



**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA**

*Comunidad Educativa al servicio del Pueblo*

**UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA, INDUSTRIA  
Y CONSTRUCCIÓN**

**CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**Optimización de un reactor biológico para la depuración de aguas  
residuales urbanas con fangos activados en plantas de tratamiento  
emplazadas en zonas de altura**

**TRABAJO DE INVESTIGACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL  
TÍTULO DE INGENIERO AMBIENTAL**

**AUTOR: HENRRY MARCELO CHUÑIR GARCÍA**

**DIRECTOR: CARLOS MARCELO MATOVELLE BUSTOS, MSc**

**MATRIZ CUENCA**

**2017**

## **DECLARACIÓN**

Yo, Henry Marcelo Chuñir García, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito 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; y eximo expresamente a la Universidad Católica de Cuenca y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

La Universidad Católica de Cuenca puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y la normatividad institucional vigente.

---

**Henry Marcelo Chuñir García**

## **CERTIFICACIÓN**

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Henry Marcelo Chuñir García, bajo mi supervisión.

---

**Ing. Carlos Marcelo Matovelle Bustos, MsC.**

**DIRECTOR**

## **AGRADECIMIENTOS**

Doy un especial agradecimiento al Ingeniero Carlos Marcelo Matovelle Bustos por su apoyo, dedicación, paciencia, orientación y confianza que me ha brindado durante el desarrollo de este trabajo.

Finalmente, expreso un profundo agradecimiento sincero a todos/as quienes hicieron posible que este trabajo llegue a feliz término.

## DEDICATORIA

En primer lugar y ante todo le agradezco a Dios por acompañarme día tras día y darme fuerzas en los momentos más difíciles que he pasado en mi vida.

De antemano le agradezco de todo corazón a mi familia, en especial a mi querida madre Beatriz y a mi hermana Ana, por que inspiraron en todo momento mi desarrollo académico. Les agradezco por la paciencia, confianza y motivación para ser mejor cada día y no rendirme ante nada.

A todos mis profesores de quienes tuve la oportunidad de aprender de sus conocimientos, que me ayudaron día tras día de forma desinteresada a lo largo de estos cinco años académicos.

Del mismo modo agradecer a mis amigos, compañeros y todas las personas que siempre estuvieron cerca de mí dándome consejos y fuerzas para seguir adelante.

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

DECLARACIÓN.....	ii
CERTIFICACIÓN.....	iii
AGRADECIMIENTOS.....	iv
DEDICATORIA .....	v
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	vi
LISTA DE TABLAS .....	x
LISTA DE ANEXOS.....	xii
RESUMEN.....	xiii
ABSTRACT .....	xiv
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Objetivos .....	1
Objetivo general.....	1
Objetivos específicos.....	1
1.2. Alcance.....	1
1.3. Metodología.....	1
1.4. Justificación .....	2
2. MARCO TEÓRICO .....	4
2.1. Generalidades del agua.....	4
2.2. El agua en la tierra.....	4
2.2.1. Distribución del agua en la naturaleza.....	4
2.3. Importancia del agua y la vida .....	5
2.4. Ciclo hidrológico .....	5
2.5. Calidad del agua.....	7
2.6. Contaminación ambiental .....	8
2.6.1. Generalidades.....	8

2.7.	Aguas residuales urbanas .....	9
2.7.1.	Generalidades.....	9
2.8.	Características de las aguas residuales urbanas.....	9
2.8.1.	Características físicas.....	9
2.8.2.	Características químicas.....	10
2.9.	Norma ecuatoriana de calidad de agua .....	10
2.10.	Principales parámetros considerados en la depuración del agua residual.....	11
2.10.1.	Demanda Biológica de Oxígeno (DBO).....	11
2.10.2.	Demanda Química de Oxígeno (DQO).....	12
2.10.3.	Sólidos Suspendidos.....	12
2.10.4.	Temperatura, OD y pH.....	12
2.11.	Tratamientos biológicos con fangos activados .....	13
2.11.1.	Generalidades.....	13
2.11.2.	Componentes del agua residual.....	14
2.11.3.	Eliminación de Materia Orgánica (MO) por bacterias heterótrofas. ....	15
2.11.4.	Rendimiento de producción de biomasa ( $Y_H$ ). ....	16
2.11.5.	Antecedentes en el comportamiento del rendimiento $Y_H$ .....	17
2.12.	Fórmulas para la obtención de $Y_H$ (crecimiento bacteriano).....	18
2.12.1.	Condiciones consideradas de los fangos activados para una mezcla completa en el tratamiento biológico.....	22
2.12.2.	Índice Volumétrico de Fangos (IVF). ....	24
2.12.3.	Carga másica ( $C_m$ ). ....	25
2.13.	Sistema de depuración de agua residual.....	26
3.	DESARROLLO .....	28
3.1.	Diseño del prototipo y adecuación del reactor biológico .....	28
3.1.1.	Diseño y adecuación de la planta piloto.....	28
3.2.	Caracterización física – químico .....	29
3.2.1.	Método para determinar la DBO. ....	30
3.2.2.	Método para determinar la DQO.....	30

3.2.3.	Método para determinar sólidos suspendidos.....	30
3.2.4.	Método para determinar la temperatura, OD y pH. ....	31
3.3.	Descripción del sistema experimental.....	31
3.4.	Tipos de investigación .....	31
3.5.	Cinética de degradación de la materia orgánica del reactor biológico con fangos activados en zonas de altura.....	32
3.6.	Experimentación de parámetros para la simulación del tratamiento biológico extrapolables en zonas de altura.....	32
3.7.	Simulación de la planta piloto. ....	32
3.8.	Simulaciones del tratamiento biológico con fangos activados de aguas residuales urbana emplazadas en zonas de altura.....	33
3.8.1.	Simulación con los datos obtenidos en la experimentación. ....	33
3.8.2.	Simulación para la optimización del reactor biológico. ....	33
3.8.3.	Simulación para la optimización del reactor biológico con una población aproximada dentro de 10 años. ....	34
3.8.4.	Simulación para la optimización del reactor biológico con una reducción del caudal de ingreso a la EDAR.....	34
4.	ANÁLISIS Y RESULTADOS .....	35
4.1.	Caracterización del afluente de la experimentación .....	35
4.2.	Caracterización del efluente de la experimentación .....	35
4.3.	Cinética de degradación de la materia orgánica en el experimento del reactor biológico con fangos activados en zonas de altura.....	36
4.4.	Simulaciones del tratamiento biológico con fangos activados de aguas residuales urbanas emplazadas en zonas de altura .....	41
4.4.1.	Simulación con los datos obtenidos en la experimentación. ....	41
4.4.2.	Simulación para la optimización del reactor biológico. ....	42
4.4.3.	Simulación para la optimización del reactor biológico con una población aproximada dentro de 10 años. ....	45
4.4.4.	Simulación para la optimización del reactor biológico con una reducción del caudal de ingreso a la EDAR).....	46
4.5.	Discusión y resultados.....	48

CONCLUSIONES .....	50
RECOMENDACIONES .....	51
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS .....	52

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Distribución del agua en la tierra.....	5
Tabla 2: Límites de descarga a un cuerpo de agua dulce .....	11
Tabla 3: Principales procesos biológicos empleados en el tratamiento de aguas residuales	13
Tabla 4: Valores de $Y_H$ utilizados para aguas residuales urbanas.....	17
Tabla 5: Sedimentabilidad del fango de acuerdo al IVF .....	25
Tabla 6: Intervalos de $C_m$ para una buena sedimentabilidad de aguas residuales urbanas.	25
Tabla 7: Medidas del reactor biológico.....	28
Tabla 8: Métodos y equipos empleados en la caracterización .....	30
Tabla 9: Caracterización del afluente del tratamiento biológico.....	35
Tabla 10: Calidad de agua residual a la salida del decantador secundario .....	36
Tabla 11: Resultados obtenidos de la repetición 1 .....	36
Tabla 12: Resultados obtenidos de la repetición 2.....	37
Tabla 13: Resultados obtenidos de la repetición 3.....	38
Tabla 14: Rangos k de las repeticiones .....	39
Tabla 15: Validación de la repetición 1 .....	39
Tabla 16: Validación de la repetición 2 .....	39
Tabla 17: Validación de la repetición 3 .....	40
Tabla 18: Datos normalizados de la repetición 1.....	40
Tabla 19: Datos normalizados de la repetición 2.....	40
Tabla 20: Datos normalizados de la repetición 3.....	40
Tabla 21: Diferencias entre datos del experimento con los datos simulados.....	41
Tabla 22: Datos obtenidos en la experimentación.....	42
Tabla 23: Características del reactor biológico.....	42
Tabla 24: Datos para la simulación del reactor biológico .....	43
Tabla 25: Características del reactor biológico.....	43
Tabla 26: Dimesiones para el decantador secundario.....	43
Tabla 27: Aireación para el tratamiento biológico.....	44
Tabla 28: Criterios EPA para la determinación de calado .....	44
Tabla 29: Datos para la simulación del reactor biológico (80000 hab) .....	45
Tabla 30: Características del reactor biológico.....	45
Tabla 31: Dimensiones para el decantador secundario.....	46
Tabla 32: Aireación para el tratamiento biológico.....	46
Tabla 33: Datos para la simulación del reactor biológico (Q: 100 l/h.d.) .....	47
Tabla 34: Características del reactor biológico.....	47
Tabla 35: Dimensiones para el decantador secundario.....	47
Tabla 36: Aireación para el tratamiento biológico.....	48

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Estructura del agua.....	4
Figura 2: Representación del sistema hidrológico.....	6
Figura 3: Ciclo hidrológico .....	7
Figura 4: División de la DQO en componentes .....	14
Figura 5: Metabolismo bacterias heterótrofas .....	15
Figura 6: Limitación del sustrato al crecimiento de los microorganismos .....	18
Figura 7: Limitación del sustrato sin inhibición .....	20
Figura 8: Limitación del sustrato con inhibición .....	21
Figura 9: Condiciones de los fangos para una mezcla completa en el proceso biológico.....	22
Figura 10: Recirculación de fangos.....	23
Figura 11: Relación IVF - Cm para una buena sedimentabilidad del fango en distintos procesos.....	26
Figura 12: Esquema típico de planta de tratamiento de agua .....	26
Figura 13: Diseño del tratamiento biológico .....	29
Figura 14: Planta piloto del proceso biológico .....	29
Figura 15: (1) motores de oxigenación; (2) reactor biológico discontinuo; (3) decantador secundario; (4) recirculación de fangos.....	31
Figura 16: Cinética de degradación de la repetición 1.....	37
Figura 17: Cinética de degradación de la repetición 2.....	37
Figura 18: Cinética de degradación de la repetición 3.....	38

## LISTA DE ANEXOS

Anexo 1: Lista de acrónimos.....	54
Anexo 2: Materiales y equipos utilizados .....	55

## RESUMEN

El rendimiento de la biomasa heterótrofa ( $Y_H$ ) es un parámetro significativo en la modelación de los procesos biológicos y caracterización del agua residual, el cual se determina por medio de análisis respirométricos; también representa la cantidad de materia orgánica que consumen las bacterias para su desarrollo y una determinación inadecuada puede afectar la simulación de los procesos biológicos.

El presente estudio pretende establecer las condiciones adecuadas para llevar a cabo la depuración del agua residual en el reactor biológico a escala prototipo utilizando fangos activados, de modo que obtenga un efluente con concentraciones que cumplan la legislación ambiental aplicable.

Se determinó experimentalmente la cinética de degradación de la materia orgánica en zonas de altura y se obtuvo como resultado una cinética lenta, este resultado se obtiene por el crecimiento de los microorganismos para la depuración del agua con la temperatura ambiental en zonas de altura. En la simulación del prototipo se obtiene más tiempo la retención del agua residual en el reactor debido a la presencia de cantidades bajas de fangos activados para el tratamiento y se realizó las simulaciones para optimizar el reactor biológico.

Para que exista una buena depuración del agua se consideró un decantador primario, el cual retiene del 60 – 65 % de sólidos totales provenientes del afluente, y 3.500 mg/l sólidos totales en el reactor biológico. Se obtuvo como resultado una rápida cinética de degradación de la materia orgánica y la infraestructura para diseñar una nueva EDAR.

**Palabras claves:** MATERIA ORGÁNICA, AGUA RESIDUAL, REACTOR BIOLÓGICO Y CINÉTICA DE DEGRADACIÓN.

## **ABSTRACT**

The yield of heterotrophic biomass ( $Y_H$ ) is a significant parameter in the modeling of biological processes and characterization of residual water which is determined by means of respirometric analysis; as well represents the amount of organic matter that bacteria consume for their development and an inadequate determination can affect the simulation of biological processes.

The present study aims to establish the adequate conditions to carry out the purification of the biological reactor the prototype scale waste water with activated sludge, in order to obtain an effluent with concentrations that comply with applicable environmental legislation.

The kinetics of degradation of the organic matter in zones of height were experimentally determined, and a slow kinetic result is obtained. This result is obtained by the growth of the microorganisms for the purification of the water with the ambient temperature in zones of height. In the simulation of the prototype the retention of residual water in the reactor is obtained longer due to low quantities of activated sludge for the treatment and the simulations were performed to optimize the biological reactor.

For a good purification of the water was considered a primary decanter, which retains 60-65% of total solids from the tributary and 3500 mg / l, total solids in the biological reactor. Was obtained as a result in a rapid kinetic degradation of organic matter and infrastructure to design a new EDAR.

**Key words:** ORGANIC MATTER, RESIDUAL WATER, BIOLOGICAL REACTOR AND KINETIC DEGRADATION

## INTRODUCCIÓN.

El hombre ha desarrollado diferentes métodos para tratar las aguas residuales urbanas. Los contaminantes que se encuentran en el agua residual pueden ser eliminados por métodos físicos, químicos o biológicos, y el estudio está enfocada solo en los procesos biológicos.

La Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR) es una instalación que se utiliza para la reducción de los contaminantes (materia orgánica y nutrientes) que están presentes en las aguas residuales antes de ser vertidas a los cauces receptores.

El estudio consiste en optimizar un reactor biológico para la depuración de las aguas residuales urbanas, con fangos activados en plantas de tratamiento, emplazadas en zonas de altura (2.500 – 3.000 m.s.n.m.) y posible reutilización del agua residual.

Los beneficios de utilizar los procesos de eliminación biológica en las estaciones han sido analizados por numerosos investigadores. Para la eliminación biológica se utiliza los fangos activados para la reducción de la materia orgánica y nutrientes, dentro de ellos se desarrollarán los microorganismos los mismos que ocuparán la materia orgánica como sustrato. El tipo de microorganismos predominante en el reactor será en función de la naturaleza, de las condiciones ambientales y del diseño de la EDAR.

El estudio se dividió en cuatro capítulos: El primer capítulo comprende los objetivos que se plantean para el desarrollo de la investigación, el objetivo general es “Optimizar un reactor biológico para la depuración de aguas residuales urbanas con fangos activados en plantas de tratamiento emplazadas en zonas de altura” y los específicos son: Caracterizar la calidad de agua durante el proceso de depuración en la planta piloto propuesta para establecer el comportamiento de los microorganismos; Cuantificar experimentalmente los parámetros cinéticos y estequiométricos para la simulación del tratamiento biológico en plantas depuradoras de aguas residuales emplazadas en zonas de altura; y, Simular las condiciones de depuración con los parámetros obtenidos utilizando software especializado para determinar la posible reutilización del agua residual. El segundo capítulo contiene el marco teórico, dónde se explica la importancia del proceso de depuración del agua residual y sus características; análisis legal (Texto Unificado de Legislación Secundario del Ministerio del Ambiente - TULSMA); el sistema de depuración del agua residual; y, la optimización del reactor biológico. En el tercer capítulo se describe la metodología empleada en el estudio y la cuantificación experimental de los parámetros cinéticos y estequiométricos para la simulación del tratamiento biológico de aguas residuales. El último capítulo indica los resultados obtenidos en la experimentación y simulación de la calidad de agua residual.

Los resultados obtenidos de la calidad del efluente del reactor biológico cumplen los límites del vertido marcado en la normativa TULSMA para uso de riego. Los resultados del estudio son importantes para la Universidad y la sociedad, ya que se pueden extrapolar para el uso en las poblaciones donde necesiten un proceso de depuración de aguas residuales urbanas.

Los objetivos planteados para el trabajo de investigación se han cumplido en su totalidad, se caracterizó el afluente y el efluente del agua residual a la salida del reactor biológico, se cuantificó experimentalmente los parámetros cinéticos y estequiométricos, para la simulación del tratamiento biológico y para poder determinar la reutilización del agua residual. El efluente obtenido en la experimentación cumple con los límites permisibles que rige la normativa de calidad de agua (TULSMA) para uso de riego.

Se determinó experimentalmente la cinética de degradación de la materia orgánica en zonas de altura. Para que el valor de la cinética de degradación sea fiable se realizó tres repeticiones, una vez obtenido el valor de la cinética y caracterizado el afluente y efluente, se llevó a cabo las simulaciones del tratamiento biológico y se utilizó los principios propuestos por Ferrer Polo para una depuración de agua residual urbana (3.500 mg/l sólidos en el reactor) para obtener un reactor biológico optimizado.

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Objetivos

#### ***Objetivo general.***

- ❖ Optimizar un reactor biológico para la depuración de aguas residuales urbanas con fangos activados en plantas de tratamiento emplazadas en zonas de altura.

#### ***Objetivos específicos.***

- ❖ Caracterizar la calidad de agua durante el proceso de depuración en la planta piloto propuesta para establecer el comportamiento de los microorganismos.
- ❖ Cuantificar experimentalmente los parámetros cinéticos y estequiométricos para la simulación del tratamiento biológico en plantas depuradoras de aguas residuales emplazadas en zonas de altura.
- ❖ Simular las condiciones de depuración con los parámetros obtenidos utilizando software especializado para determinar la posible reutilización del agua residual.

### 1.2. Alcance

Las aguas residuales urbanas generadas en la ciudad de Cuenca podrán ser depuradas por procesos biológicos con fangos activados, se obtendrán datos extrapolables a ciudades entre 2.500 – 3.000 m.s.n.m., siendo una alternativa que garantiza el saneamiento adecuado, mejorando la calidad de vida de las comunidades y la reutilización del recurso hídrico para otros fines.

### 1.3. Metodología

Para el desarrollo del trabajo de investigación se estudió el proceso de tratamiento biológico, el cual consiste en la proliferación y desarrollo de los microorganismos, éstos son parte de la materia orgánica que se encuentran en las aguas residuales.

La investigación realizada es de carácter descriptiva-cuantitativa. Para la depuración del agua residual se utilizó un reactor biológico a escala prototipo, que trabajó con agua residual de la ciudad de Cuenca. El reactor biológico contará con un decantador secundario, agitación interna, aireación y recirculación de los fangos. Con los datos obtenidos en la experimentación se efectuará simulaciones para posible reutilización del agua residual.

Para el tratamiento biológico se utilizará el agua residual generada en la ciudad de Cuenca que son conducidas por el alcantarillado a la “Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Ucubamba”, se caracterizará la calidad de agua del afluente y se introducirá al reactor biológico; durante el tratamiento del agua en el reactor se tomó muestras cada 6 días y el efluente para medir los cambios de los parámetros de la calidad del agua en relación al afluente.

Se determinó mediante la experimentación los parámetros de pH, DBO<sub>5</sub>, DQO, oxígeno disuelto, sólidos suspendidos y la temperatura en el laboratorio para la simulación del tratamiento biológico.

Con los datos obtenidos en el laboratorio se determinará experimentalmente la cinética de degradación de la materia orgánica, los datos obtenidos serán simulados en el software especializado para medir la eficacia de depuración de las aguas residuales y optimización de un reactor biológico para que pueda ser aplicado en zonas de altura.

#### **1.4. Justificación**

El agua es uno de los recursos más importantes de la naturaleza y el hombre ha venido utilizando este recurso en diferentes actividades para su supervivencia y para crecer económicamente. El agua se ha gastado y contaminado junto con otros recursos de la naturaleza. En las últimas décadas la contaminación hídrica es considerada como el principal problema mundial de daño ambiental y esto se debe a algunas actividades económicas como: agrícolas, ganaderas, industriales, mineras y otras. Estas actividades económicas alteran el equilibrio de la naturaleza en los ríos, lagos, mares y océanos provocando la desaparición de diferentes especies (Ramalho, 2010).

Generalmente las aguas residuales presentan concentraciones de materia orgánica compuesta por residuos orgánicos de las actividades urbanas; además se puede encontrar organismos patógenos, metales pesados y toxinas. Dicha contaminación produce un mal funcionamiento de la planta de tratamiento, contaminación visual y afecta la calidad del agua.

Las aguas residuales de los establecimientos comerciales, públicos y actividades industriales llegan a las redes de alcantarillado y son fuentes de contaminación de los sistemas acuáticos, y por ello se ha visto la necesidad de implementar modelos de EDAR (Estación Depuradora de Aguas Residuales) tomando en consideración los escenarios dónde se va a implementar.

El principal objetivo de la depuración es la reducción de la materia orgánica presente en el agua residual y en muchos casos los nutrientes (nitrógeno y fósforo), estas actividades se realizan en reactores diseñados principalmente para mantener a los microorganismos bajo condiciones controladas, acelerando el proceso natural de descomposición y neutralización de los residuos, antes de ser vertidos a los cauces receptores.

Para la depuración de las aguas residuales urbanas se utilizará principalmente los microorganismos, ya que tienen la capacidad de asimilar las sustancias en suspensión o disueltas que se encuentran en el agua (Metcalf & Eddy, 1995).

El estudio busca optimizar un reactor biológico para el tratamiento del agua residual, analizar la cinética de degradación de la materia orgánica en zonas de altura y con los resultados obtenidos se dará una solución alternativa para el mejoramiento de la calidad de agua. Se analizará la capacidad de depuración, la velocidad de crecimiento y la tasa de rendimiento de los microorganismos en los fangos activados. La información obtenida servirá para adquirir nuevos conocimientos y utilizar este proceso en el tratamiento de las aguas residuales urbanas.

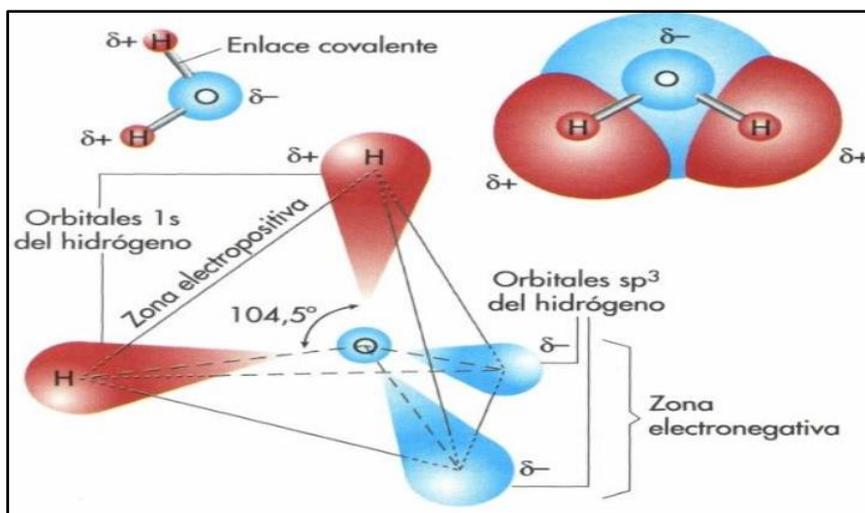
## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Generalidades del agua

El agua es un recurso indispensable para el desarrollo de la vida. La composición y estructura de una molécula sencilla de agua se divide en tres átomos pequeños, dos de hidrógeno y una de oxígeno.

El agua se la puede encontrar en tres estados naturales: sólido (hielo), líquido (ríos, mares) y gas (vapor); además es un líquido insípido, inodoro y en pequeñas proporciones incoloro.

La molécula tiene una geometría angular (los dos átomos de hidrógeno forman un ángulo de unos  $105^\circ$ ) lo que le hace una molécula polar que puede unirse a otras muchas sustancias polares (Vásquez Morera, Alfaro Solís, Sibaja Brenes, Esquivel Hernández, & Váldez González, 2012).



**Figura 1:** Estructura del agua

Fuente: <http://bulldogpuppys.net/agua/agua-y-sales-minerales.html>

### 2.2. El agua en la tierra

#### 2.2.1. Distribución del agua en la naturaleza.

En nuestro planeta más del 70% del área total está ocupada por agua que forma parte de los mares y océanos, uno de los elementos más comunes del planeta es el agua y se encuentra en diferentes estados: en estado sólido cubre las regiones polares y las montañas más altas en forma de hielo y nieve; en estado líquido la encontramos en lagos, ríos, mares y océano; y, en estado gaseoso se presenta como vapor de agua en la atmósfera (Gálvez, 2011).

**Tabla 1:** Distribución del agua en la tierra

Reservorios	Volumen (km <sup>3</sup> x 1000000)	Porcentaje (%)
Océanos	1370	97.25
Glaciares	29	2.05
Agua subterránea	9.5	0.68
Lagos	0.125	0.01
Suelos húmedos	0.065	0.005
Atmósfera	0.013	0.001
Ríos	0.0017	0.0001
Biosfera	0.0006	0.00004

Fuente: (Ordóñez Gálvez, 2010)

### **2.3. Importancia del agua y la vida**

Todos los seres vivos del planeta dependen del agua para la supervivencia y desarrollo de la vida, desde el comienzo de la vida el agua ha formado parte de la evolución ya que los primeros organismos habitaron en ambientes acuáticos.

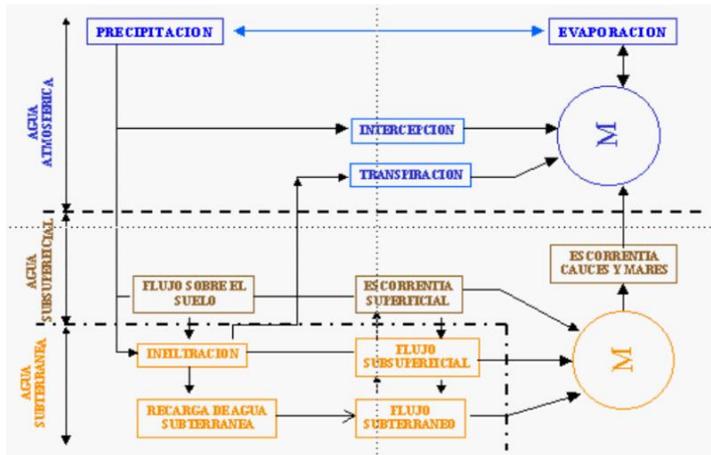
El agua es uno de los recursos más importantes en la vida de los seres vivos (humanos, plantas y animales), dónde el hombre contiene alrededor del 60% de agua, las plantas varían de un 80 - 90% y los animales entre 60 - 90%.

Generalmente un ser humano puede sobrevivir un largo tiempo sin consumir alimentos, pero solo podrá vivir aproximadamente una semana sin consumir agua.

Los ecosistemas dependen del agua directa o indirectamente para desarrollar sus procesos funcionales para la descomposición de restos de plantas y animales; este proceso es importante para incorporar nutrientes esenciales al suelo, pero es muy lento si carece de presencia de agua.

### **2.4. Ciclo hidrológico**

Los ciclos hidrológicos son muy complicados por lo que nunca pueden ser totalmente entendidos, pero a falta de una concepción perfecta se pueden interpretar de una manera resumida mediante el concepto del sistema (figura 2) (Ordóñez Gálvez, 2010).

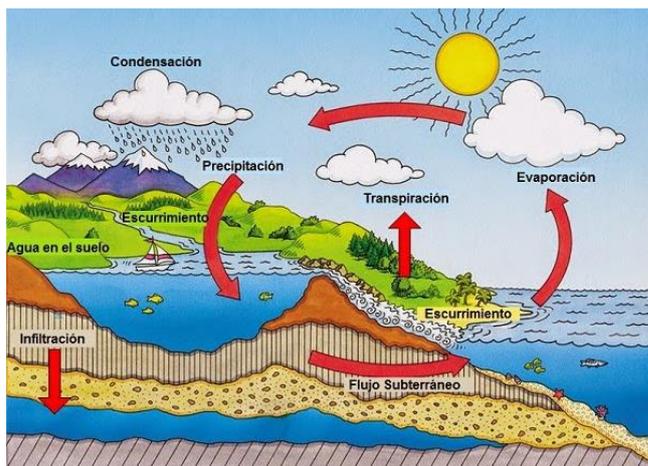


**Figura 2:** Representación del sistema hidrológico

Fuente: (Ordóñez Gálvez, 2010)

El ciclo hidrológico es el proceso que se da mediante distintos fenómenos provocando la circulación del agua, desde el mar hacia la atmósfera e inmediatamente regresa a la tierra por medio de los siguientes procesos:

- ✓ **Precipitación:** Por el intercambio de temperaturas o de la presión generan la caída del agua en forma de lluvia a la tierra.
- ✓ **Evaporación:** Es la elevación del agua en forma de vapor o humedad desde el mar hacia la atmósfera producida por la radiación solar.
- ✓ **Transpiración:** Este proceso se da por la intervención de las plantas, donde las raíces absorben el agua del suelo y mediante el metabolismo de las plantas se evaporan.
- ✓ **Intercepción o retención:** Es la precipitación obstaculizada por objetos que se encuentran en el suelo, como la vegetación e infraestructuras donde posteriormente se evaporan.
- ✓ **Corrientes subterráneas:** Estas aguas son las que logran infiltrarse en el suelo, fluyen subterráneamente y se unen a lagos y ríos.
- ✓ **Escorrentía superficial:** Estas aguas son las que llegan a la superficie del suelo, pueden fluir en riachuelos y unirse con los ríos.



**Figura 3:** Ciclo hidrológico

Fuente: <http://www.explora.cl/descubre/articulos-de-ciencia/naturaleza-articulos/agua-articulos/1690-descubre-articulos-de-ciencia-naturaleza-agua>.

La mayor parte de la evaporación se produce en los océanos, el 91% regresa a las cuencas oceánicas a través de la precipitación, y el 9% restante se transporta a las zonas continentales donde los factores climatológicos inducen la formación de la precipitación.

## 2.5. Calidad del agua

Calidad del agua se refiere a las características físicas, químicas, biológicas y radiológicas del agua. Es una medida de la condición del agua en relación con los requisitos de una o más especies bióticas o a cualquier necesidad humana o propósito. Los estándares más comunes utilizados para evaluar la calidad del agua se relacionan con la salud de los ecosistemas, seguridad de contacto humano y agua potable.

La empresa ETAPA (Empresa Pública Municipal de Telecomunicaciones, Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento), trabaja desde 1984 en la ciudad de Cuenca con el fin de rescatar la calidad de agua de los ríos de la ciudad, siendo pionera a nivel nacional y tomada como modelo para el resto de las ciudades del país.

Las aguas residuales generadas en la ciudad de Cuenca eran descargadas directamente a los ríos y quebradas de la ciudad, a consecuencia de ello provocaban contaminación y mostraban un aspecto séptico, color gris negruzco, olores pestilentes y ausencia de vida acuática. El río Tomebamba fue el más contaminado ya que la ciudad desde épocas remotas se desarrolló a sus alrededores.

Entre los años 1984 - 1985 se realizaron monitoreos en diferentes estaciones de los ríos y quebradas de la ciudad de Cuenca, la información sirvió para realizar un análisis del estado en el que se encontraba los ríos y quebradas y consecutivamente realizar un Plan Maestro de la Contaminación de los cauces.

En la época de los 90 se construyeron obras del Plan Maestro de la Contaminación para controlar la contaminación del sector urbano de la ciudad de Cuenca como: ampliación de la red de alcantarillado, reposición de colectores, interceptores de recolección de aguas residuales, emisario final y planta de tratamiento de aguas residuales.

La Empresa ETAPA realizó un programa de vigilancia de calidad de agua de los ríos de la ciudad de Cuenca, los monitoreos que se realizaron se hacían de forma mensual a trimestral. Las variables físicas, químicas y biológicas que se estudiaban fueron: oxígeno disuelto (OD), temperatura (T°), potencial de hidrógeno (pH), Demanda Biológica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>), turbiedad, coliformes, nitratos, fosfatos, sólidos totales y conductividad.

Según el diagnóstico realizado en el Plan Maestro de la Contaminación de los ríos, la calidad del agua de la ciudad de Cuenca estaba afectada por los parámetros coliformes fecales y DBO<sub>5</sub>; la fuente principal de contaminación era producido por desechos domésticos.

El parámetro DBO (Demanda Biológica de Oxígeno) es un indicador de la contaminación por la presencia de materia orgánica en el agua y tiene influencia directa con los cauces receptores. Otro indicador de la contaminación del agua es la presencia de coliformes que prohíbe el uso del agua (Clavijo Campos, 2011).

## **2.6. Contaminación ambiental**

### **2.6.1. Generalidades.**

Cuando la composición del agua ha sido alterada de forma natural o antrópica se la considera contaminada y deja de ser apta para consumo.

Actualmente se ha clasificado en diferentes tipos de contaminación: física, química y biológica que se originan en descargas de desechos sólidos o líquidos, el grado de contaminación del agua depende de la cantidad y la concentración de los elementos perjudiciales vertidos.

Las alteraciones físicas que se ocasionan en el agua pertenecen a las variaciones de la calidad natural del agua (color, olor y sabor), las alteraciones químicas son principalmente de origen orgánico e inorgánico y las alteraciones biológicas se ocasionan por la presencia de microorganismos tóxicos.

Las descargas directas de las aguas residuales a los ríos, lagos y estuarios sin previo tratamiento son consideradas como principal problema ambiental que existe en el Ecuador, la presencia de elementos en el agua puede ser perjudicial para la salud de los seres vivos (humanos, plantas y animales).

## **2.7. Aguas residuales urbanas**

### **2.7.1. Generalidades.**

Por lo general a las aguas residuales se las conoce como aguas grises, servidas o cloacales y es el resultado del uso doméstico o industrial. Se recolecta el agua residual y son conducidas por el alcantarillado a las plantas de tratamiento; además se incluye las aguas lluvias.

Las aguas industriales son el resultado de un proceso productivo, incluyendo actividades mineras, agrícolas, entre otras.

## **2.8. Características de las aguas residuales urbanas.**

Las aguas residuales presentan características físicas y químicas especiales sobre las demás aguas que es necesario comprender para optimizar su manejo y minimizar los efectos adversos del vertido a aguas naturales o al suelo, obteniendo así un mejor manejo ambiental de los desechos y la calidad del agua.

### **2.8.1. Características físicas.**

Los sólidos totales son las características más importantes y está compuesto por materia flotante y en suspensión. El residuo que queda en la evaporación de 103 – 105 °C se define como sólidos totales.

Las características físicas son: el olor, color y temperatura. El olor es generado por la descomposición de la materia orgánica y los gases que se producen, el color del agua residual reciente suele ser gris a medida que los compuestos orgánicos se van descomponiendo en el trayecto.

También se las considera características físicas a: radiactividad, espumas y conductividad. La radiactividad es producida por los isotopos del potasio (K) y algunas actividades antrópicas pueden contaminar el agua. Las espumas son producidas principalmente por los detergentes y añaden fosfatos al agua y esto produce la eutrofización del agua ocasionado por el aumento de la biomasa y empobrecimiento de la biodiversidad. Disminuyen el proceso de autodepuración de los ríos al dificultar la actividad bacteriana e interfieren en los procesos de floculación y sedimentación en las estaciones depuradoras. El agua natural tiene una conductividad muy baja, tiene iones en disolución y su conductividad es proporcional a la cantidad y características de los electrolitos. Se usan los valores de conductividad como índice aproximado de concentración de solutos y como la temperatura modifica la conductividad las medidas se deben realizar a 20°C.

## **2.8.2. Características químicas.**

### **2.8.2.1. Materia orgánica.**

Las aguas residuales reciben materia orgánica generada por la preparación de alimentos y la acción biológica de los humanos. Los compuestos orgánicos están formados por carbono (C), hidrógeno (H) y oxígeno (O).

En las aguas residuales encontramos grupos de sustancias orgánicas como: proteínas de 40 – 60%, carbohidratos 25 – 50% y grasas y aceites con el 10%.

### **2.8.2.2. Materia inorgánica.**

La materia inorgánica es importante para el control de la calidad de agua y tienen formaciones geológicas.

## **2.9. Norma ecuatoriana de calidad de agua**

En el TULSMA se encuentra la “Norma de calidad ambiental y de descarga de efluentes” la cual sirve para el control de la calidad del efluente. En esta norma se encuentra los límites permisibles, disposiciones y prohibiciones para las descargas en cauces receptores o alcantarillado, métodos y procedimientos para determinar los contaminantes del agua y criterios de la calidad de agua para sus diferentes usos.

En conformidad del TULSMA se considera los criterios generales de la calidad de agua para uso doméstico que detalla los parámetros en la descarga de efluentes a un cuerpo de agua o receptor, mediante el Art. 4.2.3., numeral 4.2.3.7, que se detalla a continuación principalmente los parámetros que se tomara en cuenta en la investigación ((MAE), 2015):

*“4.2.3. Normas de descarga de efluentes a un cuerpo de agua o receptor: Agua dulce y agua marina*

*4.2.3.7 Toda descarga a un cuerpo de agua dulce, deberá cumplir con los valores establecidos”*

Los límites de descarga que deben cumplir las aguas residuales, se presenta la siguiente tabla:

**Tabla 2:** Límites de descarga a un cuerpo de agua dulce

Parámetros	Expresado como	Unidad	Límite máximo permisible
<b>Aceites y Grasas</b>	Sustancias solubles en hexano	mg/l	0,3
<b>Coliformes Fecales</b>	Nmp/100 ml		Remoción > al 99,9%
<b>Color real</b>	Color real	Unidades de color	Inapreciable en dilución: 1/20
<b>Demanda Bioquímica de Oxígeno (5 días)</b>	DBO <sub>5</sub>	mg/l	100
<b>Demanda Química de Oxígeno</b>	DQO	mg/l	250
<b>Fosforo Total</b>	P	mg/l	10
<b>Materia flotante</b>	Visibles		Ausencia
<b>Nitratos + Nitritos</b>	Expresado como Nitrógeno (N)	mg/l	10,0
<b>Nitrógeno Total Kjeldahl</b>	N	mg/l	15
<b>Potencial de Hidrógeno</b>	pH		5 – 9
<b>Sólidos Sedimentables</b>		mg/l	1,0
<b>Sólidos Suspendidos Totales</b>		mg/l	100
<b>Sólidos Totales</b>		mg/l	1600
<b>Temperatura</b>	°C		< 35

Fuente: Texto Unificado de Legislación Medio Ambiental (TULSMA), Norma de calidad ambiental y descarga de efluentes: recurso agua, 2015.

## **2.10. Principales parámetros considerados en la depuración del agua residual**

Se considera a los parámetros de Demanda Biológica de Oxígeno (DBO), Demanda Química de Oxígeno (DQO), sólidos suspendidos, temperatura, oxígeno disuelto (OD) y potencial de hidrógeno (pH) para la depuración del agua residual.

### **2.10.1. Demanda Biológica de Oxígeno (DBO).**

La DBO mide el oxígeno utilizado por los microorganismos para oxidar biológicamente la materia orgánica del agua residual, además, mide la cantidad aproximada de oxígeno para estabilizar la materia orgánica.

### **2.10.1.1. Fórmula para calcular la DBO.**

Para desarrollar el cálculo de la DBO en proporciones a la cantidad de oxígeno se determina de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$DBO = \frac{(V_f - V_i) \times E_q \times 1000}{V} \quad (1)$$

donde:

$V_f$ : Volumen del titulante consumido después de 5 días (ml)

$V_i$ : Volumen del titulante consumido en el primer día (ml)

$E_q$ : Equivalente químico del oxígeno

$V$ : Volumen del recipiente (ml)

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

La DQO mide la cantidad de materia orgánica total en aguas naturales y residuales. Se utiliza un agente químico oxidante en medio ácido para determinar la materia orgánica presente en la muestra, por lo general la DQO de un agua es mayor que la DBO ya que tiene mayor cantidad de compuestos que pueden oxidarse por vía química.

### **2.10.3. Sólidos Suspendidos.**

Este parámetro muestra la cantidad de sólidos en suspensión presentes en el agua natural o residual. Los sólidos suspendidos vienen expresados en mg/l.

### **2.10.4. Temperatura, OD y pH.**

La temperatura es un parámetro físico que indica la intensidad de calor o frío del agua que puede ser medido en un sitio o momento determinado y aumenta la velocidad de las reacciones del metabolismo, acelerando la putrefacción. El aumento de la temperatura disminuye la solubilidad de gases (oxígeno) y aumenta la de las sales. La temperatura óptima del agua para consumo humano está entre los 10 y 14°C.

El oxígeno disuelto (OD) que está presente en el agua residual es consumido por los microorganismos para su reproducción y a su vez van depurando el agua. Las aguas superficiales limpias están saturadas de oxígeno y es fundamental para la vida. Si hay un nivel bajo de oxígeno disuelto indica que está contaminada con materia orgánica, septicización e incapacidad para mantener diferentes formas de vida.

El potencial de hidrógeno (pH) determina las características de la estructura y actividad de las moléculas, por lo tanto, del comportamiento de los microorganismos en la depuración del agua residual.

## 2.11. Tratamientos biológicos con fangos activados

### 2.11.1. Generalidades.

Con el paso del tiempo la población se ha incrementado y ha ocasionado consecuencias al medio ambiente, al utilizar el recurso hídrico los residuos lo vierten a los cauces receptores.

Generalmente en el tratamiento del agua antes de ser vertidos a los cauces receptores, consiste en la aplicación de procesos unitarios siendo su objetivo eliminar los contaminantes del modo más económico.

Actualmente, existen varios métodos que se aplican en el tratamiento de las aguas residuales entre los cuales se encuentran los procesos físico-químicos y biológicos. Se va a estudiar la aplicación del tratamiento biológico con fangos activados. Se eliminará los contaminantes presentes en el agua residual sin la adición de reactivos. En la tabla 3 se presenta los principales procesos biológicos empleados en tratamiento de aguas residuales urbanas (Wang & Pereira, 2012).

**Tabla 3:** Principales procesos biológicos empleados en el tratamiento de aguas residuales

Procesos Aerobios	Cultivo en suspensión	Fangos Activados	Continuos	Flujo en pistón Mezcla completa
		Lagunas Aireadas	Discontinuos	Aireación prolongada Canales de oxidación Nitrificación
	Cultivo fijo	Biodiscos rotativos		
		Filtros percolares	Alta carga Baja carga	
Procesos Anóxicos	Desnitrificación con cultivo en suspensión			
	Desnitrificación con cultivo fijo			
Procesos Anaerobios	Cultivo en suspensión	Digestión anaerobia	Alta carga Baja carga	Doble etapa
	Cultivo fijo	Filtro anaerobio Lecho expandido		

Procesos combinados  
(anaerobios – anóxicos –  
aerobios)

Nitrificación – desnitrificación  
Nitrificación – desnitrificación – eliminación de fósforo

Fuente: Lawrence K. Wang y Norman C. Pereira

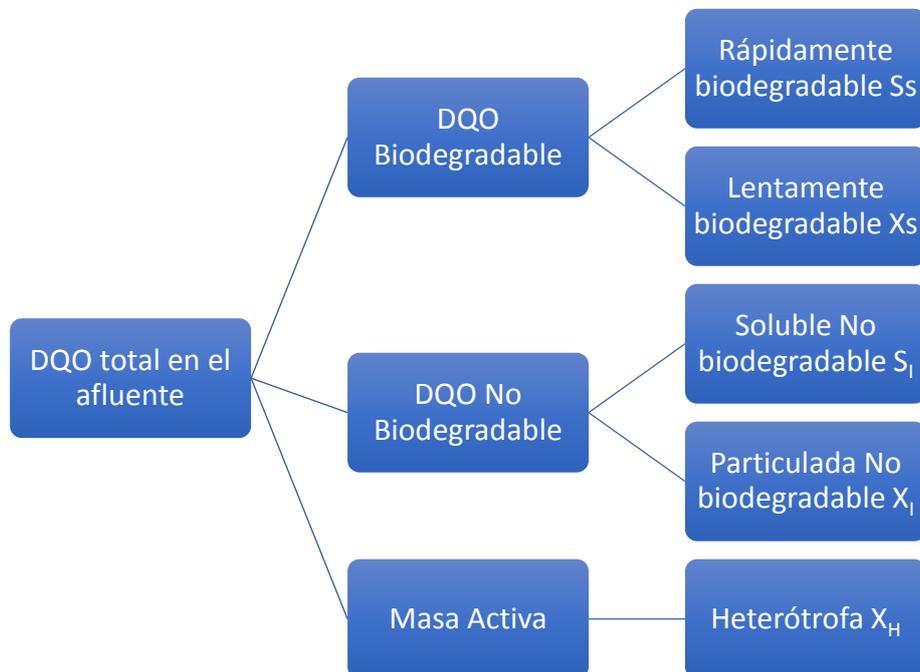
En el tratamiento biológico de las aguas residuales se utilizará principalmente a los microorganismos o bacterias heterótrofas, para el consumo de la materia orgánica y nutrientes (nitrógeno y fósforo) que se encuentra en el agua. La depuración se lleva a cabo en grandes cantidades de microorganismos, la mayor parte son bacterias heterótrofas que utilizan la materia orgánica para formar biomasa celular nueva y reproducirse.

Los procesos de eliminación de nutrientes (nitrógeno y fósforo) presentan una dificultad y han sido sometidos a numerosos estudios.

### 2.11.2. Componentes del agua residual

Los modelos matemáticos desarrollados para simular los procesos de tratamiento del agua residual basan la caracterización de la materia orgánica en términos de DQO (Demanda Química de Oxígeno).

En la figura 4 se presenta la división de la DQO en sus diferentes componentes.



**Figura 4:** División de la DQO en componentes

Fuente: Elaboración propia

La materia orgánica biodegradable se subdivide en rápida o fácilmente biodegradable (Ss), también denominada por otros autores como DQORB y en lentamente biodegradable (Xs), denominada también DQOLB (HenryK, Peter, Richard, Christopher, & Imre, 2003). La porción

S<sub>s</sub> se puede entrar rápidamente al interior de la célula y ser metabolizado para la producción de energía y material celular. La porción X<sub>s</sub> es derivada de materia particulada/coloidal y moléculas orgánicas complejas que requieren una hidrólisis previa para su posterior utilización.

Las componentes S<sub>i</sub> y X<sub>i</sub> no se eliminan en el tratamiento biológico. La componente X<sub>i</sub> se acumula con el fango producido en el proceso, por lo cual se extrae con la purga de sólidos del sistema. La S<sub>i</sub> por su parte se mantiene aproximadamente constante debido a que no puede ser degradada, siendo su valor en el efluente prácticamente igual al del afluente (HenryK, Peter, Richard, Christopher, & Imre, 2003).

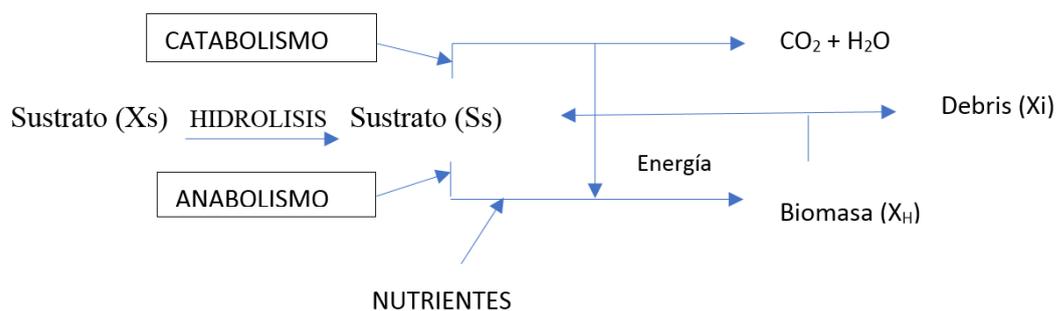
Las diversas fracciones de materia orgánica que componen el agua residual y su importancia en el metabolismo de los microorganismos, hace necesario llevar a cabo un adecuado procedimiento de caracterización. Por esta razón se exponen las principales metodologías publicadas en la literatura.

### 2.11.3. Eliminación de Materia Orgánica (MO) por bacterias heterótrofas.

La materia orgánica (MO) que se encuentra en el agua residual afluente se utiliza como sustrato por las bacterias heterótrofas como fuente de carbono para la síntesis celular, la síntesis celular y reacciones de oxidación se pueden expresar de forma genérica:



Durante la reacción los microorganismos para generar energía y síntesis de nuevas células utilizan el oxígeno y nutrientes, a la reacción se la representa como C<sub>5</sub>H<sub>7</sub>NO<sub>2</sub>.



**Figura 5:** Metabolismo bacterias heterótrofas

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 5 se presenta un esquema de las etapas del metabolismo generado por las bacterias heterótrofas. Los procesos de anabolismo y catabolismo determinan el mantenimiento y crecimiento de las bacterias. En el Catabolismo las bacterias consumen oxígeno para la oxidación del sustrato fácilmente biodegradable (S<sub>s</sub>), a partir de ello se genera

CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O. Las bacterias transforman el sustrato lentamente biodegradable (X<sub>s</sub>) en fácilmente biodegradable por un proceso llamado Hidrólisis para su consumo y crecimiento (Dimocka & Eberhard, 2006).

En el Anabolismo las bacterias utilizan la energía derivada en el Catabolismo, de los nutrientes y la materia orgánica para la síntesis de tejido celular. Con la muerte de los microorganismos presentes en el agua, contribuyen al sistema materia orgánica siendo lentamente biodegradable, por lo que debe pasar por el proceso de Hidrólisis para que pueda ser reutilizado en el ciclo.

En los procesos biológicos para la depuración del agua residual el principal contaminante es la materia orgánica, por lo que se encuentra en mayores cantidades, resulta de mayor interés estudiar los métodos que permiten caracterizarla (Sollfrank & Gujer, 1991).

#### **2.11.4. Rendimiento de producción de biomasa (Y<sub>H</sub>).**

Para lograr una adecuada modelación, diseño y operación para un tratamiento biológico se debe conocer la cinética de las bacterias heterótrofas o rendimiento de producción de biomasa. El rendimiento de la producción de biomasa (Y<sub>H</sub>) es la relación de la materia celular producida y la materia orgánica soluble total degradada (gDQO/gDQO). Este parámetro está asociado a la producción de fangos por el crecimiento de las bacterias (Estrada, 2010). Una determinación inadecuada de este parámetro puede llevar a estimaciones desfavorables del fango generado por la EDAR.

En los modelos matemáticos, Y<sub>H</sub> es el parámetro que participa en los procesos de degradación de la materia orgánica y crecimiento de las bacterias. Interviene en la caracterización del agua residual con el OD consumido asociado con su degradación (Cruz, Fajardo, & Ramírez, 2015).

Una vez que se haya obtenido el valor de Y<sub>H</sub>, además es posible obtener la velocidad máxima de crecimiento microbiano μ<sub>H</sub> y la concentración de biomasa. Se puede estimar en los modelos la producción de fangos en los procesos de las depuradoras y es necesario para su diseño y control.

Dada la importancia de este parámetro se han realizado varias investigaciones en los cuales proponen diferentes metodologías para la determinación de Y<sub>H</sub>. Es importante indicar que no todos los microorganismos responden de igual forma frente a un factor ambiental determinado; un factor puede ser perjudicial para unos y beneficiosa para otros (Díaz, 2003). Se han realizado investigaciones con diferentes rangos de temperaturas de 20 a 30 °C en Europa, para observar el efecto sobre la tasa de crecimiento y decaimiento heterotrófico microbiano en los procesos de fangos activados; sus resultados han sido efectivos, pero aún

no ha sido aplicado en Latinoamérica para determinar su eficiencia microbiana (Espinoza Rodriguez, Flores Álamo, & Esparza Soto, 2012) & (Velez Estrada, 2009).

En la bibliografía se puede encontrar diferentes valores del parámetro  $Y_H$ , el cual es una de las características del fango y del agua residual que se va a tratar. En la siguiente tabla se presenta los valores de  $Y_H$  mencionados por diferentes autores:

**Tabla 4:** Valores de  $Y_H$  utilizados para aguas residuales urbanas

Autor	Valor de $Y_H$ (gDQO /gDQO)
<b>Marco Von Sperling (2007)</b>	0,5 – 0,7
<b>Ferrer Polo (2007)</b>	0,6
<b>Henze (1987)</b>	0,66
<b>Henze (1999)</b>	0,625
<b>Dold y Marais (1986)</b>	0,666
<b>Wentzel (1999)</b>	0,645
<b>Vollertsen (1999)</b>	0,65
<b>Sperandio (1998)</b>	0,62 – 0,67

Fuente: Elaboración propia

#### **2.11.5. Antecedentes en el comportamiento del rendimiento $Y_H$**

La modelación es una herramienta utilizada para entender y diseñar sistemas de tratamiento de aguas residuales. Permite obtener un impacto sobre parámetros importantes para ser analizados y ayudar a la definición y optimización de los procesos. En este contenido la modelación depende de la información experimental lo que involucra el conocimiento de las diferentes cantidades de la DQO presente en el agua residual, así como los parámetros cinéticos y estequiométricos de los microorganismos.

(Orhon & Emine, COD Fractionation in wastewater caracterización - The state of the art. J.Chem.Tech.Biotechnol, 1997) (Sperandio & Paul, 2000) han llevado a cabo trabajos orientados a brindar herramientas que mejoren las caracterizaciones y determinaciones de los parámetros estequiométricos en el tratamiento de las aguas residuales. La herramienta más utilizada hasta el momento para la depuración del agua residual ha sido el método biológico. (Ekana, Dold, & Marais) fueron los primeros investigadores que utilizaron ensayos respirométricos con reactores de flujos discontinuos para la identificación de la porción rápidamente y lentamente biodegradable. También han realizado investigaciones de la calibración de constantes cinéticas de los microorganismos presentes en el agua residual.

En los diferentes trabajos de caracterización e identificación de parámetros cinéticos asociados a la eliminación de M.O. se puede notar que el rendimiento  $Y_H$  es uno de los parámetros más utilizados. Se realizan experimentos para la determinación de su valor o

simplemente es tomado de estudios previos. Generalmente, el valor de  $Y_H$  es tomado como un valor constante que depende del fango y del agua residual en la que se trabaje.

### 2.12. Fórmulas para la obtención de $Y_H$ (crecimiento bacteriano)

- ✓ Velocidad de crecimiento de la biomasa

$$r_x = \frac{dX}{dt_{crec}} = \mu X \quad (2)$$

donde:

$r_x$ : velocidad de crecimiento de los microorganismos (mg DQO/d)

$\mu$ : velocidad de crecimiento específico ( $d^{-1}$ )

$x$ : concentración de biomasa activa (mg DQO/l)

- ✓ Velocidad de utilización de sustrato

$$r_s = \frac{dS}{dt_{crec}} = -\frac{1}{Y} r_x \quad (3)$$

donde:

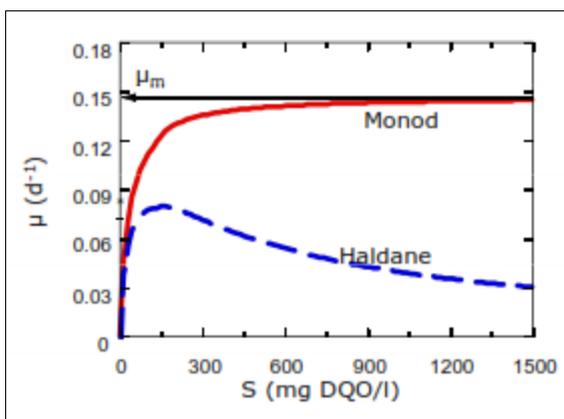
$r_s$ : velocidad de utilización del sustrato (mg DQO/d)

$S$ : concentración de sustrato (mg sustrato/l)

$Y$ : coeficiente de producción (g DQO biomasa/g sustrato consumido)

- ✓ Limitación del sustrato al crecimiento de los microorganismos

- Sin inhibición: Ec. Monod
- Con inhibición: Ec. Haldane



**Figura 6:** Limitación del sustrato al crecimiento de los microorganismos

Fuente: Elaboración propia

En la figura 6 presentan las ecuaciones de Monod y Haldane del crecimiento de los microorganismos presentes en el agua residual. La ecuación de Monod es la tasa de crecimiento ( $\mu$ ) que depende de la máxima que puede alcanzar los microorganismos ( $\mu_m$ ),

de la concentración de sustrato (S) y de un valor constante ( $k_s$ ), que representa la concentración de sustrato a la que se alcanza una tasa de crecimiento igual a la mitad de la máxima. Para que se cumpla esta ecuación el rendimiento debe ser independiente de la concentración de sustrato. La ecuación de Haldane modela la inhibición del crecimiento microbiano a altas concentraciones del sustrato. En conclusión, para la curva de Monod la velocidad del proceso biológico de crecimiento tendera asintóticamente al valor máximo ( $\mu_m$ ) y para la curva de Haldane la velocidad del crecimiento microbiano es alta para bajas concentraciones del sustrato y baja para altas concentraciones de sustrato. Ambos modelos exhiben un valor máximo en la velocidad de crecimiento microbiano.

✓ Limitación del sustrato sin inhibición (Monod)

$$\mu = \mu_m \frac{S}{k_s + S} \quad (4)$$

$$r_x = \frac{dX}{dt_{crec}} = \mu_m \frac{S}{k_s + S} X \quad (5)$$

$$r_s = \frac{dS}{dt_{crec}} = - \frac{\mu_m}{Y} \frac{S}{k_s + S} Y \quad (6)$$

donde:

$\mu$ : velocidad de crecimiento específico ( $d^{-1}$ )

$\mu_m$ : velocidad máxima de crecimiento específico ( $d^{-1}$ )

S: concentración de sustrato limitante (mg sustrato/l)

$k_s$ : constante de semisaturación (mg sustrato/l)

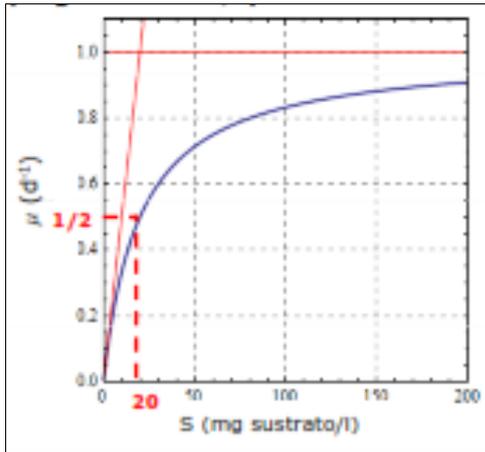
$r_x$ : velocidad de crecimiento de los microorganismos (mg DQO/d)

X: concentración de biomasa activa (mg DQO/l)

$r_s$ : velocidad de utilización de sustrato (mg DQO/d)

Y: coeficiente de producción (g DQO biom. /g sustrato consumido)

- Si  $S = k_s$ ;  $\mu = \frac{\mu_m}{2}$
- Si  $S < k_s$ ;  $\mu = \mu_m \frac{S}{k_s} aS$  (orden 1)
- Si  $S > k_s$ ;  $\mu = \mu_m = cte.$  (orden 0)



**Figura 7:** Limitación del sustrato sin inhibición  
Fuente: Elaboración propia

En la figura 7 muestra la ecuación de Monod o limitación dl sustrato sin inhibición. Esto representa que la velocidad de la velocidad de los procesos biológicos del crecimiento de los microorganismos tendera asintóticamente al valor máximo ( $\mu_m$ ) del sustrato presentes en el agua residual.

✓ Limitación del sustrato con inhibición (Haldane)

$$\mu = \mu_m \frac{S}{k_s + S + S^2/k_i} \quad (7)$$

donde:

$\mu$ : velocidad de crecimiento específico ( $d^{-1}$ )

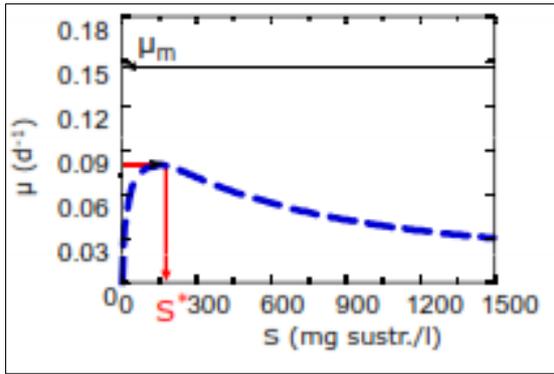
$\mu_m$ : velocidad máxima de crecimiento específico ( $d^{-1}$ )

S: concentración de sustrato limitante (mg sustrato/l)

$k_s$ : constante de semisaturación (mg sustrato/l)

$k_i$ : constante de inhibición (mg sustrato/l)

- Si  $S > S^* = \sqrt{k_s k_i} \rightarrow \mu \downarrow$



**Figura 8:** Limitación del sustrato con inhibición  
Fuente: Elaboración propia

En la figura 8 muestra la ecuación de Haldane o limitación del sustrato con inhibición. Esto representa que la velocidad del crecimiento microbiano es alta para bajas concentraciones del sustrato y baja para altas concentraciones de sustrato.

- ✓ Velocidad de desaparición de la biomasa. Incluye: mantenimiento celular, predación, muerte y lisis.

$$\frac{dX}{dt_{crec}} = -bX \quad (8)$$

donde:

b: coeficiente de desaparición de la biomasa ( $d^{-1}$ )

x: concentración de la biomasa activa (mg DQO/l)

- ✓ Velocidad neta de crecimiento

$$\frac{dX}{dt} = \frac{dX}{dt_{crec}} + \frac{dX}{dt_{desap}} = \mu_m \frac{S}{k_s + S} X - bX = \mu' X \quad (9)$$

Donde:

$\mu'$ : tasa neta de crecimiento específico ( $d^{-1}$ )

- ✓ Velocidad de crecimiento de las bacterias heterótrofas

$$r_{XH} = \frac{dX_H}{dt_{crec}} = \mu_{mH} \frac{S_S}{k_s + S_S} X_H \quad (10)$$

Donde:

$\mu_{mH}$ : velocidad de crecimiento máxima específica ( $d^{-1}$ )

$S_s$ : concentración de DQO soluble biodegradable (mg DQO/l)

$k_s$ : constante de semisaturación (mg DQO/l)

$X_H$ : concentración de bacterias heterótrofas (mg DQO/l)

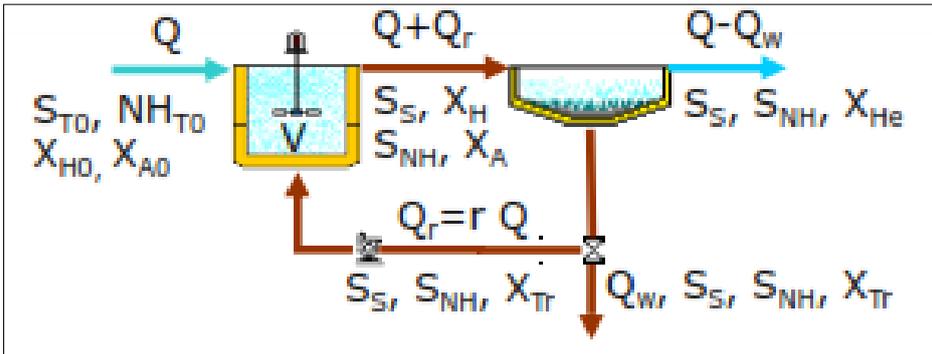
- ✓ Velocidad de consumo de DQO

$$r_s = \frac{dS_s}{dt_{crec}} = -\frac{\mu_{mH}}{Y_H} \frac{S_s}{k_s + S_s} X_H \quad (11)$$

donde:

$Y_H$ : coeficiente de producción máxima, masa de bacterias heterótrofos formadas por masa de DQO oxidada (g DQO biomasa/g DQO consumido)

### 2.12.1. Condiciones consideradas de los fangos activados para una mezcla completa en el tratamiento biológico.



**Figura 9:** Condiciones de los fangos para una mezcla completa en el proceso biológico.  
Fuente: Elaboración propia

Hipótesis de cálculo:

- No existen microorganismos en las aguas a tratar:  $X_{HO}=0$ ,  $X_{AO}=0$ .
- No se produce actividad biológica en el decantador y conducciones.
- El sustrato lentamente biodegradable se hidroliza totalmente a sustrato rápidamente biodegradable ( $S_s$ ).
- Se consigue la mezcla completa con la aireación.
- Se consiguen condiciones estables en todo el sistema.
- La eliminación de sustrato viene dada por:  $r_s = -\frac{\mu_m}{Y} \frac{S}{k_s + S} X$ .
- ✓ Tiempo de retención celular (TRC)  $\theta_c$ : DQO biodegradable soluble en el efluente

$$S_s \frac{k_s(\theta_c^{-1} + b_H)}{\mu_{mH} - (\theta_c^{-1} + b_H)} \quad (12)$$

- ✓ Producción de biomasa activa

$$Q \Delta X_H = \frac{V X_H}{\theta_c} = Q Y_H (S_{TO} - S_S) - b_H V X_H \quad (13)$$

$$V X_H = \frac{Q Y_H (S_{to} - S_S)}{\theta_c^{-1} + b_H} \quad (14)$$

$$Q\Delta X_H = \frac{VX_H}{\theta_c} \quad (15)$$

✓ Producción de biomasa inerte (debris)

$$Q\Delta X_{HI} = \frac{VX_{HI}}{\theta_c} = f_{DH}b_H VX_H \quad (16)$$

$$Q\Delta X_{HI} = f_{DA}b_A VX_A \quad (17)$$

✓ Biomasa producida

$$Q\Delta X = \frac{(1+\theta_c f_{DH}b_H)VX_H + (1+\theta_c f_{DA}b_A)VX_A}{\theta_c} \quad (18)$$

$$Q\Delta X = Q\Delta X_H + Q\Delta X_{HI} \quad (19)$$

✓ Producción de fangos totales expresados en DQO:

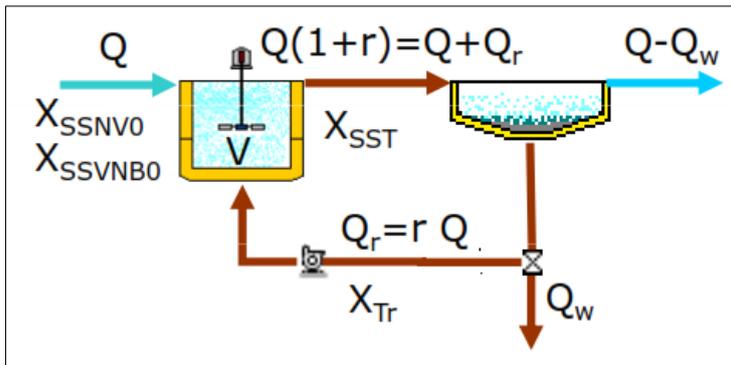
$$Q\Delta X_T = QX_{T0} + Q\Delta X \quad (20)$$

✓ Producción de fangos totales expresados en SST:

$$Q\Delta X_{SST} = QX_{SSNVO} + QX_{SSVNB0} + i_{SSTXI}(Q\Delta X_{AI} + Q\Delta X_{HI}) + i_{SSTBM}(Q\Delta X_A + Q\Delta X_H) \quad (21)$$

✓ Relación de recirculación:

$$r = \left(1 - \frac{\theta}{\theta_c}\right) \frac{X_{SST}}{X_{Tr} - X_{SST}} \quad (22)$$



**Figura 10:** Recirculación de fangos

Fuente: Elaboración propia

Balance SST: SST entrada – SST salida + Producción SST = 0

$$Q(X_{SSNVO} + X_{SSVNB0}) + rQX_{Tr} - (1+r)QX_{SST} + i_{TSSBM}(Q\Delta X_H + Q\Delta X_A) + i_{TSSXI}(Q\Delta X_{HI} + Q\Delta X_{AI}) = 0 \quad (23)$$

$$Q\Delta X_{SST} = Q(X_{SSNVO} + X_{SSVNB0}) + i_{TSSBM}(Q\Delta X_H + Q\Delta X_A) + i_{TSSXI}(Q\Delta X_{HI} + Q\Delta X_{AI}) \Rightarrow r \quad (24)$$

Las microbiologías heterótrofas son consideradas como principales organismos en los tratamientos biológicos, razón por la cual las fórmulas están considerando a las bacterias heterótrofas para la depuración de las aguas residuales. Las fórmulas fueron introducidos a al software para sus respectivas simulaciones.

### **2.12.2. Índice Volumétrico de Fangos (IVF).**

Por lo general los fangos son el tipo de lodo o sedimento acuoso en el que se concentran los sólidos sedimentados o decantados de agua bruta o de un reactor biológico.

Los fangos se clasificaron en dos procesos: fangos primarios que se obtiene de la decantación directa del agua bruta; mientras que los fangos secundarios se obtienen de la sedimentación de la mezcla del reactor biológico y están compuestas de la mayor parte por células depuradoras.

Los fangos primarios como secundarios contienen una elevada cantidad de agua superior al 95% y son putrescibles y los objetivos de su respectivo tratamiento son:

- Reducción del volumen mediante la eliminación del agua.
- Estabilizarlos para su posterior digestión.
- Obtener su fácil manejo y transporte.

En resumen, los tres objetivos corresponden a un adecuado tratamiento de los fangos con: espesamiento, la estabilización y la deshidratación.

#### **2.12.2.1. Método para determinar el IVF.**

Es el volumen (en ml) ocupado por 1 gramo de fango seco tras sedimentar 30 minutos en una probeta de 1 litro.

$$IVF = \frac{V_{30}}{X_{SST}} \quad (25)$$

donde:

$V_{30}$  = Volumen ocupado en 30 minutos de sedimentación

$X_{SST}$  = Cantidad de sólidos suspendidos totales

**Tabla 5:** Sedimentabilidad del fango de acuerdo al IVF

Sedimentabilidad	IVF	
	Rango	Típico
<b>Muy buena</b>	0 – 50	45
<b>Buena</b>	50 – 100	75
<b>Mediana</b>	100 – 200	150
<b>Pobre</b>	200 – 300	250
<b>Muy pobre</b>	300 – 400	350

Fuente: Tratamiento de Aguas Residuales; Ferrer Polo, 2007

### 2.12.3. Carga másica (Cm).

Se calculará la carga másica para obtener un resultado que este dentro del intervalo de Cm (tabla 6) y asegure una buena sedimentabilidad del fango. Para el cálculo se aplica la siguiente ecuación.

$$C_m = \frac{Q * DBO_5}{V * X_{SST}} \quad (26)$$

Se supone una relación DBO<sub>5</sub>/DQO de 0,6

Donde:

Q: Caudal (l/d)

DBO<sub>5</sub>: Demanda biológica de oxígeno (Kg /l) en 5 días

V: volumen (l)

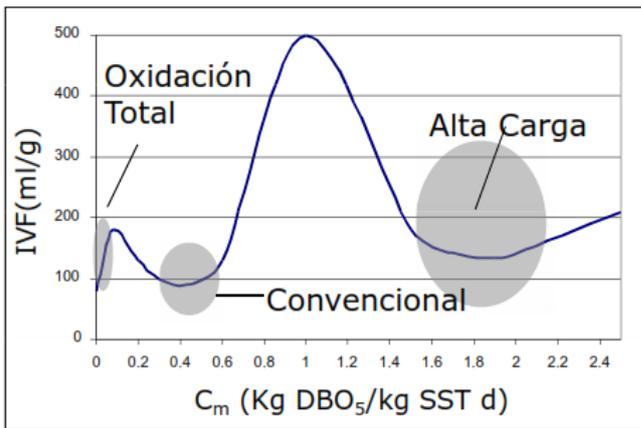
X<sub>SST</sub>: Sólidos suspendidos totales (Kg SST/l)

**Tabla 6:** Intervalos de Cm para una buena sedimentabilidad de aguas residuales urbanas

Proceso	Cm (kg DBO <sub>5</sub> / kg SST*día)		
	T<20°C	T=20°C	T>20°C
<b>Alta carga</b>	1,2 – 2,0	1,5 – 2,3	3,5 – 4,5
<b>Convencional</b>	0,15 – 0,40	0,2 – 0,45	0,25 – 0,6
<b>Oxidación total</b>	≤ 0,07	≤ 0,10	≤ 0,12

Fuente: Tratamiento de Aguas Residuales; Ferrer Polo, 2007

Una vez obtenido el IVF y la Cm según valores bibliográficos para que exista una buena sedimentabilidad debe de estar dentro de un intervalo de IVF ≤ 100 – 150 ml/g.



**Figura 11:** Relación IVF - Cm para una buena sedimentabilidad del fango en distintos procesos  
Fuente: Tratamiento de Aguas Residuales; Ferrer Polo, 2007

### 2.13. Sistema de depuración de agua residual

Depuración es el nombre que se les da a los distintos procesos implicados en la extracción, tratamiento y control sanitario de los productos de desecho, que se encuentran en el agua provenientes de una población o industria.

Las EDAR son las instalaciones dónde se les retiran los contaminantes para lograr obtener una calidad de agua sin riesgo a la salud humana y al medio ambiente, al ser vertidas a los cauces receptoras (lagos, ríos, mar) o reutilización para otras actividades. Se ha distinguido dos tipos de EDAR: las urbanas y las industriales.

No todas las EDAR cumplen las mismas funciones, se deberá definir los usos que van a tener los cauces que hará el vertido, así se podrá establecer las necesidades o situaciones críticas de los vertidos.

A pesar de que el diseño de las EDAR depende de los límites de vertido, existen esquemas típicos de tratamiento y solo se modificaran el tamaño o cantidad de unidades de tratamiento para aguas típicas residuales.



**Figura 12:** Esquema típico de planta de tratamiento de agua  
Fuente: Tratamiento de Aguas Residuales; Ferrer Polo, 2007

La figura 12 se muestra el esquema típico de EDAR para tratamiento de agua residual urbano. Presenta las diferentes fases del tratamiento del agua residual urbana: fase de pre-tratamiento, incluye las rejillas y el desarenador; fase del tratamiento primario consta de un decantador primario; fase del tratamiento secundario tiene relación con el tratamiento biológico; y, la fase del tratamiento terciario consiste en la desinfección del efluente antes de ser vertidos a los cauces receptores.

### 3. DESARROLLO

#### 3.1. Diseño del prototipo y adecuación del reactor biológico

En este espacio se describirá la metodología empleada para llevar a cabo la ejecución del estudio. La recolección de las aguas residuales se realizó en la provincia del Azuay, en la ciudad de Cuenca, en la “Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Ucubamba”; lugar donde se deposita toda el agua generada por la ciudad de Cuenca. Se tomó una muestra de agua pasado el pre-tratamiento de las aguas residuales donde quedan los residuos orgánicos e inorgánicos con mayor diámetro.

##### 3.1.1. Diseño y adecuación de la planta piloto.

El diseño de la planta piloto del reactor biológico se basa en un cubo rectangular con un volumen de 25 litros, el cual tiene las siguientes dimensiones:

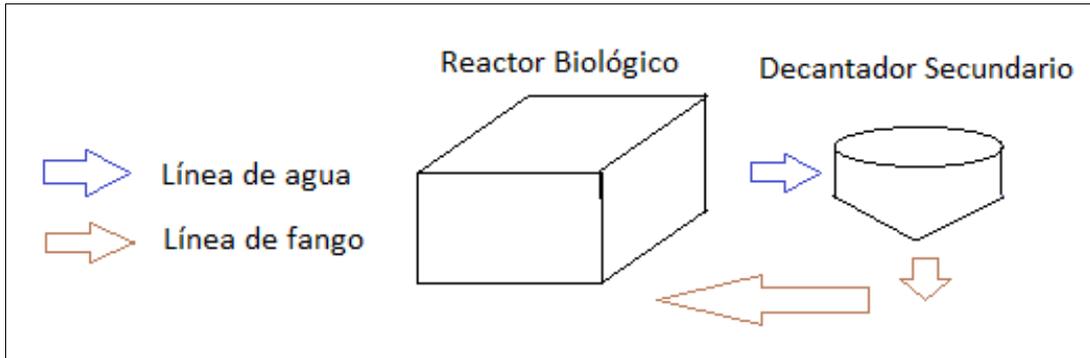
**Tabla 7:** Medidas del reactor biológico

MEDIDAS	
Largo (cm)	48,5
Ancho (cm)	23,5
Alto (cm)	30,7

Fuente: Elaboración propia

Al interior del reactor biológico se introducirán mangueras y estarán distribuidas en todo la parte baja del reactor. Con la ayuda de los motores que se encuentran en el reactor, generarán oxígeno para que sean introducidos al agua y ayude a la reproducción de los microorganismos. Los microorganismos utilizarán los contaminantes presentes en el agua como fuente de carbono y/o energía convirtiéndolos en nuevos microorganismos, dióxido de carbono y otros compuestos inocuos.

El reactor biológico contiene un decantador secundario. El agua residual estará en constante movimiento e iniciará desde el reactor biológico, pasará al decantador secundario y regresará al reactor mediante recirculación de los fangos activados. Se puede apreciar en la figura 13 el diseño del tratamiento biológico.



**Figura 13:** Diseño del tratamiento biológico  
Fuente: Elaboración propia

El diseño de la planta permite realizar la depuración del agua residual. El tiempo de retención hidráulico (TRH) es 5 h y el tiempo de retención celular (TRC) se analizará con los datos obtenidos en la experimentación. La purga diaria del fango se realiza en el decantador. En la figura 14 se puede observar la imagen real de la planta piloto.



**Figura 14:** Planta piloto del proceso biológico  
Fuente: Elaboración propia

### 3.2. Caracterización física – químico

La caracterización del agua residual se realizó utilizando el método físico – químico, implementando las técnicas propuestas en el Standard Method (Sthandard, 2010). Los parámetros realizados fueron: DBO<sub>5</sub>, DQO, OD, SS, pH y temperatura. En la tabla 8 se muestra los métodos y equipos empleados en la caracterización.

**Tabla 8:** Métodos y equipos empleados en la caracterización

Parámetro	Método estándar	Equipo
<b>Demanda biológica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>)</b>	Método manométrico	Controlador Oxitop – OC110
<b>Demanda química de oxígeno (DQO)</b>	Reflujo cerrado (método colorimétrico)	Espectroquant Pharo 300
<b>Sólidos suspendidos</b>	Gravimétrico	Horno 103 - 104 °C
<b>Oxígeno disuelto (OD)</b>	Método fotométrico	Analizador multiparamétrico
<b>Potencial de hidrógeno (pH)</b>		
<b>Temperatura (°C)</b>		

Fuente: Standard Method (2010)

### **3.2.1. Método para determinar la DBO.**

Para determinar la DBO del agua residual se mide la concentración inicial de oxígeno disuelto (OD) de la muestra, posteriormente se incuba a una temperatura de 20 °C y transcurrido un tiempo determinado se mide la concentración de OD. Se observará la disminución de la concentración de OD debido al metabolismo de la materia orgánica realizada por los microorganismos en el tiempo de incubación en el volumen de la muestra diluida y de este resultado se calcula la cantidad de oxígeno necesario para el tratamiento similar de un volumen normal no diluido.

### **3.2.2. Método para determinar la DQO.**

Para determinar la Demanda Química de Oxígeno generalmente se utiliza el dicromato de potasio ( $K_2Cr_2O_2$ ) en la muestra del agua residual en un volumen determinado con un pH > 7 y destilando a reflujo el sistema alrededor de 2 a 3 horas. El dicromato restante de la oxidación de la materia orgánica se analiza a través de un agente reductor, especialmente sulfato amoniacal ferroso. Con esto se podrá determinar si existió oxidación de la materia orgánica presente en la muestra, se determina entre la cantidad inicial de dicromato y la determinada por valoración.

En conclusión, la DQO es la cantidad de dicromato consumido expresado en mg/l de oxígeno presente en la disolución.

### **3.2.3. Método para determinar sólidos suspendidos.**

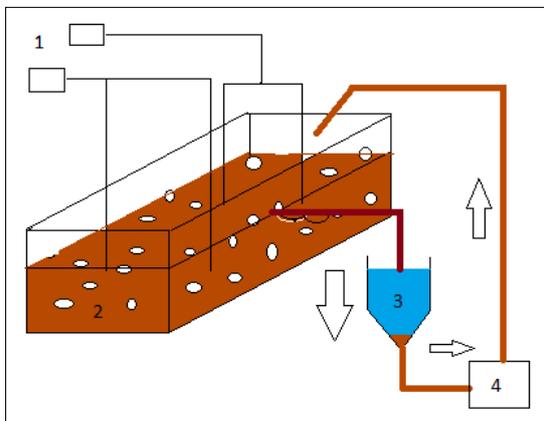
Es la cantidad de sólidos que quedan retenidos en un filtro con un tamaño de poro de 0,45 µm después de que haya sido evaporado el agua a una temperatura de 103 - 105 °C.

### 3.2.4. Método para determinar la temperatura, OD y pH.

El medidor multiparamétrico es ideal para mediciones de lagos, ríos y mares. Se caracteriza por ser resistente, impermeable y fácil de usar. Puede medir los parámetros de calidad de agua como: pH, conductividad, turbidez, temperatura, iones de amonio, nitrato, cloruro, oxígeno disuelto, resistividad, sólidos totales disueltos, salinidad y gravedad específica de agua de mar. Además, mide la presión atmosférica para compensar la concentración de oxígeno disuelto.

### 3.3. Descripción del sistema experimental

En la figura 15 se muestra el montaje experimental utilizado para llevar a cabo el análisis respirométrico del reactor biológico.



**Figura 15:** (1) motores de oxigenación; (2) reactor biológico discontinuo; (3) decantador secundario; (4) recirculación de fangos.

Fuente: Elaboración propia

El reactor se construyó en un material de vidrio con una capacidad máxima de 30 litros, pero se utilizará 25 litros de agua residual para el tratamiento. Para garantizar una mezcla continua del fango en toda el área del reactor se empleó dos soplores, y su distribución fue por medio de 4 difusores de burbuja fina que se instalaron en la parte interna inferior del reactor. Se ajustó la velocidad de ingreso de oxígeno al agua para evitar que no haya sedimentación o reaireación ocasionada por excesiva mezcla.

### 3.4. Tipos de investigación

El tipo de investigación es experimental ya que se realizaron varios ensayos variando condiciones físico – químicas, con la finalidad de comprobar y demostrar la cinética de degradación de la materia orgánica en zonas de altura.

### **3.5. Cinética de degradación de la materia orgánica del reactor biológico con fangos activados en zonas de altura**

Con los datos obtenidos en la experimentación del reactor biológico, se efectuará los cálculos para obtener la ecuación de la cinética de degradación de la materia orgánica.

La ecuación encontrada representa la cantidad de materia orgánica que se degrada en un determinado tiempo.

De las ecuaciones se obtuvo las cinéticas de degradación ( $k$ ), con la cinética se realizó datos simulados con cada una de las repeticiones del experimento teniendo en cuenta los días de tratamiento del agua residual.

Para que sea más fácil la interpretación de los resultados se normalizó (rango de 0 – 1) y se calculó la diferencia que existe entre los datos tomados en el experimento con los datos simulados. Las cinéticas que tengan diferencias mínimas, será la cinética de degradación de la materia orgánica del experimento.

### **3.6. Experimentación de parámetros para la simulación del tratamiento biológico extrapolables en zonas de altura**

El reactor biológico tuvo un volumen de 25 litros de agua residual en constante circulación. El proceso iniciará en el reactor biológico, pasará al decantador y mediante un motor recirculará los fangos al reactor para que continúe el proceso de la depuración.

Se caracterizó el agua residual a la entrada del reactor biológico, consecutivamente se tomará tres análisis de agua en un período de 12 días, los parámetros de DQO, DBO<sub>5</sub>, SS, pH, temperatura y OD; y, finalmente se tomará la última muestra del efluente en el decantador (48 días de tratamiento del agua). Con los datos obtenidos junto a las normas de calidad de agua del Ecuador se analizó si cumplen con los parámetros permisibles. Para determinar la eficiencia de los microorganismos en el agua residual se tomará cada 6 días el OD, temperatura y pH; esto ayudará a medir la cinética de depuración de las aguas residuales y la eficacia del reactor biológico.

### **3.7. Simulación de la planta piloto.**

En el desarrollo de la investigación se utilizará el software especializado como herramienta de simulación para representar el funcionamiento del tratamiento biológico de la nueva EDAR. Se introducirá las fórmulas mencionadas en el apartado 2.11., considerando las condiciones de los fangos activados en el reactor biológico escritos en el apartado 2.11.1.

Una de las modificaciones se orienta a la eliminación biológica de la materia orgánica, la simulación se llevará a cabo mediante oxidación total con reactores aerobios.

Como punto de partida a las simulaciones se tienen las concentraciones de entrada al sistema (DQO, DBO<sub>5</sub>, SS, pH, OD y temperatura). Una vez introducidos los datos y definido el esquema de tratamiento se procede a la simulación del programa, lo cual automáticamente realiza los cálculos pertinentes de cada una de las unidades de tratamiento. Las unidades del tratamiento secundario (reactor biológico y el decantador) son considerados los puntos claves de simulación en el tratamiento del agua residual, para obtener una buena calidad del efluente y fango estabilizado.

Aunque el software realiza automáticamente los cálculos, se puede realizar cambios por parte del usuario en el diseño, distribución del sistema, número de zonas (aerobias, anaerobias, anóxicas) y criterios de diseño (TRH, TRC). Además, permite modificar otros parámetros como volúmenes, caudales de entrada y recirculación, concentraciones de oxígeno, parámetros estequiométricos que son indispensables a la hora de diseñar y optimizar el funcionamiento de la EDAR.

### **3.8. Simulaciones del tratamiento biológico con fangos activados de aguas residuales urbana emplazadas en zonas de altura**

Mediante la utilización del software se llevó a cabo la simulación de los esquemas de tratamiento con el objetivo de predecir de una forma real el comportamiento de la EDAR en la depuración del agua residual. Los esquemas de tratamiento simulados se orientan principalmente en conseguir la eliminación de la materia orgánica. A continuación, se detalla los diferentes tipos de simulación que se va a emplear en el desarrollo de la investigación:

#### **3.8.1. Simulación con los datos obtenidos en la experimentación.**

En este proceso se elaborará la simulación con los datos obtenidos en la experimentación. Se determinará el funcionamiento del reactor biológico y la depuración del efluente antes de ser vertidos a los cauces receptores. Obtendremos el TRC (Tiempo de Retención Celular) que utilizó el experimento para la depuración del agua residual y la cinética de degradación de la materia orgánica.

#### **3.8.2. Simulación para la optimización del reactor biológico.**

En esta simulación se dará valores óptimos para una buena depuración de las aguas residuales emplazadas en zonas de altura. Se analizará el caudal de ingreso a la EDAR, la recirculación de los fangos activados, la velocidad de oxigenación del reactor y los volúmenes óptimos para el nuevo reactor junto a un decantador secundario. Se obtendrá la cantidad de energía necesaria para el funcionamiento de los sopladores y el número de decantadores secundarios para el funcionamiento. Se partirá con una población de 65.000 habitantes con un caudal promedio de 200 l/h.d. Tomaremos en consideración los enunciados de Ferrer Polo, dónde dice que las cantidades permisibles de sólidos totales en el reactor (3.500 mg SS/l)

para la depuración de las aguas residuales. Además, se considera un decantador primario en una planta de tratamiento de aguas residuales domésticas elimina un porcentaje de 60 - 65% de sólidos suspendidos presentes en el agua residual.

### **3.8.3. Simulación para la optimización del reactor biológico con una población aproximada dentro de 10 años.**

Con el paso del tiempo la población se va incrementando, consumen mayor cantidad de agua y en consecuencia generan mayor caudal de agua residual. Para realizar esta simulación se utilizará los mismos datos que la anterior simulación, pero en este caso se consideró a 80.000 habitantes aproximadamente, obtendremos el volumen necesario para el nuevo reactor junto al número de decantadores para la depuración del agua y, además con la ayuda de la hoja de cálculo se podrá obtener la cantidad de potencia que requiere los sopladores para introducir oxígeno al agua residual, el consumo energético y su valor monetario aproximado.

### **3.8.4. Simulación para la optimización del reactor biológico con una reducción del caudal de ingreso a la EDAR.**

Si una población deja de utilizar y/o desperdiciar el agua generaría menor caudal de ingreso a la EDAR y disminuiríamos la contaminación ambiental. El proceso del agua residual en la EDAR sería más rápido y mejor calidad del efluente, que serían destinadas a los cauces receptores. Para el desarrollo de la simulación disminuiríamos el caudal de ingreso de las aguas residuales, partiendo de los mismos datos que se han analizado y se obtendrá los nuevos datos para el diseño de la EDAR, dimensiones del reactor, número de decantadores, potencia de los sopladores de reoxigenación, consumo energético y valor monetario aproximado.

## 4. ANÁLISIS Y RESULTADOS

Durante el período del experimento se obtuvo los datos de la caracterización del afluente y efluente, el cual se resume en este apartado; además, se expone los datos simulados conseguidos en la hoja de cálculo.

### 4.1. Caracterización del afluente de la experimentación

Para conocer las características principales del afluente en el proceso del tratamiento del agua residual se han analizado los siguientes parámetros en base a la metodología descrita en el Capítulo II (Metodología): DBO<sub>5</sub>, DQO, SS, pH, T°, OD y NO<sub>3</sub>. Los resultados obtenidos del laboratorio en la experimentación se presentan en la tabla 9.

**Tabla 9:** Caracterización del afluente del tratamiento biológico

Parámetro	Valor medido	Unidad
DBO <sub>5</sub>	200	mg/l
DQO	350	mg/l
SS	182	mg/l
pH	7,5	
T°	19	°C
OD	2	mg/l
NO <sub>3</sub>	40,8	mg/l

Fuente: Elaboración propia

### 4.2. Caracterización del efluente de la experimentación

En este apartado se presenta los datos obtenidos en el laboratorio, el efluente del tratamiento biológico para observar la calidad del agua antes de ser vertidos a los cauces receptores.

En la experimentación se realizó seguimientos de comportamiento que presentaban las concentraciones de X<sub>SST</sub> en el reactor biológico y las concentraciones de DBO<sub>5</sub>, DQO, SS, pH, T°, OD y NO<sub>3</sub> a la salida del decantador secundario, cuyos resultados se detallan a continuación.

**Tabla 10:** Calidad de agua residual a la salida del decantador secundario

Parámetro	Valor medido	Unidad
<b>DBO<sub>5</sub></b>	30	mg/l
<b>DQO</b>	90	mg/l
<b>SS</b>	50	mg/l
<b>pH</b>	8,74	
<b>T°</b>	19	°C
<b>OD</b>	2	mg/l
<b>NO<sub>3</sub></b>	19,2	mg/l

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 10 se encuentra los resultados obtenidos a nivel del laboratorio. Con el volumen del reactor biológico de 25 litros que se utilizó para la depuración es posible la eliminación de la materia orgánica y los resultados obtenidos cumplen con los límites permisibles que rige nuestra ley (TULSMA) para el uso de riego.

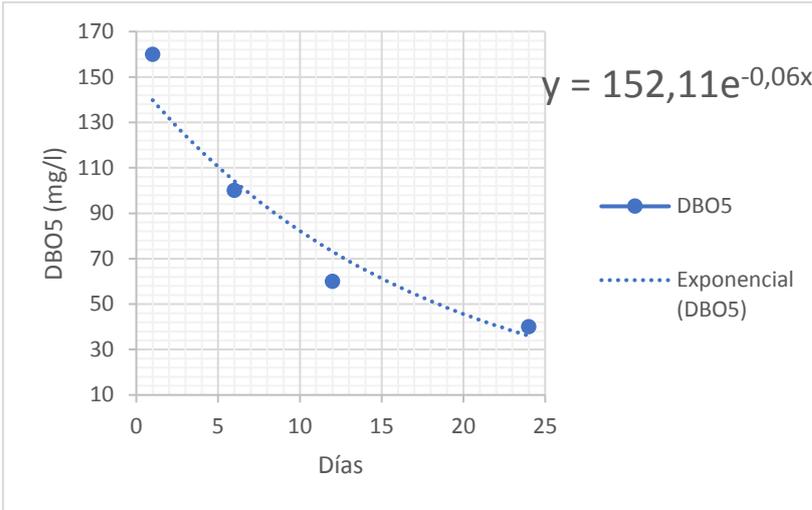
#### **4.3. Cinética de degradación de la materia orgánica en el experimento del reactor biológico con fangos activados en zonas de altura**

Para encontrar la cinética de degradación de la materia orgánica del experimento se realizó 3 repeticiones. En la primera repetición se observó que la degradación de la materia orgánica alcanzo los 12 días de tratamiento, días posteriores era nula o baja. A este resultado se le puede considerar como Tiempo de Retención Celular (TRC) por la degradación rápida de la materia orgánica. Para que sea verificable el TRC se realizó 2 repeticiones más y a continuación, se detalla los resultados obtenidos en cada una de las repeticiones.

**Tabla 11:** Resultados obtenidos de la repetición 1

Repetición 1	
Tiempo (días)	DBO <sub>5</sub> (mg/l)
<b>1</b>	160
<b>12</b>	60
<b>24</b>	40

Fuente: Elaboración propia



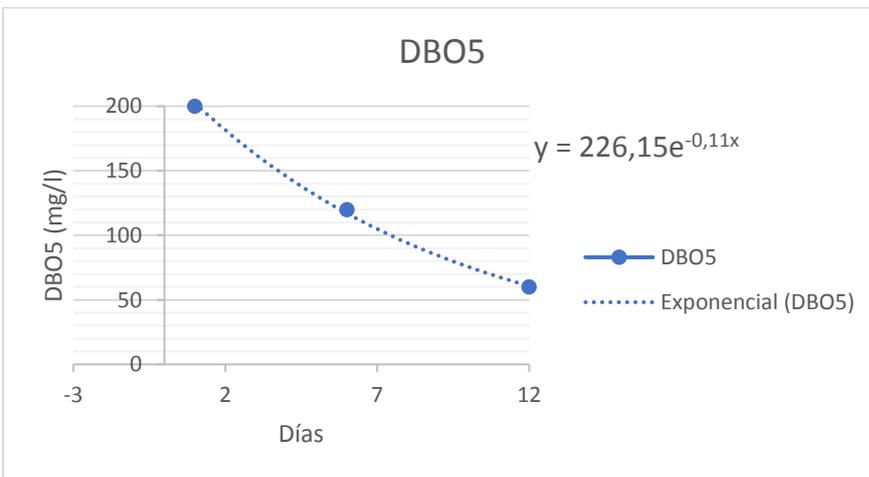
**Figura 16:** Cinética de degradación de la repetición 1  
Fuente: Elaboración propia

En la tabla 11 se muestra los datos de degradación de la materia orgánica con sus respectivos días y en la figura 16 se representa gráficamente la cinética de degradación de la materia orgánica que se obtuvo en la repetición 1 del experimento para interpretar fácilmente los resultados.

**Tabla 12:** Resultados obtenidos de la repetición 2

Repetición 2	
Tiempo (días)	DBO <sub>5</sub> (mg/l)
1	200
6	120
12	60

Fuente: Elaboración propia



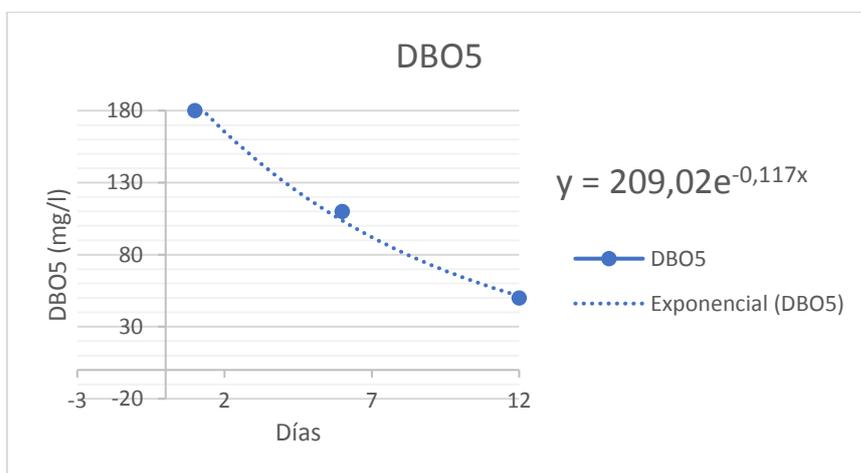
**Figura 17:** Cinética de degradación de la repetición 2  
Fuente: Elaboración propia

En la tabla 12 se muestra los datos de degradación de la materia orgánica con sus respectivos días y en la figura 17 se representa gráficamente la cinética de degradación de la materia orgánica que se obtuvo en la repetición 2 del experimento para interpretar fácilmente los resultados.

**Tabla 13:** Resultados obtenidos de la repetición 3

Repetición 3	
Tiempo (días)	DBO <sub>5</sub> (mg/l)
1	180
6	110
12	50

Fuente: Elaboración propia



**Figura 18:** Cinética de degradación de la repetición 3

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 13 se muestra los datos de degradación de la materia orgánica con sus respectivos días y en la figura 18 se representa gráficamente la cinética de degradación de la materia orgánica que se obtuvo en la repetición 3 del experimento para interpretar fácilmente los resultados.

Conseguido los datos y gráficas, obtenemos las ecuaciones de la degradación de la materia orgánica de cada una de las repeticiones. Cada repetición tiene una cinética de degradación (k) diferente, se busca encontrar la cinética (k) que se asemeja al experimento y de ahí partir la degradación de la materia orgánica emplazada en la ciudad de Cuenca.

**Tabla 14:** Rangos k de las repeticiones

Rangos k (d <sup>-1</sup> )	
<b>Repetición 1</b>	0,06
<b>Repetición 2</b>	0,11
<b>Repetición 3</b>	0,117

Fuente: Elaboración propia

Con los rangos de la cinética de degradación (k), se realizó una simulación de datos en cada una de las repeticiones partiendo de la ecuación que se encontró anteriormente y a continuación, se presenta los resultados obtenidos.

**Tabla 15:** Validación de la repetición 1

k		0,06	0,11	0,117
Repetición 1		Simulados	Simulados	Simulados
Tiempo (día)	DBO <sub>5</sub> (mg/l)	DBO <sub>5</sub> (mg/l)	DBO <sub>5</sub> (mg/l)	DBO <sub>5</sub> (mg/l)
<b>1</b>	160	160	160	160
<b>12</b>	60	74	41	37
<b>24</b>	40	36	11	9

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 16:** Validación de la repetición 2

k		0,06	0,11	0,117
Repetición 2		Simulados	Simulados	Simulados
Tiempo (día)	DBO <sub>5</sub> (mg/l)	DBO <sub>5</sub> (mg/l)	DBO <sub>5</sub> (mg/l)	DBO <sub>5</sub> (mg/l)
<b>1</b>	200	200	200	200
<b>6</b>	120	158	117	112
<b>12</b>	60	110	60	56

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 17:** Validación de la repetición 3

<b>k</b>		<b>0,06</b>	<b>0,11</b>	<b>0,117</b>
<b>Repetición 3</b>		<b>Simulados</b>	<b>Simulados</b>	<b>Simulados</b>
<b>Tiempo (día)</b>	<b>DBO<sub>5</sub> (mg/l)</b>	<b>DBO<sub>5</sub> (mg/l)</b>	<b>DBO<sub>5</sub> (mg/l)</b>	<b>DBO<sub>5</sub> (mg/l)</b>
<b>1</b>	180	180	180	180
<b>6</b>	110	146	108	104
<b>12</b>	50	102	56	51

Fuente: Elaboración propia

Los datos simulados que se obtuvieron en cada uno de las repeticiones se normalizó (rango de 0 – 1) para obtener valores pequeños y sea más fácil la interpretación de los datos.

**Tabla 18:** Datos normalizados de la repetición 1

<b>k</b>		<b>0,06</b>	<b>0,11</b>	<b>0,117</b>
<b>Repetición 1</b>		<b>Simulados</b>	<b>Simulados</b>	<b>Simulados</b>
<b>Tiempo (día)</b>	<b>DBO<sub>5</sub> (mg/l)</b>	<b>DBO<sub>5</sub> (mg/l)</b>	<b>DBO<sub>5</sub> (mg/l)</b>	<b>DBO<sub>5</sub> (mg/l)</b>
<b>1</b>	1	1	1	1
<b>12</b>	0,375	0,463	0,254	0,234
<b>24</b>	0,25	0,225	0,068	0,057

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 19:** Datos normalizados de la repetición 2

<b>k</b>		<b>0,06</b>	<b>0,11</b>	<b>0,117</b>
<b>Repetición 2</b>		<b>Simulados</b>	<b>Simulados</b>	<b>Simulados</b>
<b>Tiempo (día)</b>	<b>DBO<sub>5</sub> (mg/l)</b>	<b>DBO<sub>5</sub> (mg/l)</b>	<b>DBO<sub>5</sub> (mg/l)</b>	<b>DBO<sub>5</sub> (mg/l)</b>
<b>1</b>	1	1	1	1
<b>6</b>	0,6	0,789	0,584	0,56
<b>12</b>	0,3	0,55	0,302	0,278

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 20:** Datos normalizados de la repetición 3

<b>k</b>		<b>0,06</b>	<b>0,11</b>	<b>0,117</b>
<b>Repetición 3</b>		<b>Simulados</b>	<b>Simulados</b>	<b>Simulados</b>
<b>Tiempo (día)</b>	<b>DBO<sub>5</sub> (mg/l)</b>	<b>DBO<sub>5</sub> (mg/l)</b>	<b>DBO<sub>5</sub> (mg/l)</b>	<b>DBO<sub>5</sub> (mg/l)</b>
<b>1</b>	1	1	1	1
<b>6</b>	0,611	0,81	0,6	0,575
<b>12</b>	0,278	0,565	0,31	0,285

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 21 se observa la diferencia que existe entre los datos simulados y los datos del experimento. Con estos resultados se obtiene la cinética de degradación de la materia orgánica que se asemeja al experimento.

**Tabla 21:** Diferencias entre datos del experimento con los datos simulados

Día	k (cinética de degradación)			
	0,06	0,11	0,117	
6	0,189	0,016	0,04	Repetición 2
	0,199	0,011	0,036	Repetición 3
12	0,088	0,121	0,141	Repetición 1
	0,25	0,002	0,022	Repetición 2
	0,29	0,032	0,007	Repetición 3

Fuente: Elaboración propia

Culminado con los cálculos se concluye que la cinética de degradación es:  $k = 0,11 \text{ d}^{-1}$ ; esto representa la cinética de degradación de la materia orgánica del experimento. La cinética en zonas de altura es muy lenta, por lo que las condiciones del clima intervienen directamente con el desarrollo de los microorganismos para la depuración del agua residual.

$$y = 226,15e^{-0,11x} \quad (27)$$

La ecuación 27 representa la degradación de la materia orgánica del experimento en zonas de altura. Con esto se determina la cantidad de materia orgánica que se degrada en un tiempo determinado.

#### **4.4. Simulaciones del tratamiento biológico con fangos activados de aguas residuales urbanas emplazadas en zonas de altura**

##### **4.4.1. Simulación con los datos obtenidos en la experimentación.**

La simulación con los datos obtenidos en el experimento se obtiene las condiciones en las que depuró el agua residual, el comportamiento microbiano y el tiempo de degradación de la materia orgánica. En el experimento el TRC es de 12 días, días posteriores la degradación era mínima o nula.

Para realizar esta simulación, partimos con los datos que se obtuvo en el experimento y se presenta en la tabla 22.

**Tabla 22:** Datos obtenidos en la experimentación

Parámetro	Valor
Caudal (l/h.d.)	200
DBO <sub>lím</sub> (mg/l)	257
DBO <sub>5</sub> (mg/l)	200
DQO (mg/l)	350
Población	65000
Temperatura Agua (°C)	19
Oxígeno Disuelto (OD)	2
Tiempo de retención celular (días)	12
Sólidos en el reactor $X_{sst}$ (mg SS/l)	750

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 23:** Características del reactor biológico

REACTOR BIOLÓGICO	
Volumen (m <sup>3</sup> )	45854
Relación de recirculación (r)	0,085

Fuente: Elaboración propia

En la simulación se consideró una población de 65.000 habitantes y se obtienen los resultados que se presentan en la tabla 23. Se presenta el volumen del reactor biológico que se requiere para el tratamiento del agua residual y la relación de recirculación que debería tener para que los sólidos totales suspendidos, que se acumula en el decantador recirculen al reactor y continúe su tratamiento.

En el experimento la relación de recirculación de los fangos activados es baja, por las cantidades bajas de sólidos suspendidos en el reactor biológico. La recirculación depende directamente de los fangos que se encuentran en el reactor biológico. En conclusión, menores cantidades de fangos será menor recirculación.

#### **4.4.2. Simulación para la optimización del reactor biológico.**

Para el desarrollo de esta simulación se tomó como referencia al autor Ferrer Polo, la cantidad mínima de sólidos suspendidos en el reactor (3.500 mg SS/l) para un adecuado tratamiento biológico de las aguas residuales con fangos activados.

En la tabla 24 se puede apreciar los datos que se consideró para la simulación en el programa y obtener la optimización del reactor biológico. Consideramos un caudal promedio de ingreso a la EDAR y la temperatura del agua in situ para obtener resultados con mayor grado de precisión a nuestro medio.

**Tabla 24:** Datos para la simulación del reactor biológico

Parámetro	Valor
Caudal (l/h.d.)	200
DBO <sub>lím</sub> (mg/l)	257
DBO <sub>5</sub> (mg/l)	200
DQO (mg/l)	350
Población	65000
Temperatura Agua (°C)	17
Oxígeno Disuelto (OD)	2
Tiempo de retención celular (días)	12
Sólidos en el reactor X <sub>sst</sub> (mg SS/l)	3500

Fuente: Elaboración propia

En la simulación se tomó en consideración un decantador primario, el cual el autor Ferrer Polo José describe: “..... que un decantador primario en una planta de tratamiento de aguas residuales domésticas elimina un porcentaje de 60 - 65% de sólidos suspendidos presentes en el agua residual...”.

En base a esta consideración se obtiene los siguientes resultados que se puede observar a continuación.

**Tabla 25:** Características del reactor biológico

REACTOR BIOLÓGICO	
Volumen (m <sup>3</sup> )	4067
Relación de recirculación (r)	0,974

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 26:** Dimesiones para el decantador secundario

DECANTADOR SECUNDARIO	
Área para cubrir carga superficial (m <sup>2</sup> )	1083,33
Dimensiones Decantador	
Diámetro (m)	21,44
Altura (m)	3,61
Volumen (m <sup>3</sup> )	1305,3

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 27:** Aireación para el tratamiento biológico

<b>AIREACIÓN TRATAMIENTO BIOLÓGICO</b>	
<b>P (kw/tanque)</b>	23,37
<b>Consumo Energético</b>	560,97
<b>Valor (\$)</b>	793,21

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 25 se encuentra el volumen que se requiere en el reactor biológico para el tratamiento de las aguas residuales, y la relación de recirculación de los sólidos suspendidos totales, desde el decantador secundario hacia el reactor. En la simulación se considera mayor cantidad de sólidos en el reactor, en consecuencia, será mayor la recirculación de los fangos activados.

Por lo general en una planta de tratamiento un reactor biológico debe ir acompañado de un decantador; por lo tanto, se tuvo que realizar los cálculos para encontrar las dimensiones adecuadas al diseño del reactor biológico. En la tabla 26 se observa las dimensiones del decantador, y para poder cubrir la carga superficial generada por el reactor biológico se debe aplicar tres decantadores con las mismas dimensiones ya que es un valor alto. Para realizar los cálculos de los decantadores se basará en los criterios de calado planteados por la United States Environmental Protection Agency, ((EPA), 2015).

**Tabla 28:** Criterios EPA para la determinación de calado

<b>Criterios EPA para la determinación de calado</b>		
<b>Diámetro (m)</b>	<b>Calado recomendado (m)</b>	<b>Calado mínimo (m)</b>
<b>&lt; 12</b>	3,3	3
<b>12 – 21</b>	3,6	3,3
<b>21 - 30</b>	3,9	3,6
<b>31 – 42</b>	4,2	3,9
<b>&gt; 42</b>	4,5	4,2

Fuente: Elaboración propia

Además, para el funcionamiento de los sopladores del reactor biológico requieren de consumo energético, y se realizó los cálculos correspondientes para presentar los valores estimados. En la tabla 27 está la potencia que requiere los sopladores, el consumo energético y el valor monetario que se gastaría diariamente para el funcionamiento del mismo.

#### 4.4.3. Simulación para la optimización del reactor biológico con una población aproximada dentro de 10 años.

En la anterior simulación (apartado 4.4.2.) se estimó una población de 65.000 habitantes. Dado que con el paso del tiempo se va incrementando la población, se realizó una nueva simulación incrementando la población aproximada dentro de 10 años a 80.000 habitantes. La finalidad de esta simulación es obtener los nuevos cambios que ocurre con el volumen del reactor biológico, decantadores y consumo energético para el tratamiento del agua residual.

**Tabla 29:** Datos para la simulación del reactor biológico (80000 hab)

Parámetro	Valor
Caudal (l/h.d.)	200
DBO <sub>lim</sub> (mg/l)	257
DBO <sub>5</sub> (mg/l)	200
DQO (mg/l)	350
Población	80000
Temperatura Agua (°C)	17
Oxígeno Disuelto (OD)	2
Tiempo de retención celular (días)	12
Sólidos en el reactor X <sub>sst</sub> (mg SS/l)	3500

Fuente: Elaboración propia

Como se mencionó anteriormente en el apartado 4.4.2., se utilizará la misma definición de José Ferrer Polo, los sólidos suspendidos totales presentes en el reactor (3.500 mg SS/l) y el decantador primario retendrá del 60 – 65 % de los sólidos suspendidos totales y consecutivamente pasará al reactor biológico para su respectivo tratamiento.

Culminada la simulación se obtiene los siguientes resultados:

**Tabla 30:** Características del reactor biológico

REACTOR BIOLÓGICO	
Volumen (m <sup>3</sup> )	5006
Relación de recirculación (r)	0,974

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 31:** Dimensiones para el decantador secundario

<b>DECANTADOR SECUNDARIO</b>	
<b>Área para cubrir carga superficial (m<sup>2</sup>)</b>	1333,33
<b>Dimensiones Decantador</b>	
<b>Diámetro (m)</b>	23,79
<b>Altura (m)</b>	3,69
<b>Volumen (m<sup>3</sup>)</b>	1641,31

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 32:** Aireación para el tratamiento biológico

<b>AIREACIÓN TRATAMIENTO BIOLÓGICO</b>	
<b>P (kw/tanque)</b>	30,06
<b>Consumo Energético</b>	721,47
<b>Valor (\$)</b>	1020,15

Fuente: Elaboración propia

Como se incrementó la población a 80.000 habitantes aumentó el volumen del reactor biológico. Mayor cantidad de población existe mayor consumo de agua y en consecuencia generará mayor caudal de agua residual. La relación de recirculación se mantendrá la misma que la simulación anterior ya que solo depende de los sólidos suspendidos que se encuentra en el reactor (tabla 30).

A mayor cantidad de volumen de agua residual en el reactor será mayor el área para cubrir la carga superficial de los decantadores generados por los fangos activados; entonces, requieren de mayor volumen para su tratamiento biológico. En la tabla 31 presenta los nuevos valores para el decantador y está diseñado para tres decantadores, así tendrán menos volumen cada decantador y puedan realizar con mayor facilidad su respectivo tratamiento.

Se calculó en el programa los valores del consumo energético que se utilizará diariamente para el funcionamiento, la potencia de energía necesaria para la aireación en el reactor y el costo monetario aproximado que se gastaría diariamente (tabla 32).

#### **4.4.4. Simulación para la optimización del reactor biológico con una reducción del caudal de ingreso a la EDAR).**

Para el desarrollo de la simulación serán considerados los mismos datos que el apartado anterior, solo que, en este caso se reducirá el caudal de ingreso a la EDAR a la mitad, y en la tabla 33 se encuentran los valores ingresados en el programa para los respectivos cálculos.

**Tabla 33:** Datos para la simulación del reactor biológico (Q: 100 l/h.d.)

Parámetro	Valor
Caudal (l/h.d.)	100
DBO <sub>lím</sub> (mg/l)	257
DBO <sub>5</sub> (mg/l)	200
DQO (mg/l)	350
Población	65000
Temperatura Agua (°C)	17
Oxígeno Disuelto (OD)	2
Tiempo de retención celular (días)	12
Sólidos en el reactor X <sub>sst</sub> (mg SS/l)	3500

Fuente: Elaboración propia

En esta simulación serán considerados las definiciones de José Ferrer Polo, decantador primario (retención 60 – 65% sólidos) y el número de sólidos presentes en el reactor (3.500 mg SS/l). A continuación, se obtiene los siguientes resultados.

**Tabla 34:** Características del reactor biológico

REACTOR BIOLÓGICO	
Volumen (m <sup>3</sup> )	2034
Relación de recirculación (r)	0,974

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 35:** Dimensiones para el decantador secundario

DECANTADOR SECUNDARIO	
Área para cubrir carga superficial (m <sup>2</sup> )	550,58
<b>Dimensiones Decantador</b>	
Diámetro (m)	18,72
Altura (m)	3,52
Volumen (m <sup>3</sup> )	970,14

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 36:** Aireación para el tratamiento biológico

<b>AIREACIÓN TRATAMIENTO BIOLÓGICO</b>	
<b>P (kw/tanque)</b>	8,57
<b>Consumo Energético</b>	205,79
<b>Valor (\$)</b>	290,98

Fuente: Elaboración propia

Como se disminuyó el caudal de ingreso a la EDAR a la mitad, la producción del agua residual será menor. En la tabla 34 muestra la cantidad de volumen del reactor, la recirculación es la misma que las anteriores simulaciones, porque dependen de los fangos que se encuentran en el reactor biológico (3500 mg SS/l).

Como es menor el volumen del reactor biológico será menor la carga superficial para los decantadores. Los resultados obtenidos del diseño del decantador (tabla 35) se puede distribuir el volumen de agua a dos decantadores y así tendrá mayor facilidad de tratamiento de agua residual.

En consecuencia, menor volumen de agua residual en el reactor será menor consumo energético. No requiere de grandes potencias de energía, el valor monetario que se invierte diariamente para el funcionamiento de los sopladores es accesible para gastos en una EDAR. Los resultados obtenidos se encuentran en la tabla 36.

#### **4.5. Discusión y resultados**

En base a los resultados obtenidos mediante la experimentación y el programa de simulación, se puede concluir que:

- ✓ El Tiempo de Retención Celular (TRC) fueron de 12 días de tratamiento del agua residual por el rápido consumo de materia orgánica en el afluente, posterior a ello la degradación es lenta o nula por la escasez de materia orgánica; se obtiene una cinética lenta de degradación de la materia orgánica en el experimento en zonas de altura ( $k = 0,11 \text{ d}^{-1}$ ), la temperatura interviene directamente con el consumo y desarrollo de los microorganismos para la depuración del agua residual; y, la calidad de agua del efluente del experimento cumple con los límites permisibles de agua para uso de riego de acuerdo al TULSMA.
- ✓ En la simulación del experimento se obtiene las dimensiones de la infraestructura para el diseño de una EDAR. Se obtiene dimensiones grandes por la utilización de cantidades bajas de sólidos suspendidos totales en el reactor ( $X_{\text{SST}}$ ), lo que origina más tiempo la retención del agua residual en el reactor biológico para su tratamiento.

- ✓ Para optimizar el reactor biológico se tomó en consideración el enunciado de Ferrer Polo ( $X_{SST} = 3500 \text{ mg/l}$ ) y los resultados obtenidos representan la infraestructura para el diseño de una EDAR. Para obtener estos resultados se utiliza mayor cantidad de sólidos en el reactor, entonces aumentará la cinética de degradación de la materia orgánica, y origina menor tiempo de retención del agua residual en el reactor biológico para el tratamiento.
- ✓ Con el paso del tiempo la población aumenta su densidad, genera mayores volúmenes de agua residual y ocasiona diseñar nuevas dimensiones de la infraestructura para los procesos del tratamiento biológico de una EDAR. En la simulación se obtuvo grandes dimensiones de la infraestructura y esto ocasiona la dificultad de operación y mantenimiento por los altos costos económicos.

## CONCLUSIONES

- ❖ Se caracterizó la calidad de agua durante la depuración en la planta piloto propuesta y se obtuvo un crecimiento lento de los microorganismos ocasionado por la temperatura. La temperatura interfiere directamente con el crecimiento de los microorganismos, temperaturas altas genera el crecimiento rápido y temperaturas bajas será el crecimiento lento.
- ❖ Se cuantificó experimentalmente la cinética de degradación de la materia orgánica considerando los parámetros oxígeno disuelto, temperatura y pH; y se obtuvo como resultado una cinética lenta ( $k = 0,11 \text{ d}^{-1}$ ) debido a las bajas temperaturas ambientales de la zona de estudio. Además, se obtuvo los parámetros estequiométricos (DBO, DQO, sólidos suspendidos, oxígeno disuelto pH y temperatura) para observar la calidad del afluente y efluente en la planta piloto. Obtenidos los datos se procedió a la simulación en el programa especializado y se obtuvo como resultado que la calidad de agua cumple con los límites permisibles que rige la normativa vigente del país.
- ❖ Con los datos de los parámetros obtenidos en el experimento aplicado en la planta piloto se procedió la simulación, pero considerando las condiciones para una buena depuración de agua residual urbana (decantador primario retiene 60 – 65 % de sólidos y  $X_{\text{SST}} = 3.500 \text{ mg SS/l}$ ) y se obtuvo como resultado las condiciones adecuadas para el diseño de una nueva EDAR en los procesos biológicos.

## RECOMENDACIONES

- En los sistemas a escala prototipo y laboratorio se debe dar seguimiento constantemente al estado de las mangueras y otras conexiones, pues las mismas deben de estar siempre limpias para que el proceso se mantenga eficiente.
- Utilizar motores con reguladores de la velocidad de oxigenación, para controlar el crecimiento y muerte de los microorganismos presentes en el agua residual. La cantidad de oxígeno presente en el agua depende de la cinética de degradación de la materia orgánica.
- Al final de cada experimentación se recomienda hacer una limpieza íntegra de los equipos utilizados, principalmente se debe hacer una limpieza del equipo, de las mangueras y difusores que están dentro del reactor, de ser el caso cambiarlas si están defectuosas.
- Se recomienda escalar este prototipo a una planta piloto para observar si a condiciones reales el sistema mantiene su eficiencia.
- Determinar la eficiencia de esta tecnología en aguas que contienen metales pesados.
- Realizar los estudios de esta tecnología en una empresa para establecer los factores positivos de este prototipo.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- (EPA), U. S. (21 de Septiembre de 2015). *Tratamiento de Aguas Residuales*. Obtenido de <https://www.epa.gov/>
- (MAE), M. d. (2015). Texto Unificado de Legislación Medio Ambiental. Quito, Pichincha, Ecuador.
- Clavijo Campos, G. (27 de 03 de 2011). La mejor Agua del Ecuador. *EL MERCURIO*.
- Cruz, C. A., Fajardo, A. M., & Ramírez, J. S. (2015). Software de Ingeniería especializado en el diseño y simulación de plantas de tratamiento de agua residual.
- Díaz, J. D. (2003). Investigación sobre el efecto de la temperatura en los procesos biológicos. Madrid, España.
- Dimocka, R., & Eberhard, M. (2006). The influence of particle size on microbial hydrolysis of protein particles in activated sludge. *Wat. Res*, 40, 2064-2074.
- Dold, P. L., Ekana, G. A., & Marais, G. V. (1980). A General model for the activated sludge process. *Prog. Wat. Technology*, 47 - 77.
- Ekana, G. A., Dold, P. L., & Marais, G. (s.f.). Procedures for determinig influent COD fraction and the maximum specific growth rate of heterotrophs in activated sludge system. 18, 91 - 114. *Wat. Sci. Tech.*
- Espinoza Rodriguez, M., Flores Álamo, N., & Esparza Soto, M. (2012). Efecto de la temperatura en la tasa de crecimiento y decaimiento heterotrófico en el rango de 20-32 °C en un proceso de lodos activados. 11(2).
- Estrada, C. V. (Diciembre de 2010). Comportamiento del rendimiento de las bacterias heterótrofas YH con la variación de la relación  $S_0/X_0$  en un reactor con flujo discontinuo a escala laboratorio. Valencia, Valencia, España.
- Ferrer Polo, J., & Secos Torrecilla, A. (2003). *Tratamientos Biológicos de Aguas Residuales*. Valencia: UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA.
- Gálvez, J. O. (2011). *Cartilla Técnica: Ciclo Hidrológico*. Lima-Perú: Sociedad Geográfica de Lima.
- HenryK, M., Peter, D., Richard, J., Christopher, B., & Imre, T. (2003). Methods for Wastewater Characterization in Activated Sludge Modelling. *Water Enviroment Research Foundation*. IWA Publishing.

- Henze, M., Gujer, W., Mino, T., & Loosdrecht, M. (2000). Activated Sludge Models ASM1, ASM2 ASM2d and ASM3. IWA Scientific and Technical.
- Metcalf, & Eddy. (1995). Ingeniería de Aguas Residuales. *Tratamiento, vertido y reutilización*. Mc Graw Hill.
- Ordóñez Gálvez, J. J. (2010). *Sociedad Geográfica de Lima*. Lima.
- Orhon, D., & Diden, O. (2003). Respirometric assessment of residual organic matter for domestic sewage. *Enzyme and Microbial Technology*, 32, 560 - 566.
- Orhon, D., & Emine, U. C. (1997). COD Fractionation in wastewater characterization - The state of the art. *J.Chem.Tech.Biotechnol.* 68, 283 - 293.
- Ramalho, R. S. (2010). *Tratamiento de Aguas Residuales*. España: Reverte.
- Sollfrank, U., & Gujer, W. (1991). Characterization of domestic wastewater for modeling of the activated sludge process. 1057 - 1066.
- Sperandio, M., & Paul, E. (2000). Estimation of wastewater biodegradable COD fractions by combining respirometric experiments in various  $S_o/X_o$  ratios. *Water Res*, 34, 1233-1246.
- Sthandard, M. (2010). For the determination of water & wastewater. Centennial Edition.
- Vásquez Morera, T., Alfaro Solís, R., Sibaja Brenes, J. P., Esquivel Hernández, G., & Váldez González, J. (2012). Composición química del Agua. *Uniciencia*, 51 - 63.
- Velez Estrada, C. (2009). Comportamiento del rendimiento de las bacterias heterótrofas Yh con la variación de la relación  $S_o/X_o$  en un reactor a escala laboratorio. Valencia.
- Vollertsen, J., & Hvitved-Jacobsen, T. (1999). Stoichiometric and kinetic model parameters for microbial transformations of suspended solid in combined sewer system. *Waster Res*, 3127-3141.
- Wang, L. K., & Pereira, N. C. (2012). *Environmental Engineering* (Vol. 3). New Jersey: Library of Congress Cataloging in Publication Data.
- Wentzel, M. C., Mbewe, A., & Ekana, G. A. (1995). Batch test for measurement of readily biodegradable COD and active organism concentration in municipal waste waters. 21. Water SA.

### **Anexo 1:** Lista de acrónimos

DQO: Demanda Química de Oxígeno

DBO<sub>1m</sub>: Demanda Biológica de Oxígeno medida a los veinte días

DBO<sub>5</sub>: Demanda Biológica de Oxígeno medida a los cinco días

SS: Sólidos Suspendidos

pH: Potencial de Hidrógeno

OD: Oxígeno Disuelto

T°: Temperatura

X<sub>SST</sub>: Sólidos Suspendidos Totales

C<sub>m</sub>: Carga Másica

EDAR: Estación Depuradora de Aguas Residuales

TRC: Tiempo de Retención Celular

TRH: Tiempo de Retención Hidráulico

TULSMA: Texto Unificado de Legislación Secundario del Ministerio del Ambiente

## Anexo 2: Materiales y equipos utilizados

a) Prototipo del reactor biológico



b) Tratamiento del agua residual en el reactor biológico



c) Horno Gravimétrico



d) Deseccador



e) Analizador multiparámetro



f) Espectroquant Pharo 300



g) Balanza

