras compuestas obtenidas para la evaluación de la bio torre	65
<b>Tabla 3.18.</b>	Determinación de aceites y grasas para un caudal de 2,5 L/día durante 24 horas de tratamiento	66
<b>Tabla AIV.1.</b>	Medición de sólidos suspendidos totales durante 90 segundos en el desarenador	91
<b>Tabla AV.1.</b>	Determinación de la eficiencia en la remoción de DQO en el Reactor A en función del tiempo	92
<b>Tabla AV.2.</b>	Determinación de la eficiencia en la remoción de DQO en el Reactor B en función del tiempo	93
<b>Tabla AVI.1</b>	Determinación de los sólidos suspendidos totales para un caudal de 2,5 l/día durante 24 horas de tratamiento	94
<b>Tabla AVI.2</b>	Determinación de DBO <sub>5</sub> para un caudal de 2,5 L/día durante 24 horas de tratamiento	95

**Tabla AVI.3** Determinación de DQO para un caudal de 2,5 L/día durante 24 horas de tratamiento

## ÍNDICE DE FIGURAS

		PÁGINA
<b>Figura 1.1.</b>	Esquema de un desarenador de flujo horizontal	8
<b>Figura 1.2.</b>	Esquema del funcionamiento de un desarenador de flujo helicoidal	9
<b>Figura 1.3.</b>	Formación de una nata de sólidos suspendidos mediante flotación	10
<b>Figura 1.4.</b>	Proceso de adsorción de sustancias en carbón activado	11
<b>Figura 1.5.</b>	Sistema de discos biológicos rotatorios	13
<b>Figura 1.6.</b>	Esquema de un medio de soporte de una bitorre de aire sumergido	14
<b>Figura 1.7.</b>	Representación gráfica del crecimiento bacteriano en un material de soporte	17
<b>Figura 1.8.</b>	Curva de crecimiento donde se identifican las cuatro fases de desarrollo	18
<b>Figura 1.9.</b>	Esquema del funcionamiento de una bio torre de aire sumergido con lecho estático	21
<b>Figura 2.1.</b>	Zona de descarga del efluente en la fábrica de frituras	25
<b>Figura 2.2.</b>	Esquema del bioreactor de aire sumergido	31
<b>Figura 2.3.</b>	Cuartero para obtener una muestra representativa del lecho estático de PET	35
<b>Figura 3.1.</b>	Dimensiones del desarenador de flujo horizontal	42
<b>Figura 3.2.</b>	Resultados de sólidos suspendidos totales para un caudal de 12 L/min	43
<b>Figura 3.3.</b>	Desarenador de flujo horizontal después de 90 segundos de retención	44
<b>Figura 3.4.</b>	Comparativa del agua que entro al desarenador (izquierda) y efluente obtenido desde el desarenador (derecha).	44
<b>Figura 3.5.</b>	Esquema del reactor y sus dimensiones (izquierda) y reactor construido a escala laboratorio (derecha).	48
<b>Figura 3.6.</b>	Disminución de DQO respecto al tiempo para los reactores A y B.	49
<b>Figura 3.7.</b>	Aumento de la eficiencia con respecto al tiempo para los reactores A y B.	51

<b>Figura 3.8.</b>	Regresión lineal de la reacción de impregnación de primer orden	56
<b>Figura 3.9.</b>	Regresión lineal de la reacción de impregnación de segundo orden	57
<b>Figura 3.10.</b>	Regresión lineal de la reacción de impregnación de orden cero	58
<b>Figura 3.11.</b>	Cantidad de bacterias por mL de lecho estático de PET.	60
<b>Figura 3.12.</b>	Cantidad de bacterias por m <sup>2</sup> de lecho estático de PET.	61
<b>Figura 3.13.</b>	Evaluación de SST en la bio torre durante 24 horas	65
<b>Figura 3.14.</b>	Evaluación de la remoción de DBO <sub>5</sub> con respecto al tiempo para la bio torre con lecho estático de PET	68
<b>Figura 3.15.</b>	Evaluación de la eficiencia de remoción de DBO <sub>5</sub> con respecto al tiempo para la bio torre con lecho estático de PET	69
<b>Figura 3.16.</b>	Evaluación de la remoción de DQO con respecto al tiempo para la bio torre con lecho estático de PET	70
<b>Figura 3.17.</b>	Evaluación de la eficiencia de remoción de DQO con respecto al tiempo para la bio torre con lecho estático de PET	71
<b>Figura AIII.1</b>	Informe de resultados del conteo de bacterias por mL de agua	88

**ÍNDICE DE ANEXOS**

	<b>PÁGINA</b>
<b>ANEXO I</b> Cálculos para la construcción del desarenador	82
<b>ANEXO II</b> Balance de masa para el enriquecimiento de la muestra con agua fresca y melaza	85
<b>ANEXO III</b> Cálculo del conteo de bacterias con respecto al área del lecho estático de PET	88
<b>ANEXO IV</b> Pruebas de remoción de sólidos suspendidos totales en el desarenador	91
<b>ANEXO V</b> Pruebas de remoción de la demanda química de oxígeno en el bio reactor de aire sumergido	92
<b>ANEXO VI</b> Evaluación de SST, DQO y DBO <sub>5</sub> durante las 24 horas de funcionamiento de la bio torre	94

## RESUMEN

En el presente proyecto se planteó la remoción de las cargas contaminantes de las aguas residuales provenientes de una fábrica de frituras mediante una bio torre con lecho estático de PET impregnado con una biopelícula de bacterias aerobias propias del efluente, para lo cual se realizó la etapa de toma de muestras y acondicionamiento de las aguas, el muestreo consistió en la toma de cuatro muestras puntuales de 3 litros en un día y se obtuvo una muestra compuesta que fue analizada para determinar los parámetros fuera de la norma y se determinó los parámetros DBO<sub>5</sub>, DQO, SST y aceites y grasas, no cumplen con la Norma Técnica N°002-SA de la Ordenanza Metropolitana N°404.

La etapa de acondicionamiento se inició con la eliminación de los SST a través de un desarenador de flujo horizontal, para una muestra compuesta del efluente de 12 L/min de caudal (Sainz, 2005, p.109; Clesceri, 2014, pp. 242, 243).

Una vez eliminados los sólidos se realizó un análisis del pH y el coeficiente de biodegradabilidad para determinar si el agua es apta para realizar el proceso de impregnación y remoción de cargas contaminantes orgánicas (Soza, 2003, p. 22), se determinó que el efluente es apto y se realizó el desarrollo de la biopelícula bacteriana mediante dos reactores idénticos de 3 L con una carga contaminante inicial de DQO de 1 365 mg/L y 1 305 mg/L respectivamente en cada reactor (Lapo, 2014, pp. 66-84; Cohen, 2001, pp. 259 -271).

Cada 15 días se obtuvo una muestra de agua de cada reactor y se analizó el DQO para obtener la curva de remoción de cargas contaminantes en función del tiempo, este procedimiento se realizó durante 5 meses, obteniéndose siempre una mayor eficiencia de remoción, como resultado de una biopelícula bacteriana más desarrollada y estable (Lapo, 2014, pp. 69-71).

Con la biopelícula desarrollada y estable se realizó la evaluación mediante el conteo de las bacterias aerobias, hongos, levaduras y coliformes presentes en el lecho de PET, obteniéndose que la mayor cantidad de microorganismos presentes son las

aerobias mezófilas provenientes del propio efluente, se identificó que hay  $5,6818 \times 10^6$  ufc/m<sup>2</sup> de soporte, seguido de los hongos  $1,0511 \times 10^5$  upm/m<sup>2</sup> de soporte y levaduras  $1,4205 \times 10^5$  upl/m<sup>2</sup> de soporte, se concluyó que las bacterias provenientes del efluente (aerobias mezófilas) se han desarrollado en mayor cantidad en el lecho estático provocando la depuración del agua contaminada (Vintimilla, 2011, pp. 16-18) .

Se realizó la evaluación de la remoción de las cargas contaminantes en la bio torre de lecho de PET impregnado con una biopelícula bacteriana estable y se obtuvo que el tiempo ideal de tratamiento es de 16 horas para un caudal de 3 L/día, tiempo en el cual el efluente cumple con la Resolución N°002-SA-2014 de la Ordenanza Metropolitana N°404, pero alcanzo su máxima remoción a las 24 horas, donde se obtuvo una remoción de DBO<sub>5</sub> del 95,90 %, 94,64 % y 94,48 % en los tres días de evaluación, para DQO se obtuvo una eficiencia de remoción del 93,27 %, 92,61 % y 92,39 %.

La bio torre de lecho estático de PET impregnado con una biopelícula bacteriana del propio efluente que aprovecha y acelera la capacidad de autodepuración del agua, es un proyecto que puede dar un beneficio económico y legal a la empresa de frituras y queda abierto al estudio en otro tipo de efluentes (Lapo, 2014, p.84; Andreottola, 2005).

## INTRODUCCIÓN

En Ecuador la industria de alimentos representa el segundo sector más importante del valor del PIB, solo superada por la extracción y refinación de petróleo, de las fábricas de elaboración de alimentos las más representativas son las de conservación de carne y productos lácteos, camaroneras y pescados que representan el 74,1 % del total de este tipo de industria, por otro lado los procesos de manufactura relacionadas con la industria vegetal como: molienda, producción de aceites, azúcares y confitería representan al 25,9 % restante, constituyéndose en un sector económico muy importante dentro del país (Carrillo, 2009, p.2).

La industria alimentaria es una de las más contaminantes sobre todo por sus variados procesos que generan residuos sólidos, aguas residuales y emisiones gaseosas, sin embargo los efluentes en todos los tipos de industria de alimentos tienen como principales contaminantes a los componentes orgánicos, por lo que se determina la caracterización de las mismas con los siguientes parámetros físico químicos: Demanda Química de Oxígeno (DQO), Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), sólidos suspendidos totales y aceites y grasas (Restrepo, 2006, p.88).

Comsaju Snacks CIA. LTDA. es una fábrica de frituras y su producción incluye extruidos de maíz, papas fritas y cueros reventados, en cuyos procesos se generan efluentes líquidos que contienen residuos de maíz, tierra, almidón de papa que aumentan los parámetros físico químicos antes enunciados, la empresa actualmente cuenta con un sistema de tratamiento que requiere de la compra de bacterias y de un control operacional que genera un costo elevado para la pequeña industria. El presente proyecto pretende ahorrar la compra de las bacterias mediante un tratamiento que permita cumplir con las normativas vigentes.

En el Distrito Metropolitano de Quito a través de la Secretaria del Ambiente se regulan todos los residuos que generan las empresas, por lo cual se creó la Ordenanza Metropolitana N°404 que mediante su Resolución N°002-SA-2014 establece los límites máximos permisibles que deben cumplir los efluentes de la industria alimenticia en los parámetros antes dispuestos.

Para la remoción de los sólidos suspendidos totales se utiliza tanques sedimentadores que permiten la remoción de las partículas suspendidas mediante la decantación (Sainz, 2005, p.108; Romero, 2001, p. 293). Los Aceites y Grasas se remueven mediante la construcción de trampas de grasa o la biodegradación mediante tratamientos biológicos (Crites & Tchobanoglous, 2000, p. 264).

Los parámetros físico químicos DQO y DBO, requieren de un tratamiento biológico, que permita mediante el uso de bacterias degradar los componentes orgánicos, en el presente proyecto se propone un sistema que aproveche los mecanismos de autodepuración de agua mediante una Bio Torre de Aire Sumergido (BAS) con un lecho de PET impregnado con los propios microorganismos y bacterias del efluente (Comisión Europea, 2001, p.6; Moncayo, 2010; Tejero, 2012).

La BAS es un biofiltro que basa su eficiencia en el medio de soporte del lecho estático, este lecho puede ser de vidrio, arcilla, carbón activado, piedras, plástico (Andreottola, 2005; Cohen, 2000), en Ecuador se realizó un estudio para la remoción de DQO y DBO de aguas domésticas con soporte de plástico reciclado obteniendo una remoción sobre el 90 % (Lapo, 2014, pp. 16 -23).

Los estudios realizados permiten a Comsaju Snacks CIA. LTDA. evaluar el diseño y construcción de un sistema de tratamiento de aguas basado en la Bio torre de Aire Sumergido y todo el procedimiento de acondicionamiento realizado para alcanzar el cumplimiento de la normativa legal vigente.

# **1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA**

## **1.1. EFLUENTES DE LAS INDUSTRIAS DE ALIMENTOS**

### **1.1.1. PRINCIPALES CONTAMINANTES DE LOS EFLUENTES DE LA INDUSTRIA DE ALIMENTOS**

Una de las industrias que mayor impacto genera sobre el medio ambiente es la alimentaria, debido a su variedad de procesos productivos y la cantidad de sub productos que se generan (Restrepo, 2006, p.88). Este tipo de industria consume una gran cantidad de agua para distintas utilidades, tanto como materia prima, refrigerante, agente de limpieza, etc. (Pascual, 2009, p.4).

Los principales efluentes a tomar en cuenta son las aguas de proceso y de limpieza, en la industria de lácteos, azucarera, frutas, verduras, almidones, carnes, etc. se presentan altas concentraciones de DBO y DQO, debido a la cantidad de materia orgánica presente, así como por la naturaleza de las materias primas presentes en cada tipo de industria, los efluentes presentan aceites y grasas, también sólidos suspendidos, siendo estos los principales contaminantes presentes en los efluentes de este tipo de industria (Restrepo, 2006, pp. 88-90).

#### **1.1.1.1. Composición de los efluentes producidos en la fabricación de frituras**

Las frituras (extruidos de maíz, papas fritas, cueros reventados, etc.) se elaboran mediante: extrusión y/o corte de la materia prima, fritura u horneado y saborizado (Comsaju Snacks, 2014; Muñoz, 2009, pp. 12-16; Salinas, 2011, pp. 72-77).

La preparación de la materia prima previo al proceso de extrusión y/o corte involucra grandes cantidades de agua, esto se aprecia en el lavado de las papas y la preparación de los gritz de maíz, por lo que en el presente estudio se analiza los efluentes obtenidos en la preparación de extruidos de maíz y papas fritas.

En la elaboración de frituras los procesos de fabricación que generan efluentes son los extruidos de maíz y la preparación de papas fritas, cuyos procesos contaminantes se describen a continuación:

- **Extruidos de Maíz**

La preparación del extruido de maíz, tiene como paso previo la obtención del gritz de maíz, que es el resultado de la molienda del grano de maíz sin cáscara (INEN 2051, 1995).

El proceso de separación de la cáscara de maíz del grano se realiza mediante el calentamiento en una solución acuosa alcalina a una temperatura menor a ebullición (80 °C) durante 60 minutos y luego pasa por un reposo de 24 horas (Comsaju Snacks, 2014; Salinas, 2011, pp. 72-77). De este proceso se genera una descarga líquida que contiene abundantes residuos de cáscaras de maíz que se une a los otros efluentes generados en la empresa.

- **Papas Fritas**

Previo al corte y fritura de la papa, se realiza el proceso de pelado y lavado de la misma, para lo cual se utiliza agua potable en dos etapas primero se elimina los residuos de tierra presentes previo a la etapa de pelado y corte y posteriormente se realiza el lavado de la papa cortada para eliminar la mayor cantidad de almidón posible para obtener un producto de mejor calidad, por lo que se genera un efluente que requiere tratamiento (Comsaju Snacks, 2013; Muñoz, 2009, pp. 12-16 ).

Debido a los procesos anteriormente descritos y a la naturaleza de la industria alimentaria los parámetros físico - químicos que se deben analizar del efluente obtenido en una fábrica de frituras son: Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), Demanda Química de Oxígeno (DQO), Sólidos Suspendidos Totales (SST) y Aceites y grasas (Restrepo, 2006, pp. 88-90).

A continuación se describe cada uno de los parámetros de análisis del efluente:

### **1.1.1.2. Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)**

Es un parámetro que representa la materia orgánica biodegradable presente en el agua y se cuantifica a través de la cantidad de materia orgánica que puede ser consumida, degradada u oxidada por una colonia de bacterias, se determina mediante la comparación de oxígeno presente en una muestra de agua inicialmente y la presente cinco días después siendo este el tiempo estándar en el cual las bacterias digieren materia orgánica a una temperatura de 20 °C, al ser un parámetro físico químico de concentración se reporta como mgO<sub>2</sub>/L (Marín Ocampo, 2013, p. 23).

Se analiza en el laboratorio mediante el método APHA 5210B, según lo establece la Ordenanza Metropolitana N° 404 en su resolución N° 002-SA-2014 (Clesceri, 2014, pp. 712 – 720).

### **1.1.1.3. Demanda Química de Oxígeno (DQO)**

Representa una aproximación de la materia presente en el agua que es susceptible a la oxidación incluidos los biológicos, por lo tanto su valor cuantitativo siempre será superior al DBO<sub>5</sub> (Marín Ocampo, 2013, p. 23). Su determinación se realiza mediante la oxidación con Dicromato de Potasio a temperaturas elevadas, la cantidad oxidada se reporta con unidades de concentración mgO<sub>2</sub>/L (Marín Ocampo, 2013, p. 23). Se analiza en el laboratorio mediante el método APHA 5220D detallado en el Anexo I, según lo establece la Ordenanza Metropolitana N° 404 en su resolución N° 002 –SA - 2014 (Clesceri, 2014, pp. 722, 723; Municipio de Quito, 2014).

### **1.1.1.4. Sólidos Suspendidos Totales (SST)**

Son todos los sólidos presentes en un agua residual, no se toma en cuenta los solubles ni coloidales, se los cuantifica por un tamaño de partícula por encima de

un micrómetro (Barrenechea, 2004, p.8). Los sólidos suspendidos totales se analizan mediante el método APHA 2540D, según lo establece la Ordenanza Metropolitana N° 404 en su resolución N° 002-SA-2014 (Clesceri, 2014, pp. 242, 243).

#### **1.1.1.5. Aceites y grasas**

Es un parámetro físico-químico de compuestos orgánicos de naturaleza lipídica que son insolubles en agua, por lo que su cuantificación se realiza mediante la extracción del material orgánico en un solvente de naturaleza orgánica como el Hexano, se lo expresa en unidades de concentración mg/L de MEH (Material Extraíble en Hexano) (Romero 2001, p.59; Barrenechea, 2004, p.16).

Los aceites y grasas se analizan en el laboratorio mediante el método APHA 5220B, según lo establece la Ordenanza Metropolitana N° 404 en su Resolución N° 002-SA-2014 (Clesceri, 2014, pp. 722, 723).

#### **1.1.2. NORMATIVA LEGAL VIGENTE**

En el Ecuador los límites máximos permisibles para efluentes, emisiones y descargas residuales se regulan mediante diferentes instituciones como el Ministerio del Ambiente por parte del Estado y por instituciones municipales en las principales ciudades del país.

En el Distrito Metropolitano de Quito, desde el año 2014, está en vigencia la Ordenanza Metropolitana N° 404 cuya resolución N° 002-2014-SA establece los Límites Máximos Permisibles (LMP) para los parámetros físico-químicos de las descargas líquidas residuales. Para el caso de una fábrica de frituras se toman en cuenta los LMP de DBO, DQO, SST y aceites y grasas como se indica en la Tabla 1.1. (Municipio de Quito, 2014, p. 22-30).

**Tabla 1.1.** Límites máximos permisibles para parámetros físico-químicos de la industria alimentaria.

Parámetro	Expresado Como	Límite Máximo Permisible
Demanda Bioquímica de Oxígeno	DBO	170 mg/L
Demanda Química de Oxígeno	DQO	350 mg/L
Sólidos Suspendidos Totales	SST	1600 mg/L
Aceites y Grasas	A y G	70 mg/L

(Municipio de Quito; Resolución N°002-SA-2014 “Norma Técnica de la O. M. N° 404”)

## 1.2. TRATAMIENTOS DE EFLUENTES EN LA INDUSTRIA ALIMENTICIA

Los efluentes de la industria alimenticia contienen una carga contaminante principalmente compuesta de DBO, DQO, sólidos suspendidos totales y aceites y grasas, para realizar el tratamiento de estos efluentes se utiliza métodos que disminuyan las concentraciones de estos parámetros conflictivos. A continuación se describe los tratamientos más utilizados para la reducción de estos contaminantes en este tipo de industrias, de acuerdo a la siguiente clasificación (Ramalho, 2003, p.92):

### 1.2.1. TRATAMIENTOS FÍSICOS

Son operaciones que en general se producen al inicio de las plantas depuradoras para evitar inconvenientes en los procesos siguientes, se realiza remoción de basura, arenas y regulación de caudal por lo que se trata de sistemas de eliminación puramente físicos, en este grupo se incluyen el desbaste o cribado, sedimentación, flotación, filtración y desengrasado (Marín Ocampo, 2013, p.89).

A continuación se describen los principales tratamientos físicos:

### **1.2.1.1. Desbaste**

Debido a los varios procesos que se producen en las empresas de alimentos en los desagües terminan todo tipo de sólidos de tamaño muy grande (varios centímetros) como latas, botellas, plásticos, piedras, cáscaras etc. que deben ser detenidas, para lo cual se usa un sistema de desbaste o cribado compuesto principalmente de pozos gruesos, rejillas y tamices (Sainz, 2005, pp.79, 80; Ramalho, 2003, p.92).

### **1.2.1.2. Sedimentación**

En las aguas residuales se presentan partículas sólidas suspendidas de diferentes tamaños y en diferentes estados de suspensión, por lo que están sometidos a fuerzas gravitacionales que producen su caída a una velocidad de sedimentación dependiente del tamaño de partícula, convirtiendo a la sedimentación en una técnica efectiva y de bajo costo (Weber, 2003, p.115).

La sedimentación se produce en varias etapas dependiendo de la planta de tratamiento de aguas residuales, por lo general se trata de un pretratamiento y en algunos casos es el único tratamiento que recibe el efluente (Ramalho, 2003, p.92).

Un tipo de sedimentador que se especializa en la eliminación de arena y tierra es conocido como desarenador, a continuación se detalla sus características:

- **Desarenador**

Es un tipo de sedimentador muy utilizado cuya función como tratamiento previo es la eliminación de los sólidos en suspensión con un peso específico elevado y de naturaleza inorgánica (tierra, arena, grava, ripio), se considera que elimina a todo sólido con tamaño de partícula superior a 0,2 mm (Sainz, 2005, pp.101, 102).

El desarenador ha sufrido una evolución para mejorar sus diseños, por lo que existen varios tipos como:

- Desarenador de flujo horizontal es un canal rectangular que permite la decantación de las arenas (Figura 1.1), el agua circula a través de toda la longitud del desarenador, permitiendo disminuir los sólidos suspendidos totales y que el agua se clarifique, soporta caudales pequeños por lo que se utiliza en plantas de tratamiento de empresas que generan efluentes bajos y con contaminantes uniformes, su funcionamiento se basa en dos velocidades que son: la de entrada del efluente al canal ( $V$ ) y la de caída de partícula ( $v$ ) que producen la decantación (Sainz, 2005, pp.102–105).

En la Tabla 1.2, se presentan los criterios sugeridos para la construcción del desarenador de flujo horizontal del presente proyecto:

**Tabla 1.2.** Criterios de diseño de un desarenador de flujo horizontal.

<b>Parámetro</b>	<b>Rango de diseño</b>
<b>Tamaño de Partícula</b>	>0,15 mm.
<b>Velocidad en canal</b>	0,30 m/s
<b>Velocidad de caída de partícula</b>	0,018 m/s
<b>Tiempo de retención</b>	45-90 s.
<b>Relación Anchura / Profundidad</b>	1 a 2,5

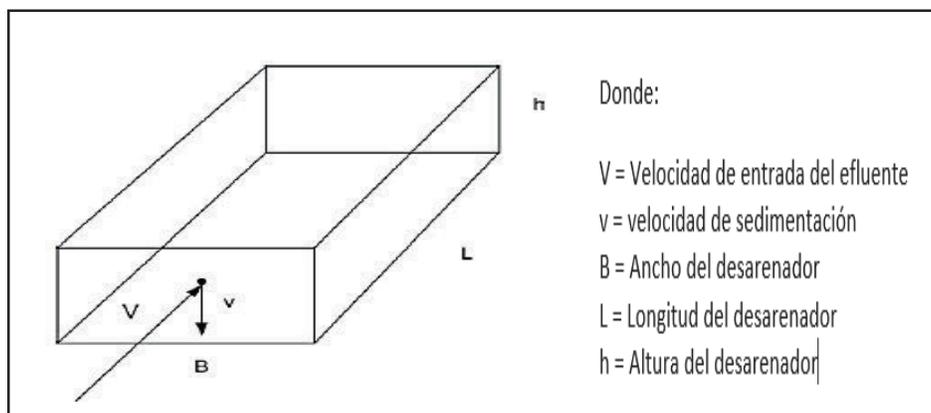
(Sainz, 2005, p.105)

- **Tamaño de partícula:** Se define como la distribución de dimensiones de las partículas con equivalentes esféricos o de cualquier otro tipo según requiera el estudio (Pérez, 2005, pp. 1-2).
- **Velocidad de caída de partícula:** La partícula se encuentra sometida a una acción gravitatoria y el empuje del agua se observa en la Figura 1.1, la variación de estas fuerzas provoca que las partículas formen un camino desde la altura máxima del efluente hasta su caída en el fondo de los desarenadores en un tiempo específico, esta relación entre el camino de

caída y el tiempo que tarda la partícula en sedimentar se conoce como la velocidad de caída de partícula (Pérez, 2005, pp. 9-13).

Su principal ventaja es su uso en plantas de tratamiento de aguas residuales de caudales pequeños con remociones por sobre el 90 % (Sainz, 2005, p.106-107), por lo que en el presente proyecto es la mejor opción.

El principal inconveniente de este tipo de desarenador es su longitud como se observa en la Figura 1.1, pues debido al flujo horizontal del agua mientras más grande sea el caudal la longitud del equipo para la decantación crece de tal manera que se llega a obtener equipos con dimensiones imposibles de trabajar (Sainz, 2005, p.106-107).

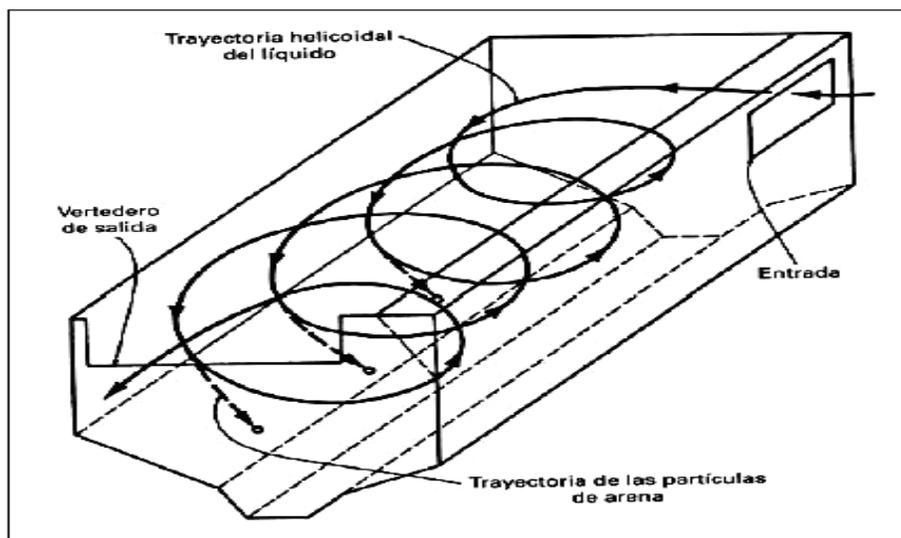


**Figura 1.1.** Ilustración de un desarenador de flujo horizontal

Debido a estos inconvenientes se han diseñado nuevos desarenadores capaces de realizar altos porcentajes de remoción y que trabajan con caudales muy grandes, a continuación se describe algunos:

- Desarenadores de sección cuadrada: son equipos en los que pasa el agua a través de una zona en la cual caen los sólidos estos se ubican en el fondo y se retiran del sistema, estos equipos han caído en desuso debido a su complejo sistema de eliminación de sólidos, que provocaba corrosión y abrasión por el arrastre de los sólidos (Sainz, 2005, pp. 106, 107).

- Desarenadores aireados son utilizados en plantas urbanas con caudales elevados, donde se utiliza aire que produce que la trayectoria del agua no sea recta sino helicoidal como se indica en la Figura 1.2, donde se observa la entrada de los sólidos con el efluente mientras el aire produce remolinos internos que hacen al recorrido helicoidal, las partículas cuyo peso específico sea mayor que la fuerza de arrastre provocada por el aire caerán a la zona de almacenamiento de sólidos ubicada en la parte inferior del equipo, esto permite disminuir la longitud de caída de la partícula permitiendo obtener dimensiones de trabajo manejables para caudales muy grandes, es decir se trata de una versión mejorada de un desarenador de flujo horizontal (Sainz, 2005 pp. 107-110).



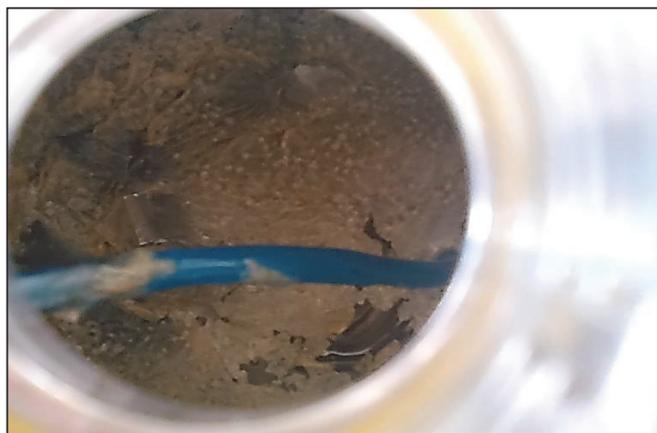
**Figura 1.2.** Esquema del funcionamiento de un desarenador de flujo helicoidal

### 1.2.1.3. Trampas de grasa

Las trampas de grasa tienen como objetivo la separación de grasas, aceites, espumas y todo flotante ligero, corresponde a un tratamiento físico primario que utiliza la flotabilidad de los componentes para realizar una separación líquido – líquido en el caso de los aceites y una separación líquido – sólido en el caso de las grasas (Marín Ocampo, 2013, p. 93).

#### 1.2.1.4. Celda de flotación

Es una operación mediante la cual se inyecta aire para que los sólidos cuya densidad no le permita decantar o ascender a través del efluente sobre salgan a la superficie, los contaminantes más afectados en este proceso son aceites y grasas, que terminan formando una nata en la superficie del agua como se observa en la Figura 1.3. (De Vargas, 2004, p. 106).



**Figura 1.3.** Formación de una nata de sólidos suspendidos mediante flotación

#### 1.2.1.5. Filtración

Consiste en pasar el agua a través de un medio poroso, este procedimiento se realiza cuando las aguas tratadas deben ser muy cristalinas, suele utilizarse después de la floculación y coagulación (CITME, 2006). En la filtración los medios más utilizados son: antracita, granate, magnetita, carbón activado, cascara de arroz, cascara y pelo de coco quemada y molida, etc (De Vargas, 2004, p. 107).

### 1.2.2. TRATAMIENTOS QUÍMICOS

Se trata de procesos de depuración de aguas en los cuales se utiliza sustancias químicas para eliminar los contaminantes que no fueron afectadas en los

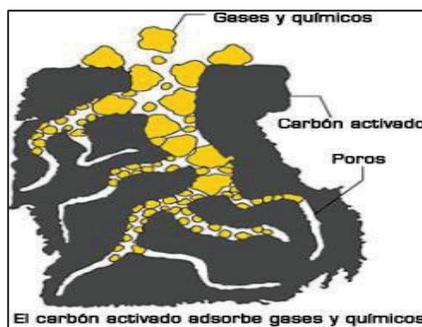
tratamientos físicos preliminares, en estos tratamientos el principal objetivo es la disminución de las cargas contaminantes coloidales y sólidos en suspensión con densidades muy bajas (Sainz, 2005, p.55; Marin Ocampo, 2013, p. 101).

#### 1.2.2.1. Coagulación - Floculación

En este proceso se produce una aglomeración de material suspendido se lo identifica como un tratamiento físico - químico debido a la colisión de las partículas formando flóculos que aumentan su peso específico y decantan en el agua, el proceso de floculación se produce siempre después de la coagulación que es un tratamiento químico ya que se añade polímeros u otras sustancias químicas para mejorar la velocidad de aglomeración de las partículas (Aguilar, 2002, p.19).

#### 1.2.2.2. Adsorción

La adsorción es un proceso físico – químico, donde una sustancia es atraída (adsorbato) a la superficie de otra (adsorbente), se lo identifica como un tratamiento final. El adsorbente más utilizado es el carbón activado debido a su elevada área superficial, el proceso de adsorción se observa en la Figura 1.4, donde se aprecia la capacidad del carbón activado para adherir a su superficie porosa (negro) las distintas sustancias químicas a tratar (amarillo) y que están presentes en los efluentes. (Ortiz, 2013, p. 38).



**Figura 1.4.** Proceso de adsorción de sustancias en carbón activado (Ortiz, 2013)

### **1.2.2.3. Precipitación química**

Proceso en el cual se añade al agua una sustancia química que reaccione con los contaminantes que se desean remover formando un precipitado de mayor tamaño que facilita su sedimentación. Los agentes químicos más usados son: cal, hidróxido aluminio, cloruro férrico, sulfato férrico, etc. Se trata de un proceso muy utilizado en la industria de alimentos cuando se tienen sólidos con un tamaño de partícula muy pequeño que no sedimentan con facilidad (De Vargas, 2004, p. 107; Spellman, 2003, p.465).

### **1.2.3. TRATAMIENTOS BIOLÓGICOS**

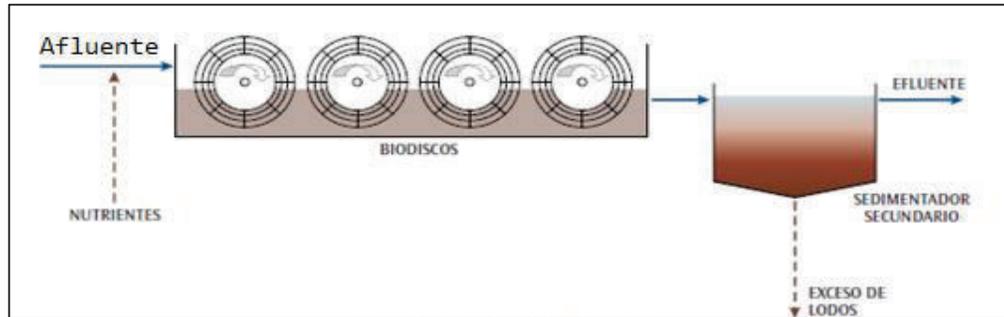
Los tratamientos biológicos consisten en provocar el desarrollo de microorganismos capaces de asimilar la materia orgánica de cada agua residual, a través de reacciones bioquímicas, de oxidación y crecimiento de nuevos microorganismos. Uno de los tratamientos biológicos más utilizados son los bio filtros de biopelícula sumergida donde se aprovecha las leyes de la naturaleza de autodepuración de las aguas, para lo cual se adhiere microorganismos depuradores a un lecho y se forma una bio capa o bio película bacteriana que degrada la materia orgánica (Sainz, 2005, p.61).

A continuación se presentan los principales tipos de bio filtros de biopelícula sumergida utilizados en la plantas de tratamiento de aguas residuales:

#### **1.2.3.1. Bio discos**

Es un bio filtro que consiste en una serie de discos en la cual está impregnada una biopelícula sumergida conectados mediante un eje horizontal que gira entre 1 a 4 revoluciones por minuto permitiendo mantener la formación de la capa bacteriana, se trata de un proceso aerobio por lo que está expuesto a la atmósfera (Marin Ocampo, 2013, p.107).

En la Figura 1.5., se observa los discos girando entre el efluente y el aire para mantener el desarrollo de los microorganismos aerobios y también se puede apreciar que es un sistema que requiere de un post tratamiento para eliminar los sólidos suspendidos que se generan mientras los discos se han saturado o las bacterias han muerto (Marín Ocampo, 2013, p.107).



**Figura 1.5.** Sistema de discos biológicos rotatorios  
(Marín Ocampo)

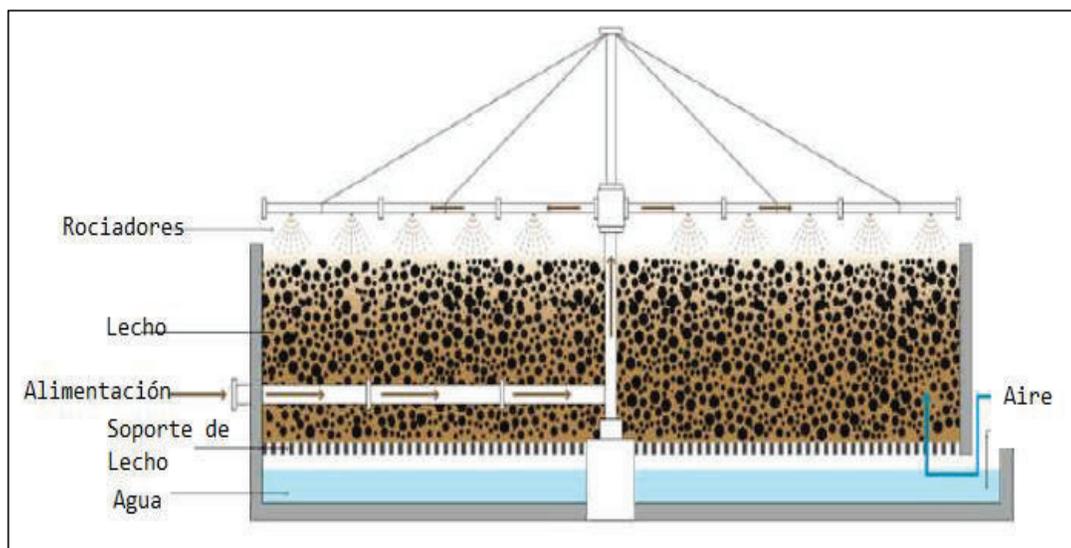
### 1.2.3.2. Bio filtro o Bio torre de aire sumergido (BAS)

El bio filtro de aire sumergido (BAS) es un sistema en el cual el efluente pasa por una torre rellena de un medio de soporte en cuya superficie está impregnada una bio película bacteriana, el agua y el aire van en sentido vertical y en contraflujo a diferencia de los bio discos donde el agua va en sentido horizontal, este sistema se ha utilizado para la depuración de aguas residuales, donde el ingreso del aire y el medio de soporte de la biopelícula bacteriana determinan la facilidad de impregnación de los microorganismos. En consecuencia el porcentaje de eficiencia en la remoción de las cargas contaminantes (Andreottola, 2005).

La eficiencia de este tipo de bio filtro depende en gran medida de los medios de soporte utilizados como lecho estático en el cual se impregnan las bacterias, pues hay una gran variedad de soportes que dan diferente hábitat a los microorganismos, a continuación se explica las cualidades y características que debe poseer un medio de soporte (Cheremisinoff, 2002, pp.132 -137).

- **Medios de soporte**

Los diferentes medios de soportes que se utilizan en los bio filtros de aire sumergido deben tener una superficie dura donde se pueda adherir la película bacteriana, así como poseer una buena área superficial, actualmente los principales medios utilizados son: medios metálicos, medios cerámicos, carbón activado, medios de goma, madera, vidrio, piedras y medios plásticos y su disposición en el bio reactor se observa en la Figura 1.6. (Cheremisinoff, 2002, pp.132 -137).



**Figura 1.6.** Esquema de la disposición del medio de soporte en una Bio torre de aire sumergido (Tilley, 2008)

Según Cheremisinoff (2002) el medio de soporte más económico y más eficiente según un análisis calidad/precio, es el plástico ya sea el Policloruro de Vinilo (PVC), Poli Etilen Tereftalato (PET), Polietileno y Poli Propileno (PP), porque se los puede obtener mediante el reciclaje de los residuos de botellas plásticas, fundas de empaçado y tuberías.

En la Tabla 1.3, se puede apreciar las diferentes características y cualidades de los soportes más utilizados en este tipo de Bio Torre de Aire Sumergido, además se puede apreciar cual posee el mayor porcentaje de remoción de carga orgánica.

**Tabla 1.3.** Características de los medios de soporte más utilizados en un BAS

Parámetro	Unidad	Material			
		Escoria de Roca	Rocas	PET	Polipropileno
Superficie específica	m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>	40-70	40-70	80-200	80-200
Porosidad	m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>	0,4 – 0,6	0,4 -0,6	0,90	0,97
Carga hidráulica	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> d	3 – 10	0,5 – 3	10 – 70	10 – 70
% Remoción DBO	-	50 – 70	65 – 85	80 – 95	65 – 90
Velocidad de Filtrado	-	Intermedia	Baja	Alta	Alta

(Wessmann, 2007)

Donde la velocidad de filtrado es la relación del caudal del agua que circula a través de la superficie del lecho, una velocidad de filtrado alta significa que el efluente demora más tiempo en atravesar el soporte, por lo tanto se produce por más tiempo el contacto con la bio película bacteriana y las reacciones del metabolismo bacteriano (Wessmann, 2007).

Se ha demostrado que la capacidad de remoción de cargas contaminantes en el medio plástico es de un 91 % para aguas de minería (Andreottola, 2005), mientras que estudios realizados en aguas del Rio Machangara determinaron una remoción del 92 % con PET (Lapo, 2014, pp. 72 y 73). Como se puede apreciar los medios plásticos permiten altas remociones de cargas contaminantes y debido a su abundancia y fácil reciclaje para este proyecto se utilizó PET como medio de soporte.

- **Poli (Etilen Tereftalato)**

El PET es un termoplástico que se sintetiza a partir del ácido tereftálico y etilen glicol, es procesado por extrusión, inyección y soplado, su producción se basa un 83 % en la industria de los envases y se ha convertido en un problema debido a su compleja degradación, por lo que se reutiliza (AIMPLAS, 2008, pp. 3-5).

Debido a su fácil manejo y su abundancia se lo utilizará como medio de soporte para tratamiento de aguas en un BAS ya que posee buenas características de reciclaje, precio, superficie específica y posee una superficie dura y se espera una remoción de contaminantes por encima del 90 % (Lapo, 2014, pp. 27-32).

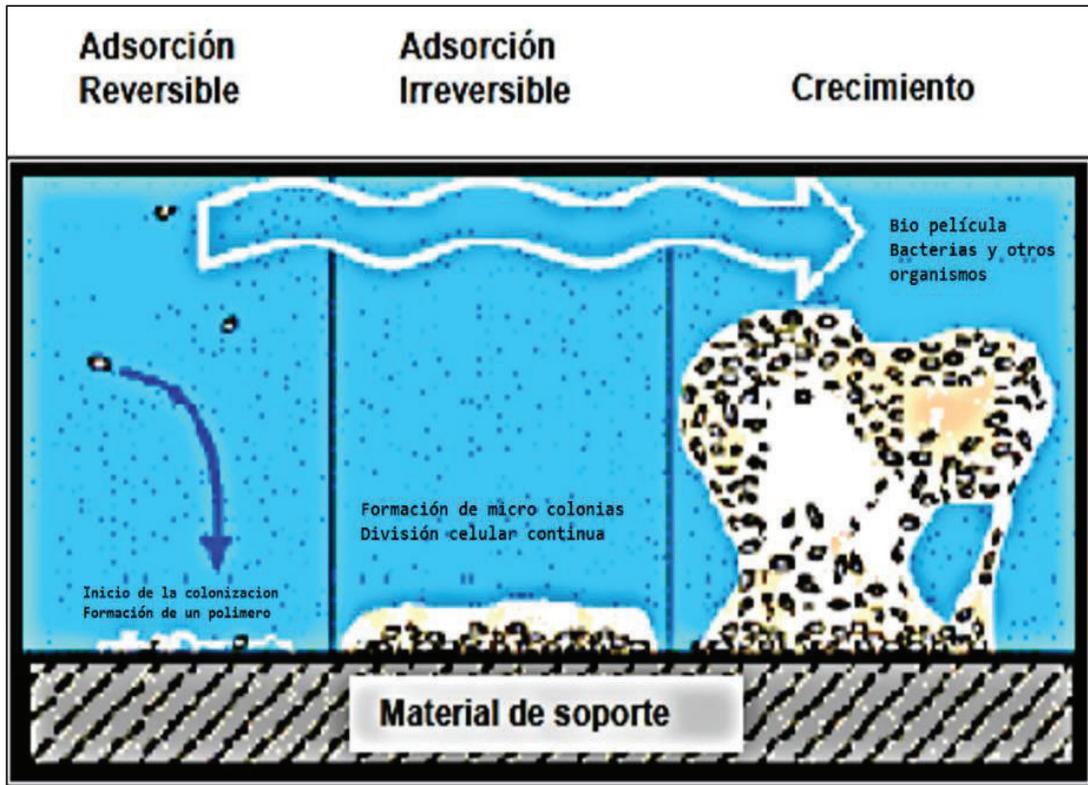
Cualquier medio de soporte debe facilitar la formación de una bio capa de bacterias, la cual se describe a continuación:

- **Formación de la bio película**

Una biopelícula son comunidades de bacterias aerobias o anaerobias, hongos, levaduras y pequeños protozoarios e invertebrados adheridos a un medio de soporte que puede ser de origen natural o sintético, en la biopelícula las bacterias y los otros organismos antes citados están en constante desarrollo y muerte, por lo que la formación de estas colonias aseguran la supervivencia ya sea en un medio hostil o en un medio adecuado para su metabolismo (Welter, 2004).

En la Figura 1.7, se observa que la impregnación de la biopelícula bacteriana se realiza en tres etapas bien diferenciadas que son (Welter, 2004; Baecheler, 2001):

- **Adsorción Reversible:** Etapa de consolidación de las bacterias a la superficie y se caracteriza porque la impregnación puede revertirse, porque las bacterias realizan la colonización del soporte y se familiarizan con el mismo mediante la fabricación de un polímero que les proporcione un ambiente adecuado de crecimiento.
- **Adsorción Irreversible:** Etapa de formación de micro colonias donde las bacterias ya han creado los polímeros y empieza un crecimiento lento de bacterias mediante división celular, en esta etapa la asociación de las bacterias ya es irreversible
- **Zona de Crecimiento:** Etapa de formación y consolidación de la biopelícula aquí las bacterias siguen multiplicándose mediante división celular y se adhieren un grupo de multiespecies suspendidas en el efluente, se incluyen protozoarios y pequeños invertebrados.



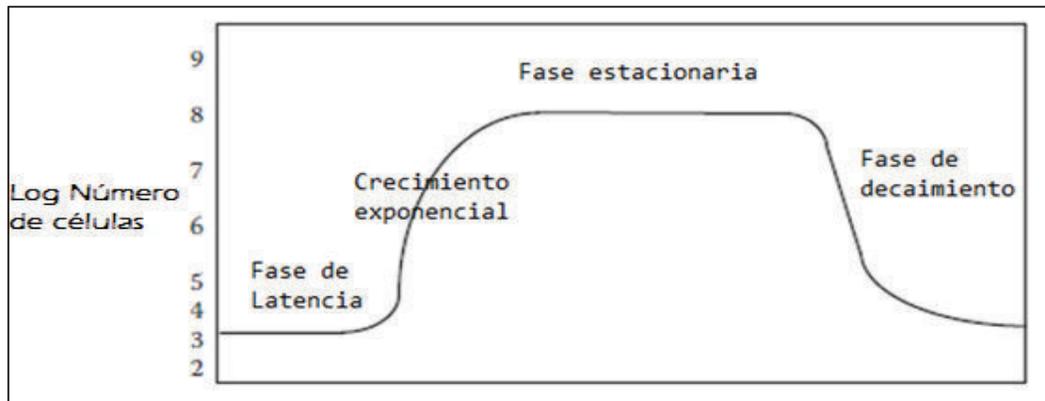
**Figura 1.7.** Representación gráfica del crecimiento bacteriano en un material de soporte  
(Welter, 2004)

Los microorganismos que intervienen en el desarrollo de la biopelícula requieren de ciertas condiciones para su crecimiento el principal es el pH, la mayor parte de bacterias crecen a pH neutro, pero el rango de tolerancia que manejan los microorganismos es de 4,0 a 9,5; la temperatura también influye en el crecimiento bacteriano este valor es variable dependiendo de cada microorganismo, un aumento o disminución de temperatura de 10 °C a partir de la temperatura ambiente puede causar un mayor crecimiento o por el contrario pueden provocar la muerte, es por esta razón que se debe trabajar a condiciones ambiente y protegiendo a las bacterias de la luz solar para evitar cambios de temperatura que modifiquen las condiciones del reactor (Soza, 2003, p.18; Ortiz, 2013, p.45).

Al tratarse de un sistema aerobio los microorganismos usan para su reproducción los nutrientes del efluente, oxígeno libre y materia orgánica, pero generan sólidos suspendidos y dióxido de carbono (Ortiz, 2013, p. 49).

- **Cinética del crecimiento bacteriano**

Todos los microorganismos siguen una ruta de crecimiento básica que se conoce como curva de crecimiento la que se indica en la Figura 1.8, en la cual se puede apreciar cuatro fases bien definidas (Spellman, 2011, p. 126).



**Figura 1.8.** Curva de crecimiento donde se identifican las cuatro fases de desarrollo (Spellman, 2011)

**Fase de latencia:** Caracterizada porque los microorganismos se aclimatan a las condiciones del efluente y sobre todo al nuevo medio de soporte.

**Fase de crecimiento exponencial:** Las bacterias se encuentran en plena reproducción bajo un ambiente saludable para su crecimiento, por lo que crecen en proporción geométrica. También se identifican a los hongos y levaduras que no tienen un crecimiento exponencial, pero también se reproducen de manera acelerada.

**Fase estacionaria:** El crecimiento bacteriano se detiene o se mantiene un equilibrio entre el nacimiento de nuevas bacterias y la muerte de otras.

**Fase de decaimiento o muerte:** Se produce cuando se rompe el equilibrio provocando que las bacterias y microorganismos empiecen a morir en mayor cantidad que la aparición de organismos nuevos.

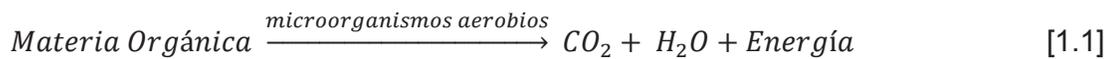
Cada fase posee su propio orden de reacción por lo que siempre se debe analizar cada fase por separado y para determinar el orden de la reacción de la impregnación bacteriana se analiza la fase estacionaria excluyendo los datos de las otras etapas (Dos Santos, 2007, p.34).

- **Reacciones del crecimiento bacteriano**

En el desarrollo de la biopelícula bacteriana se involucran reacciones aerobias y anaerobias, entre las poblaciones de microorganismos compuestas por bacterias, hongos y protozoarios, en el caso de la bio torre de aire sumergido predominan las reacciones aerobias que se presentan a continuación:

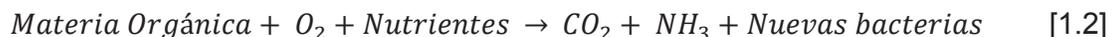
- Obtención de energía y metabolismo

La Ecuación [1.1] representa el proceso metabólico que cumplen los microorganismos aerobios en el desarrollo del biofilm, siendo las bacterias los seres más pequeños que realizan esta actividad (Solomon, 2001, pp. 136 – 138).



- Oxidación y síntesis de nuevos microorganismos

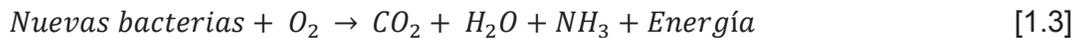
La Ecuación [1.2] representa los mecanismos de síntesis aerobia de nuevos organismos en el medio de soporte para el desarrollo de la biopelícula bacteriana y su consecuente reproducción (Solomon, 2001, pp. 156 - 158).



- Respiración endógena

La Ecuación [1.3] detalla los mecanismos de respiración que realizan los microorganismos para su supervivencia en ausencia de nutrientes, siendo solamente

un proceso respiratorio donde se producen solamente gases y energía (Olivas, Castell, Peralta y García, 2014).



En el desarrollo de la biopelícula bacteriana las tres reacciones se dan de forma simultánea, manteniendo la cinética de crecimiento microbiano como se indicó en la Figura 1.7.

- **Influencia del pH en el crecimiento bacteriano**

El pH ideal de crecimiento bacteriano para el desarrollo de una bio película bacteriana es neutro entre 6,5 y 7,5, pero los organismos suelen adaptarse a condiciones que se manejan en un intervalo de pH entre 4,0 y 9,5 (ambiente tolerable) aunque su velocidad de crecimiento disminuye, a pH fuera de estos rangos las condiciones son muy severas para que los organismos puedan adaptarse y realizar el metabolismo que permita su desarrollo (Soza, 2003, p.22).

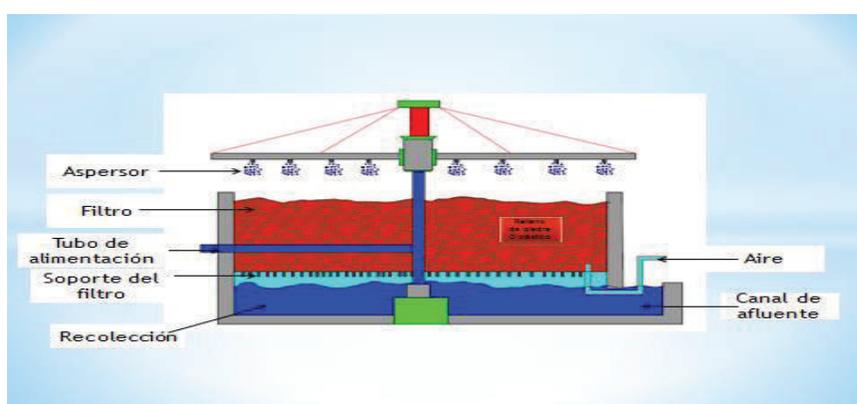
- **Influencia del coeficiente de biodegradabilidad en un tratamiento biológico**

El coeficiente de biodegradabilidad es la relación entre la Demanda Bioquímica de Oxígeno y la Demanda Química de Oxígeno, esta relación permite determinar si un agua residual puede ser depurada por tratamientos biológicos, ya que es una característica de los compuestos orgánicos, medida mediante su capacidad de biodegradarse (Soza, 2013, p. 22).

- **Estructura de la Bio torre de aire sumergido con lecho estático**

La bio torre de aire sumergido es un tratamiento biológico aerobio que utiliza a los microorganismos adheridos a un soporte, para realizar la remoción de la materia orgánica del agua residual, en el presente proyecto los microorganismos provienen del propio efluente (Ibrahim, Qiang, Wisam, 2012).

En la Figura 1.9. se observa que el efluente ingresa por la parte superior de la bio torre, atraviesa el soporte del lecho que es donde se producen las reacciones de metabolismo bacteriano que provocan la depuración y disminución de contaminantes, el efluente cae en la zona de almacenamiento para realizar el análisis de los parámetros que exige la normativa distrital, una vez cumplida dicha norma, el agua es enviada al sistema de alcantarillado, en el caso de este proyecto el lecho estático está formado de PET con una biopelícula de bacterias aerobias propias del efluente y el aire ingresa por la parte inferior.



**Figura 1.9.** Esquema del funcionamiento de una Bio Torre de Aire Sumergido con Lecho Estático (Tilley, 2008)

En la Tabla 1.4, se presenta una lista de ventajas y desventajas del BAS para su funcionamiento en una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR).

**Tabla 1.4.** Ventajas y desventajas del uso de una bio torre de aire sumergido a nivel industrial

Ventajas	Desventajas
Diseño compacto	Dificultad de escalado
Fácil construcción, control y monitoreo	Tiempo de arranque demasiado largo debido a la impregnación
Baja cantidad de lodos residuales y resistencia a los malos olores	Necesita de un pre tratamiento
Bajos costo de operación	Necesita de un post tratamiento
Alta remoción de cargas orgánicas	Flexibilidad de proceso limitada

(Cortez, 2008, p.156)

Como se observa en la Tabla 1.4. las principales ventajas de la bio torre son de diseño, esto se debe a la versatilidad en el uso de soportes que tiene el equipo que provoca una mayor área superficial de contacto entre las bacterias y el agua, que a su vez permite una mayor remoción de contaminantes con equipos de dimensiones no considerables. Una bio torre de aire sumergido genera cantidades pequeñas de biomasa debido al metabolismo bacteriano, esto permite disminuir los costos de mantenimiento, operación y obtención de sub productos (Cortez, 2008, p.156).

De igual manera las desventajas que presenta el equipo son la dificultad del escalado ya que el tiempo de arranque para obtener la estabilización de la bio película puede sobrepasar los cinco meses, adicionalmente la bio torre requiere de pre y post tratamiento para la eliminación de sólidos (Cortez, 2008, p.156).

## **2. PARTE EXPERIMENTAL**

En el presente proyecto se plantea estudiar la reducción de cargas contaminantes de aguas residuales para una fábrica de frituras. El estudio realizado incluye el muestreo de las aguas residuales en la fuente de generación, la determinación de los parámetros fuera de norma mediante los métodos APHA y se plantea un mecanismo de reducción de los contaminantes que no cumplen con la Resolución N°002-SA-2014 “Norma Técnica de la Ordenanza Metropolitana N° 404”, vigente en el Distrito Metropolitano de Quito.

La metodología experimental a realizar se explica a continuación:

### **2.1. ESTABLECIMIENTO DE LAS ETAPAS DE ACONDICIONAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES PROVENIENTES DE UNA FÁBRICA DE FRITURAS PREVIO AL DESARROLLO DE LA PELÍCULA BACTERIANA**

A continuación se presentan las etapas previas a la impregnación de la película bacteriana que se realizaron para caracterizar y acondicionar las aguas residuales de la fábrica de frituras.

#### **2.1.1. DEFINICIÓN DE LA COMPOSICIÓN INICIAL DE LAS AGUAS RESIDUALES**

##### **2.1.1.1. Muestreo de las aguas residuales**

Para determinar la composición inicial de las aguas residuales, se realizó el muestreo del efluente proveniente de una fábrica de frituras mediante las especificaciones de la Resolución N°002-SA-2014 que determina el número de

muestras simples que se necesitan en función del tiempo de operación de la planta como se indica en la Tabla 2.1.

**Tabla 2.1.** Número de muestras simples en función del tiempo de trabajo del emisor de la descarga

Horas por día que opera el proceso generador de la descarga	Número de muestras simples	Inventario entre toma de muestras simples (horas)	
		Mínimo	Máximo
Hasta 8	4	1	2
De 8 a 16	4	2	3
De 16 a 24	6	3	4

(Municipio de Quito, Norma Técnica de la Ordenanza Metropolitana N° 404” en su numeral 6.3, Tabla 4)

La fuente generadora de la descarga trabaja en un turno único de 06:00 hasta las 18:00, según la Tabla 2.1, para este horario de trabajo se debe tomar 4 muestras simples por día, por lo que estas muestras fueron tomadas en un intervalo de 3 horas y a partir de las muestras simples se obtuvo una muestra compuesta por día de trabajo y esta muestra fue almacenada y preservada en hielo según indica la Norma APHA 1060 C, esta muestra conservada fue trasladada al Laboratorio LASA donde se realizó la caracterización de los parámetros (Clesceri, 2014). Se realizó 3 repeticiones del muestreo.

#### **2.1.1.2. Identificación y definición de la composición inicial de las aguas residuales**

Los parámetros físico químicos que fueron analizados se determinaron en base a la actividad económica de la empresa. Según el Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC), una fábrica de frituras es una empresa dedicada a la “Elaboración de otros productos alimenticios (CIU C1079)”, y por los procesos de producción sus principales contaminantes son: tierra, almidón de papa, residuos de harina y maíz y cáscaras de papa, por lo tanto los parámetros a identificar del efluente se los detalla en la Tabla 2.2.

**Tabla 2.2.** Parámetros y métodos de caracterización del agua residual proveniente de una fábrica de frituras

Parámetro	Expresado Como	Métodos Normados/validados
Caudal	m <sup>3</sup> /día	Aforo
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mgO <sub>2</sub> /L	APHA 5210B
Demanda Química de Oxígeno	mgO <sub>2</sub> /L	APHA 5220D
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	APHA 2540D
Aceites y Grasas	mg/L	APHA 5220B

(Resolución N°002-SA-2014 “Norma Técnica de la Ordenanza Metropolitana N° 404”)

Los métodos de análisis de los parámetros físico-químicos (DBO, DQO, SST, A y G), fueron realizados en los Laboratorio LASA y el Laboratorio de Análisis Instrumental de la Facultad de Ingeniería Química de la Escuela Politécnica Nacional, según los métodos señalados en la Tabla 2.2, se realizaron tres repeticiones.

El caudal se determinó en la zona de descarga tal como se puede ver en la Figura 2.1, para cada muestra simple según la Tabla 2.1, mediante la obtención del tiempo requerido para llenar un recipiente con un volumen de 3 litros, se obtuvo el promedio por día del efluente muestreado, se realizaron tres repeticiones.



**Figura 2.1.** Zona de descarga del efluente en la fábrica de frituras donde se determinó el caudal.

Una vez cuantificados los parámetros físico-químicos se comparó con los límites máximos permisibles estipulados en las normas técnicas del Municipio del Distrito Metropolitano de Quito como se indica en la Tabla 1.1, del presente documento y se verificó que parámetros no cumplen con la norma.

## 2.1.2. EVALUACIÓN DE LA REMOCIÓN DE SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES

### 2.1.2.1. Construcción de un desarenador de flujo horizontal

Los sólidos suspendidos totales en el caso de la producción de frituras se tratan de un parámetro crítico debido a la naturaleza del efluente obtenido del lavado de la papa, por lo que el agua residual posee grandes cantidades de tierra y arena que deben ser tratadas, por lo que se realizó la remoción de sólidos suspendidos totales mediante la implementación de un desarenador de flujo horizontal a escala de laboratorio y que consta de una cámara de decantación para el caudal de una muestra compuesta, para determinar el mejor tiempo de remoción de las arenas.

Las dimensiones del desarenador fueron calculadas de acuerdo a los datos de la Tabla 2.3, para el tiempo máximo de retención de sólidos y el caudal de trabajo de la empresa presentados en el Anexo I.

**Tabla 2.3.** Datos utilizados para la construcción del desarenador.

Parámetro	Rango de diseño
Caudal	20 m <sup>3</sup> /día
Velocidad en canal	0,30 m/s
Velocidad de decantación	0,018 m/s
Tiempo de retención	90 s.
Relación Anchura / Profundidad	2 a 1

(Sainz, 2005, p.105)

Se determinó la superficie transversal del canal del desarenador por el cual pasa el agua con la Ecuación [2.1] para una velocidad longitudinal de 0,3 m/s (Sainz, 2005, p.108):

$$S_t = \frac{Q}{V} \quad [2.1]$$

Donde:

$S_t$  = Superficie transversal de entrada del agua ( $m^2$ )

$Q$  = Caudal a tratar ( $m^3/s$ )

$V$  = Velocidad Longitudinal ( $m/s$ )

Una vez calculado la superficie transversal del canal se utiliza la relación anchura doble de altura según la Tabla 1.2, con la Ecuación [2.2] (Sainz, 2005, p.108):

$$S_t = w' \times h' \quad [2.2]$$

Donde:

$S_t$  = Superficie transversal de entrada del agua ( $m^2$ )

$w'$  = Anchura del canal de entrada del agua (m)

$h'$  = Altura del canal de entrada del agua (m)

Una vez calculados la altura y el ancho del canal de ingreso de agua se aplica la Ecuación [2.3] y según la Tabla 2.3, con una velocidad de caída de partícula de 0,018 m/s por tratarse de arenas gruesas, se calculó la longitud teórica del desarenador (Sainz, 2005, p.109):

$$L = \left(\frac{h'}{v}\right) \times V \quad [2.3]$$

Donde:

$L$  = Longitud teórica del desarenador (m)

$h'$  = Altura del vertedero (m)

$V$  = Velocidad longitudinal (m/s)

$v$  = velocidad de caída de la partícula (m/s)

El análisis del volumen máximo del desarenador se lo realiza para el caudal obtenido en cada repetición del muestreo y según la Tabla 2.3, para el tiempo máximo de retención del desarenador que es 90 segundos de esta manera con la Ecuación [2.4] se calculó el volumen máximo de agua (Sainz, 2005, p.109):

$$Vmáx = Q \times tmáx \quad [2.4]$$

Donde:

$Vmáx$  = Volumen máximo que soporta el desarenador ( $m^3$ )

$Q$  = Caudal ( $m^3/s$ )

$tmáx$  = tiempo máximo de retención del desarenador (s)

Con el valor obtenido de la longitud teórica del desarenador en la Ecuación [2.3] y con la relación de anchura doble de altura ( $W = 2H$ ) de los criterios de construcción indicados en la Tabla 1.2, se determinó las dimensiones del desarenador mediante la Ecuación [2.5] (Sainz, 2005, p.109):

$$Vmáx = L \times H \times W \quad [2.5]$$

Donde:

$Vmáx$  = Volumen máximo que soporta el desarenador ( $m^3/día$ )

$L$  = Longitud teórica del desarenador (m)

$H$  = Altura teórica del desarenador (m)

$W$  = Ancho teórico del desarenador (m)

Una vez construido el desarenador se desarrollaron pruebas para evaluar la remoción de sólidos suspendidos totales para identificar el tiempo en el cual el efluente cumple con la Norma técnica N° 002-SA- 2014 de la Ordenanza Metropolitana N° 404, como se detalla a continuación:

### **2.1.2.2. Evaluación del desarenador de flujo horizontal**

Se evaluó el desarenador mediante el análisis de sólidos suspendidos totales según el método de la norma APHA 2540D, mediante la obtención de una muestra clarificada de agua a través de una jeringa en el intervalo de tiempo recomendado en la Tabla 1.2, que son 45, 60, 75 y 90 s. (Sainz, 2005, p.109), en el Laboratorio de Análisis Instrumental de la Escuela Politécnica Nacional, se realizaron 3 repeticiones de este procedimiento según lo descrito en la sección 2.1.1.1. sobre el muestreo y se compararon los valores obtenidos con los límites máximos permisibles de la norma de la Ordenanza Metropolitana N° 404 expuestos en la Tabla 1.1 (Municipio de Quito, 2014).

### **2.1.3. EVALUACIÓN DE pH Y BIODEGRADABILIDAD DEL EFLUENTE DEL DESARENADOR**

#### **2.1.3.1. Evaluación del pH en el efluente**

Una vez obtenidas tres muestras del agua tratada en el desarenador se realizó la medición del pH, los resultados obtenidos fueron comparados con un ambiente de crecimiento bacteriológico ideal (6,5 - 7,5) o un ambiente tolerable (4,0 - 9,0) (Soza, 2013, p.22).

#### **2.1.3.2. Evaluación del coeficiente de biodegradabilidad del efluente**

Una vez tratada el agua en el desarenador, se determinó en el Laboratorio LASA el DBO<sub>5</sub> y DQO de las tres repeticiones obtenidas y se calculó la relación de biodegradabilidad DBO<sub>5</sub>/DQO con el objetivo de identificar si las aguas son aptas para realizar la impregnación de la biopelícula y el posterior tratamiento biológico en una bio torre de lecho estático de PET, los resultados obtenidos a través del laboratorio fueron comparados con la información de la Tabla 2.4. (Soza, 2013, p.22).

**Tabla 2.4.** Relación de biodegradabilidad de un efluente

<b>Biodegradabilidad</b> <b>Parámetro</b>	<b>Poco Biodegradable</b>	<b>Biodegradable</b>	<b>Muy Biodegradable</b>
<b>DBO<sub>5</sub>/DQO</b>	<0,2	0,2 – 0,4	>0,4

(Soza, 2013, p.22)

## **2.2. DESARROLLO DE UNA BIOPELÍCULA DE BACTERIAS AEROBIAS EN EL LECHO ESTÁTICO DE PET**

### **2.2.1. CONSTRUCCIÓN DEL BIOREACTOR A ESCALA LABORATORIO**

Una vez acondicionada el agua mediante remoción de sólidos suspendidos, identificado el ambiente de crecimiento a través del pH y determinado el coeficiente de biodegradabilidad se estableció que el efluente es apto para este tipo de tratamiento, para lo cual se construyó el bioreactor para iniciar con el desarrollo de la biopelícula de las bacterias propias del efluente en el medio de soporte de PET.

Se construyeron dos biorreactores idénticos a escala de laboratorio con los siguientes materiales (Lapo, 2014, pp. 53-56):

- Dos botellas de 3 litros como base de los biorreactores
- PET recortado en pedazos de 1 x 8 cm a partir de botellas recicladas y se colocó dentro de la botella como medio de soporte del bioreactor
- Papel aluminio para cubrir la superficie del reactor e impedir que los microorganismos alteren su crecimiento en determinadas horas del día por la variación de luz (Cohen, 2001)
- Dos difusores tipo pecera de 3 L/min, para conseguir una distribución homogénea de aire y que se produzcan las reacciones de metabolismo del crecimiento bacteriano (Lapo, 2014, pp. 53 - 56)
- Mangueras que permitan la distribución del aire hacia el bioreactor, así como la salida del efluente desde el interior del reactor

En la Figura 2.2, se puede observar el esquema del bioreactor previo a su funcionamiento:



**Figura 2.2.** Esquema del bioreactor de aire sumergido

En la Tabla 2.5, se presentan las condiciones sugeridas de funcionamiento de los bioreactores durante el desarrollo de la biopelícula (Lapo, 2014, p. 56):

**Tabla 2.5.** Condiciones de funcionamiento de los bioreactores

Parámetro	Condición
Altura del Lecho	< 90 % Altura total
Flujo de aire	3 L/min
pH	4,0 – 9,5
Intensidad de Luz	Constante

(Lapo, 2014; Cohen, 2001)

Como se observa en la Tabla 2.5 la altura del lecho estático de PET en el reactor no debe superar el 90 % de la altura de la botella de 3 litros, para que no haya derrames del efluente, el flujo de aire sugerido se basa en estudios realizados para la impregnación de una biopelícula bacteriana de efluentes del Río Machángara (Lapo, 2014, pp. 1-3).

El pH sugerido se lo toma para mantener un ambiente tolerable de crecimiento dentro del reactor, mientras que la exposición a la luz se mantiene constante para evitar cambios de temperatura que alteren el crecimiento de las bacterias (Soza, 2013, p.18; Ortiz, 2013. p.45).

## **2.2.2. EVALUACIÓN DEL CRECIMIENTO BACTERIANO**

### **2.2.2.1. Etapa de impregnación y estabilización de la película bacteriana**

Al efluente obtenido del desarenador se realizó la impregnación de la biopelícula bacteriana según las condiciones establecidas en la Tabla 2.4, para lo cual se hizo el estudio de la eficiencia en la remoción del DQO con el transcurso del tiempo (Andreottola, 2005, pp. 71-74; Gómez, 2000, pp.3-7).

En el día uno de impregnación en cada reactor se colocó 2 400 mL de las muestras de los efluentes obtenidos del desarenador, de estas muestras se conocía el valor inicial de DQO, los reactores empezaron a funcionar con un flujo de aire de 3 L/min. Para identificar que la impregnación sucedía en dichos reactores, se realizó pruebas de DQO a una muestra de 300 mL tomada de cada bioreactor en intervalos de 15 días (Cohen, 2001, pp. 259-271).

Al tomar los 300 mL de cada reactor se causó una descompensación en el volumen de agua y de carga contaminante dentro del bioreactor, por lo que una vez obtenidos los resultados de las pruebas de DQO se procedía a enriquecer cada bioreactor con una mezcla de 300 mL que contenía agua residual fresca y melaza que debido a su alta carga de DQO en proporciones adecuadas permitía mediante las ecuaciones del balance de masa del Anexo II obtener dentro del reactor agua con una carga contaminante similar que al inicio del proceso (Lapo, 2014, 33 - 42).

El proceso se realizó hasta observar la primera señal de la fase de decaimiento o muerte de las bacterias, principalmente identificadas como un ligero aumento en la concentración del DQO dentro del reactor, por lo que se determinó el tiempo en el

cual se produjo la etapa estabilización de la biopelícula bacteriana y el aumento de la eficiencia respecto al tiempo como indicador del crecimiento bacteriano en el soporte de PET (Spellman, 2011, p.126).

#### 2.2.2.2. Determinación del orden de la reacción para el crecimiento bacteriano en el lecho estático de PET

Se realizó el estudio del orden de la reacción para identificar la etapa de estabilización de la biopelícula bacteriana ya que según Dos Santos (2007, p.34) en esta fase del crecimiento imitan a una reacción auto catalítica de primer orden, por lo que se utilizó la Ecuación [2.6] y se evaluó mediante regresión lineal el factor de correlación (Foggler, 2001, pp. 235).

$$\ln \frac{Ca_0}{Ca} = kt \quad [2.6]$$

Donde:

- Ca<sub>0</sub> = Concentración de DQO a tiempo 0
- Ca = Concentración de DQO a X tiempo
- k = Constante cinética de la impregnación
- t = tiempo

Para obtener el factor de correlación de una cinética de primer orden se evaluó solo la fase de estabilización, eliminando los puntos que representan a las etapas de crecimiento exponencial y de decaimiento y muerte, esto porque cada una de las fases se rigen bajo una cinética de orden reacción independiente (Welter, 2004, pp. 10-11).

Se compararon los resultados con reacciones de orden cero Ecuación [2,7] y de segundo orden Ecuación [2,8].

$$Ca = Ca_0 - kt \quad [2.7]$$

Donde:

$Ca_0$  = Concentración de DQO a tiempo 0

$Ca$  = Concentración de DQO a X tiempo

$k$  = Constante cinética de la impregnación

$t$  = tiempo

$$\frac{1}{Ca} - \frac{1}{Ca_0} = kt \quad [2.8]$$

Donde:

$Ca_0$  = Concentración de DQO a tiempo 0

$Ca$  = Concentración de DQO a X tiempo

$k$  = Constante cinética de la impregnación

$t$  = tiempo

### **2.2.3. CONTEO DE LAS BACTERIAS QUE CONFORMAN LA BIOPELÍCULA BACTERIANA**

En la impregnación al observar un ligero aumento de DQO con respecto al tiempo, se detuvo la impregnación y se procedió a analizar la biopelícula bacteriana sujeta al lecho estático de PET, mediante un conteo de microorganismos comunes en efluentes, para cuantificar la población en el lecho (Vintimilla, 2011, pp. 16-18).

Para realizar el conteo de bacterias se separó el lecho de los bioreactores y se tomó una muestra de los trozos de PET mediante el método de cuarteo, en la Figura 2.3. se observa que se hizo el cuarteo de todo el lecho de un reactor y se tomó una muestra representativa de pedazos de PET que permiten obtener un valor de área superficial fijo para evaluar la cantidad de bacterias por  $m^2$  de soporte, estos pedazos fueron lavados con 1 000 mL de agua destilada, el agua obtenida fue enviada al Laboratorio LABOLAB donde se evaluó bacterias aerobias, coliformes totales, hongos y levaduras con los métodos APHA 9222, APHA 9610B y APHA 9215 respectivamente (Lapo, 2014, pp. 62-65; Clesceri, 2014).

Se realizó una evaluación de la cantidad de bacterias en función al área superficial del lecho estático de PET, para lo cual se realizó una transformación de unidades (Ver Anexo III) basado en el área superficial de la muestra de pedazos de PET obtenidos del muestreo.



**Figura 2.3.** Cuarteo para obtener una muestra representativa del lecho estático de PET

### **2.3. EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LA BIO TORRE CON LECHO ESTÁTICO DE PET IMPREGNADO CON UNA BIOPELÍCULA DE BACTERIAS AEROBIAS**

Se realizó la evaluación de la bio torre cuyo lecho de PET tiene una biopelícula estable adherida, se evaluaron tres repeticiones de muestras frescas obtenidas de la zona de descarga. Una vez realizadas las etapas de acondicionamiento se lleva a cabo la evaluación de la bio torre durante 24 horas bajo las condiciones indicadas en la Tabla 2.6.

**Tabla 2.6.** Condiciones de funcionamiento de la bio torre

<b>Parámetro</b>	<b>Condición</b>
Caudal	2,5 L/día
Temperatura	~20 °C
pH	4,0 – 9,5
Flujo de aire	3 L/min
Coefficiente de la biodegradabilidad	>0,4

(Lapo, 2014, 53-56; Soza, 2003, p. 23.)

Se determinó DBO<sub>5</sub>, DQO y sólidos suspendidos totales (SST) en los siguientes intervalos: 0, 4, 8, 12, 16, 20 y 24 horas. Según los métodos APHA 5210 B, APHA 5220 D y APHA 5240 D respectivamente en los Laboratorio LASA y Laboratorio de Análisis Instrumental de la Escuela Politécnica Nacional por disponibilidad de los equipos necesarios, se realizaron tres repeticiones de dichos análisis (Romero, 2011, pp. 559).

Finalmente se determinó el tiempo necesario que empleó la bio torre para la depuración de las aguas residuales provenientes del efluente bajo las condiciones expuestas en la Tabla 2.6, se obtuvo el porcentaje de remoción de cargas contaminantes y se verificó que el tratamiento es apto para el efluente (Soza, 2003, p.23).

### **3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

A continuación se presentan los resultados obtenidos en las etapas de tratamiento del efluente de la fábrica de frituras:

#### **3.1. ESTABLECIMIENTO DE LAS ETAPAS DE ACONDICIONAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES PROVENIENTES DE UNA FÁBRICA DE FRITURAS PREVIO AL DESARROLLO DE LA PELÍCULA BACTERIANA**

Previo al desarrollo de la bio película bacteriana en un bio reactor de aire sumergido, se analizan tres etapas que son: resultados de la definición de la composición inicial de las aguas residuales, resultados de la evaluación de la remoción de sólidos suspendidos totales y resultados de la evaluación de pH y biodegradabilidad del efluente proveniente del desarenador.

##### **3.1.1. DEFINICIÓN DE LA COMPOSICIÓN INICIAL DE LAS AGUAS RESIDUALES**

A continuación se presentan los resultados del muestreo e identificación de las aguas residuales de la fábrica de frituras:

###### **3.1.1.1. Resultados del muestreo de las aguas residuales**

El muestreo de las aguas residuales se llevó a cabo en un recipiente de 3 L, se tomó cuatro muestras simples en los siguientes horarios: 9:00, 12:00, 15:00 y 18:00 horas, estas muestras se mezclaron para obtener una muestra compuesta de 12 L por día de muestreo, se realizaron tres repeticiones y se obtuvo los resultados en la Tabla 3.1.

**Tabla 3.1.** Determinación del tiempo necesario para llenar un recipiente de 3 litros de cada muestra simple durante los 3 días de muestreo

N° Muestra	Hora	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3
		Tiempo (s)	Tiempo (s)	Tiempo (s)
1	09:00	13,12	12,95	13,71
2	12:00	11,08	10,86	12,06
3	15:00	10,57	11,33	11,11
4	18:00	16,21	15,94	16,91
Promedio		12,75 ± 2,56	12,77 ± 2,30	13,45 ± 2,55
Promedio Total		12,99 ± 2,47 s.		

Se obtuvo durante el día variaciones de tiempo que indican fluctuación en la descarga del efluente, como se observa en la Tabla 3.1., el tiempo aumenta a las 18:00 horas debido a que la jornada laboral termina y se reduce la producción por lo tanto el caudal del efluente disminuye, se obtuvo un tiempo promedio durante las tres repeticiones de 12,99 segundos y una desviación estándar de 2,47 segundos.

La desviación estándar obtenida representa un 19,01 % del tiempo promedio, este porcentaje se debe a la fluctuación en el caudal de la descarga del efluente y a la apreciación de la persona que tomó el tiempo de llenado del recipiente, se lo puede considerar un error manejable, debido a que se diseña con fluctuaciones mediante factores de corrección superiores al 30 % (Sainz, pp. 105 - 109).

### 3.1.1.2. Identificación y definición de la composición inicial de las aguas residuales

- **Caudal**

El caudal se determinó mediante lo explicado en el numeral 2.1.1.2, y se obtuvieron los resultados expuestos en la Tabla 3.2.

**Tabla 3.2.** Determinación del caudal de cada muestra simple durante los 3 días de muestreo

N° Muestra	Hora	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3
		Caudal (m <sup>3</sup> /día)	Caudal (m <sup>3</sup> /día)	Caudal (m <sup>3</sup> /día)
1	09:00	19,76	20,01	18,91
2	12:00	23,39	23,86	21,49
3	15:00	24,52	22,88	23,33
4	18:00	15,99	16,26	15,33
Promedio		20,92 ± 3,86	20,76 ± 3,41	19,76 ± 3,47
Promedio Total		20,48 ± 3,58 m <sup>3</sup> /día		

En la Tabla 3.2, se observa la fluctuación del caudal a las distintas horas de trabajo, se obtuvo un caudal promedio entre las tres repeticiones de 20,48 m<sup>3</sup>/día y una desviación estándar de 3,58 m<sup>3</sup>/día.

La desviación estándar obtenida representa un 17,48 % del caudal promedio, esto debido a las fluctuaciones en la descarga del efluente y a la apreciación de la persona que tomó el tiempo de llenado del recipiente, se lo puede considerar un error manejable, debido a que en el diseño de la planta de tratamiento de aguas se manejan todas las fluctuaciones de caudal mediante factores de corrección (Sainz, pp. 105 - 109).

- **Parámetros físico químicos (Aceites y grasas, DBO, DQO, SST)**

Finalmente se realizó los análisis de los parámetros físico químicos para cada una de las muestras compuestas obtenidas en el muestreo, estas muestras fueron llevadas al Laboratorio LASA donde se realizaron DBO, DQO y aceites y grasas, mientras que en el Laboratorio de Análisis Instrumental de la Escuela Politécnica Nacional se realizó el análisis de SST los resultados de los análisis se presentan en la Tabla 3.3.

**Tabla 3.3.** DBO, DQO, SST, Aceites y grasas obtenidos de las tres muestras compuestas

N° Muestra	Parámetro			
	DBO <sub>5</sub> (mg/L)	DQO (mg/L)	Aceites y grasas (mg/L)	SST (mg/L)
Repetición 1	1 155	1 305	79	2 600
Repetición 2	1 277	1 365	81	2 544
Repetición 3	1 064	1 289	77	2 632
Promedio	1 165,33	1 319,67	79	2 592
Desviación Estándar	106,88	40,07	2,00	44,54
Límite Máximo Permisible	170	350	70	100
Cumplimiento	No cumple	No cumple	No cumple	No cumple

Los resultados obtenidos se comparan con los parámetros físico químicos de la normativa legal vigente (Resolución N° 002-SA-2014), se puede apreciar que ninguno de los parámetros cumple, por lo tanto en el presente proyecto se evalúa mecanismos de disminución de dichas cargas contaminantes.

Se obtuvo un valor de sólidos suspendidos totales de  $2\,592 \pm 44,54$  mg/L debido a la gran cantidad de tierra presente en el efluente, por esta cantidad de sólidos suspendidos totales el efluente sobrepasa los límites máximos permisibles establecidos por la Ordenanza Metropolitana N°404 (100 mg/L), para reducir este contaminante se realizó un pre tratamiento al efluente mediante la construcción de un desarenador de flujo horizontal que elimina altos porcentajes de remoción de tierras en un tiempo corto para plantas de tratamiento con efluentes pequeños.

Los aceites y grasas superan los límites máximos permisibles por 10 mg/L una cantidad que puede degradarse en un bio tratamiento, por lo que no es necesario realizar un tratamiento primario para la eliminación de aceites y grasas y el cumplimiento de este parámetro se evaluó posterior al bio tratamiento en la bio torre de aire sumergido.

El DBO<sub>5</sub> cuyo valor promedio fue  $1\ 165,33 \pm 106,88$  mg/L y el DQO cuyo valor promedio fue  $1\ 319,67 \pm 40,17$  mg/L que superan los límites máximos permisibles del Distrito Metropolitano de Quito, debido a la carga biológica y el índice de biodegradabilidad presente en el efluente, para su tratamiento se propone la remoción de las cargas contaminantes orgánicas en la bio torre con lecho de PET impregnado con una biopelícula bacteriana del propio efluente.

### 3.1.2. EVALUACIÓN DE LA REMOCIÓN DE SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES

A continuación se presentan los resultados de la construcción del desarenador y la evaluación de la remoción de los sólidos suspendidos totales.

#### 3.1.2.1. Construcción de un desarenador de flujo horizontal

Para remover los sólidos suspendidos totales se construyó un desarenador de flujo horizontal para un caudal de 20 m<sup>3</sup>/día que es la cantidad promedio obtenida en el muestreo diario, se realizó el análisis para un tiempo máximo de retención de 90 segundos debido a que se trata de tierra gruesa y también con un factor de corrección de diseño del 50 % debido a las fluctuaciones y variaciones del caudal, por lo que se obtuvo los resultados según los cálculos del Anexo I y con las ecuaciones citadas en la sección 2.1.2.1, el desarenador tuvo las dimensiones citadas en la Tabla 3.4 (Sainz, pp. 105 - 109).

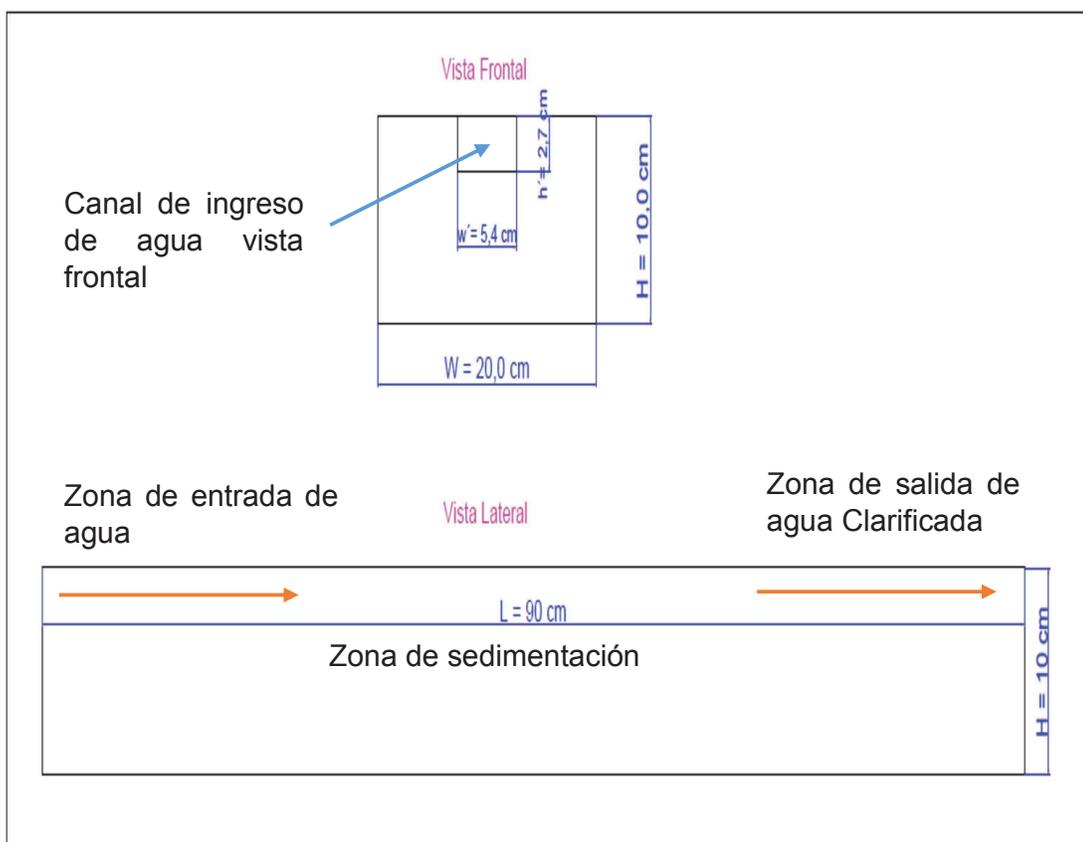
**Tabla 3.4.** Dimensiones del desarenador

Parámetro	Medida (cm)
Altura del canal de ingreso de agua (h')	2,7
Ancho del canal de ingreso de agua (w')	5,4
Longitud del desarenador (L)	90

**Tabla 3.4.** Dimensiones del desarenador (Continuación...)

Ancho del desarenador (W)	20
Altura del desarenador (H)	10

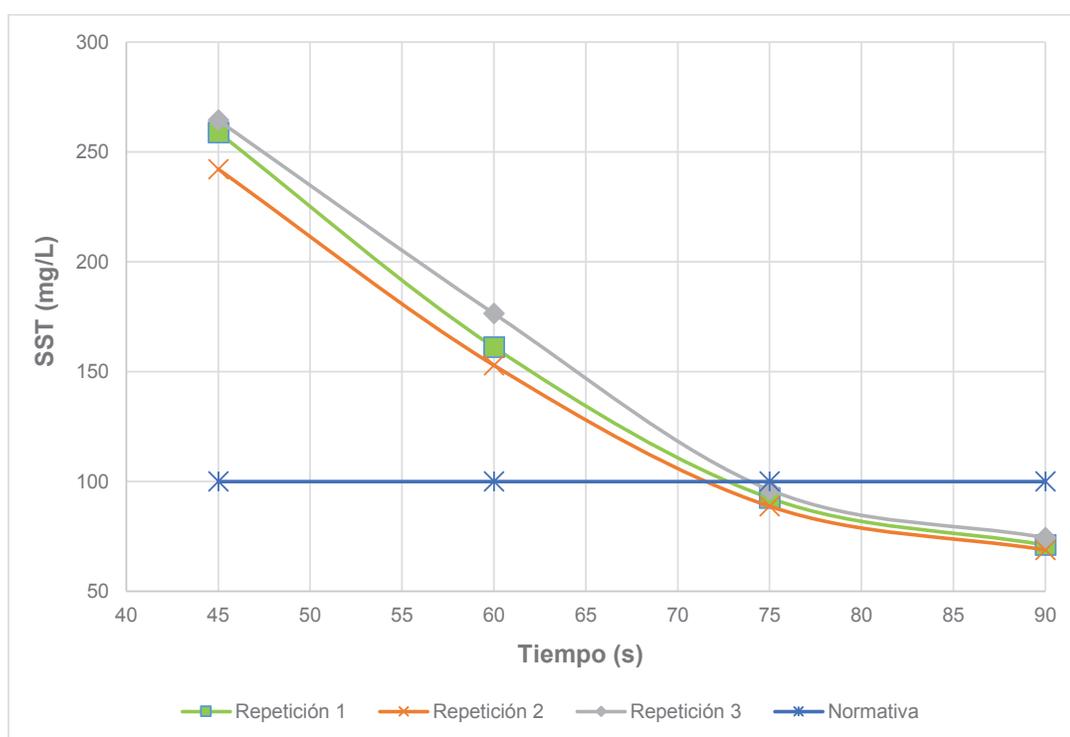
A continuación en la Figura 3.1, se presenta un esquema con la vista frontal y la vista lateral del desarenador y sus respectivas dimensiones, con estas dimensiones se construyó el desarenador en base de madera para la evaluación de la remoción de sólidos suspendidos totales.

**Figura 3.1.** Dimensiones del desarenador de flujo horizontal

En la Figura 3.1, se observa el curso que seguía el flujo de agua, que fue alimentado a través del canal (Entrada de agua vista frontal) con un caudal de 12 L/min y circulaba por la zona de sedimentación durante 90 segundos y sale por el canal de salida de agua clarificada.

### 3.1.2.2. Evaluación de la remoción de sólidos suspendidos totales en el desarenador de flujo horizontal

Se realizó la evaluación del tiempo de retención en el Laboratorio de Análisis Instrumental de la Escuela Politécnica Nacional con el desarenador construido según las dimensiones indicadas en la Tabla 3.4. (Ver Anexo IV) y se comparó con la normativa legal vigente para determinar el tiempo en el cual se cumple los requisitos de la misma y en la Figura 3.2, se observa los resultados obtenidos:



**Figura 3.2.** Resultados de sólidos suspendidos totales para un caudal de 12 L/min de la muestra compuesta obtenida

El desarenador fue construido para un caudal de 20 m<sup>3</sup>/día y posee un canal lateral por el cual se envió un caudal de trabajo de 12 L/min de agua residual que recorrió el desarenador según indica la Figura 3.1, la normativa legal distrital vigente determina como límite máximo permisible 100 mg/L de sólidos suspendidos, por lo que según se aprecia en la Figura 3.2, a partir de los 75 segundos de tiempo de retención del efluente en el desarenador el agua cumple con la norma con un valor de 95,42 ± 3,15 mg/L.

El tiempo de retención del agua en el desarenador es muy bajo respecto a otro tipo de sedimentadores que incluso tardan días en sedimentar los sólidos presentes en las aguas residuales (Sainz, 2005, p. 144), esto se debe a que se realiza la sedimentación de tierra gruesa cuya velocidad de decantación de 0,018 m/s que permite que el tiempo de sedimentación sea tan corto y tan efectivo en la remoción.

En la Figura 3.3., se observa el desarenador al culminar los 90 segundos de tratamiento con un valor de sólidos suspendidos totales promedio de  $71,11 \pm 1,11$  mg/L, en la parte superior se observa el agua transparente y la tierra acumulada en la parte baja de la figura, mientras en la Figura 3.4., se aprecia la diferencia entre el agua que entra al desarenador y el agua que sale del mismo.



**Figura 3.3.** Desarenador de flujo horizontal después de 90 segundos de retención



**Figura 3.4.** Comparativa del agua que entra al desarenador (izquierda) y efluente obtenido desde el desarenador (derecha).

### 3.1.3. EVALUACIÓN DE pH Y BIODEGRADABILIDAD DEL EFLUENTE DEL DESARENADOR

A continuación se presentan los resultados de la evaluación del pH y el coeficiente de biodegradabilidad previo a la impregnación de la bio película bacteriana.

#### 3.1.3.1. Evaluación del pH en el efluente

Se determinó el pH de las muestras clarificadas obtenidas durante tres repeticiones desde el desarenador y se obtuvieron los resultados que se indican en la Tabla 3.5.

**Tabla 3.5.** pH del efluente recuperado desde el desarenador durante 3 repeticiones

Nº Muestra	Parámetro
	pH
Repetición 1	7,9
Repetición 2	8,0
Repetición 3	7,9
Promedio	$7,93 \pm 0,047$

En la Tabla 3.5 el valor del pH del efluente que será usado para la impregnación de la biopelícula bacteriana tiene un promedio de  $7,93 \pm 0,047$ , por lo que la película bacteriana se desarrollará en un ambiente tolerable, ya que es un valor que ese encuentra en el rango de pH entre 4,0 y 9,5 (Soza, 2013, p. 18).

#### 3.1.3.2. Evaluación del coeficiente de biodegradabilidad del efluente

Se determinó el coeficiente de biodegradabilidad del efluente obtenido del desarenador y los resultados se indican en la Tabla 3.6.

**Tabla 3.6.** Coeficiente de biodegradabilidad sobre el DBO y DQO, de las tres muestras compuestas obtenidas

N° Muestra	Parámetro		
	DBO <sub>5</sub> (mg/L)	DQO (mg/L)	Coefficiente de Biodegradabilidad
Repetición 1	1 155,00	1 305,00	0,885
Repetición 2	1 277,00	1 365,00	0,936
Repetición 3	1 064,00	1 289,00	0,825
Promedio	1 165,33 ± 106,88	1 319,67 ± 40,07	0,880 ± 0,06

El coeficiente de biodegradabilidad más bajo se obtuvo en la tercera repetición y fue de 0,825 y el valor de biodegradabilidad más alto fue de 0,936 en la segunda repetición, el promedio global del coeficiente de biodegradabilidad es  $0,88 \pm 0,06$ , por lo tanto al compararlo con los valores de la Tabla 2.4 del presente documento se determina que el efluente presenta características muy biodegradables, por lo tanto es apto para ser tratado por un método biológico para la reducción de las cargas contaminantes DBO<sub>5</sub> y DQO (Soza, 2003, p. 22).

### **3.2. DESARROLLO DE LA BIOPELÍCULA BACTERIANA SOBRE EL LECHO ESTÁTICO DE PET**

Los resultados del desarrollo de la bio película bacteriana se dividieron en tres etapas que son: la construcción del bioreactor a escala laboratorio, la evaluación del crecimiento bacteriano y el conteo de las bacterias en el lecho de PET.

#### **3.2.1. CONSTRUCCIÓN DEL BIOREACTOR A ESCALA LABORATORIO**

En la Tabla 3.7 se presentan los resultados de las características físicas en la construcción de los biorreactores.

**Tabla 3.7.** Características físicas de los reactores

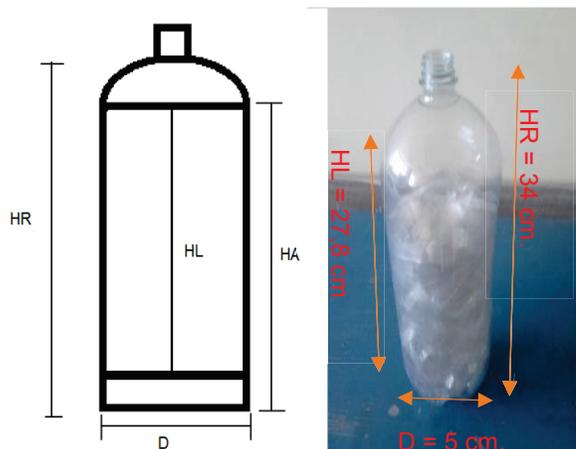
<b>Características</b>	<b>Nomenclatura</b>	<b>Medida</b>
Altura del reactor	$H_R$	34,00 cm
Altura de agua	$H_A$	30,56 cm
Altura del lecho PET	$H_L$	27,80 cm
Volumen de agua	$V_A$	2 400 cm <sup>3</sup>
Volumen del lecho PET	$V_L$	2 185,76 cm <sup>3</sup>
Diámetro	$D$	11 cm
Diámetro de las mangueras de entrada de aire y salida de agua	$D_M$	5 mm

La altura del reactor se adaptó a la altura de la botella de 3 L que fue utilizada como base del reactor, la altura del agua obtenida representa en unidades de longitud a los 2 400 mL de agua residual que fue colocada dentro del bio reactor y que representa un 89 % del volumen de todo el recipiente.

La altura del lecho de PET según la Tabla 2.5, debía ser inferior del 90 % del volumen total y también debía ser inferior a la cantidad de agua introducida en el reactor, pues el lecho debe estar totalmente cubierto por el agua residual, por lo tanto la altura de lecho de PET fue de 27,80 cm que representa un volumen del reactor de 2 185,76 cm<sup>3</sup> que representa un 72,85 % del volumen total del reactor.

Mientras el diámetro del reactor y las mangueras fueron estándares del material ocupado para la construcción de los reactores. El volumen de agua ocupado en los reactores fue de 2 400 mL, porque esta cantidad permite un trabajo adecuado dentro del reactor, para que no haya desbordes debido al flujo de aire que empuja al agua residual.

En la Figura 3.5, se presenta el esquema de la construcción de los reactores para la impregnación.



**Figura 3.5.** Esquema del reactor y sus dimensiones (izquierda) y reactor real construido a escala laboratorio (derecha).

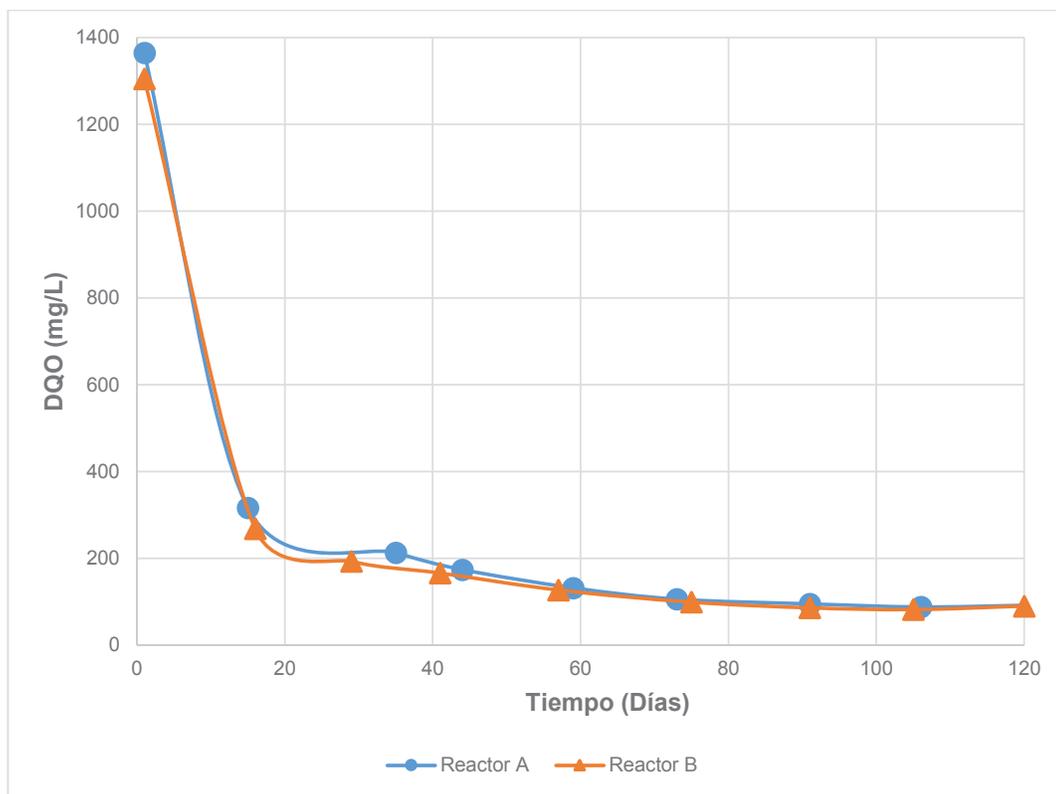
### 3.2.2. EVALUACIÓN DEL CRECIMIENTO BACTERIANO

La evaluación del crecimiento bacteriano se desarrolla en tres etapas: impregnación y estabilización de la biopelícula bacteriana, la determinación del orden de la reacción de estabilización de la biopelícula y el conteo de las bacterias presentes en el lecho de PET, donde se identificaron hongos, levaduras, mezófilas aerobias y coliformes totales. Los resultados de cada etapa se detallan a continuación:

#### 3.2.2.1. Etapa de impregnación y estabilización de la película bacteriana

- **Remoción de DQO en función del tiempo**

La etapa de impregnación y estabilización se llevó a cabo en dos bio reactores identificados como Reactor A y Reactor B cuyas dimensiones fueron especificadas en la Tabla 3.7 y con las muestras clarificadas obtenidas del desarenador, para identificar la formación de la bio película se realizó la medición del DQO cada 15 días y se relacionó la disminución de este parámetro con la impregnación bacteriana, los resultados se observan en la Figura 3.6.



**Figura 3.6.** Disminución de DQO respecto al tiempo para los reactores A y B.

En la Figura 3.6. se aprecia la tendencia en la disminución del DQO en el Reactor A que inicia en 1 365 mg/L, se puede observar que en los primeros 15 días hay una disminución exponencial hasta un valor de DQO de 316,4 mg/L que representa la fase de crecimiento exponencial de la cinética de crecimiento bacteriano, en el Reactor B se observa que en los primeros 15 días el valor de la carga contaminante DQO sigue la misma tendencia disminuyendo de 1 305 mg/L hasta 268 mg/L, se observa que los dos reactores se comportan de la misma manera en los primeros 15 días de crecimiento exponencial.

Se observa además que en el Reactor A se mantiene un decrecimiento constante de los valores de DQO desde el día 15 con un valor de 316,4 mg/L hasta el día 106 con un DQO de 88 mg/L, en el Reactor B la tendencia es similar desde el día 16 con un DQO de 268 mg/L hasta el día 105 con un valor de 82 mg/L, durante este periodo de tiempo se observa en el gráfico la fase estacionaria del crecimiento

bacteriano. La etapa de mayor estabilidad en el Reactor A se observa a partir del día 73 con un DQO de 106 mg/L hasta el día 106 y en el Reactor B desde el día 75 con un valor de DQO de 99 mg/L hasta el día 105.

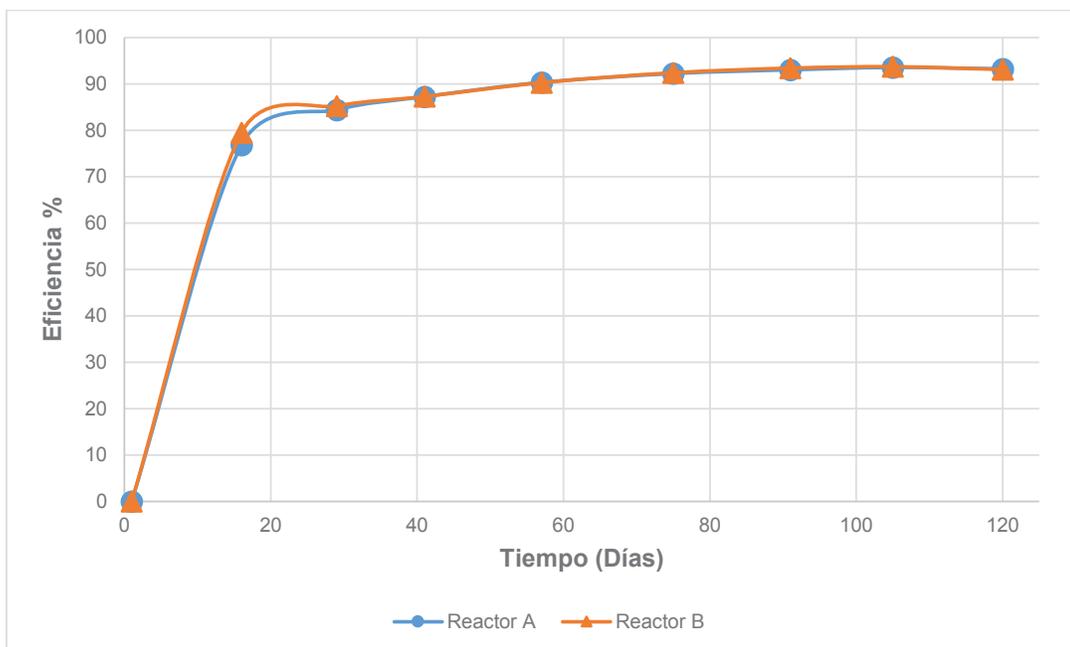
En los Reactores A y B se aprecia claramente la fase de crecimiento exponencial de la cinética del crecimiento bacteriano, pues en la curva que va en el intervalo de tiempo de 0 a 15 días hay una marcada reducción de DQO, pasando de 1 365 mg/L a 316,4 mg/L en el Reactor A y de 1 305 mg/L a 268 mg/L en el Reactor B esto se puede observar en el Anexo V.

En el Reactor A en el día 106 de impregnación se obtuvo el punto más bajo de DQO que fue de 88 mg/L mientras que el Reactor B presentó el punto más bajo de DQO a los 105 días de 82 mg/L. En el día 120 para el Reactor A el DQO incrementó a 92 mg/L, mientras que en Reactor B en el día 121 el DQO fue de 90 mg/L por lo que se determinó que inició la fase de decaimiento del crecimiento bacteriano y se detuvo el proceso de impregnación, obteniéndose dos bio torres con lecho de PET impregnado con una biopelícula bacteriana estable.

Según Andreottola (2005) se identificó que el inicio de la fase de decaimiento para efluentes de minería fue a los 222 días de tratamiento con una remoción de DQO del 91 %, mientras que Lapo (2014) realizó la impregnación con aguas domésticas del Río Machángara durante 350 días y determinó que hubo varios puntos de decaimiento a los 120, 250 y 300 días con remociones de DQO que llegaron hasta un 95 %, por lo que para el efluente de la fábrica de frituras es un tiempo considerable, pero razonable con respecto a otros estudios realizados.

- **Eficiencia de la remoción del DQO respecto al tiempo**

En la Figura 3.7, se presentan los resultados de eficiencia de remoción de la carga contaminante DQO respecto al tiempo de cada reactor, esto con el objetivo de determinar el aumento de la eficacia de la remoción con respecto al tiempo de estabilización de la bio película durante el proceso de impregnación bacteriana en el lecho estático de PET.



**Figura 3.7.** Aumento de la eficiencia con respecto al tiempo para los reactores A y B.

En la Figura 3.7. se aprecia el incremento pronunciado de eficiencia durante los primeros 15 días de desarrollo de la biopelícula bacteriana, el efluente alcanzó una remoción del 76,82 % en el Reactor A y 79,46 % en el Reactor B, un porcentaje de remoción aceptable al tratarse de la etapa de crecimiento exponencial, pues ya se cumple con la normativa vigente Ordenanza Metropolitana N° 404 y todavía el proceso de impregnación no se ha completado, por lo que se espera que la bio torre de aire sumergido mantenga el promedio de remoción que está entre el 80 – 95 % (Weismann, 2007, p.154).

A partir de los 15 días se observa en el Reactor A un aumento constante en la eficiencia de la remoción de la carga contaminante, es así que el punto más alto de remoción de DQO fue en el día 106, con una eficiencia del 93,26 %, mientras que en el Reactor B la eficiencia más alta fue a los 105 días con un porcentaje de remoción del 93,72 %, como se aprecia en la Figura 3.7, ambas repeticiones se comportan similar en el periodo de tiempo evaluado.

En el Reactor A se observa que supera el 90 % de eficiencia a partir del día 59, mientras que el Reactor B lo supera en el día 57. Se determina un punto de

disminución de la eficiencia en el Reactor A entre los días 106 y 121 desde 93,55 % hasta 93,26 % respectivamente, mientras en el Reactor B entre los días 105 y 120 la eficiencia disminuyó desde 93,72 % hasta 93,10 %, por lo que se puede determinar que la fase de estabilidad terminó y a su vez empezó la etapa de decaimiento y muerte en cada reactor.

- **DQO agregado en los reactores con respecto al tiempo**

Para mantener los efluentes con una carga contaminante de DQO similar a la del agua residual inicial cada 15 días se ingresaba en el reactor una mezcla de melaza y agua como se detalló en la sección 2.2.2.1, esta mezcla fue realizada acorde al balance de masa que consta en el Anexo II.

A continuación en las Tablas 3.8 y 3.9 se indica la cantidad de melaza y DQO agregados a los reactores según el balance de masa, para que el agua dentro de los reactores cada 15 días mantenga la carga contaminante de Demanda Química de Oxígeno por encima de 1 300 mg/L.

**Tabla 3.8.** Masa de melaza y DQO agregados a la muestra de agua restante en el Reactor A

Tiempo (días)	Melaza (g)	DQO agregado (mg/L)
1	0	0
15	2,28	8 185
35	2,49	8 909
44	2,58	9 182
59	2,68	9 476
73	2,74	9 658
91	2,76	9 735
106	2,78	9 784

Como se observa en la Tabla 3.8, la cantidad de melaza ingresada al efluente dentro del Reactor A aumentó con respecto al tiempo, desde un valor inicial de 2,28 g, hasta el valor más alto de 2,78 g en el día 106 de la impregnación, se produjo un aumento total de melaza de 0,50 g, que representa un 21,78 %.

El aumento de DQO en el Reactor A se observa en la Tabla 3.8, donde el valor de DQO más bajo fue 8 185 mg/L en el día 15 y el más elevado fue 9 784 mg/L a los 106 días de impregnación, por lo que el porcentaje que aumento el DQO ingresado al Reactor A es 19,54 %.

El aumento de melaza y carga contaminante DQO fue aumentando acorde al aumento de las colonias bacterianas en el lecho PET, pues mientras la biopelícula se estabiliza aumenta el número de bacterias, por lo tanto durante los cinco meses de impregnación, en los intervalos de 15 días se degradaba más carga contaminante como se observó en la Figura 3.6, excepto al día 120 donde el DQO no disminuyó, por lo tanto se determinó que inicio la etapa de muerte bacteriana (Lapo, 2014, pp. 69-71).

**Tabla 3.9.** Masa de melaza y DQO agregados a la muestra de agua restante en el Reactor B

Tiempo (días)	Melaza (g)	DQO agregado (mg/L)
1	0	0
16	2,28	8 524
29	2,44	9 049
41	2,51	9 238
57	2,59	9 511
75	2,66	9 707
91	2,68	9 798
105	2,69	9 826

En el reactor B se produjo un aumento entre el valor inicial 2,28 g y el más alto en el día 105 que fue 2,69 g, lo que significa un aumento del 18,02 % y 0,41 g de melaza.

El aumento de DQO agregado en el Reactor B, donde su valor mínimo fue 8 524 mg/L y sus valor máximo fue 9 826 mg/L, que representa un porcentaje del 15,74 %, la variación porcentual entre ambos reactores depende del valor de la carga contaminante DQO colocada al inicio del proceso de impregnación ya que el valor del reactor B es una repetición del Reactor A (Lapo, 2014, pp. 69 - 71).

### 3.2.2.2. Determinación del orden de la reacción para el crecimiento bacteriano en el lecho estático de PET

Se determinó el orden de la reacción acorde a las Ecuación [2.6], Ecuación [2.7] y Ecuación [2.8] para identificar el periodo de estabilización del crecimiento bacteriano en el lecho de PET y su relación como una reacción de primer orden, segundo orden u orden cero para ambos reactores (Dos Santos, 2007, p.34).

En la Tabla 3.10, se presentan los resultados de las regresiones lineales realizadas para los datos del Reactor A.

**Tabla 3.10.** Datos obtenidos para la determinación del orden de la impregnación en el Reactor A

<b>Orden de la reacción</b>	<b>Orden 0</b>	<b>Orden 1</b>	<b>Orden 2</b>
<b>Tiempo (días)</b>	<b>DQO</b>	<b>ln DQO</b>	<b>1/DQO</b>
1	N/A	N/A	N/A
15	316,4	5,76	0,0032
35	213	5,36	0,0047
44	174	5,16	0,0057
59	132	4,88	0,0076

**Tabla 3.10.** Datos obtenidos para la determinación del orden de la impregnación en el Reactor A  
(Continuación...)

73	106	4,66	0,0094
91	95	4,55	0,0105
106	88	4,48	0,0114

Con los datos presentados en la Tabla 3.10, se realizó la regresión lineal para los datos del reactor A y se obtuvo el factor de correlación ( $r^2$ ) para identificar si la impregnación obedece a una ecuación de orden cero, primer orden o segundo orden.

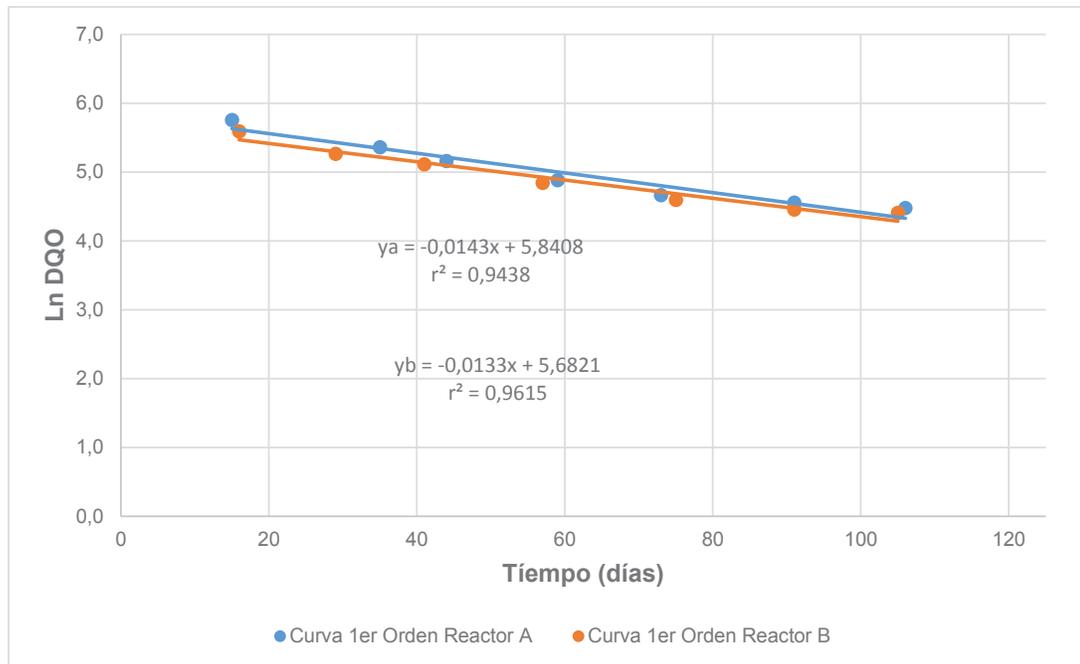
En la Tabla 3.11 se presentan los resultados de las regresiones lineales realizadas para los datos del Reactor B, para determinar si mantiene la tendencia del Reactor A:

**Tabla 3.11.** Datos obtenidos para la determinación del orden de la impregnación en el Reactor B

<b>Orden de la reacción</b>	<b>Orden 0</b>	<b>Orden 1</b>	<b>Orden 2</b>
<b>Tiempo (días)</b>	<b>DQO (g)</b>	<b>Ln DQO</b>	<b>1/DQO</b>
1	N/A	N/A	N/A
16	268	5,59	0,0037
29	193	5,26	0,0052
41	166	5,11	0,0060
57	127	4,84	0,0079
75	99	4,59	0,0101
91	86	4,45	0,0116
105	82	4,40	0,0122

- **Resultados regresión de primer orden**

En la Figura 3.8, se presentan los resultados de la regresión lineal obtenida para los datos de la fase de estabilización, si se considera como una reacción de primer orden:

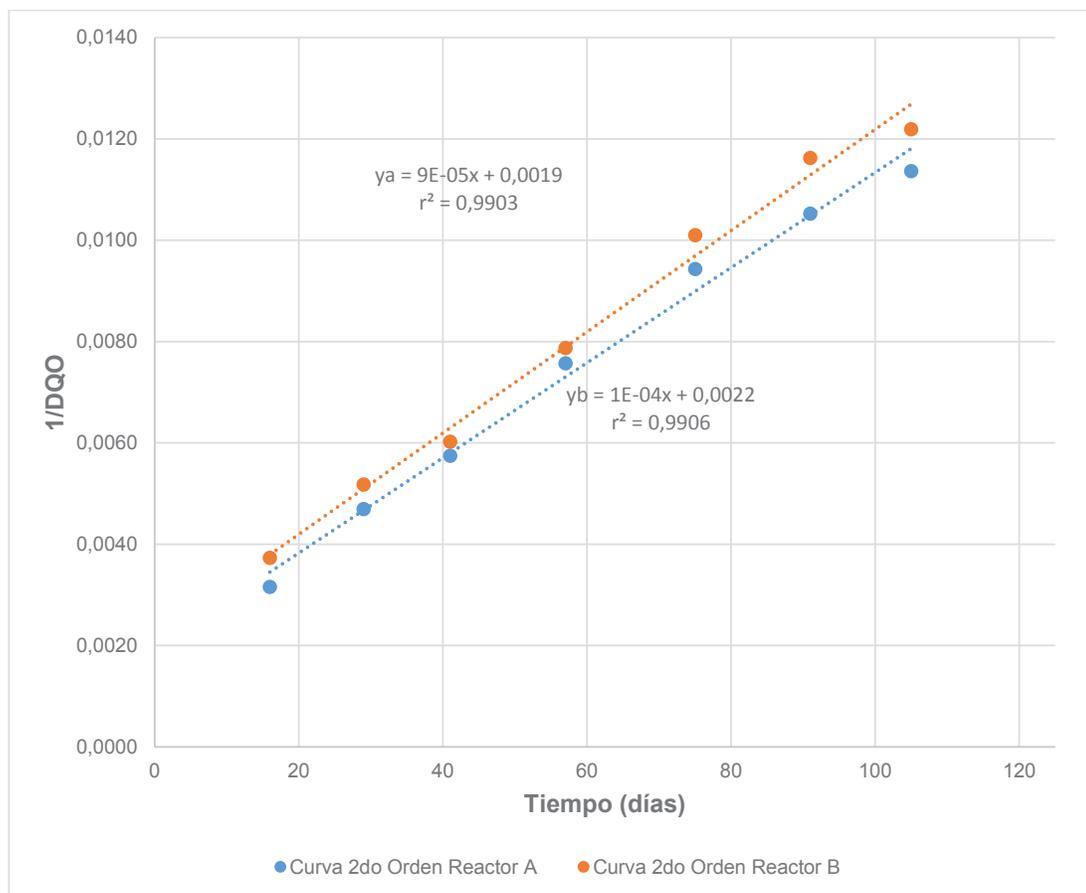


**Figura 3.8.** Regresión lineal de la reacción de impregnación de primer orden.

Para determinar el orden de la reacción se eliminó los puntos que representan claramente a la fase de crecimiento exponencial y la fase de decaimiento porque cada fase de la reacción de crecimiento bacteriano se maneja en un orden diferente por lo que se observa en la Figura 3.8., que la línea de tendencia para una reacción de primer orden produjo un factor de correlación  $r^2$  es 0,9438 en el reactor A y un factor de correlación  $r^2 = 0,9615$  en el reactor B.

- **Resultados regresión de segundo orden**

En la Figura 3.9, se presentan los resultados de la regresión lineal para una reacción de segundo orden:

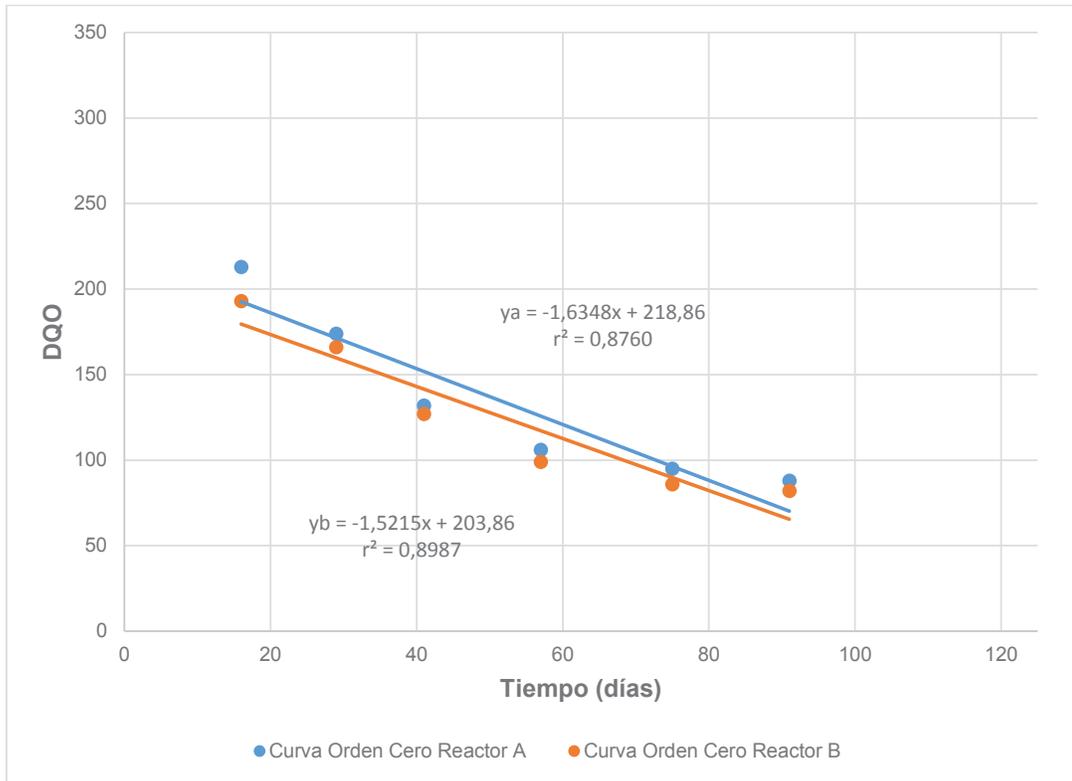


**Figura 3.9.** Regresión lineal de la reacción de impregnación de segundo orden.

En la Figura 3.9, se observa que el factor de correlación  $r^2$  de la regresión de segundo orden para el reactor A es 0,9903, mientras que para el reactor B el factor de correlación  $r^2$  es 0,9906, para obtener esta regresión también se eliminó los puntos de la fase de crecimiento exponencial y de decaimiento y se obtuvo resultados comparables con las otras regresiones analizadas en las Figura 3.8, y Figura 3.10 (Welter, 2004, pp.10-11).

- **Resultados regresión de orden cero**

En la Figura 3.10, se presentan los resultados de la regresión lineal y el factor de correlación de los datos de los reactores A y B para identificar si estos obedecen a una reacción de orden cero:



**Figura 3.10.** Regresión lineal de la reacción de impregnación de Orden cero.

En la Figura 3.10, se observa que el factor de correlación  $r^2$  de la regresión de orden cero para el reactor A es 0,8760, mientras que para el reactor B el factor de correlación  $r^2$  es 0,8987, para obtener esta regresión también se eliminó los puntos de la fase de crecimiento exponencial y de decaimiento y se obtuvo resultados comparables con las otras regresiones analizadas en las Figuras 3.8 y 3.9 (Welter, 2004, pp.10-11).

Se aprecia que la fase de estabilización de la impregnación bacteriana se ajusta mejor a una reacción de segundo orden, pero según Dos Santos (2007) la reacción de estabilización debería identificarse como una auto catalítica de primer orden y observando los resultados obtenidos en la regresión de primer orden, el factor de correlación ( $r^2 = 0,9615$ ) a escala industrial permite tratar a la impregnación como una reacción de primer orden debido a su cercanía a la unidad y esto permite utilizar la ecuación de primer orden para obtener los datos al realizar el diseño de la planta de tratamiento de aguas residuales (Fogler, 2001, pp. 235 – 242; Moncayo, 2010).

### 3.2.3. CONTEO DE LAS BACTERIAS QUE CONFORMAN LA BIOPELÍCULA BACTERIANA

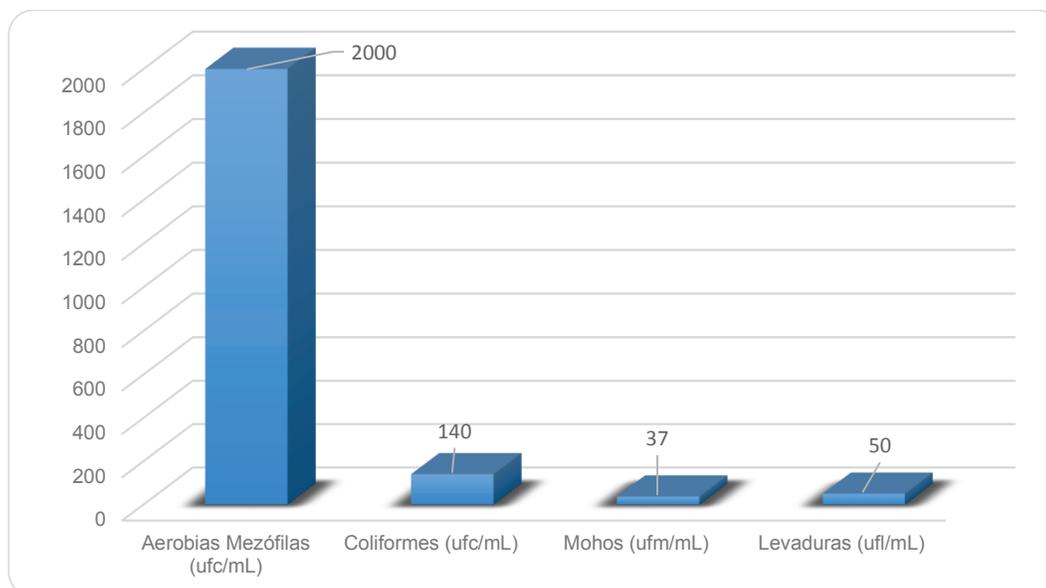
Se obtuvo los resultados del conteo de bacterias que conforman la bio película bacteriana de una muestra del lecho impregnado del Reactor A, después de las primeras señales de la etapa de decaimiento, que se identificaron por el incremento de DQO a los 120 días de impregnación. Los resultados se presentan en la Tabla 3.12.

**Tabla 3.12.** Cantidad de bacterias encontradas en un litro de agua para un total de 220 pedazos del lecho estático de PET

Recuento de microorganismos	Unidad	Resultados
Aerobios mezófilos	ufc/ml	$2,0 \times 10^3$
Coliformes totales	ufc/100ml	$1,4 \times 10^2$
Hongos/mohos	upm/ml	$3,7 \times 10$
Levaduras	upl/ml	$5,0 \times 10$

Como se observa en la Tabla 3.12, hay 2 000 unidades formadores de colonias de bacterias aerobias mezófilas por mililitro de agua tomada, mientras que hay 140 unidades formadores de colonias de coliformes totales por cada 100 mililitros una cantidad inferior a las mezófilas aerobias, tanto hongos y levaduras presentan valores muy pequeños con respecto a aerobias mezofilas 37 y 50 unidades precursoras respectivamente, por lo que en primera instancia se determinó que la biopelícula bacteriana impregnada en el lecho de PET consta en una mayoría absoluta de bacterias aerobias mezófilas provenientes del propio efluente (Cohen, 2000).

En la Figura 3.11, se observa la diferencia que existe en la muestra de agua de los diferentes microorganismos que se analizaron en el conteo de los microorganismos presentes en la biopelícula bacteriana.



**Figura 3.11.** Cantidad de bacterias por mL de lecho estático de PET.

A continuación en la Tabla 3.13, se presenta los resultados del conteo de bacterias aerobias por metro cuadrado de lecho de PET, para saber la distribución de las bacterias a través de la superficie en el soporte.

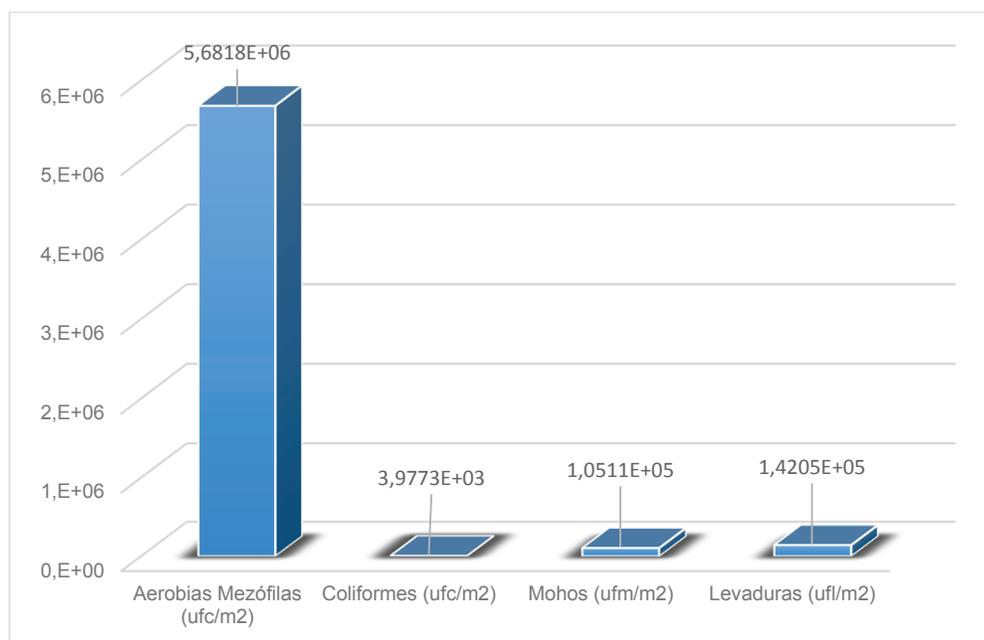
**Tabla 3.13.** Cantidad de bacterias encontradas en un m<sup>2</sup> del lecho estático de PET

Recuento de microorganismos	Unidad	Resultados
Aerobios mezófilos	ufc/m <sup>2</sup>	5,6818x10 <sup>6</sup>
Coliformes totales	ufc/m <sup>2</sup>	3,9773x10 <sup>3</sup>
Hongos/mohos	upm/m <sup>2</sup>	1,0511x10 <sup>5</sup>
Levaduras	upl/m <sup>2</sup>	1,4205x10 <sup>5</sup>

Como se observa en la Tabla 3.13, la biopelícula bacteriana tiene 5,68 millones de unidades formadoras de colonias con respecto a un metro cuadrado de lecho estático de PET, es decir hay 5,68 millones de bacterias aisladas que pueden producir toda una colonia de microorganismos en un corto periodo de tiempo, lo mismo sucede con coliformes totales pues se presentan 3 977,3 células aisladas

capaces de formar una colonia bacteriana en corto periodo de tiempo por metro cuadrado de lecho estático de PET, mientras que hay 105 mil y 142 mil unidades precursoras de mohos y levaduras respectivamente por metro cuadrado de lecho de PET.

Se determinó que las aerobias mezofílicas son la mayoría de la biopelícula bacteriana, mientras que la presencia de coliformes se explica en la manipulación del PET previo a entrar a los bioreactores, así como la naturaleza propia del agua potable usada en los procesos de producción de la fábrica de frituras, las mismas que no afectan a la remoción de la carga contaminante por estar en cantidades muy pequeñas, sin embargo se debe controlar los coliformes totales con el paso de los días de tratamiento y realizar el mantenimiento del bioreactor para evitar su propagación.



**Figura 3.12.** Cantidad de bacterias por m<sup>2</sup> de lecho estático de PET.

En la Figura 3.12, se observa la predominancia en el lecho de PET de las bacterias aerobias mezófilas, seguido de las unidades precursoras de mohos y levaduras y la formación de colonias de coliformes, por lo que la bio película está compuesta mayoritariamente por las bacterias aerobias mezofílicas propias del efluente.

### 3.3. EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LA BIO TORRE CON LECHO ESTÁTICO DE PET IMPREGNADO CON UNA BIOPELÍCULA DE BACTERIAS AEROBIAS

Se realizó la evaluación de la eficiencia de la bio torre durante 24 horas para un caudal de 2,5 L/día de tres muestras nuevas distintas a las de impregnación que también fueron acondicionadas en el desarenador y que se determinó el pH y el coeficiente de biodegradabilidad y se obtuvieron los siguientes resultados.

- **Resultados del análisis inicial de las muestras frescas**

En la Tabla 3.14, se presentan los resultados de la caracterización inicial de las nuevas muestras del efluente.

**Tabla 3.14.** DBO, DQO, SST, Aceites y grasas obtenidos de las tres muestras compuestas para la evaluación de la Bio Torre

N° Muestra	Parámetro			
	DBO <sub>5</sub> (mg/L)	DQO (mg/L)	Aceites y Grasas (mg/L)	SST (mg/L)
Muestra 1	1 196	1 337	78	2 612
Muestra 2	1 231	1 381	82	2 624
Muestra 3	1 142	1 301	77	2 546
Promedio	1 189	1 339	79	2 594
Desviación Estándar	44,83	40,07	2,65	42
Límite Máximo Permisible	170	350	70	1 600
Cumplimiento	No cumple	No cumple	No cumple	No cumple

Como se puede observar en la Tabla 3.14, los parámetros analizados para el nuevo efluente de la fábrica de frituras no cumplen con la normativa legal vigente del

Distrito Metropolitano de Quito, por lo se realiza todo el acondicionamiento previo a la evaluación de la bio torre.

- **Remoción de sólidos suspendidos totales**

A partir de las nuevas muestras obtenidas cuyos parámetros no cumplen con la legislación local vigente se acondicionaron en el desarenador para reducir los sólidos suspendidos totales como etapa previa a la evaluación de la bio torre, se obtuvieron los resultados que se presentan en la Tabla 3.15.:

**Tabla 3.15.** Evaluación de los SST obtenidos de las tres muestras compuestas para la evaluación de la bio torre

Tiempo de retención (s)	SST (mg/L)		
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
45	247,78	253,33	266,67
60	172,94	164,71	183,53
75	95,00	92,5	98,75
90	72,22	71,11	70

La remoción de los sólidos suspendidos totales fue similar a la realizada en el numeral 3.1.2.2, donde debido al tipo de sólidos suspendidos se obtuvo una reducción representativa de este parámetro y se cumple con la normativa distrital vigente que es de 100 mg/L a partir de los 75 segundos de tratamiento, sin embargo se determina 90 segundos como tiempo ideal de permanencia del agua en el desarenador.

- **Evaluación del pH del efluente**

En la Tabla 3.16, se presenta los resultados de la medición de pH del efluente obtenido del desarenador, para identificar si el efluente es apto para las bacterias.

**Tabla 3.16.** pH del efluente recuperado desde el desarenador para la evaluación de la Bio torre

N° Muestra	Parámetro
	pH
Muestra 1	7,7
Muestra 2	7,9
Muestra 3	7,9
Promedio	7,83
Desviación Estándar	±0,094

El pH obtenido como resultado de la medición tuvo un promedio entre los tres días de  $7,83 \pm 0,094$ , por lo que se según Soza (2003, pp. 18) el efluente provee un ambiente tolerable para las bacterias del lecho estático de PET, por lo tanto la bio torre tendrá un funcionamiento óptimo durante las 24 horas de tratamiento que se va a evaluar.

- **Evaluación del coeficiente de biodegradabilidad**

Las muestras frescas también fueron evaluadas mediante el coeficiente de biodegradabilidad para determinar la capacidad de remoción de contaminantes orgánicos que posee el efluente, en la Tabla 3.17, se presentan los resultados del coeficiente de biodegradabilidad del efluente obtenido del desarenador durante los tres días de muestreo, para identificar si el efluente es apto para el tratamiento en la bio torre con lecho estático de PET.

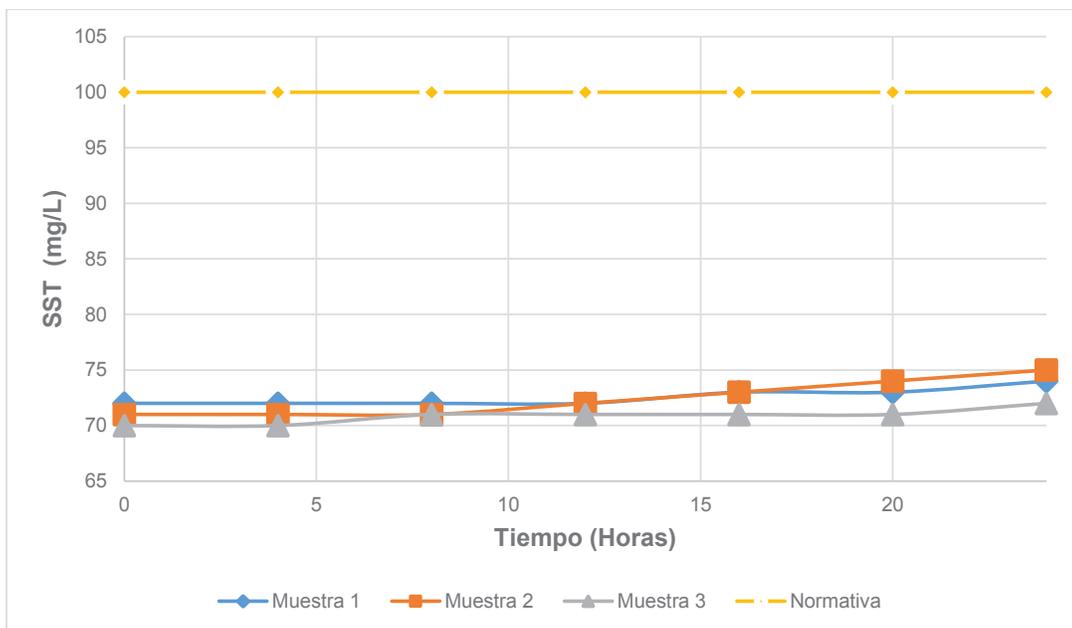
El coeficiente de biodegradabilidad presenta un valor promedio de  $0,887 \pm 0,009$  y según los datos de la Tabla 2.3, las muestras obtenidas son de características muy biodegradables, como consecuencia estas nuevas muestras son aptas para darles un bio tratamiento y por lo tanto van a ser evaluadas en la bio torre (Soza, 2003, pp. 22-23).

**Tabla 3.17.** Coeficiente de biodegradabilidad sobre el DBO y DQO, de las tres muestras compuestas obtenidas para la evaluación de la Bio Torre

Nº Muestra	Parámetro		
	DBO <sub>5</sub> (mg/L)	DQO (mg/L)	Coefficiente de Biodegradabilidad
Muestra 1	1 196	1 337	0,895
Muestra 2	1 231	1 381	0,891
Muestra 3	1 142	1 301	0,878
Promedio	1 189	1 339	0,887
Desviación Estándar	±44,83	±40,07	±0,009

- **Evaluación de sólidos suspendidos totales en la bio torre durante 24 horas**

Se realizó el análisis para un caudal de 2,5 L/día y se evaluó el parámetro en estudio durante intervalos de 4 horas, como se observa en la Figura 3.13.



**Figura 3.13.** Evaluación de SST en la bio torre durante 24 horas

En la Figura 3.13, se observa un ligero incremento en este parámetro conforme al avance del tiempo, este aumento puede deberse a las cantidades de biomasa que se desprende del lecho estático, también puede tomarse como una cantidad fija debido a que el procedimiento de cálculo de los sólidos suspendidos totales depende de variaciones de hasta cuatro decimales debido a la precisión de la balanza analítica utilizada.

Se puede observar también que las tres muestras evaluadas siempre permanecieron con valores por debajo de la norma, sus valores fluctuaron entre 70 y 75 mg/L, por lo que el tratamiento previamente realizado en el desarenador permite el cumplimiento legal.

Como se aprecia la bio masa aumenta con el paso del tiempo, por lo que la bio torre requiere de un control de SST que permita realizar un mantenimiento para retirar la bio masa y que esta reciba un tratamiento adecuado, se recomienda que forme parte de abonos orgánicos.

- **Evaluación de la degradación de aceites y grasas en la evaluación de la bio torre**

Para evaluar la Bio Torre con respecto a los aceites y grasas se realizó el análisis de una muestra de agua previamente acondicionada con un caudal de 2,5 L/día en intervalos de 4 horas, como se detalla en la Tabla 3.18.

**Tabla 3.18.** Degradación de aceites y grasas para un caudal de 2,5 L/día durante 24 horas de tratamiento

Tiempo (horas)	Aceites y Grasas (mg/L)			Límite Máximo Permisible (mg/L)
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	
0	79	81	77	70
4	63	66	60	
8	37	41	49	

**Tabla 3.18.** Degradación de aceites y grasas para un caudal de 2,5 L/día durante 24 horas de tratamiento (Continuación...)

Tiempo (horas)	Aceites y Grasas (mg/L)			Límite Máximo Permissible (mg/L)
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	
12	< 20	24	27	70
16	< 20	< 20	< 20	
20	< 20	< 20	< 20	
24	< 20	< 20	< 20	

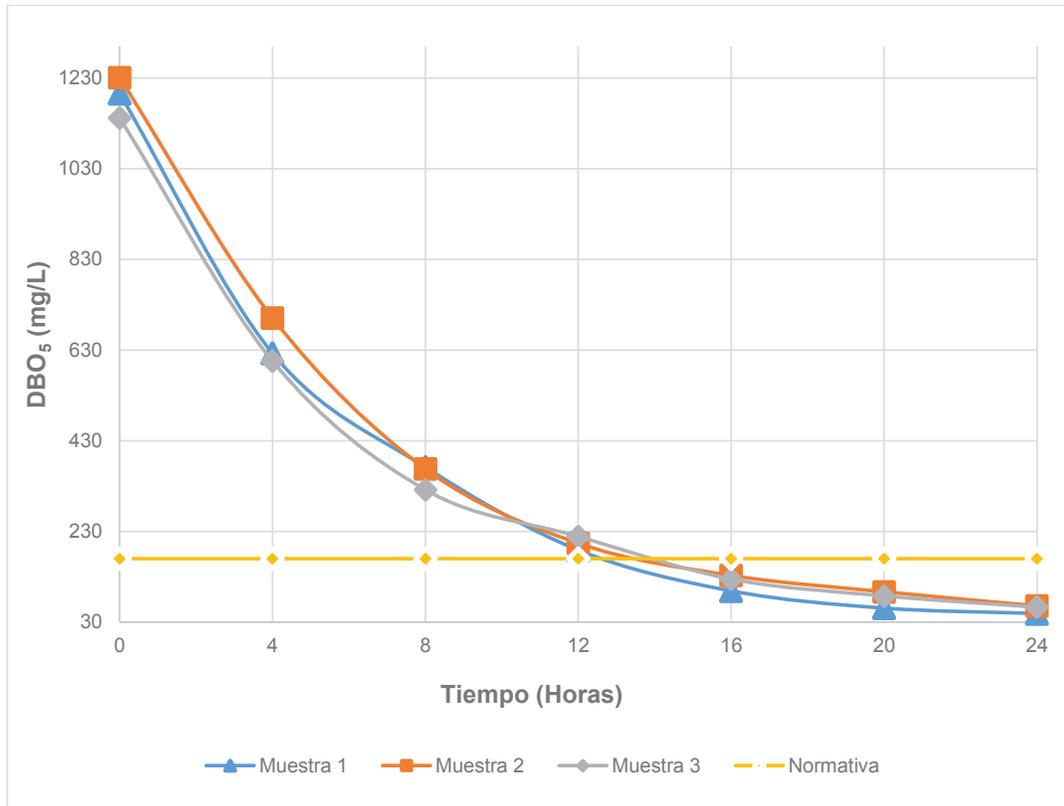
Debido a que el valor inicial de aceites y grasas está fuera de los límites máximos permisibles por una cantidad muy pequeña, no fue necesario desarrollar un pre tratamiento basado en una trampa de grasa.

Por la naturaleza orgánica de este tipo de contaminante y debido a su ligero incumplimiento se realizó su remoción en la Bio Torre, donde a partir de las 4 horas de tratamiento el efluente ya cumple con la Resolución N°002-SA-2014 de la Ordenanza Metropolitana N° 404, cuyo valor es 70 mg/L.

Se observa también que a partir de las 12 horas de tratamiento los aceites y grasas en la bio torre, este parámetro está por debajo de 20 mg/L, pero no presenta un valor fijo, esto debido a las limitaciones de los equipos del laboratorio que detecta dicha cantidad como valor mínimo.

- **Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>)**

El DBO<sub>5</sub> se determinó mediante el método estandarizado APHA 5210 B en el Laboratorio microbiológico LASA este procedimiento se realizó durante 24 horas en intervalos de 4 horas, de esta manera se obtuvieron los resultados de las tres repeticiones realizadas y cuyos resultados están expuestos en la Figura 3.14 que se presenta a continuación:

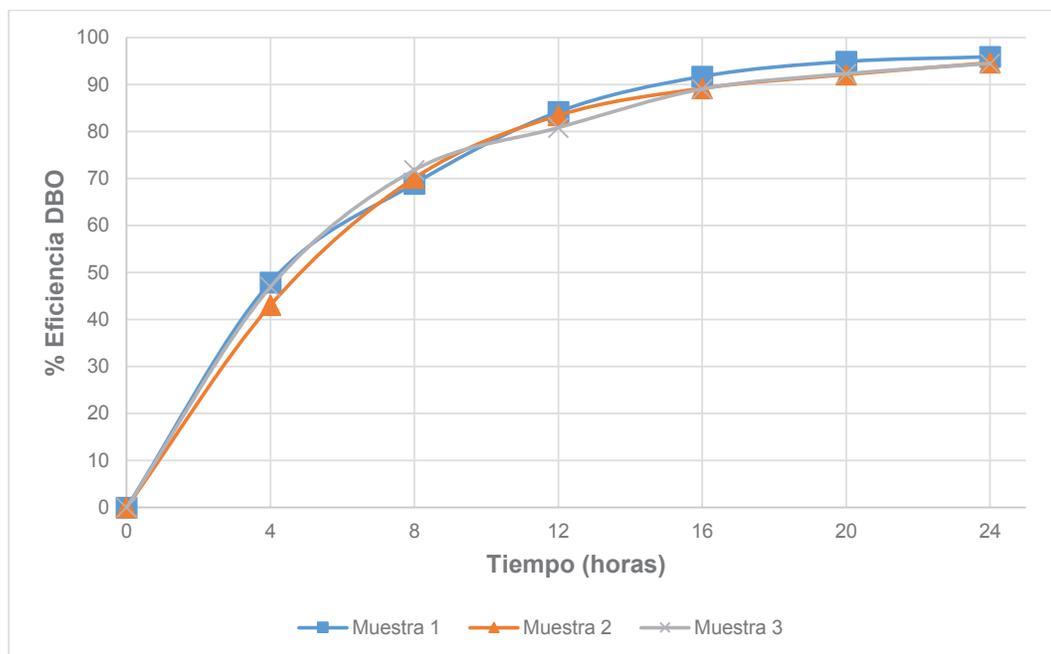


**Figura 3.14.** DBO<sub>5</sub> con respecto al tiempo para la bio torre con lecho estático de PET

Los valores iniciales de DBO<sub>5</sub> al ingresar a la Bio Torre fueron de 1 196, 1 231 y 1 142 mg/L. de cada muestra analizada, se aprecia que a partir de las 16 horas el efluente cumple con la normativa legal vigente con valores de DBO<sub>5</sub> de 99, 133 y 125 mg/L en cada día de trabajo, mientras que a las 24 horas de tratamiento se obtuvieron los siguientes valores de DBO<sub>5</sub> 49, 66 y 63 mg/L en el Anexo VI se puede observar los valores exactos durante cada hora de análisis de la disminución del DBO a través del tiempo.

Los valores obtenidos de DBO<sub>5</sub> demuestran que la bio torre con lecho estático de PET impregnado funciona correctamente y que hubo una buena impregnación de la bio película bacteriana.

Con los valores obtenidos de DBO<sub>5</sub> se determinó la eficiencia de la remoción de la carga contaminante DBO<sub>5</sub> los resultados se indican en la Figura 3.15.



**Figura 3.15.** Eficiencia de remoción de  $\text{DBO}_5$  con respecto al tiempo para la bio torre con lecho estático de PET

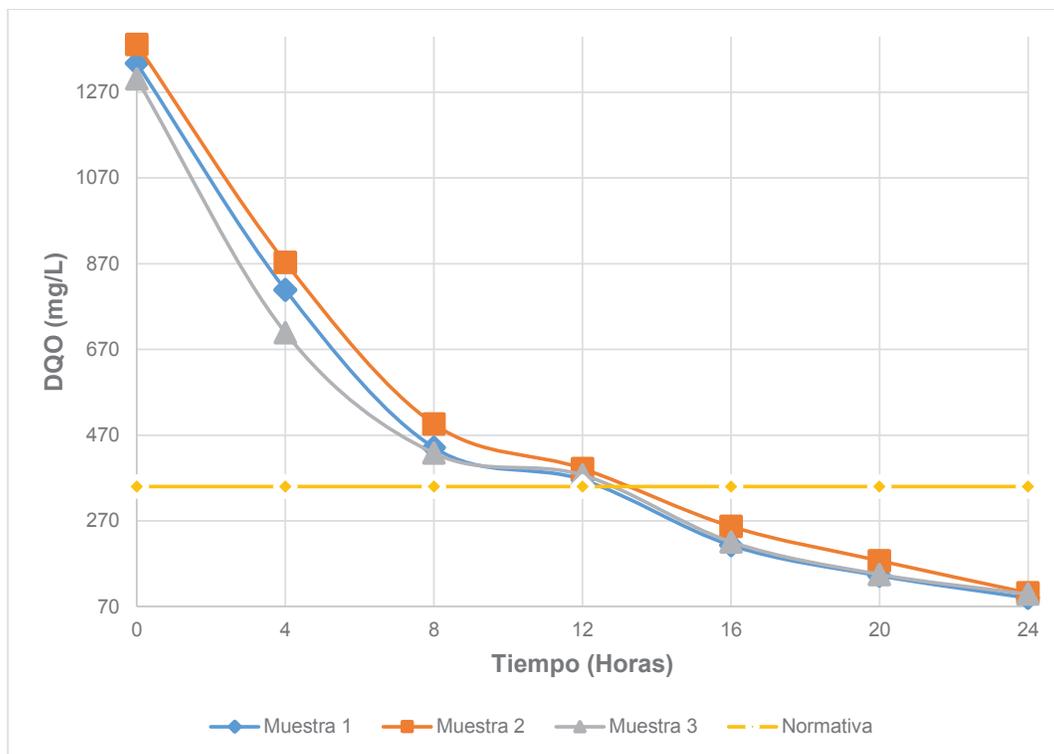
La tendencia en el aumento de la eficiencia de la remoción del  $\text{DBO}_5$  durante las tres repeticiones es similar, alcanzando en el día 1 un máximo 95,90 %, mientras que el día 2 presenta una remoción del 94,64 % y un 94,48 % en el tercer día de evaluación, siendo un porcentaje de remoción que está dentro de los parámetros establecidos para este tipo de biofiltro que según la Tabla 1.3 están entre 80 – 95 % (Wessmann, 2007, p. 154).

El tiempo ideal de retención del efluente de la fábrica de frituras en la bio torre para la remoción del  $\text{DBO}_5$  y el cumplimiento de la Ordenanza Metropolitana N° 404 fue a partir de las 16 horas de tratamiento. Los porcentajes de remoción alcanzados demuestran que el acondicionamiento de la muestra y las mediciones de pH y biodegradabilidad fueron correctas.

- **Demanda Química de Oxígeno (DQO)**

El DQO se determinó mediante el método APHA 5220 C y se realizó el análisis durante 24 horas con tres repeticiones en días distintos de una muestra de agua

cuyo caudal es 2,5 L/día en un intervalo de cada 4 horas, como se observa en la Figura 3.16.

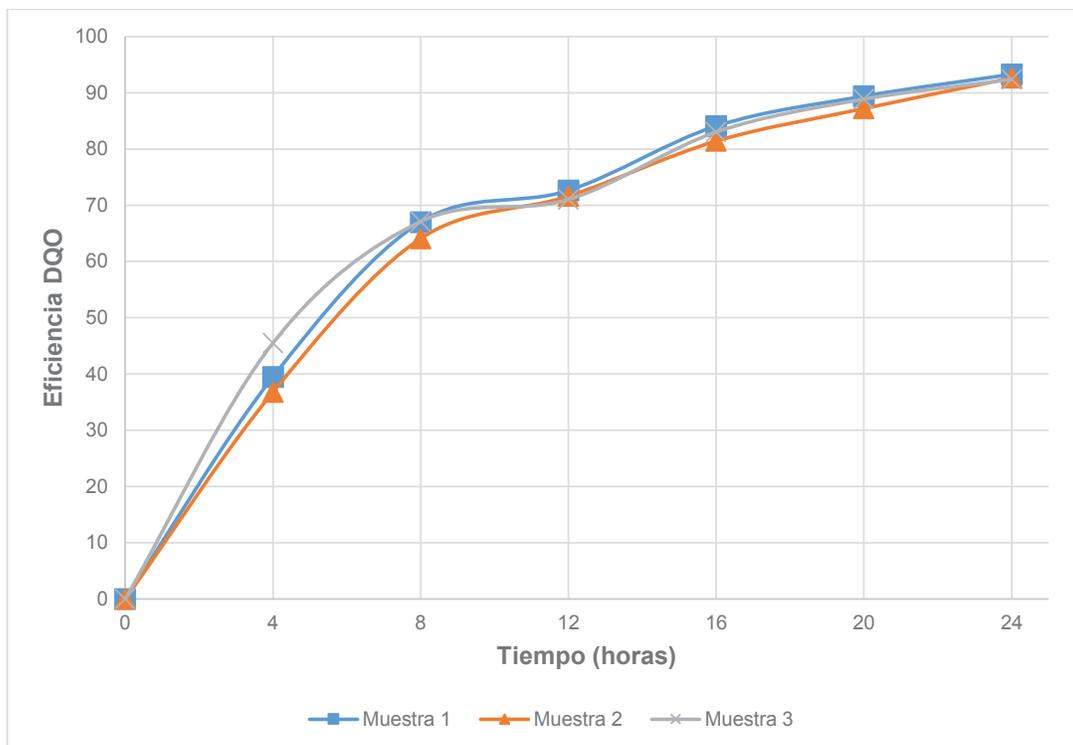


**Figura 3.16.** Evaluación de la remoción de DQO con respecto al tiempo para la bio torre con lecho estático de PET

Los valores iniciales del DQO al ingresar a la Bio Torre fueron de 1 337, 1 381 y 1 301 mg/L. de cada una de las muestras evaluadas, se aprecia que a partir de las 16 horas el efluente cumple con la normativa legal vigente con valores de DQO de 213, 257 y 221 mg/L en cada muestra analizada.

Se observa también que a las 12 horas de tratamiento convergen los puntos de las muestras 1, 2 y 3 con la línea de la “Normativa”, es decir es el momento en el cual las aguas residuales igualan o superan ligeramente el valor de la Resolución N°002-2014- SA que es 350 mg/L (Anexo VI), finalmente a las 24 horas de tratamiento se obtuvieron los siguientes valores de DQO 90, 102 y 99 mg/L para cada muestra respectivamente, para mayor detalle en el Anexo VI se puede observar la disminución del DQO con respecto al tiempo.

La eficiencia de la remoción de la carga contaminante DQO se puede apreciar en la Figura 3.17.



**Figura 3.17.** Eficiencia de remoción de DQO con respecto al tiempo para la bio torre con lecho estático de PET

La tendencia en el aumento de la eficiencia de la remoción del DQO durante las tres repeticiones es similar, alcanzando en la primera muestra un máximo 93,27 %, mientras que la muestra dos presenta un porcentaje de remoción del 92,61 % y un 92,39 % en el tercera muestra evaluada.

A las 12 horas de tratamiento la eficiencia en las tres muestras alcanzan un valor de remoción de: Muestra 1 (72,63 %), Muestra 2 (71,61 %) y Muestra 3 (71,02 %) que en la Figura 3.16. se observan como un punto de convergencia de la eficiencia de remoción del DQO de las tres repeticiones realizadas. El tiempo ideal de retención del efluente de la fábrica de frituras en la bio torre para la remoción del DQO y el cumplimiento de las normativas distritales vigentes está en el intervalo entre las 16 y 20 horas de tratamiento

En comparación con otros estudios realizados con bio torres con lecho de distinto material y con efluentes de distinta naturaleza, el bio filtro de aire sumergido estudiado en el presente proyecto mantiene la eficiencia con un promedio de 92,76 % que según Andreottola (2005, pp. 71-74) está dentro de los parámetros de este tipo de bio filtro de aire sumergido que es superior al 91 % cuando se usa un lecho de plástico para efluentes de minería, mientras que según Lapo (2014) para aguas domésticas del Río Machangara una bio torre con lecho de PET alcanza una remoción del 92 %.

Se obtuvo un rendimiento muy superior al comparar con bio filtros de aire sumergido cuyo lecho es vidrio y arcilla de efluentes de una planta de harina de pescado donde apenas se alcanza el 70 % de remoción de cargas orgánicas contaminantes (Vargas, 2001; Andrettola, 2005).

Por lo tanto se pudo establecer que la bio torre con lecho estático de PET impregnado con una bio película de sus propios efluentes es un sistema adecuado para la remoción de cargas orgánicas contaminantes.

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1. CONCLUSIONES

- Se determinó que las muestras obtenidas del efluente de la fábrica de frituras para el proceso de impregnación no cumplen con los parámetros físico-químicos de DBO<sub>5</sub> ( $1\,165 \pm 106,88$  mg/L), DQO ( $1\,319,67 \pm 40,07$  mg/L), Aceites y Grasas ( $79 \pm 2$  mg/L) y sólidos suspendidos totales ( $2\,592 \pm 44,54$  mg/L).
- En el acondicionamiento, el desarenador cumple con la normativa legal vigente de sólidos suspendidos totales desde los 75 [s] de remoción, para un caudal de 12 L/min con un valor promedio de  $95,42 \pm 3,15$  mg/L.
- El pH y el coeficiente de biodegradabilidad en la etapa de acondicionamiento previo al desarrollo fueron de  $7,93 \pm 0,047$  (ambiente tolerable para el crecimiento bacteriano) y  $0,880 \pm 0,06$  (agua muy biodegradable).
- El proceso de desarrollo de la biopelícula bacteriana duro 120 días para el Reactor A y 121 días para el Reactor B, debido al aumento de DQO en la evaluación quincenal siendo esta la primera señal de la etapa de decaimiento y muerte de las bacterias.
- La mayor remoción de DQO mientras se realizó la impregnación en el reactor A fue a los 106 días con un valor de 88 mg/L que representa una eficiencia del 93,55 %, mientras que la repetición en el reactor B fue a los 105 días con un valor de 82 mg/L que indica una eficiencia del 93,72 %.
- El incremento de melaza en el reactor A fue de un 21,78 % desde el día 15 hasta el día 121, mientras que en el reactor B que es una repetición fue de un 18,02 % durante el mismo periodo de tiempo, para mantener la carga contaminante quincenal estable en 1 300 mg/L.

- El factor de correlación para la reacción de estabilización de la biopelícula obtenido fue: 0,9438 para el reactor A y 0,9615 para el reactor B determinándose como una reacción auto catalítica de primer orden.
- El conteo de bacterias realizado a los medios de soporte extraídos de los reactores estableció que estaba compuesto en su mayoría por bacterias aerobias mezofilas cuyo valor fue 2 000 ufc/mL de agua o  $5,6818 \times 10^6$  ufc/m<sup>2</sup> de soporte.
- En la evaluación de la bio torre durante 24 horas se obtuvo cumplimiento de la normativa distrital vigente de los parámetros físico-químicos DBO<sub>5</sub>, DQO, SST y Aceites y Grasas.
- La bio torre removió el DBO<sub>5</sub> para el cumplimiento de la norma en 16 horas pasando de 1 196, 1 231 y 1 142 mg/L hasta 99, 133 y 125 mg/L respectivamente.
- Se removió el DQO para el cumplimiento de la normativa en un tiempo de 16 horas este parámetro se redujo desde 1 337, 1 381 y 1 301 mg/L hasta 213, 257 y 221 mg/L.
- El tiempo ideal de funcionamiento de la bio torre de aire sumergido para el cumplimiento de las normas legales distritales debe ser superior a 16 horas, se recomienda un tiempo de 24 horas ya que se hizo un análisis para un caudal diario de 20 m<sup>3</sup>/día.

## 4.2. RECOMENDACIONES

- Evaluar el proceso del desarrollo de la biopelícula en un periodo mayor al evaluado en el presente proyecto para identificar el comportamiento de los microorganismos cuando ha iniciado la etapa de decaimiento y muerte.
- Realizar un estudio de la influencia del caudal de aire que ingresa al reactor en el crecimiento de la biopelícula.
- Diseñar la planta de tratamiento de aguas residuales para la empresa de frituras, con relación al caudal obtenido en el presente trabajo.
- Verificar el funcionamiento de este sistema con efluentes de otros tipos de industria alimenticia y con mayor variedad de cargas orgánicas contaminantes.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Aguilar, M.I., Saez, J., Lloréns, M., Soler, A., Ortuño, J.F., (2002). *Tratamiento Físico-Químico de aguas residuales: coagulación floculación*, Murcia España: Editorial Universidad de Murcia, servicio de publicaciones.
2. AIMPLAS. (2008). Situación actual y perspectivas del uso del PET reciclado para envases en contacto con alimentos, Versión 4.
3. Andreottola, G., Foladori, P., (2005). Treatment of winery wastewater in a full-scale fixed bed biofilm reactor. *Wate Science & Technology*.
4. Baecheler, J., Zambrano, E. & Urrutia, H. (2001). Estudio de la cinética del crecimiento de bio películas bacterianas aplicadas en el tratamiento de riles. XIV Congreso de ingeniería sanitaria y ambiental, Santiago de Chile.
5. Barrenechea, A. (2004). Aspectos Físico Químicos de la Calidad del Agua. Lima, Perú: CEPIS OPS.
6. Carrillo, D. (2009). La industria de bebidas y alimentos en el Ecuador. *Revista del Instituto Nacional de Estadísticas y Censos INEN*.
7. Cheremisinoff, N., *Handbook of water and wastewater treatment technologies*. Woburn: Butterworth – Heinemann.
8. Círculo de Innovación en Tecnologías Medioambientales y Energía de la Universidad de Alcalá (2006). *Tratamientos Avanzados de Aguas Residuales Industriales*. Madrid, España.
9. Clesceri, L., Greenberg A., Trussell R., (2014). *Métodos Normalizados Para el análisis de aguas potables y residuales*. Madrid, España. Ediciones Diaz Santos S.A.

10. Cohen, Y. (2001). Biofiltration-the treatment of fluids by microorganism inmovilized into the filter bedding material. *Bioresource Technology*, Suecia.
11. Comisión Europea (2001). Procesos extensivos de depuración de las aguas residuales adaptadas a las pequeñas y medias colectividades. Luxemburgo, Luxemburgo: Oficina de publicaciones oficiales de las comunidades europeas.
12. Cortez, S; Teixeira, P & Mota, M. (2008). *Rotating biological contactors: A review on main factors affecting performance*, Environmental science and Bio/Technology, Braga, Portugal.
13. Crites, R. & Tchobanoglous, G. (2000). *Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones. (3ra Edición)*, Medellín, Colombia, Editorial: McGraw-Hill.
14. De Vargas, L. (2004). Procesos Unitarios y Plantas de Tratamiento. Lima, Perú: CEPIS OPS.
15. Dos Santos. (2007). Estudio del comportamiento cinético de microorganismos de interés en seguridad alimentaria con modelos matemáticos. *(Proyecto previo a la obtención del título de Doctor en veterinaria)*. Universidad autónoma de Barcelona, Catalunya, España.
16. Fogler, S & Dumen, N. (2001). *Elementos de las reacciones de Ingeniería Química. (3ra Edición)*. México D.F., México: Editorial: Pearson Educación de México S.A. de C.V.
17. Gómez, D. (2000). Diseño de sistemas de biopelícula para tratamiento de aguas residuales. México D.F., México.

18. Ibrahim, H. Qiang, He. Wisam, S., Al-Rekabi & Qiqi. (2012). Improvements in Biofilm Processes for Wastewater Treatment. Mannheim, *Pakistan Journal of Nutrition*, Basra, Iraq.
19. Instituto Ecuatoriano de Normalización (1995). NTE INEN: Granos y cereales. Maíz molido, sémola, harina, griz. Requisitos. Quito, Ecuador.
20. Lapo, B. (2014). Estudios de Medios de Soporte para crecimiento bacteriano aplicado al tratamiento biológico aerobio de aguas residuales. (*Proyecto previo a la obtención del Título de Master en Ingeniería Ambiental*) EPN, Quito, Ecuador.
21. Marin Ocampo, A. & Osés Pérez M. (2013). *Operación y mantenimiento de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales con el proceso de Lodos Activados: Tomo I*. Jalisco, Mexico, Editorial: CEA Jalisco.
22. Moncayo, I. (2010). Estudio de Tratabilidad biológica de aguas residuales domesticas para optimizar resultados a escala real. Quito, Ecuador.
23. Municipio de Quito (2013). *Ordenanza metropolitana N°404*. Recuperado de: <http://www.quitoambiente.gob.ec>
24. Municipio de Quito (2015). *Normas Técnicas para el control de descargas liquidas. Resolución N°002-SA-2014*. Recuperado de: [http://www.quitoambiente.gob.ec/images/M\\_images/documentos/res\\_ol\\_002\\_2014.PDF](http://www.quitoambiente.gob.ec/images/M_images/documentos/res_ol_002_2014.PDF)
25. Muñoz, J. (2007). Reducción del contenido de acrilamida en hojuelas de papas fritas por aplicación de pretratamientos y diferentes temperaturas. Trabajo previo a la obtención del título de master en Ciencias Agropecuarias, Universidad de Chile, Santiago, Chile.

26. Olivas, E. Castell, D. Peralta, J. & Garcia M. (2014). Estudio del comportamiento de las bacterias heterótrofas del proceso biológico de una EDAR industrial mediante ensayos respiro métricos, tras una parada técnica. Sociedad de fomento Agrícola Castellonense S.A., España.
27. Ortiz, D. (2011). Manual de tratamientos biológicos de aguas residuales para poblaciones medianas en la región sur del Ecuador. (*Proyecto previo a la obtención del título de Ingeniero Civil*). Universidad Técnica Particular de Loja, Loja, Ecuador.
28. Pascual, A. (2009). Gestión y Mantenimiento de Depuradoras en Industrias Agroalimentarias. AINIA.
29. Ramalho, R. (2003). *Tratamiento de Aguas Residuales*. (2da. Ed). Barcelona, España: Editorial Reverté Quebec Canada.
30. Restrepo, M. (2006). Producción más Limpia en la Industria Alimentaria. Universidad Nacional de Colombia.
31. Romero, J. (2001). *Tratamiento de Aguas Residuales: Teoría y Principios de Diseño*. (1er Ed.). Bogotá, Colombia: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.
32. Sainz, J. (2005). *Tecnologías para la sostenibilidad: Procesos y Operaciones unitarias en depuración de aguas residuales*. (1era Ed). Madrid, España: Fundación EOL.
33. Salinas, N. (2011). Caracterización de snacks extruidos de ocumo-maíz enriquecidos con aceite de palma parcialmente refinado como ingrediente funcional. Revista: Ann Venez Nutr. Carabobo, Venezuela
34. Solomon, E. Berg, L. & Martin, D. (2001). *Biología*. (5ta Ed.) México D.F., México: Editorial: McGraw-Hill.

35. Soza, L. M. (2003). Estudio de la evaluación de una ETAP para la adecuación legislativa. Madrid, España.
36. Spellman, F. (2011). *Spellman's Standard Handbook for Wastewater Operators*, (2da Ed.). Boca Raton, USA: Editorial: Taylor and Francis Group
37. Spellman, F. (2014). *Water and Wastewater Treatment Plant Operations*. (3era Ed.) Boca Raton, USA: Editorial: Taylor and Francis Group Madrid.
38. Tejero, J.L., Garcia, E., Floro, D., Diez, R., Lobo, A. & Rodriguez, L. (2012). Tecnologías de Biopelícula innovadoras para la depuración de aguas residuales. *Grupo de Ingeniería Ambiental de la Universidad de Cantabria*. Cantabria, España.
39. Vintimilla, O. & Tacuri, J. (2012). Control microbiológico y físico-químico del agua potable del sistema de abastecimiento del cantón Santa Isabel. (*Tesis precia a la obtención del título de Bioquímico Farmacéutico*). Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador.
40. Weber, JR. & Walter, J. (2003). *Control de la calidad del agua Procesos físico-químicos*. (Edición, Febrero 2003). Barcelona, España: Editorial: Reverté.
41. Welter, A. Romero, J.M. Grumelli y. Sanchez, J.A. & Ascar, G. (2004). La biopelícula en los procesos RBC. Universidad Católica de Córdoba, Córdoba, España.

## **ANEXOS**

## ANEXO I

### CÁLCULOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL DESARENADOR

Las dimensiones del desarenador fueron calculadas de acuerdo a los datos de la Tabla 1.2, para el tiempo máximo de retención de sólidos y el caudal encontrado en el numeral 3.1.1.1. (Sainz, 2005, pp. 105-109).

- Cálculo de la superficie transversal del canal de entrada del agua con la Ecuación [2.1] (Sainz, 2005, p. 108).

$$S_t = \frac{Q}{V}$$

$$S_t = \frac{20 \frac{m^3}{día} \times \frac{1 \text{ día}}{24 \text{ h}} \times \frac{1 \text{ h}}{60 \text{ min}} \times \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}}}{0,3 \frac{m}{s}}$$

$$S_t = 6,67 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

- Cálculo del ancho del canal de la entrada de agua con la Ecuación [2.2] (Sainz, 2005, p. 108).

$$S_t = w' \times h'$$

$$h' = 2w'$$

$$S_t = 2w'^2$$

$$6,67 \times 10^{-4} \text{ m}^2 = 2w'^2$$

$$w' = \sqrt{\frac{6,67 \times 10^{-4}}{2}} \text{ m}$$

$$w' = 0,0183 \text{ m} \times \frac{100 \text{ cm}}{1 \text{ m}} = 1,83 \text{ cm}$$

$$w' = 1,83 \text{ cm} \times 1,5 \text{ (factor de correccion)}$$

$$w' = 2,7 \text{ cm.}$$

$$h' = 2 \times w' = 5,4 \text{ cm.}$$

- Se calculó la longitud del desarenador a partir de la entrada del agua con la Ecuación [2.3] (Sainz, 2005, p. 109).

$$L = \left( \frac{h'}{v} \right) \times V$$

$$L = \left( \frac{0,054 \text{ m}}{0,018 \frac{\text{m}}{\text{s}}} \right) \times 0,30 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$L = 0,90 \text{ m} \times \frac{100 \text{ cm}}{1 \text{ m}} = 90 \text{ cm}$$

- Cálculo del volumen máximo que soporta el desarenador para un tiempo de retención de 90s, con la Ecuación [2.4] (Sainz, 2005, p. 109).

$$Vmáx = Q \times tmáx$$

$$Vmáx = 0,0002 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \times 90 \text{ s}$$

$$Vmáx = 0,018 \text{ m}^3$$

- Se realiza el cálculo del ancho y la altura del desarenador, con una relación  $W = 2H$  con la Ecuación [2.5] (Sainz, 2005, p. 109).

$$Vmáx = L \times H \times W$$

$$0,018 \text{ m}^3 = 0,90 \text{ m} \times H \times W$$

$$0,018 \text{ m}^3 = 0,90 \text{ m} \times 2H^2$$

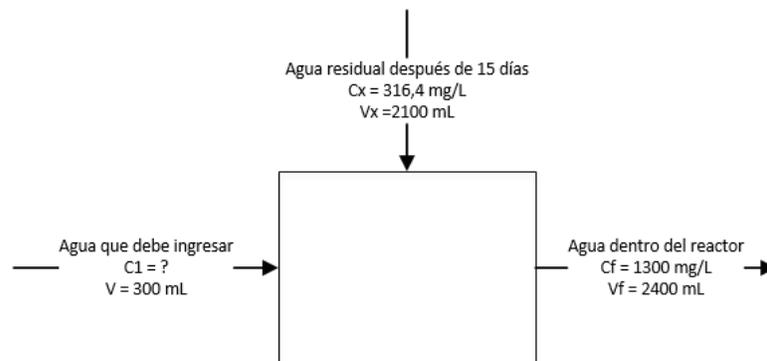
$$H = \sqrt{\frac{0,018 \text{ m}^3}{0,90 \text{ m} \times 2}} = 0,1 \text{ m} \times \frac{100 \text{ cm}}{1 \text{ m}} = 10 \text{ cm}$$

$$W = 2H = 2 \times 10 \text{ cm} = 20 \text{ cm}$$

## ANEXO II

### BALANCE DE MASA PARA EL ENRIQUECIMIENTO DE LA MUESTRA CON AGUA RESIDUAL FRESCA Y MELAZA

Se realizó el balance de masa para determinar la cantidad de melaza que debe ser adherida al efluente que ingresa al bio reactor cada quince días, a continuación se presenta un ejemplo de cálculo:



A partir del análisis realizado en el balance de masa se obtiene la Ecuación [II.1], que permite encontrar la concentración del agua fresca que debe ingresar al reactor:

*Entra = Sale*

$$(C1 \times V) + (Cx \times Vx) = (Cf \times Vf) \quad [II.1]$$

Donde:

C1 = Concentración del agua que debe ingresar (mg/L)

V = Volumen del agua que va a ingresar (mL)

Cx = Concentración del agua después de 15 días de tratamiento (mg/L)

Vx = Volumen del agua restante en la bio torre (mL)

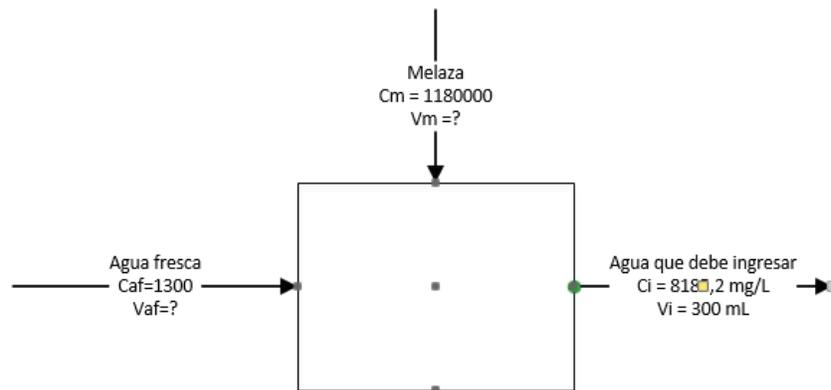
Cf = Concentración final requerida (mg/L)

Vf = Volumen final dentro de la bio torre (mL)

$$(C1 \times 300) + (316,4 \times 2100) = (1300 \times 2400)$$

$$C1 = \frac{(1300 \times 2400) - (316,4 \times 2100)}{300}$$

$$C1 = 8185,2 \frac{mg \text{ DQO}}{L}$$



A partir del análisis realizado en el balance de masa se obtiene la Ecuación [II.2], que permite encontrar el volumen de la mezcla de melaza y agua que debe ingresar al reactor:

*Entra = Sale*

$$(C_m \times V_m) + (C_{af} \times V_{af}) = (C_i \times V_i) \quad [II.2]$$

Donde:

$C_m$  = Concentración del DQO de la melaza (mg/L)

$V_m$  = Volumen de melaza que ingresa (mL)

$C_{af}$  = Concentración del agua fresca (mg/L)

$V_{af}$  = Volumen del agua fresca (mL)

$C_i$  = Concentración que ingresa a la bio torre (mg/L)

$V_i$  = Volumen que ingresa a la bio torre (mL)

$$(1180000 \times Vm) + (1300 \times Vaf) = (8185,2 \times 300)$$

$$\left. \begin{array}{l} 1180000Vm + 1300Vaf = 2455560 \\ Vm + Vaf = 300 \end{array} \right\}$$

$$Vaf = 298,25 \text{ mL.}$$

$$Vm = 1,75 \text{ mL melaza.}$$

$$Wm = 1,75 \text{ mL de melaza} \times \frac{1,303 \text{ g melaza}}{1 \text{ mL de melaza}} = 2,2834 \text{ g melaza}$$

## ANEXO III

## CÁLCULO DEL CONTEO DE BACTERIAS CON RESPECTO AL ÁREA DE LECHO ESTÁTICO DE PET



**LABOLAB**  
ANÁLISIS DE ALIMENTOS, AGUAS Y AFINES  
INFORME DE RESULTADOS

Orden de trabajo # 161827  
Hoja 1 de 1

<b>NOMBRE:</b>	Diego Granda
<b>DIRECCIÓN:</b>	Quitumbe
<b>MUESTRA:</b>	Agua destilada
<b>CARACTERÍSTICA DE LA MUESTRA:</b>	Líquido con sedimento
<b>ANÁLISIS:</b>	Microbiológico
<b>FECHA DE RECEPCIÓN:</b>	29 de abril del 2016
<b>FECHA DE TOMA DE MUESTRA:</b>	29 de abril del 2016
<b>LOCALIZACIÓN:</b>	---
<b>ENVASE:</b>	Botella de vidrio
<b>REFERENCIA:</b>	161827
<b>FECHA DE REALIZACIÓN DE ENSAYO:</b>	29 de abril - 2 de mayo del 2016
<b>MUESTREO POR:</b>	El Cliente
<b>CONDICIONES AMBIENTALES:</b>	24°C 53%HR

**ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO:**

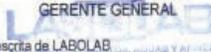
PARÁMETRO	METODO	RESULTADO
Recuento de Aerobios mesófilos (ufc/ml)*	PEEMi/LA/21 APHA 9215 B	2.0 x 10 <sup>3</sup>
Recuento de Coliformes totales (ufc/100 ml)	PEEMi/LA/19 APHA 9222 A, B	1.4 x 10 <sup>2</sup>
Recuento de Mohos (upm/ml)*	PEEMi/LA/22 APHA 9610 B	3.7 x 10
Recuento Levaduras (upl/ml)*	PEEMi/LA/22 APHA 9610 E	5.0 x 10

\*Laboratorio de ensayo acreditado por el SAE con acreditación N° OAE LE 1C 06-001\*  
\*Los ensayos marcados con (\*) NO están incluidos en el alcance de la acreditación del SAE\*

Nota: En la muestra se obtuvieron recuentos de todos los parámetros

  
 Dra. Cecilia Luzuriaga  
 GERENTE GENERAL

El presente informe solo es válido para la muestra analizada.  
Este informe no debe reproducirse más que en su totalidad previa autorización escrita de LABOLAB.



**INFORME TÉCNICO, FICHA DE ESTABILIDAD, INFORMACIÓN NUTRICIONAL PARA REGISTRO SANITARIO**  
 Análisis físico, químico, microbiológico, entomológico de: alimentos, aguas, bebidas, materias primas, balanceados, cosméticos, pesticidas, suelos, metales pesados y otros  
 Av. Pérez Guerrero De 21-11 y Versailles - Of. 12 B - 2do. Piso - Telefax.: 2563-225 / 2235-404 / 3214-333 / 3214-353 Cel.: 0999590-412  
 e-mails: secretaria@labolab.com.ec / servicioalcliente@labolab.com.ec / cecilia.luzuriaga@labolab.com.ec / informes@labolab.com.ec  
 www.labolab.com.ec      Quito - Ecuador

Figura A III. 1. Informe de resultados del conteo de bacterias por mL de agua

Se calculó el área superficial que representa a cada pedazo del lecho de PET rectangular de 1 x 8 cm. mediante la Ecuación [III.1]:

$$As = 2 (a \times b) \quad \text{[III.1]}$$

$$As = 2 (0,01 \times 0,08) = 0,0016 \text{ m}^2$$

A continuación se determinó el área superficial para la muestra de pedazos de PET tomados como muestra, que fueron contados y se encontró que la muestra contaba con 220 pedazos de PET:

$$As_{220} = 220 (As) = 0,352 \text{ m}^2$$

Para 1 litro de agua con los que se lavaron 220 pedazos de lecho de PET que representan un área superficial de 0,352 m<sup>2</sup> se realizó el cálculo del recuento de cada tipo de bacteria analizada según la siguiente transformación:

- **Recuento de unidades formadoras de colonias (ufc) de aerobias mezofilas**

$$2000 \frac{ufc}{mL} \times \frac{1000 \text{ mL}}{0,352 \text{ m}^2} = 5,6818 \times 10^6$$

- **Recuento de unidades formadoras de colonias (ufc) de Coliformes Totales**

$$\frac{140 \text{ ufc}}{100 \text{ mL}} \times \frac{1000 \text{ mL}}{0,352 \text{ m}^2} = 3,9773 \times 10^3$$

- **Recuento de unidades precursoras de mohos (upm) de hongos/mohos**

$$37 \frac{upm}{mL} \times \frac{1000 \text{ mL}}{0,352 \text{ m}^2} = 1,0511 \times 10^5$$

- **Recuento de unidades precursoras de levaduras (upm)**

$$50 \frac{upm}{mL} \times \frac{1000 mL}{0,352 m^2} = 1,4205 \times 10^5$$

## ANEXO IV

### PRUEBAS DE REMOCIÓN DE SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES EN EL DESARENADOR

A continuación se presenta los resultados detallados de las pruebas de remoción de los sólidos suspendidos totales en el desarenador previo a la impregnación de la bio película bacteriana y que fueron realizados durante los tres días de pruebas:

**Tabla A IV. 1.** Resultados de la medición de sólidos suspendidos totales durante 90 segundos en el desarenador

Tiempo de retención (s)	SST (mg/L)			Promedio (mg/L)	Desviación Estándar (mg/L)
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3		
45	258,99	242,22	264,44	255,19	±11,56
60	161,18	152,94	176,47	163,53	±11,94
75	92,50	88,75	96,25	92,50	±3,75
90	71,11	68,89	74,44	71,48	±2,80

## ANEXO V

### PRUEBAS DE REMOCIÓN DE LA DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO EN EL BIO REACTOR DE AIRE SUMERGIDO

A continuación se presenta los resultados de las pruebas de remoción de la demanda química de oxígeno y el aumento en la eficiencia de la remoción durante los cinco meses de impregnación en cada reactor:

**Tabla A V. 1.** Determinación de la eficiencia en la remoción de DQO en el Reactor A en función del tiempo

<b>Tiempo (días)</b>	<b>DQO (mg/L)</b>	<b>Eficiencia de remoción (%)</b>
1	1365	0,00
15	316	76,82
35	213	84,40
44	174	87,25
59	132	90,33
73	106	92,23
91	95	93,04
106	88	93,55
121	92	93,26

**Tabla A V. 2.** Determinación de la eficiencia en la remoción de DQO en el Reactor B en función del tiempo

<b>Tiempo (días)</b>	<b>DQO (mg/L)</b>	<b>Eficiencia de remoción (%)</b>
1	1305	0,00
16	268	79,46
29	193	85,21
41	166	87,28
57	127	90,27
75	99	92,41
91	86	93,41
105	82	93,72
120	90	93,10

## ANEXO VI

### EVALUACIÓN DE SST, DQO y DBO<sub>5</sub> DURANTE LAS 24 HORAS DE FUNCIONAMIENTO DE LA BIO TORRE

A continuación se presentan los resultados para la evaluación de los sólidos suspendidos totales durante 24 horas de funcionamiento de la Bio torre de aire sumergido:

**Tabla A VI. 1.** Sólidos suspendidos totales para un caudal de 2,5 L/día durante 24 horas de tratamiento

Tiempo (horas)	SST (mg/L)			Límite Máximo Permisible (mg/L)
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	
0	72	71	70	100
4	72	71	70	
8	72	71	71	
12	72	72	71	
16	73	73	71	
20	73	74	71	
24	74	75	72	

A continuación se presentan los resultados para la evaluación de la demanda bioquímica de oxígeno durante 24 horas de funcionamiento de la Bio Torre de Aire Sumergido:

**Tabla A VI. 2.** Determinación de DBO<sub>5</sub> para un caudal de 2,5 L/día durante 24 horas de tratamiento

Tiempo (horas)	DBO <sub>5</sub> (mg/L)			Límite Máximo Permisible (mg/L)
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	
0	1 196	1 231	1 142	170
4	623	701	606	
8	372	368	322	
12	189	204	219	
16	99	133	125	
20	61	97	88	
24	49	66	63	

A continuación se presentan los resultados para la evaluación de la demanda bioquímica de oxígeno durante 24 horas de funcionamiento de la Bio Torre de Aire Sumergido:

**Tabla A VI. 3.** Determinación de DQO para un caudal de 2,5 L/día durante 24 horas de tratamiento

Tiempo (horas)	DBO <sub>5</sub> (mg/L)			Límite Máximo Permisible (mg/L)
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	
0	1 337	1 381	1 301	350
4	809	873	709	
8	441	496	428	
12	366	392	377	
16	213	257	221	
20	142	177	145	
24	90	102	99	