



**ESPE**

**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS**  
**INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA**

**VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN, INNOVACIÓN Y  
TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍA**

**CENTRO DE POSGRADOS MAESTRÍA EN SISTEMAS DE GESTIÓN  
AMBIENTAL**

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL  
TÍTULO DE MAGISTER EN SISTEMAS DE GESTIÓN AMBIENTAL**

**TEMA: “DISEÑO DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS  
RESIDUALES DOMÉSTICAS A PARTIR DE UN SISTEMA PILOTO A  
SER INSTALADO EN LA PARROQUIA PIFO, BARRIO EL BELÉN”**

**AUTORA: ALBUJA YÁNEZ, ROSA FABIOLA**

**DIRECTOR: ING. CARRERA VILLACRÉS, DAVID VINICIO Ph.D**

**SANGOLQUÍ**

**2019**

**CERTIFICACIÓN****VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN, INNOVACIÓN Y  
TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍA****CENTRO DE POSGRADOS****CERTIFICACIÓN**

Certifico que el trabajo de titulación, **“DISEÑO DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS A PARTIR DE UN SISTEMA PILOTO A SER INSTALADO EN LA PARROQUIA PIFO, BARRIO EL BELÉN”** fue realizado por la señora **Albuja Yánez Rosa Fabiola**, el mismo que ha sido revisado en su totalidad y analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto me permito acreditarlo y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, octubre del 2019

ING. CARRERA VILLACRÉS, DAVID VINICIO Ph.D

CC:1712218518

**DIRECTOR**

**AUTORIA DE RESPONSABILIDAD****VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN, INNOVACIÓN Y  
TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍA****CENTRO DE POSGRADOS****AUTORIA DE RESPONSABILIDAD**

Yo, **Albuja Yánez Rosa Fabiola**, con cédula de ciudadanía N° 1710517978, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación **“DISEÑO DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS A PARTIR DE UN SISTEMA PILOTO A SER INSTALADO EN LA PARROQUIA PIFO, BARRIO EL BELÉN”** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Sangolquí, octubre del 2019

---

**Rosa Fabiola Albuja Yánez**

C.C: 1710517978

**AUTORIZACIÓN****VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN, INNOVACIÓN Y  
TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍA****CENTRO DE POSGRADOS****AUTORIZACIÓN**

Yo, **Rosa Fabiola Albuja Yánez**, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación **“DISEÑO DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS A PARTIR DE UN SISTEMA PILOTO A SER INSTALADO EN LA PARROQUIA PIFO, BARRIO EL BELÉN”** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad

Sangolquí, octubre del 2019

**Rosa Fabiola Albuja Yánez**

C.C: 1710517978

## **DEDICATORIA**

A mi Jesús que este trabajo sirva para Gloria de Su Nombre.

A mis hijos Samanta y José David el regalo más hermoso que Dios me dio. Ustedes son el motor que me impulsa a seguir. Los amo tanto.

A mis padres Carlos y Susana son una bendición en mi vida.

A todo aquel que quiera aprender del apasionante mundo de la biorremediación. Espero que esta investigación sirva de guía y contribuya para el cuidado del agua.

## AGRADECIMIENTO

En primer lugar a Dios por darme salud, fuerza, y sabiduría en cada paso que he dado en esta nueva meta.

A mi familia Albuja Yáñez, especialmente a mi papá Carlos Albuja por estar siempre a mi lado, por guiarme y enseñarme que quien persevera alcanza. Y a mi hermana Vanesita por cuidar con amor de mis pequeños cada vez que necesito.

A José Vaca por haberme acompañado cada fin de semana para controlar el sistema piloto.

A la empresa HIDROAMBIENTAL CIA. LTDA. Y sus colaboradores, la Ing. Gabriela Morales, el Ing. Diego Jarrín, al Sr. Raúl Guasti, al Sr. Andrés Tinizaray, y al Sr. Eduardo Moncayo, por contribuir con la recopilación de la información.

A la Ing. Karina Steal encargada del laboratorio del CENCINAT por permitir realizar los análisis de laboratorio.

Al presidente de la Junta Parroquial Sr. Sergio Peña por permitir la instalación del sistema de tratamiento en el terreno de su papá el Sr. Pedro Peña.

Al Ing. David Carrera (Phd) y la Ing. Rosa Díaz por su valioso aporte para el desarrollo de la presente investigación.

A mis amigos por su apoyo incondicional, por estar siempre presente cuando necesito de una palabra de aliento, de un consejo e incluso cuando me reprenden.

Gracias mil a todos.

**Rosa Fabiola Albuja Yáñez**

## INDICE DE CONTENIDOS

PORTADA	
CERTIFICACIÓN .....	i
AUTORIA DE RESPONSABILIDAD.....	ii
AUTORIZACIÓN.....	iii
DEDICATORIA.....	iv
AGRADECIMIENTO.....	v
INDICE DE CONTENIDOS .....	vi
ÍNDICE DE TABLAS .....	xi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xiii
RESUMEN.....	xiv
ABSTRACT .....	xv
CAPÍTULO 1	
INTRODUCCIÓN	
1.1 Desarrollo del problema.....	1
1.2 Planteamiento del problema.....	2
1.3 Justificación e importancia.....	4
1.4 Objetivos.....	7
1.4.1 Objetivo general .....	7
1.4.2 Objetivos específicos.....	7
1.5 Hipótesis o interrogantes .....	8
CAPÍTULO 2	
MARCO TEÓRICO	
2.1 Marco legal.....	9

2.2 Contaminación de ríos.....	13
2.3 Contaminación urbana.....	14
2.4 Agua residual doméstica .....	15
2.5 Calidad y flujo del agua residual doméstica.....	15
2.6 Tratamiento de efluentes domésticos .....	16
2.7 Tratamiento biológico aerobio .....	16
2.8 Tratamiento biológico anaerobio.....	18
2.9 Sedimentación secundaria .....	20
2.10 Lechos de secado de lodos .....	21
2.11 Sistemas piloto .....	21
2.12 Escalamiento.....	22

### CAPÍTULO 3

#### MATERIALES Y METODOS

3.1 Localización geográfica del proyecto.....	24
3.2 Muestreo.....	27
3.3 Medición de caudal.....	29
3.4 Encuesta hidrosanitaria.....	29
3.5 Diseño e implementación del sistema piloto.....	30
3.5.1 Bombeo y captación de agua del colector .....	30
3.5.2 Homogenización.....	31
3.5.3 Biodigestión anaerobia .....	31
3.5.4 Sedimentación .....	32
3.5.5 Filtración .....	32
3.5.6 Adsorción de carbón activado .....	32

3.5.7 Desinfección con cloro .....	32
3.5.8 Lecho de secado de lodos .....	33
3.5.9 Implementación del sistema a escala piloto .....	33
3.5.10 Flujo.....	34
3.5.11 Puesta en marcha .....	34
3.5.12 Operación y monitoreo .....	35
3.6 Calidad del agua .....	36
3.7 Diseño experimental .....	37
3.7.1 Factor controlable .....	37
3.7.2 Unidad experimental .....	37
3.7.3 Variables.....	38
3.7.4 Modelo estadístico.....	38
3.7.5 Error aleatorio y error experimental .....	38
3.7.6 Análisis .....	38
3.7.7 Interpretación.....	39
3.8 Escalamiento.....	39
3.8.1 Proyección de la población.....	40
3.8.2 Diseño del caudal de aguas servidas .....	41

## CAPÍTULO 4

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Caudal de los efluentes domésticos del barrio “El Belén” .....	45
4.2 Encuesta hidrosanitaria.....	47
4.3 Diseño e implementación del sistema piloto .....	52
4.3.1 Captación y homogenización .....	53

4.3.2 Reactor anaerobio de flujo ascendente (RAFA).....	53
4.3.3 Tanque de filtración - Adsorción.....	55
4.3.4 Tanque de desinfección .....	56
4.3.5 Lecho de lodos.....	56
4.3.6 Medición del flujo del sistema piloto .....	56
4.3.7 Puesta en marcha del sistema piloto.....	57
4.4 Calidad de agua .....	57
4.4.1 Proyección de la población futura .....	62
4.4.2 Diseño de caudal de aguas servidas.....	64
4.5 Diseño escala real .....	65
4.5.1 Periodo de vida útil de instalaciones y del proyecto .....	66
4.5.2 Diagrama de flujo del sistema de tratamiento .....	66
4.5.3 Criterios de diseño.....	67
4.5.4 Dimensionamiento de las unidades de tratamiento .....	68
4.5.5 Otros parámetros de control .....	76
5 CONCLUSIONES.....	79
6 RECOMENDACIONES .....	81
7 BIBLIOGRAFÍA.....	82

## ANEXOS

ANEXO A. Plan de muestreo

ANEXO B. Cadena de custodia

ANEXO C. Encuesta Sanitaria

ANEXO D. Implementación del sistema piloto

ANEXO E. Metodología de análisis de laboratorio

ANEXO F. Datos para cálculo caudal

ANEXO G. Carta de autorización y compromiso

ANEXO H. Datos de distancia entre pozos (EPMAPS)

ANEXO I. Memoria de cálculo

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> <i>Parámetros y límites de descarga (TULSMA)</i> .....	12
<b>Tabla 2</b> <i>Límites máximos permisibles por cuerpo receptor</i> .....	13
<b>Tabla 3</b> <i>Ventajas e inconvenientes del tratamiento anaerobio</i> .....	18
<b>Tabla 4</b> <i>Coordenadas proyecto</i> .....	27
<b>Tabla 5</b> <i>Tipos de análisis y sus requerimientos</i> .....	28
<b>Tabla 6</b> <i>Método de análisis</i> .....	36
<b>Tabla 7</b> <i>Factor controlable</i> .....	37
<b>Tabla 8</b> <i>Caudal medido en el colector del barrio El Belén</i> .....	45
<b>Tabla 9</b> <i>Caudal horario medido en el colector del barrio El Belén</i> .....	46
<b>Tabla 10</b> <i>Caudal horario</i> .....	47
<b>Tabla 11</b> <i>Unidades donde se usa agua dentro de las viviendas del barrio “El Belén”</i> .....	48
<b>Tabla 12</b> <i>Parámetros de operación y diseño para el RAFA del sistema piloto</i> .....	55
<b>Tabla 13</b> <i>Ensayo 1, un día de retención</i> .....	57
<b>Tabla 14</b> <i>Ensayo 2, dos días de retención.</i> .....	58
<b>Tabla 15</b> <i>Remoción de DQO - Ensayo 1</i> .....	59
<b>Tabla 16</b> <i>Remoción de DQO - Ensayo 2</i> .....	59
<b>Tabla 17</b> <i>Análisis de laboratorio externo – ensayo 1</i> .....	61
<b>Tabla 18</b> <i>Análisis de laboratorio externo – ensayo 2</i> .....	61
<b>Tabla 19</b> <i>Agua tratada en comparación con límites máximos permitidos</i> .....	62
<b>Tabla 20</b> <i>Dotación población barrio El Belén</i> .....	63
<b>Tabla 21</b> <i>Parámetros de diseño calculados</i> .....	64
<b>Tabla 22</b> <i>Caudal de diseño</i> .....	65
<b>Tabla 23</b> <i>Períodos de vida útil típicos para instalaciones de tratamiento de aguas</i> .....	66
<b>Tabla 24</b> <i>Datos de diseño.</i> .....	68
<b>Tabla 25</b> <i>Datos de diseño rejillas de limpieza manual</i> .....	69
<b>Tabla 26</b> <i>Diseño rejillas de limpieza manual</i> .....	69
<b>Tabla 27</b> <i>Trampa de grasas - desarenador</i> .....	71
<b>Tabla 28</b> <i>Dimensiones homogenizador</i> .....	72

<b>Tabla 29</b> <i>Soplador homogenizador</i> .....	73
<b>Tabla 30</b> <i>Datos de diseño obtenidos en la planta piloto para el reactor RAFA</i> .....	74
<b>Tabla 31</b> <i>Dimensiones reactor anaerobio flujo ascendente</i> .....	74
<b>Tabla 32</b> <i>Dimensiones sedimentador</i> .....	76
<b>Tabla 33</b> <i>Carga de sólidos superficial Metcalf &amp; Eddy vs PTAR</i> .....	76
<b>Tabla 34</b> <i>Relación de nutrientes en el tanque biológico</i> .....	77
<b>Tabla 35</b> <i>Parámetros de operación y diseño reactor anaerobio flujo ascendente RAFA</i> .....	77

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Árbol de problemas .....	3
<b>Figura 2.</b> Sistemas de lodos activados .....	17
<b>Figura 3.</b> Biodigestores anaerobios (Hidroambiental, 2016).....	19
<b>Figura 4.</b> Ubicación de la Planta de Tratamiento. Barrio: “El Belén”, Pifo – Ecuador.....	25
<b>Figura 5.</b> Colector agua residual barrio El Belén .....	26
<b>Figura 6.</b> Puente Peatonal Entrada Itulcachi - Vía E35 .....	26
<b>Figura 7.</b> Mapa de ubicación del proyecto .....	27
<b>Figura 8.</b> Sistema de tratamiento a escala piloto .....	34
<b>Figura 9.</b> Inóculo inicial.....	35
<b>Figura 10.</b> Esquema de la metodología aplicada .....	40
<b>Figura 11.</b> Variación del caudal sanitario.....	46
<b>Figura 12.</b> Destino de las edificaciones del barrio “El Belén” .....	47
<b>Figura 13.</b> Habitantes del barrio “El Belén”.....	48
<b>Figura 14.</b> Usos del agua a diario del barrio “El Belén” .....	48
<b>Figura 15.</b> Disponibilidad de agua potable del barrio “El Belén” .....	49
<b>Figura 16.</b> Disponibilidad de alcantarillado del barrio “El Belén” .....	49
<b>Figura 17.</b> Servicio de agua potable del barrio “El Belén” .....	50
<b>Figura 18.</b> Cantidad de agua potable del barrio “El Belén” .....	50
<b>Figura 19.</b> Continuidad del servicio de agua potable del barrio “El Belén” .....	50
<b>Figura 20.</b> Fertilizantes y/o químicos en huertas y jardines del barrio “El Belén” .....	51
<b>Figura 21.</b> Aporte de aguas lluvia al sistema de alcantarillado del barrio “El Belén” .....	52
<b>Figura 22.</b> Representación esquemática de la planta piloto.....	53
<b>Figura 23.</b> Esquema general del reactor anaerobio de flujo ascendente.....	54
<b>Figura 24.</b> Variación de DQO promedio .....	58
<b>Figura 25.</b> Comparación con normativa para DQO- ensayo 1 .....	60
<b>Figura 26.</b> Comparación con normativa para DQO- ensayo 2 .....	60
<b>Figura 27.</b> Diagrama de flujo del proceso de tratamiento .....	67
<b>Figura 28.</b> Geometría del sedimentador secundario .....	75

## RESUMEN

Para la ciudad de Quito es prioridad la depuración de agua residual doméstica. Por ello, se instaló un sistema de tratamiento a escala piloto que captó agua residual del colector del barrio el Belén. Se monitoreó la calidad del agua residual al ingreso y luego ser tratada en el sistema de tratamiento implementado con biodigestión anaerobia, sedimentación, filtración y desinfección. El reactor anaerobio flujo ascendente (RAFA) empleado para la digestión trabajó a 24 y 48 horas de retención hidráulica a una temperatura entre 15 y 25°C. El mayor porcentaje de remoción en carga orgánica se obtuvo a 48 horas, 74,52%, sin embargo con 24 horas de digestión, 71,46% de remoción, es suficiente para el cumplimiento de la normativa ambiental vigente. El sistema de tratamiento a escala piloto presentó una remoción del 99,9% de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>), 100% remoción en coliformes, 64,1% remoción de nitrógeno, 76,5% remoción de fósforo. Se realizó una encuesta hidrosanitaria que determinó que el 100% de la población encuestada cuenta con agua potable provista por la Junta Parroquial. El 62% del uso del agua se lo emplea para limpieza y preparación de comida. Se diseñó el sistema de tratamiento a escala real para una población futura de 902 personas, con una dotación promedio diaria de 141 litros por habitante. Los procesos de la planta de tratamiento para un flujo de 4.9 litros por segundo contemplan, remoción de sólidos, desarenador – trampa de grasas, homogenizador, reactor biológico flujo ascendente, sedimentador, y clorador

### PALABRAS CLAVE

- **TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES**
- **TRATAMIENTO BIOLÓGICO**
- **AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS**

## **ABSTRACT**

Sewage treatment is a priority for Quito city. For this reason, a pilot-scale treatment plant was installed to treat the Belen neighborhood wastewater. Wastewater quality was monitored at the entrance and at the exit of the treatment system that implements anaerobic digestion, sedimentation, filtration and disinfection. Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) used for digestion worked with 24 and 48 hours of hydraulic retention and at a temperature between 15 and 25°C. The highest percentage removal rate of 72, 54% was obtained at 48 hours. However, 24 hours of digestion (71,46%) was enough to meet the current environmental standards. The pilot-scale treatment system showed 99% removal of 5-day Biochemical oxygen Demand (BOD5), 100% coliform removal, 64,1% nitrogen removal, and 76,5% phosphorus removal. A hydro-sanitary survey was conducted and it showed that 100% of the surveyed population has potable water provided by local authorities. 62% of the water is used for cleaning and food preparation. The treatment system was designed at a real scale for a future population of 902 people, with an average daily provision of 141 liters per inhabitant. The processes of the treatment plant for a flow of 4,9 liters per second contemplate: solid removal, desander-grease trap, homogenizer, upflow biological reactor, settler, and chlorinator.

## **KEY WORDS**

- **SEWAGE TREATMENT**
- **BIOLOGICAL TREATMENT**
- **DOMESTIC RESIDUAL WATERS**

## **CAPÍTULO 1**

### **INTRODUCCIÓN**

El agua cubre el 70% de la Tierra y es esencial para la vida. Desde actividades cotidianas como bañarse, lavarse o usarla como bebida y hasta en las actividades industriales. Las características físicas y químicas del agua, le permiten ser el solvente universal, de tal forma que, el agua pura no existe en el medio natural. La contaminación del agua se refiere a cualquier cambio físico o químico que afecte a los seres vivos (Valencia , Sánchez, Ortiz, & Gómez, 2007). La contaminación proviene de fuentes naturales o antropogénicas provocando impactos según el residuo vertido. El crecimiento poblacional ha generado espacios urbanos consolidados y corredores urbanizados, ejerciendo presión sobre los recursos naturales y generando un sinnúmero de desechos (Isch, 2011).

#### **1.1 Desarrollo del problema**

Ecuador es un país con gran variedad de ecosistemas, los problemas ambientales que se generan a consecuencia de la contaminación lo condiciona y lo vuelve frágil. Las actividades antrópicas están causando estragos en la calidad de vida de las personas. La degradación de los recursos naturales y biodiversidad son evidentes según el diagnóstico del GAD provincial de Pichincha, efecto provocado principalmente por los asentamientos poblacionales, actividades industriales y agropecuarias (GADPP, 2015). En Pichincha el 33.5% de la población no satisface sus necesidades básicas, principal indicador de la pobreza (INEC, 2010).

Dentro del Distrito Metropolitano de Quito (DMQ) existen parroquias que aún no cuentan con sistema de alcantarillado sanitario ni pluvial completos en la cobertura de redes, por otro lado, no cuentan con un sistema de depuración de aguas servidas. Esto hace que la población

construya rudimentariamente letrinas y pozos sépticos para su uso rutinario. La población que cuenta con alcantarillado descarga de manera directa hacia las quebradas más cercanas el agua que utiliza provocando contaminación (GADPifo, 2015).

La parroquia de Pifo no se aleja de esta realidad y tiene un déficit en el sistema de alcantarillado del 17,5 % del total de hogares, mientras que en recolección de basura llega a ser el 45%, es decir, 2990 hogares no tienen alcantarillado y 7655 hogares no tienen servicio de recolección de basura (GADPifo, 2015). Por ello, dentro del plan de ordenamiento territorial la parroquia Pifo plantea varias soluciones para atacar a este grave problema de contaminación de agua: implementación de servicios básicos, sistemas de tratamiento de aguas, control en el uso de agroquímicos, y gestión de residuos industriales son varias de las alternativas planteadas (GADPifo, 2015).

El Barrio el Belén está catalogado como un barrio rural del perímetro de la Parroquia Pifo. Presenta asentamientos discontinuos y lineales al costado de la vía E35. No cuentan con ningún tipo de equipamiento de tratamiento de agua residual. Para el agua potable y la electricidad solo se da el servicio de cobros en la Junta Parroquial. El barrio El Belén descarga las aguas servidas hacia la quebrada Conde Huaico. Esto produce malos olores, enfermedades y contaminación ambiental. De allí la importancia de implementar un sistema de tratamiento de agua que contribuya al saneamiento ambiental y al cumplimiento de objetivos zonales (GADP, 2012).

## **1.2 Planteamiento del problema**

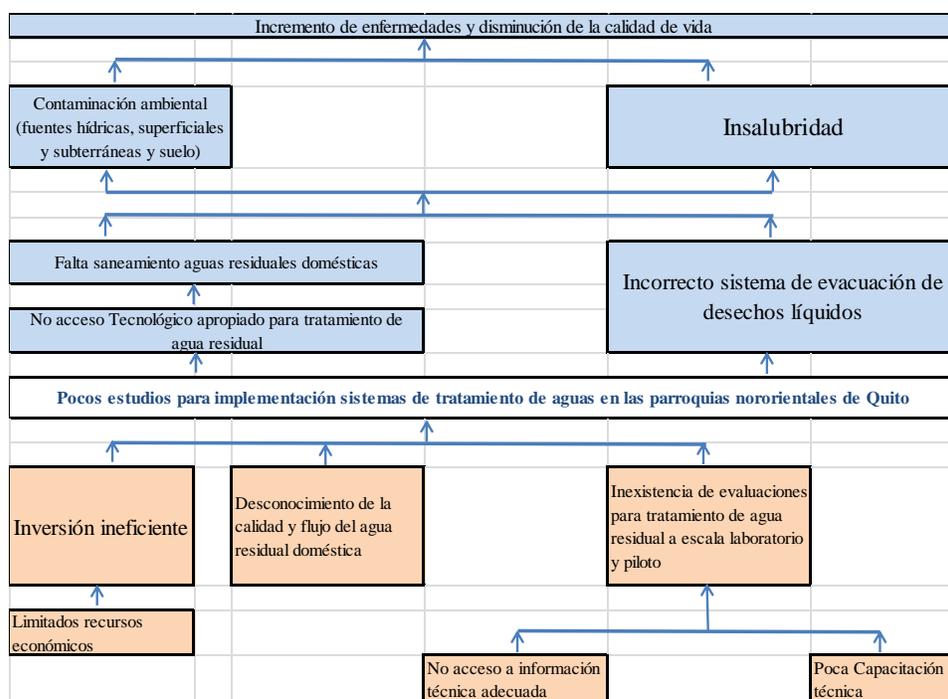
“La contaminación de los recursos hídricos y la degradación de los ecosistemas asociados a ellos son dos de los más grandes problemas que afectan al desarrollo sostenible. Incide en esta situación, el crecimiento poblacional y su creciente demanda de agua, la falta de cumplimiento de

normas y la ausencia de aplicación de sanciones rigurosas a los causantes de impactos ambientales adversos.

La calidad del agua se ve alterada por:

- El vertimiento de aguas residuales,
- La disposición final de residuos sólidos, y,
- Agroquímicos y nutrientes que por escorrentía se desplazan hacia los cuerpos de agua.

Por otro lado, la ausencia de estudios técnicos de tratamiento de agua residual doméstica en el sector impide su pronta implementación, lo cual, agrava el problema y afecta la calidad de quebradas y ríos. Según la Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento (EMAPS) en el DMQ apenas el 1% de las aguas residuales son tratadas. (GADPP, 2015). A continuación se presenta el árbol de problemas identificado para el presente proyecto (Figura 1).



**Figura 1.** Árbol de problemas

A través de ensayos a escala piloto, empleando material reciclado, se logró evaluar la viabilidad técnica de instalación de sistemas de tratamiento en el área rural e implementarlo en el Ecuador.

### **1.3 Justificación e importancia**

La Constitución del 2008 incorpora varios elementos para el tratamiento del agua. Considera al agua como derecho esencial para la vida, establece una jerarquía de usos, y plantea el tema de la autoridad única del agua (GADPP, 2015). Así el proyecto está alineado con los objetivos del Plan Nacional de Desarrollo 2017-2021 – Toda una Vida. Objetivo 6: “Desarrollar las capacidades productivas y del entorno para lograr la soberanía alimentaria y el Buen Vivir Rural”, política 6.6: “Fomentar en zonas rurales el acceso a servicios de salud, educación, agua segura, saneamiento básico, seguridad ciudadana, protección social rural y vivienda con pertinencia territorial y de calidad; así como el impulso a la conectividad y vialidad nacional.”. Objetivo 3: “Garantizar los derechos de la naturaleza para las actuales y futuras generaciones” 3.1: “Conservar, recuperar y regular el aprovechamiento del patrimonio natural y social, rural y urbano, continental, insular y marino-costero, que asegure y precautele los derechos de las presentes y futuras generaciones.”. Y acorde a la propuesta b.3 de los lineamientos territoriales para cohesión territorial con sustentabilidad ambiental y gestión de riesgos: “Promover una gestión integral y corresponsable del patrimonio hídrico para precautelar su calidad, disponibilidad y uso adecuado, con acciones de recuperación, conservación y protección de las fuentes de agua, zonas de recarga, acuíferos y agua subterránea; considerando el acceso equitativo de agua para consumo, riego y producción” descrita en el plan.

Dentro de la planificación nacional, la Zona de Planificación 9 corresponde al Distrito Metropolitano de Quito (DMQ). En la misma menciona que “Respecto de la calidad ambiental,

los principales problemas radican en el deterioro de la calidad del aire y la ausencia de un sistema de tratamiento de las aguas residuales provenientes de la ciudad”. Para reducir esta brecha se plantea como objetivo “Garantizar el acceso, la disponibilidad y la calidad de los servicios de agua potable y saneamiento con equidad social, con especial énfasis en el área rural del territorio zonal” (GAD, 2015).

Con relación a la huella hídrica que se entiende como la cantidad consumida, utilizada y contaminada, el DMQ presenta una huella hídrica total de más de un millón de m<sup>3</sup>, el 96% corresponde a huella hídrica gris, es decir el agua que proviene de uso doméstico (GADPP, 2015). Es importante señalar que la calidad de los ríos del DMQ sufre un proceso de deterioro debido a que no se dispone de un servicio de tratamiento de aguas residuales (Plan Metropolitano de Desarrollo y Ordenamiento Territorial, 2015).

El GAD Parroquial de Tumbaco menciona por su parte: “Impulsar la prevención de la contaminación y recuperación de los ríos y quebradas” (GADP, 2012). Para dar cumplimiento a su gestión de prevención y control de la contaminación para el saneamiento ambiental de quebradas, cuenta con el programa “Saneamiento ambiental de Ríos, Quebradas y Canales de Agua del Territorio”. La parroquia Pifo se encuentra dentro de la planificación de la Administración Zonal Tumbaco (AMZT), ésta última tiene un proyecto para implementación de “Sistemas de tratamiento de agua” (GADP, 2012).

Por otro lado, en el “Programa para la descontaminación de los ríos de Quito”, 2014, publicado por la EPMAPS, se encuentran contemplados los costos para las obras requeridas en las parroquias rurales, entre ellas Pifo, asignando 53 millones para 9 Plantas Recuperadoras del Agua (PRAs).

“Cuando un ecosistema es dañado o perturbado por la presencia de cualquier agente físico, químico o biológico, éste utiliza mecanismos de recuperación, como bacterias y hongos y algunas plantas y protistas como las algas que pueden degradar a los agentes dañinos” (Remtavares, 2010). Se pretende con este proyecto potenciar lo que la naturaleza realiza de manera natural “degradación biológica” en un sistema de tratamiento controlado, con materiales reciclados y que los subproductos puedan ser reutilizados.

Los biodigestores son normalmente usados para el tratamiento de las aguas residuales domésticas, cuyo objetivo es reducir la demanda biológica de oxígeno ( $DBO_5$ ). La actividad biológica aprovecha a los microorganismos para degradar y transformar el material contaminante en productos inocuos. Existen cuatro grupos de procesos biológicos: aerobios, anóxicos, anaerobios y combinados. Los procesos aerobios se efectúan en presencia de oxígeno. Los anaerobios ocurren en ausencia de oxígeno. Los procesos anóxicos, realizan la remoción de nitrógeno mediante la conversión de nitrato en nitrógeno gaseoso, en ausencia de oxígeno (Romero R., 2000).

La digestión anaerobia es un proceso de transformación en la que la mayor parte de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) de la materia orgánica se transforma a metano (90 a 97%), y una mínima parte de la DQO es convertida en lodo (3 a 10%) (Rodríguez, s.f.). La energía del metano puede ser transformada en energía eléctrica y los lodos en abono. El GAD Parroquial de Pifo dará prioridad a proyectos que usen desechos orgánicos para la generación de energía por biomasa (biocombustibles de segunda generación) (GADPifo, 2015).

Según entrevista con el Ing. Galo Rivadeneira, Jefe de Saneamiento Ambiental de la EMAPS en el año 2017, el realizar un estudio a escala piloto de tratamiento biológico para el agua residual doméstica de uno de los barrios de las Parroquias orientales, permitiría a la entidad

contar con un estudio técnico que contribuiría a la implementación de sistemas de tratamiento a escala real, en estos y otros sectores que requieran de tratamiento de agua residual doméstica. Por otro lado, el Sr. Sergio Peña presidente de la Junta Parroquial del Barrio El Belén, manifestó la aceptación para la implementación del proyecto piloto.

El proyecto contribuirá al desarrollo de alternativas de tratamiento a las aguas residuales domésticas y permitirá una gestión adecuada del agua como medida de prevención de la contaminación y propagación de enfermedades.

## **1.4 Objetivos**

### **1.4.1 Objetivo general**

Diseñar un sistema de tratamiento de aguas residuales domésticas a partir de un sistema piloto a ser instalado en la parroquia Pifo, barrio El Belén.

### **1.4.2 Objetivos específicos**

- Avalar el flujo de agua residual del Barrio El Belén contemplado en el diseño e implementación del sistema de alcantarillado.
- Diseñar, implementar y monitorear un sistema piloto de biodigestión para tratar aguas residuales domésticas del barrio El Belén.
- Realizar un plan de muestreo para las diferentes etapas de tratamiento.
- Medir la calidad de agua cruda y agua tratada a través de la Demanda Química de Oxígeno (DQO), tensoactivos, potencial hidrógeno (pH), conductividad eléctrica (CE), sólidos suspendidos totales (SST), coliformes totales, nitrógeno y fósforo.
- Diseñar e implementar un sistema piloto de secado de lodos.

### **1.5 Hipótesis o interrogantes**

La implementación de la planta piloto de tratamiento anaerobia de aguas sanitarias del barrio “El Belen” redujo en el 80% el DQO.

## **CAPÍTULO 2**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1 Marco legal**

A continuación un listado de las reglamentaciones y normativas que justifican el proyecto.

- Constitución de la República del Ecuador R.O. 449 del 20 de octubre 2008.
- Ley de Gestión Ambiental RO N. 245., Del 30 de julio de 1999.
- Ley Orgánica de Recursos Hídricos Usos y Aprovechamiento del Agua (Registro Oficial No. 305. 6 de agosto del año 2014).
- Acuerdo 061 Reforma del libro VI del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente, 4 mayo 2015.
- Acuerdo 097-A Expedición anexos del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente, 4 noviembre 2015.
- Resolución 0002-SA-2014. Secretaría de Ambiente del DMQ
- Plan de Ordenamiento y Desarrollo Territorial de la Parroquia Tumbaco 2012 – 2025
- Actualización del Plan de Ordenamiento Territorial de la Parroquia de Pifo, 2015

#### **Constitución de la República del Ecuador R.O. 449 del 20 de octubre 2008.**

**Art. 14.** TITULO II, DE LOS DERECHOS, Capítulo II: “Derechos del Buen Vivir”, Sección Segunda indica que: “Se reconoce el derecho de la población a vivir en un ambiente sano y ecológicamente equilibrado, que garantice la sostenibilidad y el buen vivir, sumak kawsay”.

**Ley de Gestión Ambiental RO N. 245., Del 30 de julio de 1999.**

Establece los principios básicos y directrices de la política ambiental según los principios en la Declaración de Río de Janeiro de 1992.

**Art. 26.-** En las contrataciones que, conforme a esta Ley deban contar con estudios de impacto ambiental los documentos pre-contractuales contendrán las especificaciones, parámetros, variables y características de esos estudios y establecerán la obligación de los contratistas de prevenir o mitigar los impactos ambientales. Cuando se trate de concesiones, el contrato incluirá la correspondiente evaluación ambiental que establezca las condiciones ambientales existentes, los mecanismos para, de ser el caso, remediarlas y las normas ambientales particulares a las que se sujetarán las actividades concesionadas.

**Ley Orgánica de Recursos Hídricos Usos y Aprovechamiento del Agua (Registro Oficial No. 305. 6 de agosto del año 2014).**

**Artículo 35.-** Principios de la gestión de los recursos hídricos. La gestión de los recursos hídricos en todo el territorio nacional se realizará de conformidad con los siguientes principios:

c) La gestión del agua y la prestación del servicio público de saneamiento, agua potable, riego y drenaje son exclusivamente públicas o comunitarias;

**Artículo 37.-** Servicios públicos básicos. Para efectos de esta Ley, se considerarán servicios públicos básicos, los de agua potable y saneamiento ambiental relacionados con el agua. La provisión de estos servicios presupone el otorgamiento de una autorización de uso.

El saneamiento ambiental en relación con el agua comprende las siguientes actividades: 1. Alcantarillado sanitario: recolección y conducción, tratamiento y disposición final de aguas residuales y derivados del proceso de depuración; y, 2. Alcantarillado pluvial: recolección,

conducción y disposición final de aguas lluvia. El alcantarillado pluvial y el sanitario constituyen sistemas independientes sin interconexión posible, los gobiernos autónomos descentralizados municipales exigirán la implementación de estos sistemas en la infraestructura urbanística.

**Artículo 79.** Objetivos de prevención y conservación del agua.- La Autoridad Única del Agua, la Autoridad Ambiental Nacional y los Gobiernos Autónomos Descentralizados, trabajarán en coordinación para cumplir los siguientes objetivos:

b) Preservar la cantidad del agua y mejorar su calidad;

e) Prohibir, prevenir, controlar y sancionar la contaminación de las aguas mediante vertidos o depósito de desechos sólidos, líquidos y gaseosos; compuestos orgánicos, inorgánicos o cualquier otra sustancia tóxica que alteren la calidad del agua o afecten la salud humana, la fauna, flora y el equilibrio de la vida;

**Artículo 80.-** Vertidos: prohibiciones y control. Se consideran como vertidos las descargas de aguas residuales que se realicen directa o indirectamente en el dominio hídrico público. Queda prohibido el vertido directo o indirecto de aguas o productos residuales, aguas servidas, sin tratamiento y lixiviados susceptibles de contaminar las aguas del dominio hídrico público.

**Acuerdo 061 Reforma del libro VI del Texto unificado de legislación secundaria, 4 mayo 2015**

**Art. 210** Prohibición.- De conformidad con la normativa legal vigente:

b) Se prohíbe la descarga y vertido que sobrepase los límites permisibles o criterios de calidad correspondientes establecidos en este Libro, en las normas técnicas o anexos de aplicación; c) Se prohíbe la descarga y vertidos de aguas servidas o industriales, en quebradas secas o nacimientos de cuerpos hídricos u ojos de agua;

**Art. 211** Tratamiento de aguas residuales urbanas y rurales.... La gestión y el mantenimiento de sistemas de tratamiento de agua deberán ser monitoreados y evaluados por medio de los mecanismos de control y seguimiento establecidos en este Libro.

**Norma de calidad ambiental y de descarga de efluentes. Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundaria (2003)**

Recurso agua: Anexo 1

Ítem 4.2 Criterios generales para la descarga de efluentes.

**4.2.1.2** se establece que toda descarga hacia el sistema de alcantarillado, deberá cumplir, por lo menos con los siguientes parámetros indicados en la Tabla 1.

**Tabla 1**  
*Parámetros y límites de descarga (TULSMA)*

<i>Parámetros</i>	<i>Límite máximo permisible</i>	
	<i>Alcantarillado</i>	<i>Cauce</i>
<i>Aceites y grasas (mg/L)</i>	100	0,3
<i>DBO (mg/L)</i>	250	100
<i>DQO (mg/L)</i>	500	250
<i>Fósforo total (mg/L)</i>	15	10
<i>Nitrógeno total (mg/L)</i>	40	15
<i>Potencial de hidrógeno (pH)</i>	5-9	5-9
<i>Sólidos Suspendidos Totales (mg/L)</i>	220	100
<i>Sólidos totales (mg/L)</i>	1600	1600
<i>Temperatura °C</i>	<40	<35
<i>Tensoactivos (mg/L)</i>	2	0,5

**4.2.1.21** Los sedimentos, lodos y sustancias sólidas provenientes de sistemas de potabilización de agua y de tratamiento de desechos y otras tales como residuos del área de la construcción, cenizas, cachaza, bagazo, o cualquier tipo de desecho doméstico o industrial, no

deberán disponerse en aguas superficiales, subterráneas, marinas, de estuario, sistemas de alcantarillado y cauces de agua estacionales secos o no, y para su disposición deberá cumplirse con las normas legales referentes a los desechos sólidos no peligrosos.

### **Resolución 0002-SA-2014. Secretaría de Ambiente**

**Art. 6.** Norma técnica para el control de descargas líquidas

**Tabla 2**

*Límites máximos permisibles por cuerpo receptor*

<i>Parámetro</i>	<i>Unidades</i>	<i>Unidades</i>	<i>Límite Máximo Permissible</i>	
			<i>Alcantarillado</i>	<i>Cauce de agua</i>
<i>Coliformes</i>	<i>NMP</i>	<i>NMP/100 ml</i>		<i>Remoción &gt; al 99%</i>
<i>Demanda Bioquímica de Oxígeno (5 días)</i>	<i>DBO5</i>	<i>mg/l</i>	<i>170</i>	<i>100</i>
<i>Demanda Química de Oxígeno</i>	<i>DQO</i>	<i>mg/l</i>	<i>350</i>	<i>160</i>
<i>Nitrógeno total Kjeldahl</i>	<i>N</i>	<i>mg/l</i>	<i>60</i>	<i>50</i>
<i>Sólidos Suspendidos</i>	<i>SS</i>	<i>mg/l</i>	<i>100</i>	<i>80</i>

## **2.2 Contaminación de ríos**

“La sociedad moderna es tan descuidada con su tierra y agua como lo es con su aire. Cada año se producen millones de toneladas métricas de desechos considerados peligrosos por estándares estatales y federales. 90 % de estos desechos terminan en nuestros cuerpos de agua, campos y aguas subterráneas” (Valencia , Sánchez, Ortiz, & Gómez, 2007).

Según el VI Encuentro Nacional del Foro de Recursos Hídricos, reunido en la ciudad de Quito entre el 17 y el 18 de junio de 2010 se estima que por debajo de los 2 mil metros de altitud prácticamente todos los cauces de agua en el Ecuador están contaminados (Isch, 2011). Las actividades industriales y las aguas servidas que se emiten sin tratamiento son las mayores fuentes de contaminación de los recursos hídricos.

### **2.3 Contaminación urbana**

Las fuentes de agua para los diferentes usos de la población provienen de ríos, quebradas, lagos, humedales, depósitos de agua subterránea entre otros. Y los cuerpos receptores de los residuos líquidos son estos mismos ecosistemas hídricos además del océano y el suelo (Isch, 2011).

La contaminación urbana está relacionada con el incremento de la escorrentía superficial y pérdidas en los sistemas de alcantarillado (Lección HQ25). Esta problemática data de tiempos remotos. Sin embargo, es hasta la década 1990 que la población comenzó a interesarse y se buscó la protección, gestión y uso eficiente de los recursos hídricos (Dirección metropolitana Ambiental, 2005).

El incremento poblacional implica mayor necesidad del recurso agua para satisfacer necesidades básicas. No obstante, al emitir los vertidos sin control las fuentes de abastecimiento son afectados por las mismas actividades requeridas por la población. La descarga no controlada genera una serie de inconvenientes (Isch, 2011):

- Contaminación de suelos agrícolas al emplear agua de riego contaminada.
- Incremento de enfermedades.
- Restricción para usos recreativos primarios y secundarios
- Imposibilidad de emplear las fuentes contaminadas para abastecimiento de agua potable.
- Caños en la biota.
- Deterioro de la calidad de vida.

## **2.4 Agua residual doméstica**

Las aguas residuales domésticas (ARD) son líquidos provenientes de las viviendas, residencias, edificios comerciales e institucionales. Se denomina aguas negras a las aguas provenientes de los inodoros, estas transportan excrementos humanos y orina, ricas en sólidos suspendidos, nitrógeno y coliformes fecales. Se denomina aguas grises a las aguas residuales provenientes de tinajas, duchas, lavamanos y lavadoras, aportantes de DQO, sólidos suspendidos, fósforo, grasas y coliformes fecales (Romero R., 2000).

## **2.5 Calidad y flujo del agua residual doméstica**

La comprensión de las características de origen de las aguas residuales es de vital importancia para el desarrollo de proyectos de operación de la infraestructura tanto de recogida como de depuración y descarga de las aguas residuales. Los constituyentes están presentes en el agua residual son clasificados como físicos (sólidos, color y temperatura), químicos (proteínas, carbohidratos, grasas y aceites) y biológicos (organismos no patógenos y coliformes) que se presentan por actividades ajenas al proceso productivo (Metcalf & Eddy, 1995).

La cantidad de agua de consumo doméstico no debería superar los 200 litros por persona y por día con un promedio de 60 a 70% para baño, lavandería, cocina y aseo, y un 30 a 40% para arrastre sanitario de excrementos y orina (Romero R., 2000). El DMQ reporta que el consumo promedio de agua per cápita es de 189,1 litros por habitante por día (Plan Metropolitano de Desarrollo y Ordenamiento Territorial, 2015).

## **2.6 Tratamiento de efluentes domésticos**

La conducción de aguas residuales aparece hasta principios del siglo XIX. El tratamiento se da a finales del siglo pasado y principios del presente. La relación entre contaminación y enfermedades motivan a la gestión de las aguas residuales (Metcalf & Eddy, 1995).

Las operaciones y procesos unitarios se agrupan para constituir el tratamiento primario, secundario y terciario (Metcalf & Eddy, 1995). El tratamiento primario se refiere a la remoción de sólidos gruesos, materia orgánica mediante el uso de operaciones físicas como la sedimentación y el desbaste. El tratamiento secundario se lo emplea para la remoción de Demanda Biológica Orgánica (DBO) soluble y sólidos suspendidos a través de procesos biológicos y químicos. El tratamiento terciario supone, la necesidad de remover nutrientes (nitrógeno y fósforo) y otros componentes que no se hayan removido en etapas anteriores, en este se emplean una combinación de procesos y operaciones unitarias (Romero R., 2000).

Qué contaminantes deben ser removidos y en qué porcentaje, depende de cada sector y la normativa de calidad aplicable, de allí que la complejidad de un sistema de tratamiento estará en función de los objetivos propuestos previos al diseño.

## **2.7 Tratamiento biológico aerobio**

La depuración del agua residual en un sistema de digestión aerobia se realiza en un período corto de estabilización, ya que la velocidad de crecimiento de los microorganismos es alta, en consecuencia la remoción de carga orgánica del agua residual se efectúa casi de manera inmediata, convirtiéndolo en un modelo efectivo de tratamiento a ser aplicado en zonas donde no existe sistemas de alcantarillado.

La aireación se adiciona mediante inyección de aire y/o agitación mecánica (Levin & Gealt, 1997). La actividad microbiana se mantiene a niveles muy altos mediante la recirculación de la mayor parte de fangos activados sedimentados. La ventaja de ser un sistema portátil radica en la facilidad de movilización del biodigestor hacia el sitio de asentamiento definitivo.

El aprovechamiento de los microorganismos y su capacidad de remover materia orgánica oxidable mediante procesos de oxidación, síntesis y endogénesis, se conoce como proceso biológico aerobio (Perales, 2000). Entre los procesos biológicos aerobios mayormente usados está el proceso de lodo activo. En un sistema de lodos activados, las bacterias constituyen el grupo de mayor importancia entre los organismos que conforman la biomasa, por su decisivo papel en la formación del floc o flóculo (agregado microbiano) (Romero R., 2000). El proceso de lodos activados se compone de un tanque de aireación, un tanque de sedimentación, un sistema de recirculación de sólidos al tanque de aireación y una línea de purga. El tratamiento biológico se emplea principalmente para la generación de biol (abono orgánico) y biogás. En la Figura 2 a la izquierda, se observa la imagen de un sistema biológico aerobio compacto y a la derecha un sistema de biológico aerobio para lixiviados.



**Figura 2.** Sistemas de lodos activados  
Fuente: [www.hidroambiental.com.ec](http://www.hidroambiental.com.ec) (Hidroambiental, 2016)

## 2.8 Tratamiento biológico anaerobio

El tratamiento anaerobio es la descomposición u oxidación de compuestos orgánicos, en ausencia de oxígeno libre, para obtener la energía requerida para el crecimiento y mantenimiento de los organismos anaerobios (Romero R., 2000).

En el proceso de digestión anaerobia la materia orgánica se convierte en metano (CH<sub>4</sub>) y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), en un reactor completamente cerrado. El agua residual se introduce en el reactor de manera continua o intermitente y permanece en el interior durante períodos de tiempo variables (Metcalf & Eddy, 1995).

“Los motivos de la falta de utilización en aguas residuales incluyen la falta de experiencia en el proceso, la falta de la adecuada comprensión de la química y microbiología del proceso, la presencia de compuestos tóxicos y la preocupación para la necesidad de que el proceso sea fiable en un ambiente de estricta regulación” (Rittmann & McCarty, 2001).

La Tabla 3 muestra un resumen de las ventajas e inconvenientes del proceso de tratamiento anaerobio, comparados con las del tratamiento aerobio. En la Figura 3 se observan imágenes de reactores o biodigestores anaerobios.

**Tabla 3**  
*Ventajas e inconvenientes del tratamiento anaerobio*

• <i>Ventajas</i>	• <i>Inconvenientes</i>
• <i>Baja producción de residuos sólidos biológicos</i>	• <i>Crecimiento lento de microorganismos</i>
• <i>Bajo requerimiento de nutrientes</i>	• <i>Desprendimiento de olor</i>
• <i>El metano es un producto final muy útil</i>	• <i>Requerimientos más elevados de regulador para controlar el pH</i>
• <i>Generalmente genera energía</i>	• <i>Escasa eficacia de eliminación con residuos sólidos</i>
• <i>Es posible una carga orgánica elevada</i>	

Fuente: (Rittmann & McCarty, 2001).



**Figura 3.** Biodigestores anaerobios

Fuente: (Hidroambiental, 2016)

### **Reactor anaerobio de flujo ascendente (RAFA)**

El RAFA es una tecnología que se aplica a tratamientos de aguas residuales que contienen alto contenido de materia orgánica. Los digestores RAFA pueden presentar eficiencias entre 90% y 95% dependiendo de las condiciones del agua a depurar y su diseño (Bermúdez, Rodríguez, Martínez, & Terry, 2011).

El reactor funciona mediante la creación de un manto de lodos. El agua residual ingresa a la cámara de digestión que marcha desde la parte inferior hasta la parte superior. La altura del reactor depende del efluente a tratar. El lodo es altamente activo y por lo tanto estabiliza la materia orgánica del efluente, con una conversión a gases de  $\text{CH}_4$  y  $\text{CO}_2$  (Freire, 2012).

La actividad depuradora de los microorganismos anaerobios permite la digestión de la materia orgánica, la cual es empleada como fuente de energía en su desarrollo. Los grupos de microorganismos instauran una relación simbiótica de alta eficiencia metabólica para formar gránulos de alta densidad que puedan sedimentarse en el digestor (Freire, 2012).

La implementación de baffles tiene la finalidad de retener y sedimentar los sólidos que presentan baja densidad que pueden pasar a través de la campana de gases. Los gases que se forman generalmente son  $\text{CH}_4$  y  $\text{CO}_2$  en un 98%. También pueden generarse otros gases como  $\text{SH}_2$ , los cuales se controlan por presión y volumen; la producción de estos gases es escasa debido a que contienen gran cantidad de agua que circula. Los lodos residuales que han formado la película de remoción se retiran cuando se hayan saturado, se depura los lechos mediante secado ya que son semisólidos con un contenido entre 90% - 96% de agua y 4% de sólidos. Se puede volver a utilizarlos para depurar agua residual pero la eficiencia disminuye; sin embargo, una posible solución es utilizar como enmienda orgánica en los cultivos, aunque se necesita una mayor investigación para determinar si existen contaminantes que puedan afectar el suelo (Castillo & Solano, 2006).

El arranque del reactor comienza cuando el efluente a depurar asciende con velocidades bajas y se pone en contacto con la alta concentración de lodos activados que trabajan anaeróbicamente, este lecho de lodos se conoce como manto de lodos debido a su capacidad de expandirse conforme pasa el flujo de agua y sin ser evacuado del reactor. Los procesos que llevan a cabo estos lodos son de filtración biológica, absorción y adsorción, de forma simultánea; produciendo también la decantación de los mismos (Marquéz & Martínez, 2011).

## **2.9 Sedimentación secundaria**

El agua que proviene de un sistema biológico tiene gran cantidad de sólidos en suspensión. La sedimentación se emplea para separar las partículas más pesadas que el agua, que se encuentran en suspensión, mediante la acción de la gravedad y diferencia en el tamaño de partícula (Pérez, 2005).

El agua pasa por un dispositivo de sedimentación donde se depositan los materiales para su posterior eliminación, el proceso de sedimentación puede reducir de un 20 a un 40% la DBO<sub>5</sub> y de un 40 a un 60% los sólidos en suspensión.

### **2.10 Lechos de secado de lodos**

El proceso de secado de lodos consiste en reducir el contenido de agua que este posee a menos del 85%. Los lechos de secado de arena se emplean para reducir el contenido de humedad de manera natural. Es el método más usado en plantas pequeñas de menos de 100 l/s (Romero R., 2000).

Consiste en colocar un lecho rectangular poco profundo, con capas de grava de diferente granulometría. El lodo se aplica sobre el lecho. El desaguado se efectúa mediante drenaje y evaporación. La pasta se agrieta y se remueve de manera manual.

### **2.11 Sistemas piloto**

Debido a la naturaleza cambiante de las aguas residuales se está intensificando el estudio de la tratabilidad de las aguas residuales (Metcalf & Eddy, 1995).

La metodología implica:

1. Estimación de tratabilidad del agua residual doméstica
2. Realización de estudios en plantas piloto y laboratorios
3. La transformación de datos experimentales a escala real

La construcción de sistemas piloto se realiza con el fin de obtener conclusiones para el sistema a escala real. Se define cuál es el sistema y el medio ambiente que lo rodea. Existen múltiples tipos de modelos para representar la realidad: dinámicos, estáticos, matemáticos,

físicos, analíticos, numéricos, continuos, discretos, determinísticos y estocásticos. El modelo de un sistema piloto de tratamiento de aguas corresponde a un sistema continuo, en el que los cambios son graduales y las variables que intervienen son continuas (FIUBA, s.f.).

## **2.12 Escalamiento**

El escalamiento consiste en analizar los criterios y las reglas de asignación numérica que determinan las unidades de medida significativas para llevar de un tamaño dado a otro tamaño mayor o menor una operación u objeto (Anaya-Durand & Pedroza-Flores, 2008). El paso fundamental en el escalamiento (Anaya-Durand y Gutiérrez, 1999) consiste en pasar los datos obtenidos en la planta piloto a un modelo que puede ser: fenomenológico, empírico y de similaridad (Anaya-Durand & Pedroza-Flores, 2008). Para escalar un sistema de tratamiento de agua residual se basa en el modelo de similaridad. El cual se obtiene a partir de un análisis de similaridad con respecto a analogías físicas de tipo térmico, mecánico, geométrico, químico, etc. Los sistemas físicos se caracterizan en general por tres cualidades: tamaño, forma y composición. Las tres variables son independientes; por ejemplo, dos objetos pueden ser diferentes en tamaño pero tener la misma forma y composición. También deben anexarse cuestiones como son: patrones de flujo en fluidos, gradientes de temperatura, perfiles de concentración con respecto al tiempo, etc (Anaya-Durand & Pedroza-Flores, 2008).

Dentro de la ingeniería bioquímica son de interés cuatro tipos de similaridades: 1. Similaridad geométrica 2. Similaridad mecánica 3. Similaridad térmica 4. Similaridad química

El tratamiento biológico se da gracias a una serie de reacciones bioquímicas, las cuales están afectadas por fenómenos de transporte de masa, movimiento y energía, que están controlados por la estructura y tamaño del reactor, y se puede predecir de forma cuantitativa. El uso de técnicas

de análisis dimensional proporcionará una guía para el diseño y cambio de escala del bioreactor a través del análisis de similitud (Casablancas & Ferrando).

## CAPÍTULO 3

### MATERIALES Y MÉTODOS

#### **3.1 Localización geográfica del proyecto**

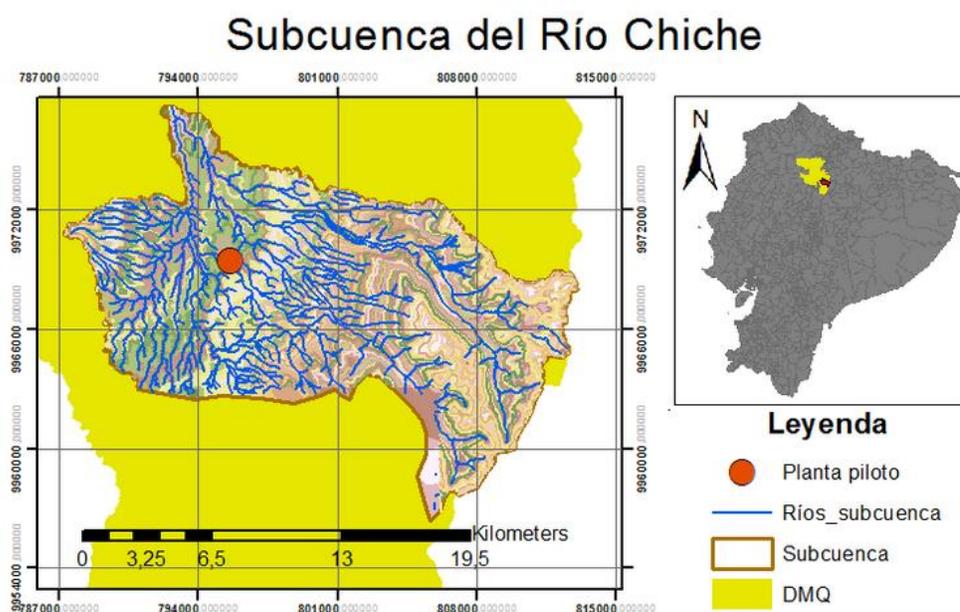
El presente trabajo de tesis se realizó en el Distrito Metropolitano de Quito (DMQ), Valle de Tumbaco, Parroquia rural Pifo, barrio El Belén.

“El Valle de Tumbaco tiene una extensión de 64.000 hectáreas y está formado por ocho parroquias rurales: Cumbayá, Tumbaco, Puembo, Pifo, Tababela, Yaruquí, Checa y El Quinche, con 138 barrios y 35 comunas. La población es de aproximadamente 174.000 habitantes” (Quito, 2016). La parroquia de Pifo se encuentra ubicada en la zona nororiental del Distrito Metropolitano, pertenece a la red de centralidades periféricas urbanas, colinda con las parroquias de Yaruqui, Pintag, Provincia de Napo, Parroquia Tumbaco y La Merced, cuenta con una población de 16645 habitantes, según el último censo nacional realizado en 2010; y una tasa de crecimiento demográfico de 3,33%. Tiene una extensión de 25.58 km<sup>2</sup> (GADP, 2012).

Los barrios de la parroquia no responden a ningún tipo de estructura, no existe un trazado definido. “Al sur este de la Parroquia de Pifo se encuentran los barrios y comunidades del Tablón y del Inga Alto cuya mayor superficie está constituida también por páramos de gran importancia para la protección del agua. En sentido sur se encuentran los barrios de Palugo, Itulcachi y el Inga Bajo, con los sectores de El Belén y La Cocha, cuyo entorno es en su mayor parte seco y que constituyen una zona en la cual se han asentado proyectos importantes como el de parques industriales y el relleno sanitario de Quito”. (EMAAP-Q, 2006).

Hidrográficamente, la planta se encuentra en la subcuenca del río Chiche, como se puede observar en la Figura 4. El clima predominante en la zona es seco, con una temperatura media

anual de 13,5 °C y una precipitación de 1272 mm al año. La menor cantidad de lluvia ocurre en julio, con un promedio de 29 mm; mientras que la mayor cantidad se da en abril, con un promedio de 165 mm (INHAMI, 2017).



**Figura 4.** Ubicación de la Planta de Tratamiento. Barrio: “El Belén”, Pifo – Ecuador

El área de influencia es la quebrada Conde Huaico, donde actualmente se están descargando las aguas residuales domésticas del barrio El Belén (Figura 5).

El colector se ubica a 20 metros del puente peatonal de la vía E 35, en la entrada al barrio Itulcachi. Las descargas de las aguas residuales se realizan sin control al aire libre (Figura 6).



**Figura 5.** Colector agua residual barrio El Belén



**Figura 6.** Puente Peatonal Entrada Itulcachi - Vía E35

En la Figura 7 se muestra el mapa de ubicación de la zona de estudio y área de influencia y en la Tabla 4 las coordenadas de ubicación del proyecto.



*Figura 7.* Mapa de ubicación del proyecto

**Tabla 4**

*Coordenadas proyecto*

S	00°16'35.9''
W	78° 20'39.0''

### 3.2 Muestreo

Previo al inicio de la parte experimental se realizó un plan de muestreo (Anexo A) con el fin de optimizar recursos y asegurar se tomen las muestras necesarias para el proyecto. Los objetivos de este plan fueron obtener una muestra representativa del efluente y realizar los análisis fisicoquímicos internos y externos de interés.

Para el muestreo fue necesario monitorear las condiciones de toma de muestra, codificación, preservación, transporte y análisis. Este proceso es importante para demostrar el control y fiabilidad de la muestra, como documento de respaldo se usó una cadena de custodia (Anexo B)

Se tomó muestras compuestas del agua cruda y tratada y muestras puntuales para el monitoreo del sistema a escala piloto

Para el almacenamiento de las muestras se consideró como condiciones de refrigeración una temperatura aproximada a 8° C INEN 2176. En la Tabla 5 se muestra la cantidad requerida, tipo de envase, preservación y almacenamiento según análisis a realizar.

**Tabla 5**  
*Tipos de análisis y sus requerimientos*

<i>Análisis</i>	<i>Cantidad requerida</i>	<i>Tipos de envases</i>	<i>Preservante</i>	<i>Almacenamiento</i>
<i>Físico químico</i>	<i>500ml/1000ml</i>	<i>PTFE/Vidrio ámbar/plástico</i>	<i>---</i>	<i>Refrigeración</i>
<i>Microbiológico</i>	<i>125 ml</i>	<i>Vidrio /Plástico estéril</i>	<i>---</i>	<i>Refrigeración</i>
<i>DQO</i>	<i>100 ml</i>	<i>Plástico/vidrio ámbar</i>	<i>H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub></i>	<i>Refrigeración</i>
<i>Sólidos totales</i>	<i>100 ml</i>	<i>Plástico /vidrio ámbar</i>	<i>---</i>	<i>Refrigeración</i>

De acuerdo al TULSMA, la formación de las muestras compuestas deberá ser con alícuotas de volumen proporcional al caudal (MAE, 2015). La composición de las muestras en proporción al caudal medido se realizará tomando alícuotas de volumen ( $V_i$ ), utilizando la siguiente ecuación:

$$V * x * Q_i * V_i = n * x * Q_m \quad [3.1]$$

Donde:

$V_i$ : volumen individual de cada una de las alícuotas, en ml

$V$ : volumen de la muestra compuesta, ml (generalmente 3500 ml)

$Q_i$ : caudal medido al momento del muestreo de cada una de las alícuotas, l/s

$n$ : número de alícuotas individuales de que se compone la muestra

$Q_m$ : es el caudal medio en el período de muestreo, l/s

x: es una constante de volumen de alícuota, ml/(l/s)

En este caso, las alícuotas se tomaron en recipientes plásticos, desde las 14:00 hasta las 18:00.

### 3.3 Medición de caudal

Para la determinación del caudal (volumen/tiempo) se aplicó el método volumétrico. Se tomó el tiempo de llenado de un área donde se estancaba el agua, punto en el que confluían todas las tuberías de descarga. Una vez lleno se tapó las tuberías y con ayuda de una bomba se evacuó el agua hacia un tanque de almacenamiento y en este se midió el volumen. El volumen no podía ser determinado en el sitio de estancamiento debido a la irregularidad del mismo. Las mediciones se realizaron en diferentes horarios y todos los días de la semana. Se aplicó la fórmula 3.2:

$$Q = \frac{V}{t} \quad [3.2]$$

Donde:

V: Volumen tanque (m<sup>3</sup>)

t: tiempo (s)

### 3.4 Encuesta hidrosanitaria

La realización de la encuesta tuvo como fin recopilar información relevante y de utilidad para el proyecto (Naciones Unidas, 2007). En este caso para conocer las actividades en las que se usa el agua y estimar el caudal teórico para compararlo con el caudal real medido durante el proyecto.

El sábado 10 de junio de 2017 se llevó a cabo la encuesta hidrosanitaria a la población del Barrio El Belén. El barrio está confirmado por 15 viviendas y se determinó realizar las encuestas a todas debido al tamaño pequeño de la población en cuestión. Sin embargo, en tres de estas

viviendas no había gente habitando por lo que la información recopilada fue de 12 viviendas, donde se entrevistó al propietario de cada una. La encuesta se encuentra en el Anexo C.

### **3.5 Diseño e implementación del sistema piloto**

El sistema de tratamiento de agua residual doméstica para el Barrio El Belén, escala piloto, contempló las siguientes etapas de tratamiento:

- Bombeo y captación de agua del colector
- Homogenización
- Biodigestión anaerobia
- Sedimentación
- Filtración
- Adsorción en carbón activado
- Desinfección con cloro
- Lecho de secado de lodos

#### **3.5.1 Bombeo y captación de agua del colector**

Se empleó una bomba sumergible, Myers, modelo SM33, de 1/3 HP. Se realizó una adaptación en el colector de agua residual doméstica del barrio El Belén para poder contar con el volumen necesario para bombear hacia el tanque de captación (Anexo D).

### **3.5.2 Homogenización**

Se instaló un tanque de 250 l de capacidad construido en polietileno de alta densidad, a donde se bombeó el agua para ser homogenizada previo a la entrada al biodigestor. De este tanque se tomaron las muestras para los análisis de agua de entrada (agua sin tratar).

### **3.5.3 Biodigestión anaerobia**

Se instaló un tanque de 89.5 l de capacidad construido en acero inoxidable. El tanque de biodigestión cuenta con una base cónica que sirvió como sedimentador y recolectó los lodos generados en el tratamiento. En la parte superior tiene una campana para recolección de gases que conecta a un sistema tubular de almacenamiento de gases controlado con un manómetro. Cuenta con un sistema hidráulico que permitió la toma de muestras en diferentes alturas para control de sólidos en suspensión.

El biodigestor posee un sistema de calentamiento que sirve para mantener la temperatura constante, la cual es fue controlada por medio de un sistema automático de medición de temperatura. En este sistema se colocó dos resistencias tipo alambre y para el aislamiento térmico se colocó fibra de vidrio en la parte externa del tanque (Anexo D).

Las condiciones óptimas para una biodigestión anaerobia eficiente son: relación nutrientes, pH entre 6,5 y 7,5. Temperatura entre 30 y 38 °C, ausencia de oxígeno, ausencia sustancias tóxicas (Rojas, 2010).

### **3.5.4 Sedimentación**

El biodigestor tiene un sistema cónico en la parte inferior para recolección de lodos, por lo que la sedimentación se realizó de manera interna en el biodigestor. Los lodos sedimentados se evacuaron por la parte inferior con ayuda de un sistema de válvulas, hacia el lecho de secado.

### **3.5.5 Filtración**

Se instaló un sistema de filtración ascendente en un tanque de 250 l de capacidad, construido en polietileno de alta densidad. En la parte inferior del tanque se colocó un colector de agua digestada que permitió la distribución uniforme de agua. Se colocó tres capas de grava de 10 cm de altura cada una. En el fondo se colocó grava gruesa de 5 cm de diámetro, seguida de grava media de 2,5 cm de diámetro, finalmente se colocó grava fina de 0,5 cm de diámetro.

### **3.5.6 Adsorción de carbón activado**

En el mismo tanque de filtración a continuación de la grava se colocó una capa de 10 cm de altura de carbón activado americano, 760 número de yodo.

### **3.5.7 Desinfección con cloro**

Se instaló un tanque de 1000 l de capacidad construido en polietileno de alta densidad, el cual se empleaba como tanque de almacenamiento de agua digestada-filtrada y en donde se realizó el proceso de desinfección. Para lo que aplicó 50 mg/l de cloro al 5%..

### **3.5.8 Lecho de secado de lodos**

Junto al reactor se colocó un sistema de secado de lodos. Este constaba de un tanque de 20 litros relleno hasta la mitad con ripio y una malla en la parte superior para sostener el lodo. El secado se dio a temperatura ambiente y los lodos deshidratados se dispusieron como compostaje

### **3.5.9 Implementación del sistema a escala piloto**

Se realizó una investigación bibliográfica sobre las condiciones de los efluentes de las parroquias orientales de Quito. Se mantuvo reuniones con los dirigentes de la Junta Parroquial del Barrio El Belén, ubicado al sur este de la parroquia de Pifo, y con las autoridades de la Empresa Pública de Agua Potable Alcantarillado y Saneamiento (EPMAPS), de tal forma de solucionar de manera conjunta el problema de aguas residuales domésticas.

Se decidió instalar un sistema biológico anaerobio a escala piloto, con el fin de optimizar el consumo energético y que sean los microorganismos quienes depuren el agua residual.

Con los dirigentes parroquiales se decidió el mejor sitio a instalar el sistema piloto, tomando en cuenta distancias de captación de agua cruda y vuelco de agua tratada. La construcción del sistema se llevó a cabo en el terreno de un habitante del barrio El Belén, el cual se encuentra cerca del colector de aguas residuales del barrio.

Hidroambiental Cia. Ltda. empresa auspiciante facilitó los materiales para la construcción del sistema. Para la construcción del sistema de tratamiento a escala piloto se empleó material reciclado (Figura 8). Las actividades con el respectivo registro fotográfico de implementación se muestran a detalle en el Anexo E.

Se realizó un convenio de trabajo con la comunidad para realizar la instalación del sistema piloto en un terreno adjunto al colector de aguas residuales. El lugar es al aire libre por lo que fue

necesario construir una caseta de protección y la adecuación del lugar para el montaje de los equipos.



*Figura 8.* Sistema de tratamiento a escala piloto

### **3.5.10 Flujo**

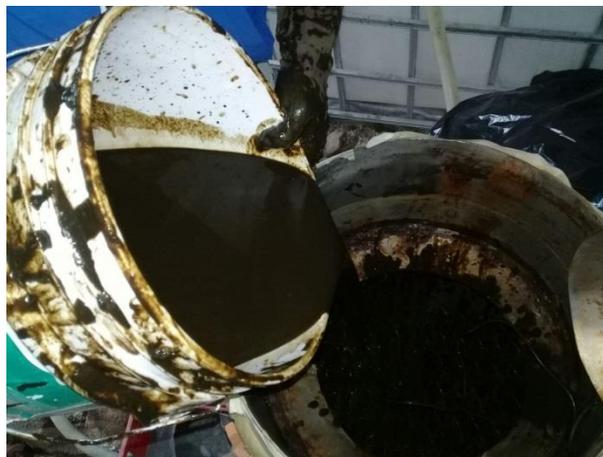
El flujo para el sistema piloto fue fijado a un caudal fijo por medio de la válvula de salida del tanque de almacenamiento que se conectaba hacia el digestor. El caudal se ajustó a razón de 200 litros/día.

### **3.5.11 Puesta en marcha**

Se realizó primero una prueba con agua limpia para comprobar el funcionamiento hidráulico y eléctrico. Se corrigieron las fugas del sistema.

Para arrancar con el funcionamiento del sistema de tratamiento se ingresó lodo anaerobio digerido como inóculo inicial en el tanque de digestión anaerobia (Figura 9) y posteriormente se ingresó agua cruda. La adición de un inóculo acorta los tiempos de adaptación de los microorganismos en el reactor (Machado, Marquetti, Gusils, & Quaia, 2016). Como inóculo se

empleó estiércol de vaca suministrado por Hidroambiental. El estiércol fue almacenado en recipientes plásticos herméticos a temperatura ambiente hasta su uso. Según la empresa el lodo tiene un año de digestión natural (Hidroambiental, 2017).



*Figura 9.* Inóculo inicial

### **3.5.12 Operación y monitoreo**

El sistema fue operado y monitoreado durante los meses de mayo, junio y julio del 2017. Personal de Hidroambiental colaboró con la toma de datos y chequeo para que el sistema operara de manera óptima. El procedimiento de control siguió los siguientes pasos:

- Chequeo del funcionamiento eléctrico.
- Medición de flujo.
- Control de temperatura, pH y conductividad.
- Revisión índice volumétrico de lodos (IVL).
- Toma de muestras.
- Ingreso agua cruda.

### 3.6 Calidad del agua

Se realizaron pruebas de laboratorio para el análisis de calidad de agua cruda, agua digestada, agua filtrada, y agua tratada. Los análisis se realizaron con los equipos de la empresa Hidroambiental, en el laboratorio del Centro de Nanotecnología CENCINAT, Laboratorios Anncy (LABANNCY) Laboratorio de Medioambiente de la Facultad de Ingeniería en Geología, Minas, Petróleos y Ambiental (FIGEMPA).

Se midió la calidad de agua cruda y agua tratada a través de la Demanda Química de Oxígeno (DQO), tensoactivos, potencial hidrógeno (pH), conductividad eléctrica (CE), sólidos suspendidos totales (SST), coliformes totales, nitrógeno y fósforo. Los análisis fueron realizados bajo las metodologías aplicables para los equipos que se usaron, estas están detalladas en el Anexo E. El método a emplear para cada análisis se detalla en la Tabla 6.

**Tabla 6**  
*Método de análisis*

<i>Ensayo</i>	<i>Tipo de análisis</i>	<i>Métodos</i>	<i>Unidades</i>
<i>Demanda Química de Oxígeno (DQO)</i>	<i>Digestión/colorimétrico</i>	<i>APHA 5220D</i>	<i>mg/l</i>
<i>Tensoactivos</i>	<i>Extracción / colorimétrico</i>	<i>APHA 5540C</i>	<i>mg/l</i>
<i>pH</i>	<i>Electroquímico</i>	<i>APHA 45000G</i>	<i>U pH</i>
<i>Conductividad eléctrica</i>	<i>Electroquímico</i>	<i>EN50081-1</i>	<i>μS/cm</i>
		<i>EN50082-1</i>	
		<i>EN61010-1</i>	
<i>Sólidos suspendidos totales</i>	<i>Gravimétrico</i>	<i>APHA 2540 D</i>	<i>mg/l</i>
<i>Coliformes totales</i>	<i>Método de Tubos Múltiples (NMP)</i>	<i>APHA 9221F</i>	<i>UFC</i>
<i>Nitrógeno</i>	<i>Digestión / colorimétrico</i>	<i>HACH 8075</i>	<i>mg/l NTK</i>
<i>Fósforo</i>	<i>Digestión / colorimétrico</i>	<i>APHA 4500-P B-E</i>	<i>mg/l</i>
<i>Caudal</i>	<i>Volumen/tiempo</i>	<i>Descarga canal abierto</i>	<i>l/s</i>

### 3.7 Diseño experimental

Se aplicó un muestreo probabilístico simple (Berrendero, 2008) el cual se realizó dos veces a la semana, teniendo como muestra el agua residual de la población del barrio “El Belén”.

Se evaluó el porcentaje de remoción de DQO en el agua residual para tiempos de retención de 24 y 48 horas en el bioreactor. El diseño experimental que se empleó para los tratamientos fue diseño unifactorial.

#### 3.7.1 Factor controlable

El factor controlable fue el tiempo de retención del agua residual dentro del bioreactor. Teniendo dos variantes que fueron: veinticuatro y cuarenta y ocho horas, como muestra la Tabla 7 (Metcalf & Eddy, 1995).

**Tabla 7**  
*Factor controlable*

<i>Código</i>	<i>Descripción</i>
<i>R1</i>	<i>Retención de 24 horas en el bioreactor.</i>
<i>R2</i>	<i>Retención de 48 horas en el bioreactor</i>

#### 3.7.2 Unidad experimental

La unidad experimental fue un biorreactor anaerobio de 89.5 litros, construido en acero inoxidable.

### 3.7.3 Variables

**Variable de respuesta:** La variable de respuesta fue la remoción de DQO (%  $R_{DQO}$ ) que es porcentaje de reducción de DQO de salida con respecto a la DQO de entrada del agua residual (Berrendero, 2008).

### 3.7.4 Modelo estadístico

Para un modelo unifactorial, el diseño está dado por la ecuación 3.3:

$$Y_{ij} = u_i + \varepsilon_{ij} \quad [3.3]$$

Siendo Y la variable respuesta que se analizó. Donde  $i = 1, \dots, a$ ;  $j = 1, \dots, n_i$  y la sumatoria de  $n_i = N$ , siendo  $\mu_i$  el valor medio de Y, el nivel i-ésimo, y  $\varepsilon_{ij}$  es el error aleatorio que incluye a todos los factores que influyen en la respuesta y no están incluidos en el modelo (Berrendero, 2008).

### 3.7.5 Error aleatorio y error experimental

Se consideró error aleatorio a la variabilidad producida por: temperatura y pH. El error experimental se consideró el producido por la manipulación de la investigadora durante el proceso.

### 3.7.6 Análisis

El análisis de los resultados se llevó a cabo en el programa Excel. Se realizó estadística de tendencia central

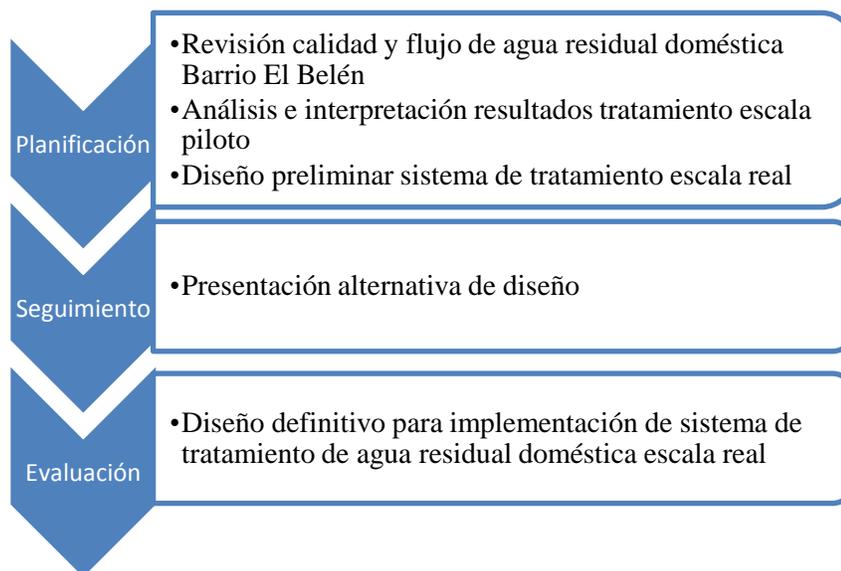
### **3.7.7 Interpretación**

Los resultados obtenidos se determinaron por el porcentaje de remoción de DQO para cada tiempo de retención. El porcentaje de remoción se calcula dividiendo la variación de DQO antes y después del tratamiento sobre la DQO a la entrada del tratamiento.

### **3.8 Escalamiento**

En el escalamiento es necesario seleccionar las condiciones de diseño que aseguren que las variables produzcan el mismo efecto en sistemas de diferente tamaño (Casablanca & Ferrando). La velocidad de una reacción bioquímica dada en un biodigestor anaerobio es independiente del tamaño de reactor y de su geometría. Sin embargo, se encuentra afectada por fenómenos de transporte como transferencia de masa, momento y energía que si dependen del tamaño de reactor. Dentro del escalado podemos encontrar diferentes tipos de similitud: geométrica, dinámica, térmica, másica (concentración), bioquímica. El concepto de similitud se estima que si dos sistemas están descritos por las mismas ecuaciones diferenciales, con las mismas ecuaciones de contorno, entonces ambos sistemas se comportarán de forma idéntica (Casablanca & Ferrando). Así el escalado a contemplar dentro de este estudio será el de similitud geométrica.

Para el diseño a escala real se siguió la siguiente metodología (Figura 10):



*Figura 10.* Esquema de la metodología aplicada

### 3.8.1 Proyección de la población

#### **Población actual**

La población actual o de diseño es el número de habitantes que aportan con flujo de agua al sistema de tratamiento. Para la determinación de esta población se realizó una entrevista al presidente de la junta parroquial de Tumbaco.

#### **Período de diseño**

Es el período de tiempo para el cual el sistema debe funcionar. Varía entre 10 y 40 años (CEPES). Para su determinación intervienen diferentes variables que deben ser evaluadas para que el proyecto sea económicamente viable. En este caso se tomó 20 años. Población futura

Es la población que se estima habrá en un período posterior según se considere el tiempo de diseño. Se consideró el Código Ecuatoriano para el Diseño de la Construcción de Obras Sanitarias, Norma CO 10.7 – 602 para zonas rurales, que establece en las disposiciones

específicas título 4.2 que: para el cálculo de la población futura o de diseño se emplea el método geométrico, que consiste en (ecuación 3.4):

$$Pf = Pa(1 + r)^n \quad [3.4]$$

Donde:

Pf: Población futura (habitantes)

Pa: Población actual (habitantes)

r: Índice de crecimiento poblacional

n: Período de diseño (años)

### **Dotación**

Es la cantidad de agua que se requiere por persona en un día. Sirve para estimar el consumo de agua promedio diario anual. Se determina dividiendo el flujo medido por el número de habitantes y el coeficiente de retorno.

### **3.8.2 Diseño del caudal de aguas servidas**

#### **Caudal medio**

Recopilados los datos de la encuesta hidrosanitaria y la medición in situ del caudal se realizó el cálculo del caudal medio con la Ecuación 3.5.

$$Qmd = Cr * P * D \quad [3.5]$$

Dónde:

Qmd: caudal medio diario (m<sup>3</sup>/día)

P: población futura (habitantes)

D:dotación (m<sup>3</sup>/día.persona)

Cr: coeficiente de retorno

### **Coefficiente de flujo máximo o mayoración**

Se lo define como la relación entre el caudal medio diario y el caudal máximo horario (Secretaría del Agua). También conocido como coeficiente de mayoración, para poblaciones menores mil habitantes se calcula a través de la ecuación de Flores (León, 2012).

$$M = \frac{7}{p^{0.1}} \quad [3.6]$$

Donde:

M: coeficiente de mayoración

p: población (habitantes)

### **Caudal máximo**

En toda red de alcantarillado, existe un instante en que la aportación es máxima, generalmente coincide con el pico máximo de la curva de consumo de agua potable. El caudal

máximo diario se calcula multiplicando el caudal medio por el coeficiente de mayoración (León, 2012).

$$Q_{maxd} = Q_{md} * M \quad [3.7]$$

Dónde:

$Q_{maxd}$ : caudal máximo diario ( $m^3/día$ )

$Q_{md}$ : caudal medio diario ( $m^3/día$ )

$M$ : coeficiente de mayoración

### **Caudal aguas de infiltración**

Es el agua del subsuelo que penetra en el sistema de alcantarillado. La cantidad de agua de infiltración depende de varios factores como: métodos constructivos del sistema, altura del nivel freático, tipo de uniones, tipo de suelo, forma de unión de conexiones, dimensiones del colector (León, 2012). Se calcula según la ecuación 3.8.

$$Q_i = 0.8 * l_{tr} \quad [3.8]$$

Donde:

$Q_i$ : Caudal de infiltración ( $m^3/s$ )

$l_{tr}$ : Distancia entre pozos (m)

### **Caudal de aguas erradas**

El caudal de aguas erradas o ilícitas se produce por la introducción del agua lluvia al alcantarillado sanitario especialmente en las zonas que carecen de un sistema de recolección de aguas lluvias. Este caudal se debe a:

- Agua que fluye por techos, patios y drenajes de sumideros de agua lluvia conectados al alcantarillado sanitario por equivocación.
- Falta de hermetismo en las tapas de los pozos, debido a fallas en la construcción.

### **Caudal de diseño**

El caudal de diseño se calcula a partir de la sumatoria del caudal máximo horario, caudal de infiltración, caudal de aguas erradas.

$$Qd = Qmh + Qi + Qe \quad [3.9]$$

## CAPÍTULO 4

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1 Caudal de los efluentes domésticos del barrio “El Belén”

La variación del caudal de las aguas residuales afecta en gran medida al diseño hidráulico tanto de las redes de alcantarillado, como de las propias instalaciones de una planta de tratamiento de aguas residuales.

En el Anexo F se tiene los datos del flujo medido en diferentes días. La toma de muestras se realizó en función de la disponibilidad de tiempo del propietario del terreno que alquiló el sitio para la instalación del sistema piloto, del personal de Hidroambiental y tomando en consideración las actividades cotidianas en el sector. A continuación en la Tabla 8 se muestra un resumen con los promedios de los caudales según los días y horas de muestreo.

**Tabla 8**  
*Caudal medido en el colector del barrio El Belén*

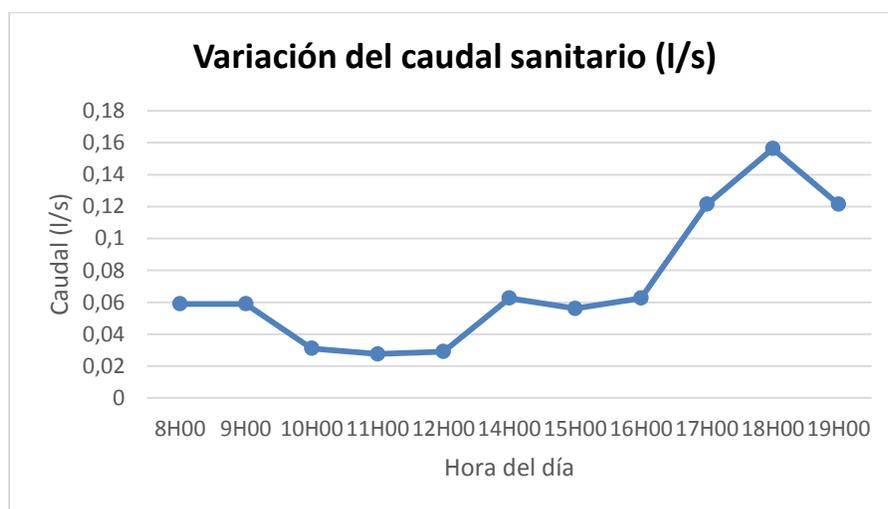
<i>Hora</i>	<i>Resultados medición caudal Q (l/s)</i>				
	<i>Martes</i>	<i>Miércoles</i>	<i>Jueves</i>	<i>Viernes</i>	<i>Sábado</i>
<i>08H00</i>	0,059				
<i>09H00</i>	0,059				
<i>10H00</i>			0,036	0,026	
<i>11H00</i>		0,016	0,029	0,026	
<i>12H00</i>		0,016	0,029		
<i>14H00</i>					0,06
<i>15H00</i>					
<i>16H00</i>					0,077
<i>17H00</i>		0,1			
<i>18H00</i>		0,1			0,14

El sábado 10 de junio del 2017 se concluyó la medición de flujo para determinar el caudal horario. En la Tabla 9 se observan los resultados y en la Figura 11 se encuentra el gráfico de la variación del caudal.

**Tabla 9**

*Caudal horario medido en el colector del barrio El Belén*

<i>Hora</i>	<i>Caudal horario (l/s)</i>
<i>8:00:00</i>	<i>0,06</i>
<i>9:00:00</i>	<i>0,06</i>
<i>10:00:00</i>	<i>0,03</i>
<i>11:00:00</i>	<i>0,03</i>
<i>12:00:00</i>	<i>0,03</i>
<i>14:00:00</i>	<i>0,06</i>
<i>15:00:00</i>	<i>0,06</i>
<i>16:00:00</i>	<i>0,06</i>
<i>17:00:00</i>	<i>0,12</i>
<i>18:00:00</i>	<i>0,16</i>
<i>19:00:00</i>	<i>0,12</i>



**Figura 11.** Variación del caudal sanitario

El flujo promedio de los efluentes domésticos del barrio El Belén es de 0.13 litros por segundo para una población de 51 habitantes.

En la Tabla 10 se tiene el caudal promedio, mínimo y máximo. El caudal mínimo se tiene a las 11 de la mañana. El pico máximo de caudal se observa a las 6 de la tarde. Esto tiene relación con la forma de vida de la población: salen muy temprano a realizar actividades de laboreo, pastoreo y envían a sus niños a la escuela. Mientras que por la tarde regresan a sus hogares y es cuando se reúnen a realizar actividades domésticas.

**Tabla 10**  
*Caudal horario*

<i>Descripción</i>	<i>Caudal (l/s)</i>
<i>Caudal promedio</i>	0,071
<i>Caudal mínimo</i>	0,027
<i>Caudal máximo</i>	0,156

#### 4.2 Encuesta hidrosanitaria

Como resultado de la encuesta se determinó que las edificaciones del barrio son destinadas 100% a vivienda (Figura 12), donde habitan 56 personas de manera ocasional (fines de semana) y 51 de permanentemente (Figura 13). Dentro de las viviendas las unidades donde se usa agua se muestran en la Tabla 11 y en la Figura 14 se observa los porcentajes de uso del agua en las diferentes actividades diarias.



**Figura 12.** Destino de las edificaciones del barrio “El Belén”

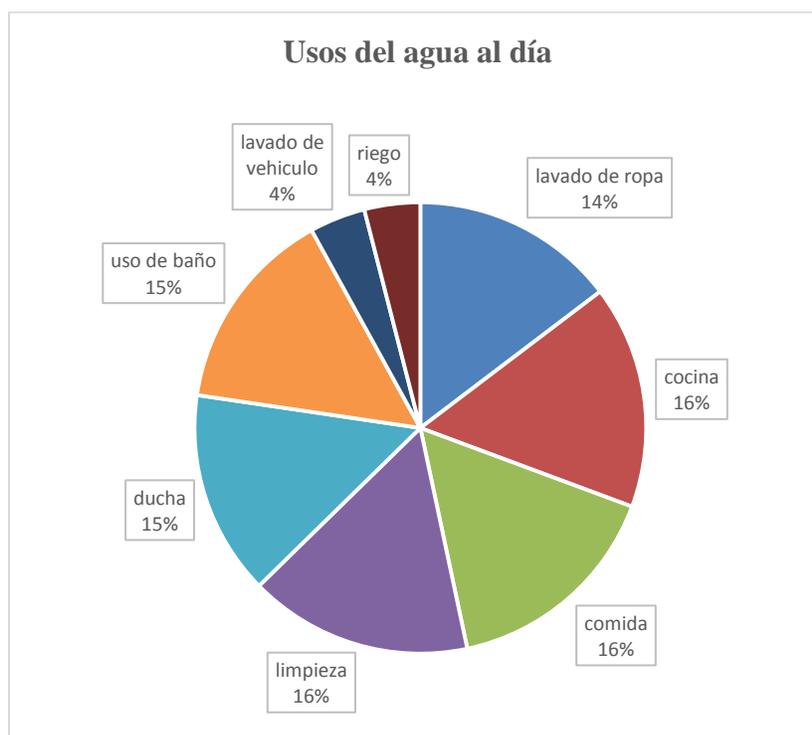


**Figura 13.** Habitantes del barrio “El Belén”

**Tabla 11**

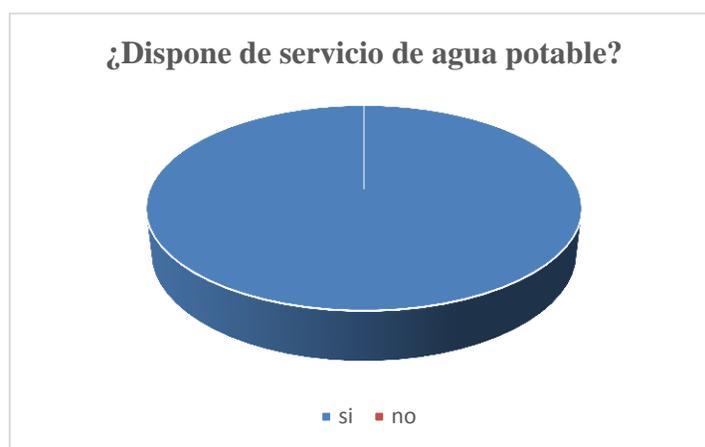
*Unidades donde se usa agua dentro de las viviendas del barrio “El Belén”*

	<i>Lavamanos</i>	<i>Duchas</i>	<i>Fregaderos (cocina)</i>	<i>Lavadoras de ropa</i>	<i>Inodoros</i>
<i>Unidades</i>	20	18	16	8	20



**Figura 14.** Usos del agua a diario del barrio “El Belén”

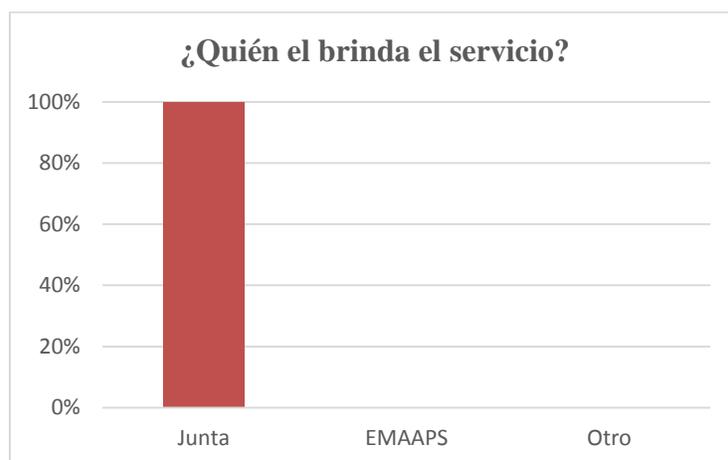
Todos los habitantes encuestados del barrio disponen de agua potable (Figura 15) y de servicio de alcantarillado (Figura 16). El servicio de agua es suministrado 100% por la junta de agua de la parroquia (Figura 17). Los habitantes mostraron su satisfacción en cuanto a cantidad y continuidad de agua (Figura 18 y Figura 19), así mismo a su percepción, los habitantes califican al agua en general sin color, sin sabor y sin olor.



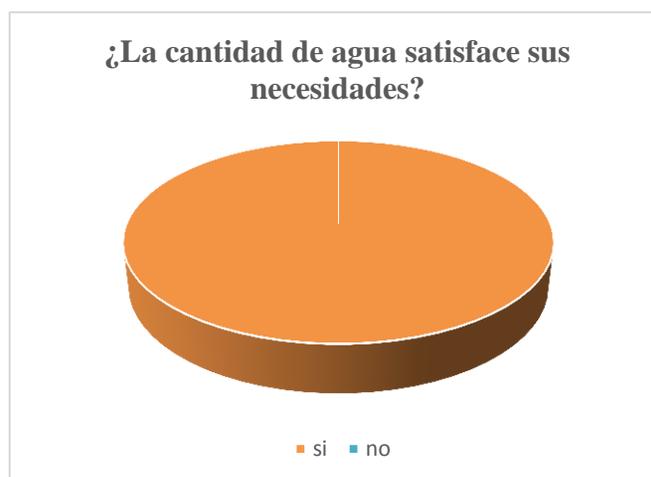
**Figura 15.** Disponibilidad de agua potable del barrio “El Belén”



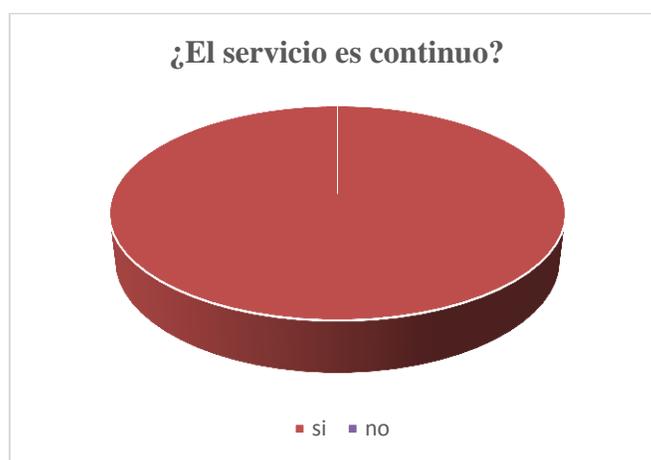
**Figura 16.** Disponibilidad de alcantarillado del barrio “El Belén”



**Figura 17.** Servicio de agua potable del barrio “El Belén”

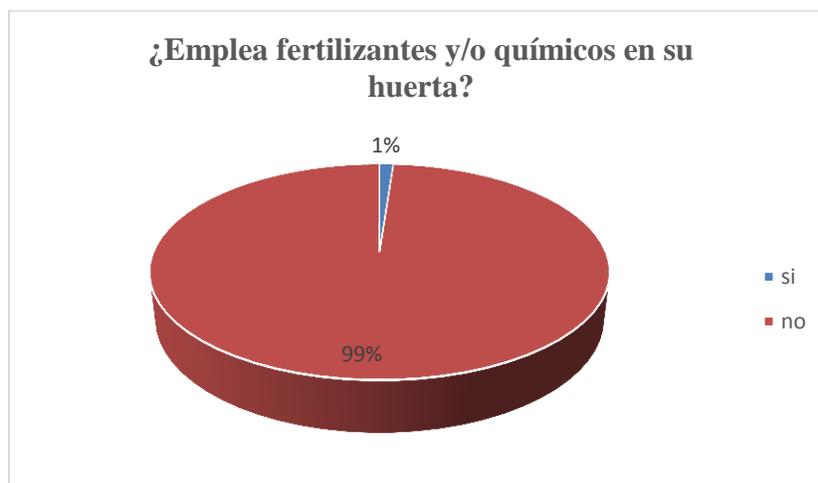


**Figura 18.** Cantidad de agua potable del barrio “El Belén”



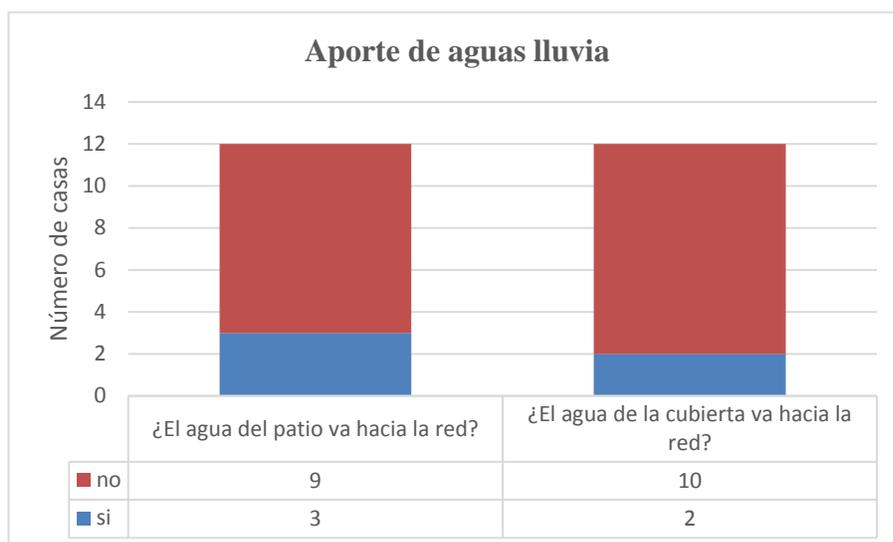
**Figura 19.** Continuidad del servicio de agua potable del barrio “El Belén”

Las viviendas poseen un área extensa de huertas y jardines con 4326 m<sup>2</sup>, de los cuales en solo 50 m<sup>2</sup> se aplican fertilizantes (Figura 20) que podrían llegar a las aguas residuales.



**Figura 20.** Fertilizantes y/o químicos en huertas y jardines del barrio “El Belén”

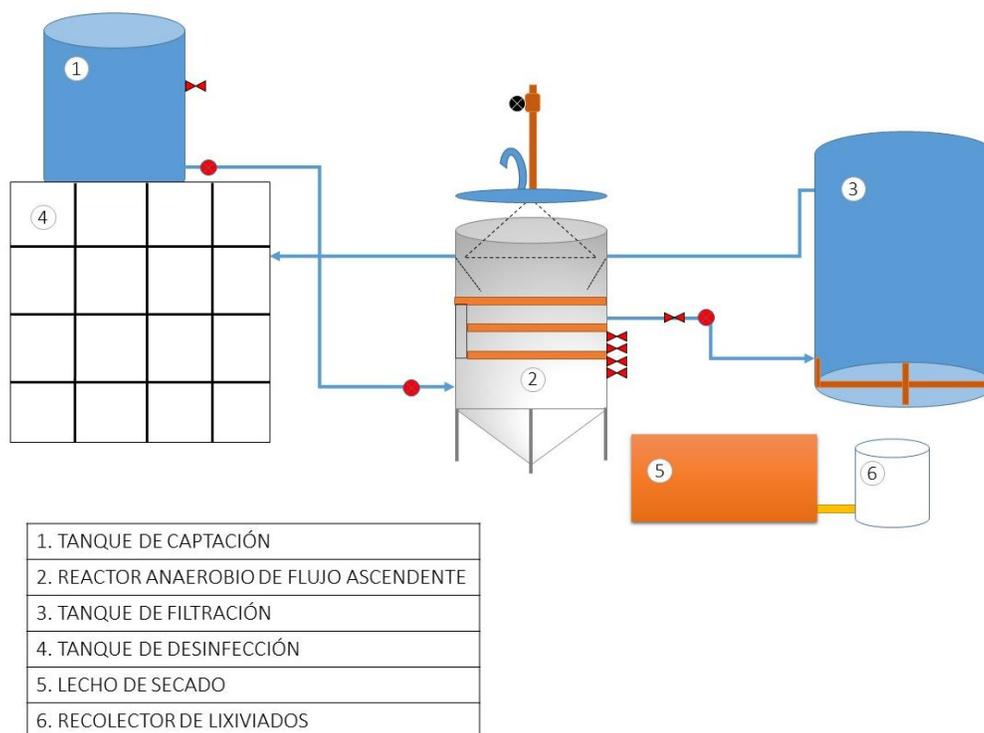
Con el fin de conocer aportes de caudal a las aguas residuales se plantearon dos preguntas relacionadas a las aguas lluvia que caen en patios y cubiertas y si su descarga va a la red de alcantarillado. Como se observa en la Figura 21 (en azul) si existe dicho aporte de tres patios y dos cubiertas.



**Figura 21.** Aporte de aguas lluvia al sistema de alcantarillado del barrio “El Belén”

### 4.3 Diseño e implementación del sistema piloto

En la Figura 22 se muestra el esquema del sistema piloto, el cual constó de un tanque de captación donde se recolectó el agua residual, seguido de un reactor anaerobio de flujo ascendente, posterior a este un tanque de filtración y por último el tanque de desinfección. Adicional se contó con un lecho de secado para los lodos resultantes del tratamiento, unido a un recolector de lixiviados.



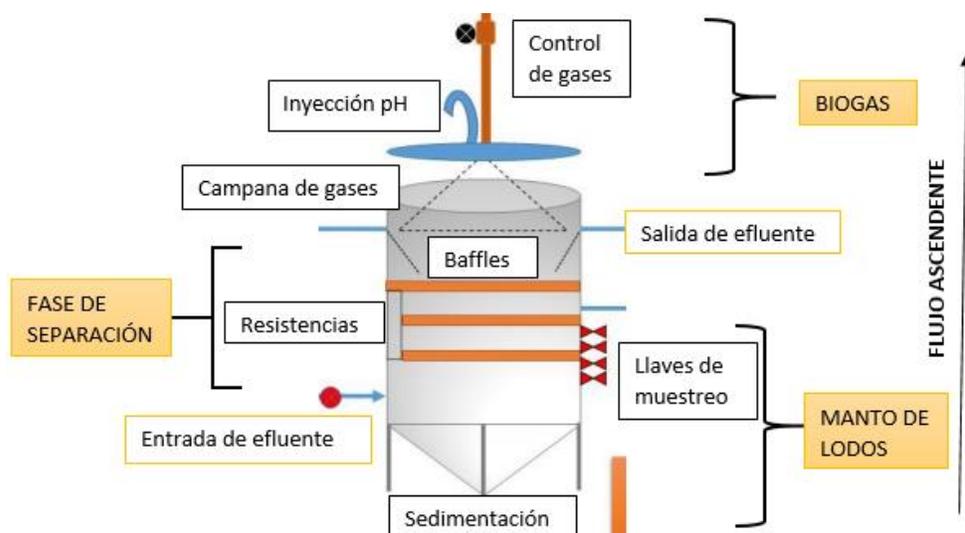
**Figura 22.** Representación esquemática de la planta piloto

#### 4.3.1 Captación y homogenización

El agua fue tomada directamente del colector con ayuda de una bomba hacia el tanque de captación. En el mismo tanque se realizó la homogenización del efluente, previo a la entrada al reactor anaerobio. La función del tanque homogenizador es generar un efluente constante tanto en caudal como en carga contaminante, esto debido a que los reactores no soportan variaciones altas de dichos parámetros (Lapsolite, 2017).

#### 4.3.2 Reactor anaerobio de flujo ascendente (RAFA)

En la Figura 23 se presenta el esquema general del RAFA, en el cual se puede identificar las diferentes zonas de operación.



**Figura 23.** Esquema general del reactor anaerobio de flujo ascendente

Para el funcionamiento del reactor se incorporaron lodos anaerobios activados durante dos años, los cuales permitieron que la depuración sea inmediata sin necesidad de tiempo de arranque para estabilizarlos. La eficiencia del RAFA depende del crecimiento de la biomasa. Los nutrientes son vitales para el crecimiento de los microorganismos y, al ser aguas residuales domésticas (mezcladas con aguas grises), normalmente la concentración de carbono y nitrógeno es baja. El desarrollo de biomasa se limita a un arranque prolongado del reactor, debido al crecimiento lento de microorganismos (Castillo & Solano, 2006).

El control de pH se hace mediante pruebas de laboratorio; se inyecta sosa cáustica para estabilizar el ambiente ácido. Para garantizar el desarrollo adecuado de los microorganismos, se controla la temperatura que se realiza con tres bandas de resistencia térmica. La temperatura se mantuvo en un rango de 15 – 25°C. El resumen de los parámetros de operación para el RAFA se muestra en la Tabla 12.

**Tabla 12***Parámetros de operación y diseño para el RAFA del sistema piloto*

<i>Descripción</i>	<i>Símbolo</i>	<i>Unidad</i>	<i>Valor</i>	<i>Valor bibliográfico</i>	<i>Referencia</i>
<i>Tiempo de residencia hidráulica</i>	$\theta$	<i>h</i>	24 - 48	24-48	(Metcalf & Eddy, 2003)
<i>Potencial Hidrógeno</i>	<i>pH</i>	<i>Unidades de pH</i>	7 - 8		(Albuja, 2017)
<i>Carga orgánica volumétrica</i>	<i>COV</i>	<i>g DQO/l d</i>		4-12	(Metcalf & Eddy, 2003)
<i>Edad de lodos</i>	$\theta_c$	<i>d</i>	2.66	>11 a 18/°C	(Droste, 1997)
<i>Sólidos suspendidos volátiles del reactor</i>	<i>SSV</i>	<i>mg/l</i>	200		(Albuja, 2017)
<i>Tasa de crecimiento bacteriano</i>	$\mu$	<i>d<sup>-1</sup></i>	0.99		(Zegers, 1987)
<i>Coefficiente de respiración endógena</i>	$K_d$	<i>d<sup>-1</sup></i>	0,61		(Albuja, 2017)
<i>Coefficiente de producción máxima</i>	<i>Y</i>	<i>mg SSV/mg DBO<sub>5</sub></i>	0.06		(Metcalf & Eddy, 2003)
<i>Producción específica observada</i>	<i>Y<sub>net</sub></i>	<i>mg SSV/mg DBO<sub>5</sub></i>	0.023		(Albuja, 2017)
<i>Producción de lodos ensayo 1</i>	$P_x$	<i>g/d</i>	1,23		(Albuja, 2017)
<i>Producción de lodos ensayo 2</i>	$P_x$	<i>g/d</i>	1,31		(Albuja, 2017)

### 4.3.3 Tanque de filtración - Adsorción

Las partículas en suspensión que lleva el agua digerida son retenidas en un lecho filtrante de arena, grava y carbón activado. La arena es uno de los elementos más utilizados para filtración de aguas con cargas bajas o medianas de contaminantes, que requieran una retención de partículas de hasta veinte micras de tamaño. El carbón activado permite la eliminación algunos compuestos

orgánicos en el agua. En esta etapa se obtuvo un 77 -80% de remoción de detergentes (Tabla 17 y Tabla 18).

#### **4.3.4 Tanque de desinfección**

“La desinfección del agua se refiere a la destrucción de los organismos causantes de enfermedades o patógenos presentes en ella”. Existen diferentes desinfectantes físicos y químicos. Entre los físicos se encuentran los rayos ultravioletes y el calor. Entre los desinfectantes químicos se tiene el cloro, yodo, y bromo. La forma más común de desinfección es empleando el hipoclorito de sodio (NaOCl) (Arboleda, 2000). Para este caso se dosificó hipoclorito de sodio comercial al 5%, eliminando totalmente los coliformes fecales (Tabla 17 y Tabla 18).

#### **4.3.5 Lecho de lodos**

No existió remoción de lodos del sistema a escala piloto. La cantidad de lodos producidos para el primer ensayo fue de 1,23 gramos por día, mientras que para el segundo ensayo de 1,31 gramos por día.

#### **4.3.6 Medición del flujo del sistema piloto**

Para garantizar el tiempo de residencia hidráulica en el sistema piloto se controló el flujo medido mediante la apertura de la válvula No. 2 del tanque de captación.

### 4.3.7 Puesta en marcha del sistema piloto

Una vez puesta en marcha la planta de tratamiento, el agua es captada por la bomba desde un dique construido artesanalmente en el interior del colector de aguas residuales del barrio El Belén. Cada vez que se requirió alimentar al sistema se colocó manualmente la bomba en el dique. En el tanque de captación se instaló una válvula flotadora que permitió el control de la cantidad de agua a tratar. El sistema de control automático de temperatura permitió el encendido y apagado de las resistencias que mantuvieron al RAFA entre 15 y 25 °C.

### 4.4 Calidad de agua

En cuanto a la calidad del agua en términos de DQO se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 13; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** para el ensayo 1 y Tabla 14; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** para el ensayo 2.

Las eficiencias de remoción de DQO fueron calculadas dividiendo el valor promedio del parámetro a la entrada de la planta sobre el valor promedio de salida para diseñar el escalamiento. Para cada tratamiento se encontró intervalos de confianza para el agua la DQO de entrada, DQO de salida y porcentaje de remoción; usando el estadístico T de students por la naturaleza de la muestra, a un nivel de confianza del 99%. La variación promedio de DQO para cada ensayo se muestra en la **Error! La autoreferencia al marcador no es válida.** y Tabla 16.

**Tabla 13**

*Ensayo 1, un día de retención*

<i>DQO entrada (mg/l)</i>	<i>DQO salida (mg/l)</i>	<i>Remoción (%)</i>
457	180	60,61
	92	
374	120	
	128	
	119	68,18

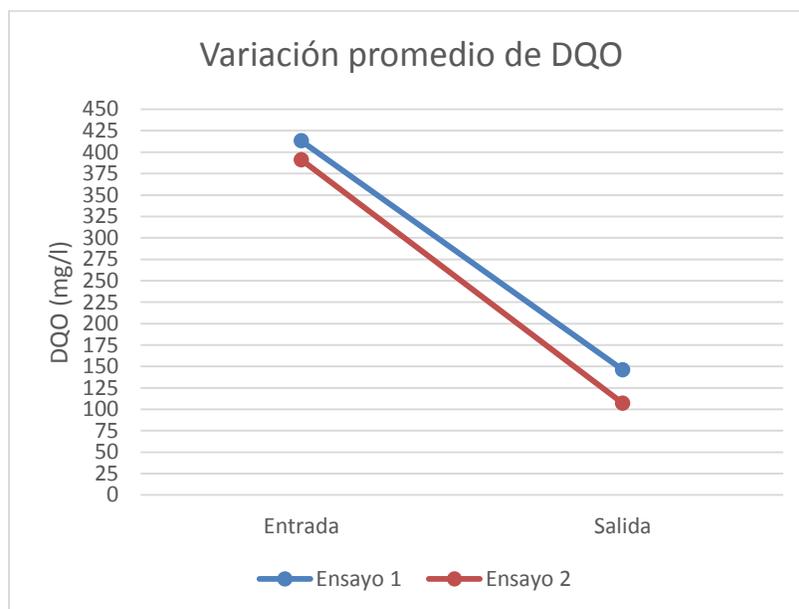
Continúa

	438	137	
		139	
	383	143	67,35
		195	
		200	47,78
	173	150	
<b>Promedio</b>	413	145,73	60,98
<b>Desviación estándar</b>	40,75	33,57	9,43

**Tabla 14**

*Ensayo 2, dos días de retención.*

	<b>DQO entrada (mg/l)</b>	<b>DQO salida (mg/l)</b>	<b>Remoción (%)</b>
	380	111	70,79
	402	108	73,13
	405	114	71,85
	395	107	72,91
	401	101	74,81
	389	110	71,72
	403	99	75,43
	353	109	69,12
<b>Promedio</b>	391	107,37	72,54
<b>Desviación estándar</b>	9,09	5,40	1,33



**Figura 24.** Variación de DQO promedio

En la Tabla 15 y Tabla 16 se muestra los límites superiores e inferiores de DQO medidos tanto para el ensayo 1 como para el ensayo 2, respectivamente.

**Tabla 15**

*Remoción de DQO - Ensayo 1*

	<i>Límite inferior</i>	<i>Límite superior</i>
<i>DQO entrada</i>	369,81	456,19
<i>DQO salida</i>	110,14	181,31
<i>Remoción</i>	50,5	71,46

**Tabla 16**

*Remoción de DQO - Ensayo 2*

	<i>Límite inferior</i>	<i>Límite superior</i>
<i>DQO entrada</i>	381,37	400,63
<i>DQO salida</i>	101,65	113,1
<i>Remoción</i>	71,57	74,52

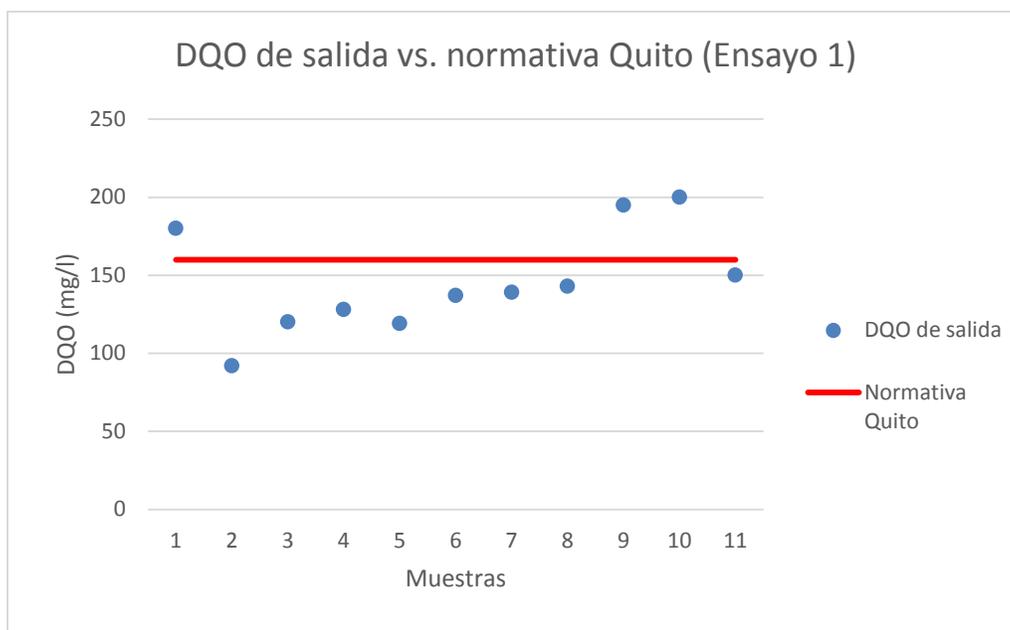
Se encontró la diferencia estadística de ambas muestras con la prueba t de student para comprar medias de dos muestras.

$$t = \frac{\bar{X} - \bar{Y}}{\sqrt{\frac{(n-1)v_1^2 + (m-1)v_2^2}{n+m-2} * \left(\frac{1}{n} + \frac{1}{m}\right)}}$$

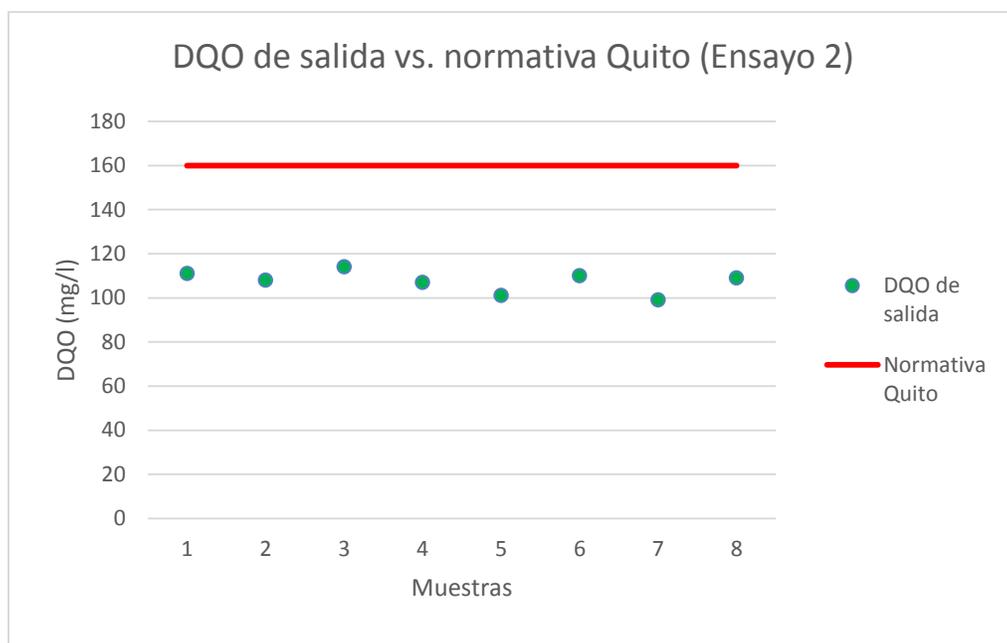
Se obtuvo un valor de 11,98 como t observado, siendo t (0,001; 14) 2,624; da como resultado que las medias son distintas, con un nivel de confianza de 99%.

Teniendo en cuenta la normativa ambiental de Quito que es la que rige al barrio “El Belén” se realizó la comparación de calidad del agua en función al límite máximo permisible de descarga a cuerpos de agua dulce (DQO de 160 mg/l) tanto para el ensayo 1 como para el ensayo 2, obteniendo los siguientes resultados que se muestran en la Figura 25 y Figura 26 respectivamente.

La t de student sirve para seleccionar si son significativamente diferentes y seleccionar uno de los tratamientos



**Figura 25.** Comparación con normativa para DQO- ensayo 1



**Figura 26.** Comparación con normativa para DQO- ensayo 2

### Análisis de laboratorio

Se realizaron análisis en un laboratorio externo del agua cruda y tratada, tanto para el ensayo 1 (Tabla 17) como para el ensayo 2 (Tabla 18) y se analizó el porcentaje de remoción para cada parámetro.

**Tabla 17**

*Análisis de laboratorio externo – ensayo 1*

<i>Parámetro</i>	<i>Unidad</i>	<i>Agua cruda</i>	<i>Agua tratada</i>	<i>Porcentaje de remoción</i>
<i>Demanda Química de Oxígeno (DQO)</i>	<i>mg/l</i>	413	146	64,71
<i>Tensoactivos</i>	<i>mg/l</i>	1,8	0,4	77,77
<i>pH</i>		7,71	7	9,201
<i>Conductividad eléctrica</i>	<i>mS/cm</i>	510	250	50,98
<i>Sólidos suspendidos totales</i>	<i>mg/l</i>	75	<50	33,33
<i>Coliformes totales</i>	<i>NMP/100 ml</i>	>2420	0	100
<i>Nitrógeno</i>	<i>mg/l NTK</i>	46,8	16,8	64,10
<i>Fósforo</i>	<i>mg/l (PO<sub>3</sub>)<sub>4</sub></i>	22,1	5,2	76,47

**Tabla 18**

*Análisis de laboratorio externo – ensayo 2*

<i>Parámetro</i>	<i>Unidad</i>	<i>Agua cruda</i>	<i>Agua tratada</i>	<i>Porcentaje de remoción</i>
<i>Demanda Química de Oxígeno (DQO)</i>	<i>mg/l</i>	391	108	72,44
<i>Tensoactivos</i>	<i>mg/l</i>	1	0,2	80
<i>pH</i>		7,14	7	1,96
<i>Conductividad eléctrica</i>	<i>mS/cm</i>	390	150	61,54
<i>Sólidos suspendidos totales</i>	<i>mg/l</i>	75	<50	33,33
<i>Coliformes totales</i>	<i>NMP/100 ml</i>	>2420	0	100
<i>Nitrógeno</i>	<i>mg/l NTK</i>	46,8	15,7	66,45
<i>Fósforo</i>	<i>mg/l (PO<sub>3</sub>)<sub>4</sub></i>	22,1	4,8	78,28

En la evaluación de los resultados comparándolos con lo que establece la norma y sus límites máximo permisibles para el DM de Quito (Tabla 19), el agua de los dos ensayos cumple normativa a la salida del tratamiento, sin embargo, los valores del ensayo dos son mucho

menores a los del ensayo uno. Porque el tiempo de residencia hidráulica es mayor para el ensayo dos que para el ensayo uno, esto es a mayor tiempo de biodegradación mayor calidad del efluente.

**Tabla 19**

*Agua tratada en comparación con límites máximos permitidos*

<i>Parámetro</i>	<i>Unidad</i>	<i>Límite máximo permisible</i>	<i>Agua tratada Ensayo 1</i>	<i>Agua tratada Ensayo 2</i>
<i>Demanda Química de Oxígeno (DQO)</i>	<i>mg/l</i>	<i>160</i>	<i>146</i>	<i>108</i>
<i>Tensoactivos</i>	<i>mg/l</i>	<i>0,5</i>	<i>0,4</i>	<i>0,2</i>
<i>pH</i>		<i>6-9</i>	<i>7</i>	<i>7</i>
<i>Conductividad eléctrica</i>	<i>mS/cm</i>	<i>--</i>	<i>250</i>	<i>150</i>
<i>Sólidos suspendidos totales</i>	<i>mg/l</i>	<i>80</i>	<i>&lt;50</i>	<i>&lt;50</i>
<i>Coliformes totales</i>	<i>NMP/100 ml</i>	<i>Remoción &gt; al 99%</i>	<i>0</i>	<i>0</i>
<i>Nitrógeno</i>	<i>mg/l NTK</i>	<i>50</i>	<i>16,8</i>	<i>15,7</i>
<i>Fósforo en forma de fostato</i>	<i>mg/l P-PO<sub>4</sub><sup>3-</sup></i>	<i>--</i>	<i>5,2</i>	<i>4,8</i>

#### **4.4.1 Proyección de la población futura**

##### **Población actual**

Según la Junta Parroquial, en el barrio El Belén existen 150 propietarios con una población de 650 personas.

##### **Población futura**

Según (INEC, 2017) la tasa de crecimiento anual entre el 2001 y 2010 para la parroquia de Pifo es de 3,33%. Se asume que el índice de crecimiento poblacional no ha variado desde el 2010 que fue realizado el último censo poblacional.

Según la norma de diseño para sistemas de abastecimiento de agua potable, disposición de excretas y residuos líquidos en el área rural (Norma CO 10.7 – 602), recomienda un período de

diseño de 20 años. Considerando que la población actual es de 650 habitantes y usando la ecuación 3.4 se calcula la población futura:

$$Pf = 902 \text{ habitantes (en 20 años)}$$

## Dotación

En base a la información levantada en la encuesta hidrosanitaria, se determinó que habitan 51 personas permanentes y 30 personas ocasionales en el barrio El Belén, sector Sur.

Todo sistema de alcantarillado sanitario está relacionado con el sistema de abastecimiento de agua potable, de tal manera que entre el 70 a 90% de la dotación de agua potable, es posteriormente arrojada a la red de alcantarillado sanitario. Esta relación entre el agua residual y el agua potable se conoce como, coeficiente de retorno. Para el cálculo del caudal para el barrio El Belén se toma 85% como coeficiente de retorno. En la Tabla 20 se detalla la dotación promedio, mínima y máxima según la información recopilada.

**Tabla 20**  
*Dotación población barrio El Belén*

<i>Descripción</i>	<i>Dotación (l/habitantes*día)</i>
<i>Dotación promedio</i>	141
<i>Dotación mínima</i>	53
<i>Dotación máxima</i>	310

En una publicación del diario El Comercio se señala que la población quiteña consume 220 litros diarios, muy por encima de Bogotá 168, Medellín, 150 y La Paz, 120. Según la Organización mundial de la Salud (OMS), se cataloga como acceso óptimo y de abastecimiento

continuo cuando el promedio de consumo de agua se encuentra por encima de 100 litros por día, garantizando la atención de todas las necesidades de higiene.

Según la clasificación para niveles de servicio para zonas rurales detallada en la normativa, el barrio El Belén se encuentra en el nivel IIb, cuenta con conexiones domiciliarias, con más de un grifo por casa y sistema de alcantarillado sanitario. Para esta clasificación la dotación por habitante que debería tener el barrio es de 75 litros por día.

El consumo promedio de agua por habitante de 141 litros por día se encuentra por encima de lo contemplado en la normativa para zonas rurales (71 l/hab-día), superando al consumo de La Paz. Al encontrarse cerca de la capital se puede indicar que mantiene la tendencia elevada de uso de agua quiteña.

#### 4.4.2 Diseño de caudal de aguas servidas

Aplicando las ecuaciones 3.5, 3.6 y 3.7; el valor de dotación promedio y las poblaciones tanto actual como futura se obtuvieron los siguientes valores (Tabla 21):

**Tabla 21**  
*Parámetros de diseño calculados*

<i>Parámetros</i>	<i>Unidades</i>	<i>Población</i>	
		<i>Actual</i>	<i>Futura</i>
<i>Dotación promedio</i>	<i>l/habitantes.-día</i>	141	141
<i>Caudal medio (Q<sub>md</sub>)</i>	<i>l/s</i>	0.9	1.25
<i>Coficiente de mayoración (M)</i>	--	3.66	3.54
<i>Caudal máximo (Q<sub>maxd</sub>)</i>	<i>l/s</i>	3.29	4.42

#### Caudal de aguas de infiltración

Teniendo en cuenta la distancia media entre pozos según información proporcionada por la EMAPS (Anexo H) es de 58,85 m y aplicando la ecuación 3.8, se obtuvo un valor de:

$$Q_i = 0.047 \text{ l/s}$$

### Caudal de aguas erradas

Según la OPS el caudal por aguas erradas puede ser del 5% al 10% del caudal máximo horario de aguas residuales.

$$Q_e = 0.329 \text{ l/s}$$

### Caudal de diseño

El caudal de diseño se calculó a partir de la ecuación 3.9. Obteniendo los valores mostrados en la Tabla 22.

**Tabla 22**  
*Caudal de diseño*

	<i>Población Actual</i>	<i>Población Futura</i>
<i>Caudal de diseño Qd (l/s)</i>	4.089	4.909

### 4.5 Diseño escala real

Un correcto diseño de los diferentes procesos de tratamiento de efluentes considera entre otros (Metcalf & Eddy, 2003):

- Período de vida útil de las instalaciones y del proyecto.
- Diagrama de flujo de las diferentes etapas a considerar.

- Criterios de diseño.
- Dimensionamiento de las unidades de tratamiento.
- Distribución física de los elementos.

#### 4.5.1 Periodo de vida útil de instalaciones y del proyecto

En la Tabla 23 se detalla los períodos de vida útil típicos para instalaciones de tratamiento de aguas residuales, sin embargo, esto estará definido por el constructor de la obra, de acuerdo a los materiales y equipos a instalar.

El período de diseño considerado es de 20 años por lo que el material de construcción también debe tener un período de vida útil de 20 años, esto se consigue realizando construyendo el sistema de tratamiento en hormigón. Por otro lado, la estructura tendrá una vida útil de 50 años y lo que menos vida útil tiene será el equipo electromecánico.

**Tabla 23**

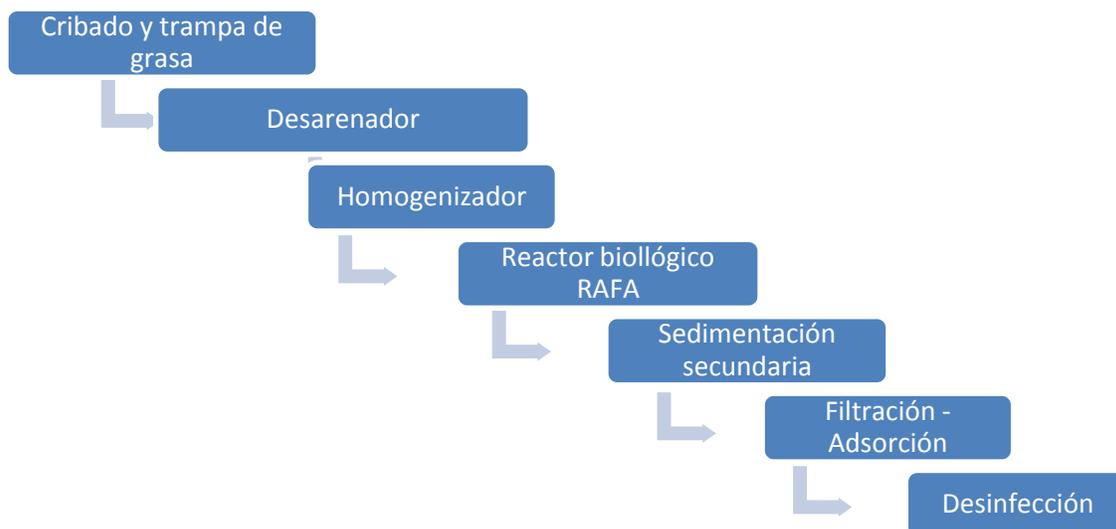
*Períodos de vida útil típicos para instalaciones de tratamiento de aguas*

<i>Instalación</i>	<i>Vida útil, años</i>
<i>Redes de alcantarillado</i>	<i>20-40</i>
<i>Estaciones de bombeo</i>	
<i>Estructuras</i>	<i>20-40</i>
<i>Equipos de bombeo</i>	<i>10-25</i>
<i>Plantas de tratamiento</i>	
<i>Estructuras</i>	<i>20-40</i>
<i>Equipos</i>	<i>10-20</i>
<i>Conducciones hidráulicas</i>	<i>20-40</i>

Fuente: Metcalf & Eddy, 1995

#### 4.5.2 Diagrama de flujo del sistema de tratamiento

En la Figura 27 se explica las diferentes fases que componen el sistema de tratamiento de agua residual doméstica considerado para el barrio El Belén.



**Figura 27.** Diagrama de flujo del proceso de tratamiento

### 4.5.3 Criterios de diseño

El caudal y la concentración de contaminantes son importantes en el diseño y operación de las unidades de tratamiento. Del caudal se obtiene el tamaño del sistema, y los requerimientos hidráulicos, mientras que la concentración de contaminantes indica el proceso con el cual debe ser tratada el agua.

Para el dimensionamiento del sistema se toma en consideración el período de diseño, la caracterización global de las muestras colectadas, el estudio de tratabilidad a escala piloto y el cálculo de caudal futuro a partir de los aforos realizados (Tabla 24).

**Tabla 24**  
*Datos de diseño.*

	<i>Parámetro</i>	<i>Unidad</i>	<i>Valor</i>
<b>Población</b>	<i>Período de diseño (años)</i>	<i>años</i>	20
	<i>Población actual</i>	<i>habitantes</i>	650
	<i>Población futura</i>	<i>habitantes</i>	902
<b>Caudal del efluente</b>	<i>Caudal medio aforo (<math>Q_{md}</math>)</i>	$m^3/d$	1,25
	<i>Caudal máximo (<math>Q_{max}</math>)</i>	$m^3/d$	4,42
	<i>Caudal de diseño (<math>Q_d</math>)</i>	<i>l/s</i>	4.90
<b>Calidad del efluente</b>	<i>Demanda Química de Oxígeno (DQO)</i>	<i>mg/l</i>	
	<i>Demanda Biológica de Oxígeno (DBO)</i>	<i>mg/l</i>	
	<i>Nitrógeno Total Kjeldahl (NKT)</i>	<i>mg/l</i>	
	<i>Sólidos suspendidos totales (SST)</i>	<i>mg/l</i>	
	<i>Tensoactivos</i>	<i>mg/l</i>	
	<i>Coliformes totales</i>	<i>mg/l</i>	
	<i>Nitrógeno total</i>	<i>mg/l</i>	
<b>Meteorología</b>	<i>Temperatura media anual</i>	$^{\circ}C$	13,5
	<i>Precipitación media anual</i>	<i>mm</i>	1272

Fuente: Caudal (Albuja, 2017) Calidad de agua (Laboratorios Hidroambiental - Labannncy, 2017) Datos climatológicos (Inhami, 2017)

#### 4.5.4 Dimensionamiento de las unidades de tratamiento

##### Cribado

El agua residual está cargada de sólidos de diferente tamaño. La operación unitaria para remover el material grueso es el cribado. El agua es conducida hacia un sistema de rejillas de diferente espesor entre barrotes. “Según el tamaño de las aberturas se clasifican como rejillas gruesas o finas. Las gruesas tienen aberturas mayores a 0,64 cm y las finas menores a 0,64 cm” (Rojas, 2010). En el anexo G se detalla los criterios de diseño para rejillas de limpieza manual y automática. En la Tabla 25 se muestran los datos del diseño.

En el anexo G se detalla la memoria de cálculo para el diseño de las rejillas. A continuación en la

Tabla 26 se coloca un cuadro resumen con la información más importante de esta etapa de tratamiento.

**Tabla 25***Datos de diseño rejillas de limpieza manual*

<i>Descripción</i>	<i>Símbolo</i>	<i>Unidad</i>	<i>Valor</i>
<i>Caudal de diseño</i>	<i>Qd</i>	<i>l/s</i>	<i>4.9 l/s</i>
<i>Velocidad a través de las barras</i>	<i>Vb</i>	<i>m/s</i>	<i>0.6</i>
<i>Espesor entre barras</i>	<i>E</i>	<i>cm</i>	<i>2.5</i>
<i>Grosor de la barra</i>	<i>G</i>	<i>cm</i>	<i>1.5</i>
<i>Material de construcción</i>	--	--	<i>Acero inoxidable</i>
<i>Pendiente con la vertical</i>	--	<i>grados</i>	<i>30</i>

**Tabla 26***Diseño rejillas de limpieza manual*

<i>Descripción</i>	<i>Símbolo</i>	<i>Unidad</i>	<i>Valor</i>
<i>Material de construcción</i>	<i>SS</i>	--	<i>Acero inoxidable</i>
<i>Longitud</i>	<i>L</i>	<i>m</i>	<i>0.082</i>
<i>Ancho</i>	<i>B</i>	<i>m</i>	<i>1</i>
<i>Profundidad de las barras</i>	<i>H</i>	<i>m</i>	<i>0.075</i>
<i>Borde libre</i>	--	<i>m</i>	<i>0.2</i>
<i>Número de barrotes</i>	<i>N</i>	<i>unidad</i>	<i>25</i>
<i>Pérdida de carga</i>	<i>Hf</i>	<i>m</i>	<i>15</i>

### Trampa de grasas

Los aceites y grasas pueden ser de origen animal, vegetal, o petróleo extraídos por el solvente. Son compuestos orgánicos de gran estabilidad difíciles de biodegradar. Proviene de carnes, cereales, semillas, nueces y ciertas frutas (Metcalf & Eddy, 2003).

Los aceites y grasas pueden taponar tuberías, provocar problemas en el tratamiento biológico y afectar la vida biológica en aguas superficiales formando películas flotantes (Metcalf & Eddy, 2003). La concentración de aceites y grasas en efluentes domésticos puede ser de 30 a 50 mg/l y constituir 20% de la DBO (Rojas, 2010).

La trampa para grasas es un sistema de tratamiento previo al tratamiento biológico. Se trata de un tanque con diseño hidráulico para retener grasas por diferencia de densidad. Se deben

instalar pantallas de control de flujo para garantizar régimen hidráulico adecuado (Rojas, 2010). La grasa flota y es retenida mientras el agua clara es evacuada.

Se diseña con tiempos de retención hidráulica de 15 a 30 minutos y tamaño de 2,8 m (Rojas, 2010). Con el fin de evitar taponamiento de las tuberías y garantizar el tratamiento biológico es necesario remover las grasas. Luego del sistema de cribado el agua residual es conducida por gravedad a la trampa de grasas de las siguientes características.

### **Desarenador**

Las arenas pueden ser arena, grava, cenizas y otros materiales con un peso específico superior a los sólidos degradables (Metcalf & Eddy, 2003).

Los desarenadores pueden ubicarse previo el tratamiento y posterior al cribado. Estos evitan el desgaste de equipos mecánicos y depósitos en el sistema de conducción existen tres tipos básicos de desarenadores: de flujo horizontal, aireados y de vórtice (Rojas, 2010).

Luego del cribado se tiene un sistema de tratamiento primario en el cual contempla el uso de operaciones físicas tales como: separación de grasas y arenas.

Para el diseño del sistema de tratamiento de agua residual del barrio El Belén se ha considerado un desarenador rectangular de flujo horizontal, con dos secciones para permitir el mantenimiento sin parar el sistema de tratamiento. En el mismo tanque se podrán separar arenas y grasas gracias al diseño hidráulico de apertura y cierre de válvulas. Además se tendrá una bomba de encendido manual para la remoción de estos lodos.

En el anexo G se detalla la memoria de cálculo para el diseño de trampa de grasas - desarenador. A continuación en la Tabla 27 se coloca un cuadro resumen con la información más importante de esta etapa de tratamiento.

**Tabla 27**  
*Trampa de grasas - desarenador*

<i>Descripción</i>	<i>Símbolo</i>	<i>Unidad</i>	<i>Valor</i>
<i>Material de construcción</i>			<i>Hormigón armado 210 kg/cm<sup>2</sup></i>
<i>Cantidad</i>		<i>U</i>	<i>2</i>
<i>Volumen</i>	<i>V</i>	<i>m<sup>3</sup></i>	<i>4,41</i>
<i>Tiempo de residencia</i>	$\Theta$	<i>h</i>	<i>0,5</i>
<i>Número de compartimientos</i>	<i>#</i>	<i>U</i>	<i>3</i>
<i>Longitud</i>	<i>L</i>	<i>m</i>	<i>3,7</i>
<i>Ancho</i>	<i>a</i>	<i>m</i>	<i>1,0</i>
<i>Altura total desarenador</i>	<i>H<sub>td</sub></i>	<i>m</i>	<i>1,2</i>
<i>Borde libre</i>	<i>bl</i>	<i>m</i>	<i>0.2</i>

## Homogenizador

Las variaciones horarias del caudal de agua residual pueden tener un efecto adverso en el funcionamiento de los procesos de la planta. El cambio constante de la cantidad y concentración de contaminantes presentes en el agua residual contribuye a que la operación eficiente de los procesos sea difícil. Además, muchas unidades de tratamiento tendrían que diseñarse para condiciones de gasto máximo, provocando su sobredimensionamiento. Por estas razones, es necesario el diseño y construcción de un homogenizador en un sistema de tratamiento de aguas residuales.

Para el sistema de tratamiento de los efluentes domésticos del barrio El Belén se adoptó un sistema de homogenización en línea para regular tanto el caudal como las cargas contaminantes.

Se diseñó una geometría cilíndrica para evitar cortocircuitos, evitar malos olores y facilitar el mantenimiento.

En el Anexo I se detalla la memoria de cálculo para el diseño del homogenizador. A continuación en la Tabla 28 se coloca un cuadro resumen con la información más importante de esta etapa de tratamiento.

**Tabla 28**  
*Dimensiones homogenizador*

<i>Descripción</i>	<i>Símbolo</i>	<i>Unidad</i>	<i>Valor</i>
<i>Material de construcción</i>			<i>Hormigón armado 210 kg/cm<sup>2</sup></i>
<i>Cantidad</i>		<i>U</i>	<i>2</i>
<i>Volumen homogenizador</i>	<i>V<sub>h</sub></i>	<i>m<sup>3</sup></i>	<i>127</i>
<i>Tiempo de residencia</i>	<i>Θ</i>	<i>h</i>	<i>12</i>
<i>Diámetro homogenizador</i>	<i>Ø<sub>h</sub></i>	<i>m</i>	<i>6,0</i>
<i>Altura total homogenizador</i>	<i>H<sub>th</sub></i>	<i>m</i>	<i>5,4</i>
<i>Borde libre</i>	<i>bl</i>	<i>m</i>	<i>0,9</i>

De acuerdo a Orozco (2005), el tiempo de retención hidráulica ( $\Theta_h$ ) preciso para un homogeneizador debe estar entre 6-24 horas. Dividiendo el volumen para el caudal de diseño se tiene el tiempo de retención hidráulica: 14,39 horas.

Según Rojas, 2000, se recomienda tener un sistema de sedimentación primaria con carga superficial menor de 40 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>-día como tratamiento primario si los sólidos suspendidos exceden de 200 mg/L. El promedio de sólidos suspendidos para las aguas residuales domésticas es de máximo 220 mg/l (Metcalf & Eddy, 2003). En el tanque de homogenización existirán sólidos que se depositen, por tal motivo se analiza la carga superficial. La carga superficial calculada es de 1,87 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>\*día para el caudal de diseño (Qd)

El pH promedio es 8.73, ligeramente alcalino, no representa un problema para el tratamiento razón por la cual no se considera adición de químicos.

Se dosificará aire para homogenizar el efluente y garantizar condiciones óxicas en el interior del tanque, la descripción de las características de los sopladores que entregarán el aire se muestra en la Tabla 29. Se requiere 4 wattios por cada metro cúbico de agua (Rojas, 2010).

**Tabla 29**  
*Soplador homogenizador*

<i>Descripción</i>	<i>Símbolo</i>	<i>Unidad</i>	<i>Valor</i>
<i>Material de construcción</i>			<i>Hierro fundido</i>
<i>Cantidad</i>		<i>U</i>	<i>3 (1 en stand by)</i>
<i>Potencia</i>	<i>Pot</i>	<i>HP</i>	<i>8</i>
<i>Energía</i>	<i>E</i>		<i>220V – Trifásica</i>
<i>Presión</i>	<i>P</i>	<i>psi</i>	<i>7.4</i>

### **Reactor anaerobio flujo ascendente (RAFA)**

Los reactores anaerobios de flujo ascendente (RAFA), se los conoce como UASB por sus siglas en inglés (Upflow Anaerobic Sludge Blanket), es un proceso de tratamiento en el cual el agua residual se pone en contacto con un manto de lodos. El agua ingresa por la parte inferior del reactor y fluye en sentido ascendente, al entrar en contacto con el manto de lodo es degradada por los microorganismos anaerobios presentes (Rojas, 2010).

Los gases que se generan de la reacción anaerobia permiten circulación en el interior contribuyendo a la formación de nuevos gránulos de lodo. En el interior del reactor se colocan deflectores para que las partículas sólidas se separen del gas. El gas es recolectado en la parte superior del reactor mientras que los sólidos se depositan en una cámara de sedimentación (Metcalf & Eddy, 2003).

La eficiencia del tratamiento depende del tiempo de residencia, el cual está directamente ligado a la temperatura y variaciones hidráulicas. La velocidad ascensional juega entonces un papel muy importante (Observatorio del Agua de El Salvador). El tiempo de permanencia de los sólidos dentro del reactor suele estar entre 30 y 60 días, tiempo que permite la estabilización del lodo purgado.

Según (BIODISOL) los parámetros de control para que el tratamiento anaerobio se efectúe eficientemente son pH, alcalinidad, potencial redox, nutrientes, tóxicos e inhibidores. Los parámetros operacionales temperatura, agitación, tiempo de retención, velocidad de carga orgánica.

**Tabla 30**

*Datos de diseño obtenidos en la planta piloto para el reactor RAFA*

<i>Descripción</i>	<i>Símbolo</i>	<i>Unidad</i>	<i>Valor</i>
<i>Demanda química de oxígeno promedio DQO</i>	<i>So</i>	<i>mg/l</i>	402
<i>Demanda bioquímica de oxígeno promedio DBO<sub>5</sub></i>	<i>So</i>	<i>mg/l</i>	220*
<i>Potencial hidrógeno</i>	<i>pH</i>	-	7
<i>Temperatura</i>	<i>T</i>	<i>°C</i>	23
<i>Tiempo de residencia</i>	<i>θ</i>	<i>h</i>	24
<i>Caudal medio de diseño</i>	<i>Q<sub>md</sub></i>	<i>l/s</i>	2.05

\*Fuente: (Metcalf & Eddy, 2003)

En el anexo G se detalla la memoria de cálculo para el diseño del RAFA. A continuación en la Tabla 31 se coloca un cuadro resumen con la información más importante de esta etapa de tratamiento.

**Tabla 31**

*Dimensiones reactor anaerobio flujo ascendente*

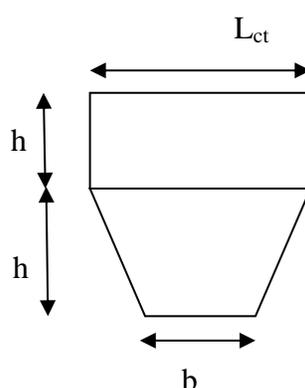
<i>Descripción</i>	<i>Símbolo</i>	<i>Unidad</i>	<i>Valor</i>
<i>Material de construcción</i>			<i>Hormigón armado 210 kg/cm<sup>2</sup></i>
<i>Cantidad</i>		<i>U</i>	1
<i>Volumen RAFA</i>	<i>V<sub>RAFA</sub></i>	<i>m<sup>3</sup></i>	88.52
<i>Tiempo de residencia</i>	<i>θ</i>	<i>h</i>	24
<i>Diámetro RAFA</i>	<i>Ø<sub>RAFA</sub></i>	<i>m</i>	4.74
<i>Altura total homogenizador</i>	<i>H<sub>th</sub></i>	<i>m</i>	5.4
<i>Borde libre</i>	<i>Bl</i>	<i>m</i>	0.4

## Sedimentador secundario

El objetivo de la sedimentación es la separación de partículas suspendidas, basada en la diferencia de densidades. Para el diseño de un sedimentador se debe tomar en cuenta la carga superficial y de sólidos. La primera representa la velocidad crítica de sedimentación que influye directamente en la eficiencia de remoción de sólidos. Según Metcalf & Eddy, 1995, como criterio típico se emplea una carga superficial de  $1.35 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{hora}$  basada en el caudal punta horario.

Según el tipo de flujo se dividen en sedimentadores de flujo horizontal, de flujo radial y de flujo ascensional (Rojas, 2010). Estos se diferencian por la geometría de construcción, los de flujo horizontal son generalmente rectangulares, los de flujo radial son circulares mientras que los de flujo ascensional pueden ser rectangulares o circulares. La ubicación del ingreso y salida de agua al sedimentador es la que permite que se dé la sedimentación con el flujo deseado.

El diseño del sedimentador secundario para los efluentes del barrio El Belén contempla un sedimentador de flujo horizontal, con geometría troncopiramidal, según lo muestra la **¡Error! No e encuentra el origen de la referencia..** La descripción del tanque se muestra en la Tabla 32.



**Figura 28.** Geometría del sedimentador secundario

Donde;

$h_1$ : altura de la parte prismática (m)

$h_2$ : altura de la parte cónica con ángulo entre  $55 - 70^\circ$  con la horizontal (m)

b: base (m)

Dos parámetros de diseño importantes para el análisis del sedimentador son la carga de superficie y carga de sólidos (Tabla 33). A continuación se detalla las cargas consideradas para la PTAR considerando los flujos medios y punta. En el Anexo I se encuentra la memoria de cálculo.

**Tabla 32**  
*Dimensiones sedimentador*

<i>Descripción</i>	<i>Símbolo</i>	<i>Unidad</i>	<i>Valor</i>
<i>Material de construcción</i>			<i>Hormigón armado 210 kg/cm<sup>2</sup></i>
<i>Cantidad</i>		<i>U</i>	2
<i>Volumen sedimentador</i>	$V_s$	$m^3$	56
<i>Tiempo de residencia</i>	$\Theta$	<i>h</i>	6
<i>Longitud</i>	<i>L</i>	<i>m</i>	3,6
<i>Altura total sedimentador</i>	$H_{ts}$	<i>m</i>	4,0
<i>Borde libre</i>	<i>bl</i>	<i>m</i>	0.2

**Tabla 33**  
*Carga de sólidos superficial Metcalf & Eddy vs PTAR*

<i>Tipo de tratamiento</i>	<i>Carga de superficie</i> $m^3/m^2h$		<i>Carga de sólidos</i> $Kg/m^2h$		<i>Profundidad</i> <i>(m)</i>
	<i>Media</i>	<i>Punta</i>	<i>Media</i>	<i>Punta</i>	
<i>Sedimentación a continuación del proceso de fangos activados</i>	0,67 8- 1,35 6	1,69 5- 2,03 5	3,9- 5,85	9,76	3,6 - 6
<i>Sedimentador secundario</i>	0,65	1,39	0,08	0,17	3,7

#### 4.5.5 Otros parámetros de control

El valor de pH en el tanque biológico se encuentra entre 7 y 8.

Los nutrientes necesarios para un tratamiento biológico anaerobio deben mantener una relación DBO<sub>5</sub>/N/P: 100/0.5/0.1. A continuación se muestra la relación en el agua cruda y la requerida de manera teórica (Tabla 34).

**Tabla 34**  
*Relación de nutrientes en el tanque biológico*

<i>Parámetro</i>	<i>Unidad</i>	<i>Relación</i>
<i>Relación de nutrientes agua residual</i>	<i>DBO<sub>5</sub>:N:P</i>	<i>220/46.8/8.7</i>
<i>Relación de nutrientes teórica requerida</i>	<i>DBO<sub>5</sub>:N:P</i>	<i>220/1.45/0.29</i>
<i>Relación de nutrientes agua tratada estudio piloto</i>	<i>DBO<sub>5</sub>:N:P</i>	<i>47/16.8/2.04</i>

A continuación en la Tabla 35 se muestra un resumen de los parámetros de operación y diseño para el sistema de tratamiento de los efluentes domésticos del barrio El Belén. Según (Metcalf & Eddy, 2003) indica que la relación de nutrientes teórica requerida para un proceso biológico anaerobio debería tener DBO<sub>5</sub>:N:P 220/1,45/0,29. En comparación con el agua residual de El Belén 220/46,8/8,7, se tiene un exceso de nutrientes del. A pesar del exceso 96,9 % en nitrógeno y del 96,7% en fósforo nutricional, el prototipo a escala piloto muestra tener una remoción del 64,1% en nitrógeno y 76,5% en fósforo, evidenciando su alta eficiencia en remoción de nutrientes.

**Tabla 35**  
*Parámetros de operación y diseño reactor anaerobio flujo ascendente RAFA*

<i>Descripción</i>	<i>Símbolo</i>	<i>Unidad</i>	<i>Valor</i>	<i>Valor bibliográfico</i>	<i>Referencia</i>
<i>Tiempo de residencia hidráulica</i>	$\theta$	<i>H</i>	24	24-48	<i>(Metcalf &amp; Eddy, 2003)</i>
<i>Potencial Hidrógeno</i>	<i>pH</i>	<i>Unidades de pH</i>	7 – 8		<i>(Albuja, 2017)</i>
<i>Carga orgánica volumétrica</i>	<i>COV</i>	<i>g DQO/l d</i>	1.9	4-12	<i>(Metcalf &amp; Eddy, 2003)</i>
<i>Edad de lodos</i>	$\theta_c$	<i>D</i>	20	>11 a 18/°C	<i>(Droste, 1997)</i>
<i>Sólidos</i>	<i>SSV</i>	<i>mg/l</i>	1500		

<i>suspendidos volátiles del reactor</i>					
<i>Tasa de crecimiento bacteriano</i>	<i>de</i>	$\mu$	$d^{-1}$	0.99	(Zegers, 1987)
<i>Coefficiente de respiración endógena</i>	<i>de</i>	$K_d$	$d^{-1}$	0,94	(Albuja, 2017)
<i>Coefficiente de producción máxima</i>	<i>de</i>	$Y$	mg SSV/mg DBO <sub>5</sub>	0.06	(Metcalf & Eddy, 2003)
<i>Producción de lodos</i>	<i>de</i>	$P_x$	g/d	128,6	(Albuja, 2017)

## CONCLUSIONES

La población actual del barrio El Belén es de 650 personas, con una dotación promedio diaria de 141 litros por habitante.

El flujo del agua residual del barrio El Belén es de 4.9 litros por segundo calculado para un período de diseño de 20 años. Para el funcionamiento del sistema de tratamiento se debe contemplar la separación de agua residual de agua lluvia.

La implementación de un sistema a escala piloto permitió el escalamiento del sistema de tratamiento de aguas residuales domésticas para el barrio El Belén, parroquia Pifo. El tiempo de degradación adoptado es de 24 horas.

Se realizó el plan para el monitoreo de calidad de agua de la planta piloto ubicada en el barrio El Belén.

Se realizó una encuesta hidrosanitaria que muestra que toda la población cuenta con abastecimiento continuo de agua potable y el mayor consumo de agua en el día se la realiza para limpieza y preparación de comida con 30 % a 32 % respectivamente.

El sistema de tratamiento de aguas residuales domésticas a escala piloto contó con captación, homogenización, biorremediación anaerobia, filtración, adsorción, y desinfección para un caudal de 200 l/d.

La calidad de agua residual doméstica emitida por el barrio El Belén incumple la normativa ambiental vigente de descarga al cauce en el Distrito Metropolitano de Quito.

Los resultados de los análisis de laboratorio permiten establecer que la planta piloto tiene una alta eficiencia en remoción de coliformes y reducción de la DBO<sub>5</sub>. La eficiencia de remoción de coliformes fue del 100%, mientras que para la DBO<sub>5</sub> fue del 99,96%.

El pH de cada una de las muestras se mantiene estable dentro del proceso de tratamiento de agua residual, por lo que este parámetro no incide en el funcionamiento de la planta piloto del Barrio El Belén.

Con un tiempo de residencia hidráulica de 48 horas se tiene un porcentaje de remoción máximo de Demanda Química de Oxígeno de 74.52%, mientras que con un tiempo de residencia hidráulica de 24 horas se alcanza un máximo de 71.46% para un rango de temperatura de trabajo de 15 a 25°C.

El agua residual del barrio El Belén tiene un exceso nutricional requerido para un tratamiento anaeróbico del 96,9 % en nitrógeno y del 96,7% en fósforo según requerimiento teórico. Sin embargo, el prototipo logró su remoción evidenciando su alta eficiencia.

Los sistemas biológicos anaeróbicos requieren bajas concentraciones de nutrientes. Según Metcalf & La relación de la demanda bioquímica, nitrógeno y fósforo requerida es de 100/0.5/0.1 respectivamente. El sistema demostró que puede remover un 64,1 % en exceso de nitrógeno y 76.6 % de exceso de fósforo.

Existe mayor producción de lodos para un tiempo de residencia de 48 horas, 1, 31 g/d.

## 6 RECOMENDACIONES

Realizar ensayos a diferentes temperaturas, para observar si la degradación anaeróbica puede darse sin necesidad de calentamiento.

La carga orgánica volumétrica que puede tolerar el sistema biológico diseñado es de 1.9 g DQO/l.d, por lo que la empresa que construya el sistema diseñado deberá contemplar la separación de aguas lluvias en el sistema de alcantarillado.

Es importante observar el comportamiento de los nutrientes de manera independiente en cada uno de los subprocesos del sistema de tratamiento para determinar cuál de ellos fue el responsable de la remoción.

Realizar ensayos para observar la curva de degradación anaeróbica para tensoactivos.

Se recomienda realizar ensayos de fertilizantes y pesticidas, ya que al ser una población rural estos elementos se los usa constantemente.

Se recomienda realizar ensayos con dosificación de biomasa y evaluar si puede disminuir el tiempo de residencia. Evaluar la caracterización de la bacteria acetoclástica *Methanotrix*.

Se recomienda realizar el cálculo estructural de los tanques en función del estudio de suelo según área asignada para la ubicación del sistema de tratamiento de agua residual.

Se recomienda a la Junta que realice la gestión ante la autoridad competente para la instalación del sistema de tratamiento a escala real.

## 7 BIBLIOGRAFÍA

- Anaya-Durand, A., & Pedroza-Flores, H. (enero-junio de 2008). Escalamiento, el arte de la ingeniería química: Plantas piloto, el paso entre el huevo y la gallina. *Tecnología, Ciencia, Educación*, 23(1), 31-39.
- Arboleda, J. (2000). *Teoría y práctica de la purificación del agua* (tercera ed.). Acodal.
- Bermúdez, R., Rodríguez, S., Martínez, M., & Terry, A. (2011). *Ventajas del empleo de reactores UASB en el tratamiento de residuales líquidos para la obtención de biogas*.
- Berrendero, J. (2008). *Universidad Autónoma de Madrid*. Obtenido de <https://www.uam.es/UAM/Home.htm?language=es>
- BIODISOL. (s.f.). <http://www.biodisol.com>. Recuperado el 1 de Noviembre de 2017, de <http://www.biodisol.com/que-es-el-biogas-digestion-anaerobia-caracteristicas-y-usos-del-biogas/digestion-anaerobia-proceso-de-produccion-de-biogas-biocombustibles-energias-renovables/>
- Casablanca, C., & Ferrando, S. (s.f.). Cambio de escala en biorreactores. Madrid.
- Casablanca, G., & Ferrando, S. (s.f.). *Ingeniería Bioquímica*.
- Castillo, E., & Solano, J. (2006). Evaluación operacional de un sistema a escala laboratorio de biopelícula anaerobia soportada para el tratamiento de aguas residuales domésticas. 19, 18-22. ION.
- CEPES. (s.f.). [www.cepes.org.pe](http://www.cepes.org.pe). Recuperado el 27 de Septiembre de 2017
- De Lemos, C. A. (2007). *Anaerobic Reactors*. Londres: IWA Publishing.
- Droste, R. (1997). *Theory and Practice of Water and Wastewater Treatment*.
- EMAAP-Q. (17 de Mayo de 2006). Programa de Saneamiento Ambiental. *Plan parcial de ordenamiento de las Parroquias Orientales: Puenbo, Pifo, Tababela, Yaruquí, Checa, El Quinche y Guayllabamba*. Quito, Ecuador.
- FIUBA. (s.f.). Sistemas, modelos y simulación. *Simulación*, 2-19.
- Freire, P. (2012). Análisis y evaluación de un sistema de tratamiento de aguas residuales para la empresa TEIMSA. Ambato.
- GAD. (2015). Actualización del Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial Parroquia Alangasí. *PDOT Diagnóstico Alangasí*.
- GAD. (2015). Actualización del Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial Parroquia Alangasí. *PDOT Diagnóstico Alangasí*.

- GADP, T. (Agosto de 2012). Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial de la Parroquia Tumbaco 2012-2025. Tumbaco.
- GADPifo. (2015). Actualización del Plan de Ordenamiento Territorial de la Parroquia de Pifo. Quito, Pichincha, Ecuador: Capservs Medios.
- GADPP. (15 de Agosto de 2015). Actualización Del Plan De Desarrollo y Ordenamiento Territorial Del Gobierno Provincial De Pichincha. Pichincha.
- Hydroambiental. (2012). Estudio de tratabilidad agua residual doméstica.
- INEC. (2017). Población y tasas de crecimiento intercensal de 2010, 2001, 1999 por sexo según parroquias. Quito, Ecuador.
- INHAMI. (2017). Red de estaciones automáticas. *Estación metereológica La Tola M002*. Quito, Ecuador.
- INHAMI; Red de estaciones Automáticas. (s.f.). *Estación meteorologica La Tola M0002*. Quito. Obtenido de <http://186.42.174.236/InamhiEmas/#>
- Isch, E. (2011). *Contaminación de las aguas y políticas para enfrentarla*. Camaren, Quito.
- Lapsolite. (2017). *Lapsolite*. Obtenido de <http://www.lapsolite.com.mx/productos/?pro=61&producto=Homogenizaci%C3%B3n&id=1>
- León, F. (2012). Estudio y diseño del sistema de agua potable para la comunidad El Salado del cantón Sozoranga, provincia de Loja. Loja.
- Levin, M., & Gealt, M. (1997). *Biotratamiento de residuos tóxicos y peligrosos 1997*. Madrid: Mc Graw Hill.
- Machado, W., Marquetti, F., Gusils, C., & Quaiá, E. (Diciembre de 2016). *Revista Industrial y agrícola Tucumán*, 93(2).
- MAE. (2015). Norma de Calidad Ambiental y de descarga de efluentes, Recurso agua (Libro VI, Anexo 1). Ecuador.
- Marquéz, M., & Martínez, S. (2011). Reactores anaerobios de Flujo Ascendente RAFAs. México.
- Metcalf & Eddy. (2003). *Ingeniería de las Aguas Residuales: Tratamiento, vertido y reutilización*. Mc Graw Hill.
- Metcalf & Eddy, I. (1995). *Ingeniería de aguas residuales Tratamiento, vertido y reutilización*. España: McGraw Hill Interamericana de España, S. A. U.
- Ministerio del Ambiente. (2015). *Norma de Calidad Ambiental y de Descarga de efluentes: Recurso Agua (LIBRO VI ANEXO 1)*. Obtenido de <http://extwprlegs1.fao.org/docs/pdf/ecu112180.pdf>

- Naciones Unidas. (2007). *Encuestas de hogares en los países en desarrollo y en transición*. Nueva York.
- Observatorio del Agua de El Salvador. (s.f.). *www.agua.marn.gob.sv*. Recuperado el 1 de Noviembre de 2017, de [www.agua.marn.gob.sv/Documentos/TallerAgus2015/RAFA\\_final\\_curvas.pdf](http://agua.marn.gob.sv/Documentos/TallerAgus2015/RAFA_final_curvas.pdf)
- OPS/OMS. (2015). *Proceso de Construcción y validación de Norma técnica para regular el abastecimiento de agua y saneamiento rural*. El Salvador.
- Perales, J. (2000). *Procesos Biológicos de cultivo en suspensión aerobio*. Recuperado el 8 de Agosto de 2016, de <http://uniciencia.ambientalex.info/infoCT/Procesosbioloensuspes.pdf>
- Plan Metropolitano de Desarrollo y Ordenamiento Territorial. (2015). DMQ.
- Quito, A. (2016). *www.quito.gob.ec*. Recuperado el 6 de Diciembre de 2016, de [www.quito.gob.ec: http://www.quito.gob.ec/index.php/administracion-zonales/administracion-zonal-tumbaco#area-de-intervencion](http://www.quito.gob.ec/index.php/administracion-zonales/administracion-zonal-tumbaco#area-de-intervencion)
- Remtavares. (22 de Marzo de 2010). *Madrid El Agua*. Recuperado el 10 de Agosto de 2016, de [La biorremediación puede ser útil para la degradación de algunos contaminantes: http://www.madrimasd.org/blogs/remtavares/2010/03/22/131435](http://www.madrimasd.org/blogs/remtavares/2010/03/22/131435)
- Rittmann, B., & McCarty, P. (2001). *Bioteología del medio ambiente*. Madrid: McGraw Hill Interamericana de España, S.A.U.
- Rodriguez, J. (s.f.). *Tratamiento anaerobio de aguas residuales*. Recuperado el 19 de diciembre de 2016, de <http://www.ingenieroambiental.com/4014/tratamiento545.pdf>
- Rojas, J. A. (2010). *Tratamiento de aguas residuales. Teoría y principios de diseño*. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Romero R., J. (2000). *Tratamiento de aguas residuales. Teoría y Principios de diseño*. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Secretaría del Agua. (s.f.). Norma CO 10.7-602. *Norma de Diseño para sistemas de abastecimiento de agua potable, disposición de excretas y residuos líquidos en el área rural*.
- SENAGUA. (s.f.). Norma de diseño para sistemas de abastecimiento de agua potable, disposición de excretas y residuos líquidos en el área rural. *Norma CO 10.7 - 602* .
- Valencia , R., Sánchez, J., Ortiz, E., & Gómez, J. (2007). La contaminación de los ríos, otro punto de vista. Primera parte. *Ciencia en la Frontera revista de ciencia y tecnología de la UACJ, No. 1*, 35-49.
- Zegers, F. (1987). *Arranque y operación de sistemas de flujo ascendente con manto de elodo-UASB*. Santiago de Cali.