

Información Importante

La Universidad Santo Tomás, informa que el(los) autor(es) ha(n) autorizado a usuarios internos y externos de la institución a consultar el contenido de este documento a través del catálogo en línea, página web y Repositorio Institucional del CRAI-USTA, así como en las redes sociales y demás sitios web de información del país y del exterior con las cuales tenga convenio la Universidad.

Se permite la consulta a los usuarios interesados en el contenido de este documento, para todos los usos que tengan finalidad académica, siempre y cuando mediante la correspondiente cita bibliográfica se le dé crédito al trabajo de grado y a su autor, nunca para usos comerciales.

De conformidad con lo establecido en el Artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, la Universidad Santo Tomás informa que “los derechos morales sobre documento son propiedad de los autores, los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.”

**Centro de Recursos para el Aprendizaje y la Investigación, CRAI-USTA
Universidad Santo Tomás, Bucaramanga**

**Diseño de un Tren de Tratamiento para el Manejo de Las Aguas Residuales Domésticas
generadas en el Campus Piedecuesta de la Universidad Santo Tomás, Seccional
Bucaramanga**

Laura Nathaly Forero Rojas, Laura Patricia Lozano Díaz

Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Ambiental

Director

Martha Jhoana Estévez Gómez

Magister en Ingeniería Civil

Universidad Santo Tomás, Bucaramanga

División de Ingenierías y Arquitectura

Ingeniería Ambiental

2020

Dedicatoria

Este proyecto está dedicado a nuestras familias, especialmente a nuestras madres que estuvieron en todo nuestro proceso formativo, brindándonos su apoyo incondicional, enseñándonos a no desfallecer en los momentos difíciles que se pueden llegar a presentar en el transcurso de nuestra vida profesional. De igual manera, a todas las personas que estuvieron presentes en estos años aportándonos sus conocimientos y compartiéndonos sus experiencias labores, lo cual fue significativo para nosotras.

Agradecimientos

Primeramente, a Dios y a nuestra familia por su apoyo incondicional en toda nuestra carrera, porque sin ellos no podríamos haber llegado hasta aquí.

Seguidamente a la profesora Martha Jhoana Estévez Gómez por ser nuestra guía y apoyo incondicional en esta última etapa, dispuesta a brindarnos sus conocimientos con la mejor disposición, dedicación y comprensión. De igual manera, a la Doctora María Claudía Latome Gómez por su apoyo y amabilidad en brindarnos la información disponible del sistema de gestión ambiental que se lleva a cabo en la institución. Finalmente, a todos nuestros docentes y compañeros que estuvieron presentes a lo largo de nuestra carrera y que de alguna manera aportaron un granito de arena para nuestra formación como futuras ingenieras

Contenido

Pág.	
Glosario	12
Resumen	15
Abstract	16
Introducción	17
1. Objetivos	20
1.1 Objetivo General.....	20
1.2 Objetivos Específicos	20
2. Marco Referencial	21
2.1 Marco Teórico	21
2.1.1 Agua residual.....	21
2.1.2 Sistemas de tratamiento de aguas residuales.....	23
2.1.3 Vegetación.....	29
2.2 Estado del Arte	31
2.3 Marco Legal.....	45
3. Método	46
3.1 Realización del Diagnóstico de las Aguas Residuales Domésticas Generadas en el Campus Piedecuesta de la Universidad Santo Tomás – Seccional Bucaramanga, Teniendo en Cuenta el Manejo Actual y las Características Fisicoquímicas y Microbiológicas de las Mismas	

3.2	Determinación de los Parámetros Críticos de Diseño que Influyen en la Eficiencia de un Sistema de Tratamiento Descentralizado de Acuerdo con las Características del Agua Residual a Tratar	48
3.3	Propuesta del Diseño de un Tren de Tratamiento Descentralizado, el cual Cumple con los Requisitos Establecidos por la Normativa Ambiental Vigente, Para el Manejo de las Aguas Residuales Domésticas del Campus Piedecuesta	49
4.	Resultados y Discusión	50
4.1	Diagnóstico de las Aguas Residuales Domésticas	50
4.1.3	Determinación de la población beneficiada.	53
4.1.4	Características socioculturales de la población y participación comunitaria....	53
4.1.6	Diagnóstico del manejo actual de las aguas residuales generadas en el Campus de Piedecuesta de la Universidad Santo Tomás.	58
4.1.7	Descripción del sistema de tratamiento de aguas residuales existente en el campus Piedecuesta	60
4.1.8	Características fisicoquímicas y microbiológicas de las aguas residuales generadas en el campus Piedecuesta.	63
4.1.9	Evaluación de alternativas.....	71
4.2	Parámetros Críticos que Influyen en la Eficiencia del Sistema de Tratamiento	74
4.3	Dimensionamiento del Sistema Descentralizado	91
4.3.1	Tanque de almacenamiento.....	92
4.3.2	Tanque séptico.....	93
4.3.3	Filtro anaerobio de flujo ascendente (FAFA).	96

4.3.4	Humedal artificial de Flujo Subsuperficial Horizontal.	97
4.3.5	Diseño del tren de tratamiento descentralizado.....	99
4.3.6	Balance de masas.	100
4.3.7	Mantenimiento del sistema de tratamiento.....	103
5.	Conclusiones	104
6.	Recomendaciones.....	106
	Referencias Bibliográficas	108

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Características físicas, químicas y biológicas del agua residual</i>	22
Tabla 2. <i>Ventajas y desventajas de los humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal</i>	29
Tabla 3. <i>Taxonomía de la Heliconia psittacorum</i>	31
Tabla 4. <i>Normativa Colombiana</i>	45
Tabla 5. <i>Parámetros físicos, químicos y biológicos</i>	47
Tabla 6. <i>Cobertura municipal de energía eléctrica para el año 2014</i>	57
Tabla 7. <i>Inventario de baterías sanitarias</i>	60
Tabla 8. <i>Generalidades de los criterios de diseño del tanque séptico existente y su comparación con lo establecido en la resolución 0330 del 2017</i>	62
Tabla 9. <i>Ubicación de los puntos de monitoreo</i>	63
Tabla 10. <i>Resultados de la caracterización fisicoquímica y microbiológica de las aguas residuales de estudio</i>	64
Tabla 11. <i>Relación DBO/DQO</i>	71
Tabla 12. <i>Criterios a evaluar</i>	73
Tabla 13. <i>Justificación de los criterios evaluados</i>	73
Tabla 14. <i>Evaluación de alternativas</i>	74
Tabla 15. <i>Ponderación de los valores de intensidad</i>	74
Tabla 16. <i>Variables de diseño para el dimensionamiento de un tanque séptico</i>	75
Tabla 17. <i>Variables de diseño para el dimensionamiento de un filtro anaerobio de flujo ascendente</i>	79

Tabla 18. <i>Resumen de artículos de la utilización de Filtros Anaerobios de flujo ascendente ...</i>	82
Tabla 19. <i>Variables de diseño para el dimensionamiento de un humedal artificial de flujo subsuperficial.....</i>	83
Tabla 20. <i>Resumen de artículos de la utilización de humedales artificiales</i>	90
Tabla 21. <i>Condiciones iniciales para el desarrollo del diseño</i>	92
Tabla 22. <i>Mantenimiento de las unidades de tratamiento.....</i>	103

Lista de figuras

	Pág.
<i>Figura 1.</i> Humedal artificial de flujo superficial.	27
<i>Figura 2.</i> Humedales de flujo subsuperficial vertical.....	28
<i>Figura 3.</i> Humedales de flujo subsuperficial horizontal.	28
<i>Figura 4.</i> Planta <i>Heliconia</i>	31
<i>Figura 5.</i> Ubicación del Área de influencia.....	55
<i>Figura 6.</i> Distribución de la red de alcantarillado - Campus Piedecuesta. Adaptado de la Universidad Santo Tomás.	59
<i>Figura 7.</i> Plano del tanque séptico.	61
<i>Figura 8.</i> Plano del tanque de almacenamiento. Adaptado de La Universidad Santo Tomas....	61
<i>Figura 9.</i> Ubicación de las alternativas 1 y 2	72
<i>Figura 10.</i> Dimensionamiento tanque de almacenamiento	93
<i>Figura 11.</i> Dimensionamiento tanque séptico	94
<i>Figura 12.</i> Dimensionamiento FAFA.....	97
<i>Figura 13.</i> Diseño del humedal artificial.....	99
<i>Figura 14.</i> Diseño en 3D	100
<i>Figura 15.</i> Balance de masas del sistema de tratamiento	101
<i>Figura 16.</i> Comparación de Efectividad de los Sistemas de Tratamiento.....	102
<i>Figura 17.</i> Comparación de las remociones obtenidas para los coliformes fecales	102

Lista de apéndices

(Ver apéndice adjunto en medio digital)

Apéndice A. Memoria de pozos sépticos

Apéndice B. Plano del Campus de Piedecuesta

Apéndice C. Memoria de cálculo del sistema de tratamiento descentralizado propuesto

Apéndice D. Diseño en 3D de un sistema de tratamiento descentralizado

Glosario

AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS: Son las procedentes de los hogares, así como las de las instalaciones en las cuales se desarrollan actividades industriales, comerciales o de servicios y que correspondan a: Descargas de los retretes, servicios sanitarios, sistemas de aseo personal (duchas y lavamanos), áreas de cocinas y cocinetas, pocetas de lavado de elementos de aseo y lavado de paredes y pisos y del lavado de ropa (No se incluyen las de los servicios de lavandería industrial) (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015).

AGUAS RESIDUALES NO DOMÉSTICAS: Son las procedentes de las actividades industriales, comerciales o de servicios distintas a las que constituyen aguas residuales domésticas (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015).

COLIFORMES: La denominación genérica coliformes designa un grupo de especies bacterianas que tienen ciertas características bioquímicas en común e importancia relevante como indicadores de contaminación del agua y de alimentos. Las bacterias de este género se encuentran principalmente en el intestino de los humanos y de los animales de sangre caliente (Castro Muñoz, 2007).

COLIFORMES TOTALES: Bacterias Gram negativas, no esporoformadoras, oxidasa negativa, con capacidad de crecimiento aeróbico y facultativamente anaeróbico en presencia de sales biliares, que a temperatura especificada de 35°C +/- 2°C causan fermentación de lactosa con producción de gas. Poseen la enzima B-galactosidasa (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2017).

COLIFORMES FECALES: se define como el grupo de organismos coliformes que pueden fermentar la lactosa a 44-45°C. incluyen las bacterias del género *Escherichia* y también especies de *Klebsiella*, *Enterobacter* y *Citrobacter* (Ambientalys, 2018).

DEMANDA BIOLÓGICA DE OXÍGENO (DBO): parámetro obtenido en análisis de laboratorio que mide la cantidad de oxígeno que requieren los microorganismos para degradar la materia orgánica y es utilizado para determinar el contenido de materia orgánica en una muestra de agua (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2007).

DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO): parámetro obtenido en análisis de laboratorio que determina el contenido de materia orgánica, la cual es totalmente oxidada mediante sustancias químicas (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2007).

EX-SITU: Fuera de lugar (ChileCientifico, 2019).

FAFA: Filtros anaerobios de flujo ascendente es un tratamiento secundario utilizado para el tratamiento de las aguas residuales (Comisión Nacional del agua, 2015).

FOSFORO TOTAL (P): Parámetro obtenido en análisis de laboratorio que indica la cantidad de detergentes sintéticos y fertilizantes vertidos a un cuerpo de agua (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2004).

IN-SITU: En el sitio (ChileCientifico, 2019).

NITROGENO TOTAL (N): Es uno de los mayores contaminantes de las aguas residuales, debido a que disminuye el oxígeno disuelto de las aguas superficiales (Microlab Industrial, 2017).

PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR): es donde se realiza un tratamiento de las aguas residuales, con el objetivo de generar un efluente reutilizable para el entorno y así, evitar afectaciones en el medio ambiente. Estas plantas cuentan con cuatro fases de

tratamiento: preliminar, primario, secundario y terciario (Carrera Vargas & Florian Sanchez, 2013).

SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTAL (SST): parámetro obtenido en análisis de laboratorio que indica la presencia de sales disueltas, partículas en suspensión de carácter orgánico o inorgánico (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2007).

TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICO (TRH): es el tiempo de permanencia del agua en un sistema (Carrera Vargas & Florian Sanchez, 2013).

Resumen

El presente proyecto tuvo como objetivo principal diseñar un tren de tratamiento para el manejo descentralizado de las aguas residuales domésticas provenientes del Campus Piedecuesta. Inicialmente se solicitó el informe de la caracterización realizada en el pozo séptico existente por el laboratorio ECOSAM S.A.S. Seguidamente, se llevó a cabo una recopilación de las consideraciones de diseño a partir del análisis de referentes bibliográficos y de la normativa aplicable. Una vez seleccionados los criterios, se realizó la propuesta de diseño teniendo en cuenta las siguientes eficiencias teóricas determinadas a partir de la Resolución 0330 del 2017 y los referentes bibliográficos: para el tanque séptico una eficiencia proyectada del 30% para DBO-DQO, 50% para SST y 81% de coliformes fecales (CF); en el FAFA una eficiencia del 65% para DQO, 60% de DBO-SST y 80% CF; finalmente en el humedal artificial se estableció una eficiencia del 56% para DBO, 90% SST-DQO y 98% para CF.

Palabras Clave: Tren de tratamiento, tanque séptico, filtro anaerobio (FAFA), humedal artificial, aguas residuales domésticas, remoción.

Abstract

The main objective of this project was to design a treatment train for the decentralized management of domestic wastewater from Campus Piedecuesta. Initially, the report of the characterization carried out in the existing septic tank by the ECOSAM S.A.S. laboratory was requested. Next, a compilation of design considerations was carried out from the analysis of bibliographic references and the applicable regulations. Once the criteria were selected, the design proposal was made taking into account the following theoretical efficiencies determined from Resolution 0330 of 2017 and bibliographic references: for the septic tank a projected efficiency of 30% for DBO-DQO, 50% for SST and 81% for faecal coliforms (CF); in FAFA an efficiency of 65% for DQO, 60% of DBO-SST and 80% CF; finally in the artificial wetland an efficiency of 56% for DBO, 90% SST-DQO and 98% for CF was established.

Key Word: Treatment train, septic tank, anaerobic filter (FAFA), artificial wetland, domestic wastewater, removal

Introducción

En Colombia gran parte de las zonas rurales presentan graves problemas de contaminación en sus fuentes hídricas, como consecuencia de la baja inversión en proyectos de saneamiento básico (Valencia, Silva, & Narváez, 2010). Según el Plan Director de Agua y Saneamiento Básico (2018-2030) se registra una cobertura de alcantarillado público del 70,1% en el sector rural para el año 2017 (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2018).

Por otra parte, en Bucaramanga y su Área metropolitana solo se trata el 52,6% de las aguas servidas generadas en las cabeceras urbanas y el 47,4% van a los ríos sin tratamiento (Empresa pública de alcantarillado en Santander, 2017). Lo anterior, trae diversos impactos al medio ambiente como cambio a la calidad del agua, pérdida de los ecosistemas acuáticos, generación de malos olores y afectación en la calidad de vida de la población (Empresa pública de alcantarillado en Santander, 2017).

De acuerdo con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, se establece que el objetivo 6 tiene como finalidad garantizar la disponibilidad y la gestión sostenible del agua y el saneamiento para todos, ya que el acceso al agua potable, el saneamiento e higiene adecuada es un derecho humano fundamental; sin embargo, miles de millones de personas enfrentan enormes dificultades para acceder a estos servicios que son elementales (Organización de las Naciones Unidas, 2016). Cerca de 1.800 millones de personas en el mundo utilizan un cuerpo hídrico como fuente de abastecimiento de agua potable parcialmente contaminada por restos fecales; más de 2.400 millones de personas no cuentan con servicios de saneamiento básico y se estima que más del 80% de las aguas residuales generadas por la actividad humana son vertidas en los ríos o en el mar sin recibir ningún tratamiento, afectando directamente los ecosistemas (Organización de las Naciones Unidas, 2016). Por esta razón, las Naciones Unidas hacen un llamado a que todos los

países del mundo afronten los grandes desafíos y así mismo, garanticen una adecuada calidad de vida para la población sin arriesgar el planeta. (Organización de las Naciones Unidas, 2016).

A partir de lo anterior el municipio de Piedecuesta ha implementado diferentes iniciativas para el mejoramiento de la prestación de los servicios públicos con el fin de mejorar la calidad de vida de sus habitantes. Mediante la implementación de diferentes programas para dar solución a las problemáticas relacionadas con el sector de agua potable y saneamiento básico, los cuales son: Agua de vida para los Piedecuestanos, que se basa en el mejoramiento de las infraestructuras del sistema de agua potable, y el segundo es el manejo adecuado de las aguas servidas, lluvias y alcantarillado en busca de diseños y estudios de prefactibilidad y factibilidad del servicio de alcantarillado y los tratamientos de agua residual en el área rural (Ramirez Rojas, 2016)

La Universidad Santo Tomás comprometida con el medio ambiente, a través del programa de gestión integral del recurso hídrico, busca dar un tratamiento y manejo adecuado a las aguas residuales generadas en cada uno de sus campus, a partir del uso racional y eficiente del agua, y el aprovechamiento adecuado de los recursos naturales. Lo anterior, a través de estrategias que permitan la armonización de las actividades llevadas a cabo en las sedes, para dar cumplimiento a los requisitos legales y vigentes establecidos por las políticas ambientales (Universidad Santo Tomás, 2017).

El Campus Piedecuesta de la Universidad Santo Tomás se ubica en el municipio de Piedecuesta, el cual no tiene cobertura de alcantarillado público, por lo tanto, las aguas residuales domésticas generadas están siendo gestionadas internamente y recibiendo un inadecuado manejo, ya que la tecnología existente es un Tanque séptico de doble cámara construido “*in situ*”; este sistema no cumple con las especificaciones establecidas en el Reglamento técnico para el sector de Agua potable y Saneamiento básico.

Es de importancia mencionar que, desde el año 2020, una vez pasan las aguas residuales por el pozo séptico son recolectadas en un tanque de almacenamiento temporal, para posteriormente ser extraídas por una entidad tercera que brinda el tratamiento y disposición, bajo un precio establecido.

No obstante, en el Decreto 3930 de 2010, en su Artículo 31 se establece que “toda edificación, concentración de edificaciones o de desarrollo urbanístico, turístico o industrial, localizado fuera del área de cobertura del sistema de alcantarillado público, deberá, dotarse de sistemas de recolección y tratamiento de residuos líquidos y, además, contar con el respectivo permiso de vertimiento” (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2010).

Por otra parte, en la Resolución 330 de 2017 (Capítulo 5 - Sección 3) se destaca que los tanques sépticos deben ir acompañadas de un filtro anaeróbico y un tratamiento complementario. Algunas de estas alternativas incluyen: campos de infiltración, pozo de absorción o infiltración, filtros intermitentes y humedales artificiales (Ministerio de Salud y Protección Social, 2017).

Por lo expuesto anteriormente, se propone el diseño de un tren de tratamiento descentralizado (Pozo Séptico, FAFA, seguido de un Humedal Artificial) que permita reducir la carga contaminante de las aguas residuales domésticas generadas en el Campus Piedecuesta y que cumpla con los requerimientos establecidos por la normativa ambiental competente en materia de vertimientos y/o de reuso, y de esta manera garantizar la gestión integral de las aguas residuales.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Diseñar un tren de tratamiento para el manejo descentralizado de las aguas residuales domésticas provenientes del Campus Piedecuesta de la Universidad Santo Tomás - Seccional Bucaramanga, con el fin de garantizar el cumplimiento normativo en materia de vertimientos y los lineamientos de diseño establecidos en el Reglamento técnico del sector de Agua potable y Saneamiento básico.

1.2 Objetivos Específicos

- Realizar un diagnóstico de las aguas residuales domésticas generadas en el Campus Piedecuesta de la Universidad Santo Tomás, Seccional Bucaramanga, teniendo en cuenta el manejo actual y las características fisicoquímicas y microbiológicas de las mismas.
- Determinar los parámetros críticos de diseño que influyen en la eficiencia de un sistema de tratamiento descentralizado de acuerdo con las características del agua residual a tratar.
- Proponer el diseño de un tren de tratamiento descentralizado, el cual cumpla con los requisitos establecidos por la normativa ambiental vigente para el manejo de las aguas residuales domésticas del Campus Piedecuesta.

2. Marco Referencial

2.1 Marco Teórico

2.1.1 Agua residual. En los últimos años la calidad de las fuentes hidrográficas ha disminuido debido al aumento de la población, ya que, los seres humanos realizan diversas actividades que afectan las condiciones iniciales de las fuentes hídricas, dan como resultado las aguas residuales (AR) que están compuestas de residuos líquidos provenientes del uso doméstico, comercial e industrial. Las aguas residuales se clasifican en aguas residuales domésticas (ARD) y aguas residuales no domésticas (ARnD) (Oviedo, 2016).

2.1.1.1 Características físicas, químicas y biológicas del agua residual. El conocimiento de la naturaleza del agua residual es clave para la determinación del tipo de tratamiento a usar. Además, las características físicas del agua residual están directamente relacionadas con las condiciones estéticas del agua, así mismo, las características químicas se dividen en dos clases: indicadores y sustancias químicas; por último, las características biológicas que evidencia la presencia de microorganismos patógenos o no patógenos en el agua (Espigares Garcia & Pérez López, 2008). En la tabla 1 se demuestran algunas de estas características.

Tabla 1. *Características físicas, químicas y biológicas del agua residual*

CARACTERÍSTICAS					
FÍSICAS		QUÍMICAS		BIOLÓGICAS	
Parámetro	Definición	Parámetro	Definición	Parámetro	Definición
Sólidos	Indican la presencia de sales disueltas, partículas en suspensión de carácter orgánico o inorgánico.	DBO	Mide la cantidad de oxígeno que requieren los microorganismos para degradar la MO.	Coliformes	Indicador de riesgo por contaminación de bacterias de carácter patógeno.
		DQO	Determina el contenido de MO oxidado a partir de sustancias químicas.		
		Grasas y Aceites	Asociadas a la presencia de hidrocarburos, esterres, aceites, etc. Ocasionan películas que interfieren en la transferencia de oxígeno.		
Temperatura	Eleva el potencial tóxico de ciertas sustancias.	Nitrógeno	Es uno de los mayores contaminantes de las AR, debido a que disminuye el oxígeno disuelto de las aguas superficiales.		
		Fósforo	Ayuda a la formación de la eutrofización en las aguas.		
		pH	Demuestra la intensidad de las condiciones acidas o básicas del agua.		

Nota: * Parámetros fisicoquímicos y biológicos del agua residual.

Adaptado de Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2007). *Toma de Muestras de Aguas Residuales.*

2.1.2 Sistemas de tratamiento de aguas residuales. El tratamiento de las aguas residuales se basa en una serie de operaciones físicas, químicas y biológicas, utilizadas con el fin de eliminar los contaminantes presentes en el agua. Por esta razón, es importante mencionar, que existen dos tipos de sistemas para el tratamiento de estas aguas: en primer lugar, están los Sistemas Descentralizados, los cuales son utilizados de manera *in situ*, principalmente en aquellas zonas desprovistas de una red de alcantarillado, tienen la capacidad tratar pequeños volúmenes de agua, su mantenimiento es de bajo costo y generan un gran ahorro de energía (Valencia, Silva, & Narváez, 2010). Por otra parte, se encuentran los Sistemas Centralizados, en los cuales se utilizan tecnologías más complejas para llevar a cabo el proceso de tratamiento, generando un alto consumo de energía y mayores costos de mantenimiento y operación (Sánchez J. , 2017).

2.1.2.1 Sistema descentralizado. Los sistemas descentralizados son comúnmente utilizados en zonas que no cuentan con una red de alcantarillado como lo son los sectores rurales; además, tienen la capacidad de tratar aguas residuales provenientes de viviendas, industrias y comercio (Valencia, Silva, & Narváez, 2010).

Este sistema por normativa debe ir acompañado de tratamientos complementarios como lo son los filtros anaerobios que en ellos se implementan medios de soportes para que las bacterias se adhieran a él y así degraden la materia orgánica, es caracterizado por tener una óptima remoción de la demanda biológica de oxígeno (DBO). Así mismo, los humedales artificiales son denominados métodos de Fito-depuración de aguas residuales, debido a que se eliminan contaminantes a partir de medios naturales como arena, grava, gravilla y macrófitas; éstas crean

una serie de interacciones físicas, químicas y biológicas a través de las cuales el agua es tratada progresiva y lentamente (Oscar, 2010).

2.1.2.2 Tanque séptico. Los tanques sépticos son utilizados principalmente como tratamiento primario de las aguas residuales en zonas rurales desprovistas de alcantarillado (Gonzalez, 2016). En este sistema la separación de los sólidos se hace mediante gravedad o sedimentación, una vez realizado esto, los sólidos se asientan en el fondo del tanque y comienzan a ser degradados por bacterias que se encuentran allí (Gonzalez, 2016). De acuerdo con lo establecido en la Resolución 330 del 2017 este sistema debe ir acompañado de un FAFA y un tratamiento complementario; además, se esperan eficiencias para DBO de 30-40% y SST de 50%-60 (Ministerio de Salud y Protección Social, 2017).

2.1.2.3 Filtros anaerobios de flujo ascendente (FAFA). En Colombia es muy utilizado el filtro anaerobio de flujo ascendente para el tratamiento secundario de las aguas residuales, su aplicación está encaminado a las zonas que se ubican fuera del perímetro sanitario (Alvarado Arce, 2011). Este sistema presenta eficiencias de remoción superiores al 60% (Ministerio de Salud y Protección Social, 2017).

En este sistema se lleva a cabo un proceso de crecimiento adherido, lo cual disminuye el riesgo de taponamiento de este. Generalmente son contruidos por un tanque o columna, en él se encuentra un medio sólido en cargado de ser el soporte de crecimiento garantizando una mayor retención de los sólidos y así mismo, promover la proliferación de las bacterias para contribuir en la descomposición de materia orgánica por parte de los microorganismos presentes (Alvarado Arce, 2011); puede ser utilizado como medio de soporte los siguientes materiales; piedras, anillos

de plástico o bioanillos plásticos, anillos de guadua, cascara de coco, residuos de ladrillera, entre otros.

Sin embargo, (Gomez Plata & Alvarez Sequeda, 2008; Remtavares, 2008) recomiendan que este sistema opere mediante las siguientes condiciones:

- Mantener la temperatura del sistema entre 25 – 35 °C para obtener un correcto desempeño del reactor.
- Preservar el pH en 6.5 y 7.3, ya que la acidez produce la formación de compuestos tóxicos.
- Evitar elevadas cantidades de metales pesados (cromo total 5 mg/L, magnesio 2mg/L, cadmio 0.5 mg/L, mercurio 0.1 mg/L) metales alcalinos y alcalinotérreos (Remtavares, 2008).

En todos los tratamientos anaerobios se presentan cuatro procesos básicos de descomposición: el primero es la Hidrólisis, donde el material orgánico complejo es transformado en compuestos más simples por medio del agua; posteriormente, ocurre el proceso de Acidogénesis, la cual, comienza una vez los compuestos orgánicos complejos están hidrolizados, donde las bacterias forman ácidos orgánicos mediante bacterias fermentativas acidogénicas; luego, en el proceso de Acetogénesis, estas bacterias convierten los productos de la acidogénesis en ácido acético, hidrógeno y gas carbónico, los cuales son favorables para las bacterias Metanogénicas, donde finalmente, se produce el metano, biomasa y gas carbónico (Gomez Plata & Alvarez Sequeda, 2008).

2.1.2.4 Humedales artificiales. Los humedales son cunetas cubiertas por una columna de agua poco profunda, ya sea de régimen natural o artificial (ONU HABITAT, 2008).

Los humedales artificiales son utilizados como tratamiento complementario, diseñados para simular los mecanismos hidrodinámicos y procesos biogeoquímicos de degradación que usualmente suceden en los humedales naturales (Merino Solís, 2017). Estos sistemas son amigables con el medio ambiente, y son destinados como tratamiento descentralizado de aguas residuales domésticas e industriales (Rabat Blázquez, 2016), debido a la presencia de plantas las cuales contribuyen a la oxigenación del sustrato, y a su vez la interacción con microorganismos asociados a la zona radicular, permitiendo la generación de procesos físicos, químicos y biológicos logrando mejorar la calidad del agua (Laverde Sarmiento & Salazar Florez, 2017).

A lo largo del sistema se encuentran zonas con presencia o ausencia de oxígeno molecular, por lo que la acción de los microorganismos pasan por procesos biológicos aerobios como anaerobios (Fundación para el conocimiento Madrid, 2013); Los humedales tienen la capacidad de depurar el agua mediante la remoción del material orgánico, el fósforo, reduciendo nitratos y oxidando el amonio; estos sistemas son utilizados para tratar diferentes tipos de aguas residuales, como lo son las aguas residuales domésticas, industriales, de drenaje de extracciones mineras, de escorrentía superficial agrícola y urbana, entre otros (Delgadillo, Camacho, Pérez, & Andrade, 2010).

Una de las principales características de estos sistemas es que eliminan los contaminantes presentes en el agua, a través de diferentes procesos que incluyen la sedimentación, absorción, degradación microbiana, acción de las plantas, reacciones químicas y volatilización (Delgadillo, Camacho, Pérez, & Andrade, 2010).

Los humedales artificiales se pueden clasificar según el tipo de flujo que presenten:

- ***Humedales Artificiales de Flujo Superficial:***

En estos sistemas el agua pasa sobre la superficie del lecho desde la entrada hasta la salida del flujo de agua. Este modelo es similar a los humedales naturales, caracterizándose por tener profundidades entre 30 a 50 cm (Rabat Blázquez, 2016).

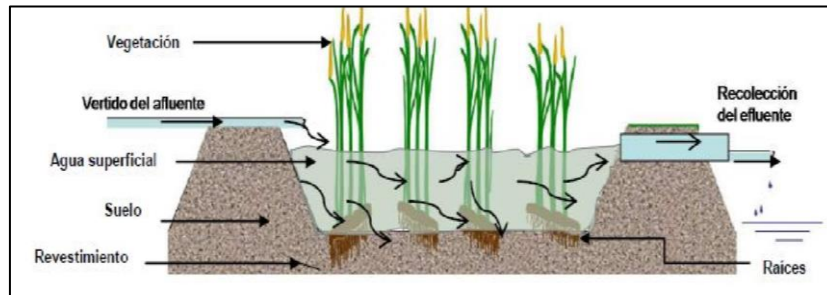


Figura 1. Humedal artificial de flujo superficial.
Adaptado de: (Rabat Blázquez, 2016).

- ***Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial:***

Son de flujo continuo, diseñados para que el agua fluya a través de la zona radicular de la vegetación. Además, consta de un lecho filtrante ya sea grava, arena, roca triturada u otro tipo de material, el cual, es capaz de soportar el crecimiento de la vegetación emergente. De igual manera, la selección de especies depende del lugar donde se van a implementar, puesto que el clima es un factor variante (Marín Sanabria & Torres, 2012).

Estos humedales se dividen en dos tipos, según la forma de aplicación de agua al sistema:

- ***Humedales de Flujo Subsuperficial Vertical:***

Este tipo de humedales también son conocidos como filtros intermitentes y en el se presentan fases de llenado, reacción y vertido; caracterizándose por tener el nivel del agua inferior a 0.6 m, con el fin de mantener las condiciones insaturadas del medio poroso y así, tener un mayor contacto entre el agua y el aire dentro de los poros (Mena, 2014). El agua por tratar es vertida desde un punto alto, así como se demuestra en la figura 2, para que el agua fluya verticalmente a

través del lecho filtrante hacia el fondo del sistema, donde posteriormente es recolectada (Milanes Hernández, 2010).

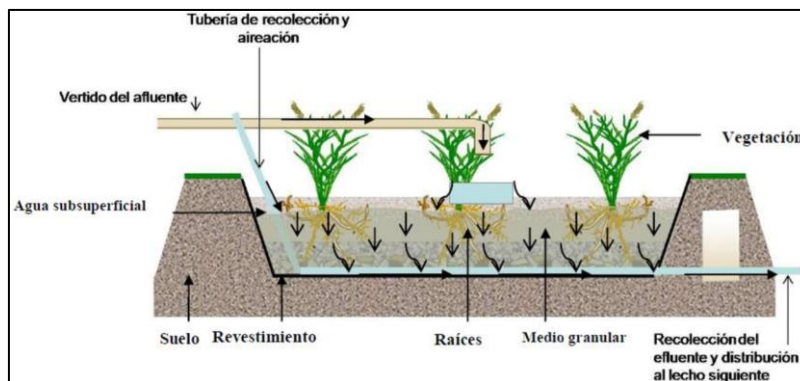


Figura 2. Humedales de flujo subsuperficial vertical.
Adaptado de: (Rabat Blázquez, 2016).

- **Humedales de Flujo Subsuperficial Horizontal:**

También conocidos como filtros permanentes; en este sistema el agua fluye de forma continua a través del medio poroso de forma horizontal, presentando eficiencias superiores a 80-90% de parámetros como DBO, DQO y SST (Mena, 2014).

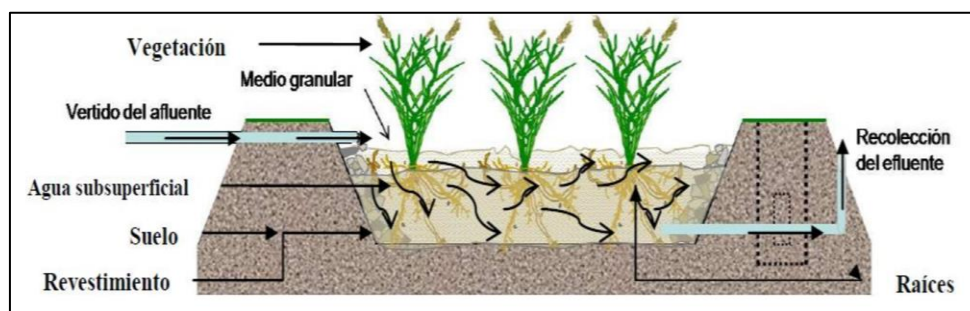


Figura 3. Humedales de flujo subsuperficial horizontal.
Adaptado de: (Rabat Blázquez, 2016)

En la tabla 2 se evidencian las ventajas y desventajas de los humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal, que se deben tener en cuenta para la selección de este tipo de sistemas.

Tabla 2. Ventajas y desventajas de los humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal

Ventajas	Desventajas
- Son sistemas utilizados para el tratamiento de aguas residuales domésticas o para pequeñas urbanizaciones. - Alternativa viable debido a sus bajos costos de construcción, operación y mantenimiento. - Están en mayor contacto con el agua y el sedimento, lo que genera una mayor velocidad en la depuración de contaminantes. - Mayor tolerancia a condiciones climáticas extremas. - Minimización de problemas de olores. - Los procesos bioquímicos de remoción realizados por los humedales se desarrollan de forma natural, ahorrando en costos como el consumo de energía, ya que solo requiere energía solar, para concluir los ciclos del sistema. - Es una alternativa que beneficia el medio ambiente, ya que minimizan focos de infección y favorecen la reutilización del agua tratada. - No producen biosólidos, ni lodos residuales que requieran tratamiento subsiguiente y disposición.	- La construcción de humedales generalmente requiere extensas superficies para su implementación. - En algunos casos pueden presentar huéspedes incomodos como zancudos, mosquitos y otros insectos. - Requieren tiempos de retención muy altos para mostrar evidencia de su eficiencia satisfactoria. - Un inadecuado mantenimiento genera problemas de colmatación del sustrato. - Los compuestos orgánicos, SST, nitrógeno o bacterias coliformes no se remueven completamente.

Nota: * Características de los humedales artificiales.

Adaptado de La Organización de las Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos (ONU HABITAT, 2008). *Manual de Humedales Artificiales*.

2.1.3 Vegetación. En los humedales las plantas cumplen un papel muy importante, debido a que son organismos foto-autótrofos es decir recogen la energía solar para transformar el carbono inorgánico en carbono orgánico. Además, ellas pueden transferir oxígeno desde la

atmosfera a través de hojas y tallos llegando a las zonas de mayor profundidad, así mismo el oxígeno crea regiones anaerobias donde los microorganismos utilizan el oxígeno disponible para originar diferentes reacciones de degradación de materia orgánica y nitrificación (Arias Triguero, 2014).

Es importante mencionar otras funciones destacables que cumplen las macrófitas dentro de los humedales:

- Las raíces de las macrófitas ayudan a controlar la erosión y la retención de los sedimentos en los tratamientos de aguas residuales, a su vez, mejoran la filtración del agua y brinda soporte a la proliferación de microorganismos.
- La vegetación absorbe nutrientes como carbono, fósforo y nitrógeno en los procesos de tratamiento de agua residual.
- Las plantas ayudan a la estabilización del caudal, reduciendo la velocidad del agua, lo cual favorece la sedimentación de los sólidos suspendidos.
- Las macrófitas reducen el gradiente de temperatura, lo cual influye a la protección de estas en altas temperaturas (Delgadillo, Camacho, Pérez, & Andrade, 2010).

Es necesario hacer énfasis que el diseño propuesto está acompañado de la planta *Heliconia psittacorum*, ya que se desarrolla con normalidad en el área de estudio debido a que presenta tolerancia de temperaturas mínimas de 18°C y máximas de 34°C e inundaciones (Sosa Rodriguez, 2013). Esta macrófita es de origen neotropical y de uso ornamental; Colombia se considera el país con mayor diversidad de este género, debido a que cuenta con 94 especies. En los últimos años se han realizado diferentes estudios con el objetivo de evaluar su potencial de fitorremediación, demostrando la presencia de características de aclimatación en los humedales diseñados para el tratamiento de aguas residuales. Se demostró que esta planta tiene la capacidad

de disminuir en más de un 60% DBO, DQO y SST, y además logra la acumulación de metales pesados como Cadmio, Cromo, Plomo y Mercurio, sin afectar sus propiedades fisiológicas (Sánchez, Peña, Madera, & Medina, 2013).

Tabla 3. *Taxonomía de la Heliconia psittacorum*

Clasificación		
Reino	Plantae	
División	Angiospermae	
Clase	Monocotyledoneae	
Orden	Zingiberales	
Familia	Heliconiaceae	
Género	Heliconia	
Especie	<i>H. psittacorum</i>	

Figura 4. Planta *Heliconia*

Nota: * Taxonomía de *Heliconia* p.

Adaptado de Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas (Sosa Rodriguez, 2013). *Cultivo del género Heliconia*.

2.2 Estado del Arte

Desde hace varios años, se han venido desarrollando diferentes investigaciones, con el objetivo de promover diversas alternativas para el tratamiento de las aguas residuales. Por esta razón, en el 2006, Parra evaluó la puesta en marcha de un Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente en el tratamiento de vinazas del laboratorio de procesos productivos de la Universidad Nacional de Colombia, en Manizales. Para este sistema, utilizaron como medio de soporte vasos de polietileno, teniendo en cuenta que este tipo de material permite el tratamiento de las aguas residuales que contengan una alta carga orgánica y concentración de sólidos, ya que se

caracterizan por presentar mayor porosidad del lecho y una mejor distribución del flujo. Por otra parte, se analizó durante 11 semanas el comportamiento de parámetros como DBO y DQO a la entrada y salida del reactor, obteniendo como resultados porcentajes de remoción de 35% y 45% respectivamente. Por último, recomienda futuras investigaciones la implementación de un sistema combinado anaerobio-aerobio, para lograr mayores remociones (Parra Rodriguez, 2006).

Posteriormente, en el 2007 Osorio & Vásquez realizaron un montaje que consistió en dos unidades en serie de filtros anaerobios de flujo ascendente (FAFA's) y de tres humedales artificiales de flujo subsuperficial (HASFF) con grava y arena, ubicados en paralelo. Este sistema fue alimentado con agua residual sintética y fue entregada por medio de una bomba peristáltica que al mismo tiempo regulaba el caudal de la solución. En los filtros FAFA's se vertió un manto anaerobio de lodo proveniente de la planta de tratamiento de Aguas Residuales de gaseosas del municipio de Dosquebradas, además, establecieron como medio de soporte anillos de guadilla "*Bambu phyllostachys*" con una longitud de 10 cm, una porosidad de 0.67, un diámetro promedio de 2.5 cm y una parrilla de 20 cm de altura para simular un fondo falso. Este montaje tuvo un tiempo de adaptación de tres semanas para que así el manto anaerobio se adhiriera a la superficie de la guadilla. Se realizaron muestreos compuestos semanalmente, los cuales consistían en establecer alícuotas de cada punto definido con un intervalo de 10 minutos, dando como resultado remociones en DBO 65%, DQO 62.42%, SST 62.43%, con un tiempo de retención hidráulico de 11.8 h – 11.4 h (Osorio Trujillo & Vásquez Botero, 2007).

Dos años después (2009), Londoño & Marín estudiaron la remoción de materia orgánica en humedales artificiales de flujo horizontal subsuperficial. Por lo anterior, los autores evaluaron tres humedales contruidos en ladrillo y cemento con dimensiones de 0.66 m de ancho, 2.95 m de largo y 0.80 m de profundidad, cada uno de los sistemas estaban conformados de grava y como

macrófita utilizaron *Phragmites australis* sembrada a partir de la relación (20 plantas por m²), en ellos se trabajaron diferentes condiciones de caudal entre 89 – 383 m³/día y carga contaminante de DQO de 146 a 476 mgO₂/L. Para tener el control de caudales se utilizaron bombas peristálticas. Inicialmente, los humedales fueron alimentados con agua residual procedente de la planta de tratamiento de la Universidad Tecnológica de Pereira durante 12 meses con el objetivo que la especie tuviera una adaptación optima, después, se inició la toma de datos y se cambió la alimentación de los humedales por agua residual sintética, donde se obtuvieron porcentajes de remoción, en DQO entre 83% - 93%, en DBO 90% - 95%, y SST 91% - 98%, así mismo, se evidenció que la *Phragmites australis* no presenta la proliferación de roedores o zancudos. (Londoño Cardona & Marín Vanegas, 2009).

Seguidamente, en el año 2010, Marín & Correa implementaron un sistema de tratamiento terciario, el cual, constaba de dos humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal utilizando como medio filtrante (arena y grava). Este sistema fue alimentado con aguas residuales provenientes de la planta de tratamiento de la Universidad Tecnológica de Pereira. Estos humedales fueron construidos en concreto con dimensiones 4.48m de largo, 1.06m de ancho y 1 m de profundidad; la entrada del afluente se basó en una llave de paso de tipo grifo, la que permitió la regulación del caudal en cada humedal. En cada prototipo se sembraron 20 especies de *Guadua angustifolia Kunth*, las cuales, tuvieron un tiempo de adaptación y estabilización de 20 semanas, seguidamente, se realizaron monitoreos semanales de diferentes parámetros como pH, OD, DBO, DQO, Nitrógeno. A partir de la evaluación de estos dos humedales se determinó un tiempo de retención hidráulico de 3 a 5 días, se identificó que hubo una mayor remoción de contaminantes orgánicos en el lecho de arena (DBO 92.21%, DQO 84.31%), así demostrando que los humedales artificiales con *Guadua angustifolia Kunth* son idóneos como tratamientos

terciarios en aguas residuales, debido a que mejoran las condiciones fisicoquímicas del agua. (Marín Montoya & Correa Ramírez, 2010)

En ese mismo año, Montoya, Ceballos, Casas & Morató, evaluaron la remoción de materia orgánica en agua residual sintética, mediante la construcción de seis humedales de flujo subsuperficial, los cuales tenían diferentes especies plantadas (A y B con *Phragmites sp.*, C y D con *Canna limbata* y E y F con *Heliconia psittacorum*). Estos humedales estaban elaborados en fibra de vidrio, de 1.0 m de largo, 0.6 m de alto, 0.6 m de ancho y como medio de soporte utilizaron grava de 3.2 – 6.4 mm de diámetro con una porosidad del 48%. De acuerdo con los resultados obtenidos durante la investigación, se determinó que la implementación de estas tres especies es buena, ya que remueven de manera efectiva la materia orgánica presente en las aguas residuales domésticas, por lo cual se obtuvieron porcentajes de remoción en DQO de 94.49% - 93.50% para *Heliconia psittacorum*, 97.31% -95.94% para *Canna limbata* y 97,39 % y 97,13 % para *Phragmites sp*; en cuanto a DBO se obtuvo 100 % y 99,36 % para *Canna limbata*, 99,09 % y 97,49 % para *Heliconia psittacorum*, 100 % y 99,45 % para *Phragmites sp*. Por último, los autores demostraron la importancia de la construcción de humedales para la depuración de las aguas residuales en comunidades de escasos recursos (Montoya, Ceballos, Casas, & Morató, 2010).

Luego, en el 2011 Alvarado realizó una evaluación de materiales de desecho como medio filtrante para ser implementados en filtros anaerobios de flujo ascendente. Este estudio consistió en la realización en un sistema experimental localizado en la planta de tratamiento de aguas residuales de la urbanización Iztarú, el montaje consistía inicialmente de un sedimentador, de él se distribuía el efluente hacia los tres FAFA's colocados en paralelo, cada uno de ellos contenían diferentes medios de lechos, entre ellos piedra, tapas plásticas, cilindros de espuma y lodos. Es

importante mencionar, que a los lodos se les adicionaron nutrientes y fueron dejados en reposo durante dos semanas, seguidamente, fueron vertidos en cantidades iguales en cada uno de los FAFA's dejándolos el tiempo necesario para que estos se adhieran a los materiales filtrantes. Finalmente, se realizaron muestreos durante 8 semanas a la entrada y a la salida de cada uno de los reactores. A partir de esto, se obtuvo como resultado que el uso de las tapas plásticas y los cilindros de espuma son alternativas viables para el tratamiento de aguas residuales, ya que, lograron una remoción de DBO 31,97%, DQO 72,25%, DBO 42,06% Y DQO 52,40%. Cabe resaltar que el lecho de piedras aumentó la turbiedad considerablemente por la aparición de gran cantidad de algas que dieron una tonalidad verde al agua y se obtuvieron remociones de cargas orgánicas bajas con respecto a las obtenidas (Alvarado Arce, 2011).

Dos años después (2013), Pérez, Alfaro, Sasa y Agüero, evaluaron el funcionamiento de un humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal, el cual se encontraba precedido de un tanque séptico, un sedimentador, con el fin de obtener un mejor rendimiento del sistema. El humedal fue construido en una base de geotextil y geomembrana impermeable, con dimensiones de 12m de largo y 3m de ancho. La especie *Cyperus papyrus* fue plantado con una densidad de 4 por cada m² y como lecho de soporte piedra “cuarta” de diámetro entre 1.5-2.5 cm. Además, en la entrada y en la salida del humedal se instalaron piedras “bola” de diámetro entre 5-6 cm, con el fin de generar un efecto de gavión y así favorecer la distribución del flujo de manera horizontal a lo largo del sistema. Con la puesta en marcha del sistema, se demostró una remoción del 91% para DBO y 72% para DQO, en cuanto a nutrientes 75% para fosforo y en sólidos totales un 73%. Por otra parte, el *Cyperus papyrus* en la investigación presentó un buen crecimiento, resistencia a plagas y se adaptó de manera adecuada a las condiciones climáticas (Pérez, Alfaro, Sasa, & Agüero, 2013).

Así mismo, Donado Roger elaboro un Plan de Gestión para los lodos generados en las plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas de los municipios de Cumaral y San Martin de los Llanos, con el objetivo de crear un valor agregado en la reutilización de este residuo aprovechando su composición fisicoquímica y así, poder ser utilizado como un subproducto. Para llevar a cabo el proyecto, realizaron un análisis de la situación actual de los lodos generados en cada una de las plantas y recopilaron información primaria, mediante entrevistas a la comunidad, operarios de las plantas y entidades encargadas. A partir de este análisis, concluyeron que la mejor tecnología para el tratamiento de los lodos de la zona de interés era la técnica de compostaje, ya que se ajusta a la disposición de espacio, requiere de herramientas básicas, beneficia a la comunidad con empleo y posibilidades de aplicación del compost debido a la tendencia agrícola de la región, ya que puede aplicarse sobre diferentes terrenos (Donado, 2013).

De igual manera, Cueva & Rivadeneira diseñaron y evaluaron cuatro humedales artificiales de flujo subsuperficial mediante la utilización de tres tipos de macrófitas, las cuales fueron sembradas en hileras de 10 cm x 20cm. El primer tratamiento estaba conformado por la especie *Echinochloa polystachya*– Hitch, el segundo con *Eríochloa polystachya* – Kunth, el tercero con *Brachiaria mutica* – Forks, finalmente el cuarto estaba compuesto por la mezcla de las tres especies. Los cuatro sistemas se construyeron con una pendiente del 3% para así obtener un adecuado drenaje, con una profundidad de 0.6 m, un largo de 2.5 m, un ancho de 1 m. Además, adicionaron 20 cm de capa de grava, seguidamente 25 cm de arena y 15 cm de tierra. A partir de esta investigación determinaron que los tratamientos 1, 2 y 3 presentaron similitudes en cuanto a la remoción de los parámetros fisicoquímicos como lo fueron (DBO, DQO y Coliformes fecales) alcanzando la depuración del 50% de estos. Por esta razón los autores recomiendan la utilización de estas especies en futuras investigaciones. (Cueva Torres & Rivadeneira Bravo, 2013).

En el siguiente año, Bermeo & Idrovo analizaron los lodos procedentes de las lagunas de estabilización de una PTAP ubicada en Ucubamba y una parte del sistema de tratamiento de aguas residuales de la ciudad de Cuenca, con el fin de determinar la utilidad de este subproducto como agregados para materiales de construcción y así, poder generar una disposición ecológica de los mismos. De acuerdo con el estudio realizado se obtuvo que los lodos procedentes de las lagunas de estabilización de la PTAP no son aptos debido al elevado contenido de sulfatos, los cuales generan un efecto corrosivo sobre los materiales (morteros y hormigones). Mientras que, los lodos del sistema de tratamiento de aguas residuales demostraron ser efectivos para la fabricación de materiales como: hormigones, ya que el lodo sustituye el 10% del agregado fino; para morteros, en los cuales la ceniza del lodo produce el mismo efecto que la cal; y para ladrillos se obtiene una mayor eficiencia cuando la dosis adicionada reemplaza el 5% de su volumen (Bermeo Barreto & Idrovo Heredia, 2014).

Después, Paredes Laura evaluó la remoción de los contaminantes presentes en aguas residuales domésticas a partir de humedales de flujo vertical con lecho de arena. Esta investigación se basó en la construcción de 4 humedales experimentales, los cuales, se diseñaron a partir de la combinación de dos variables, en primer lugar, la frecuencia de alimentación y la ausencia o presencia de plantas. Estos humedales tuvieron dimensiones de 0.95m de ancho, 1.15 m de largo y 0.75 de profundidad útil, obteniendo un área superficial de $1,1 \text{ m}^2$. La planta utilizada en esta investigación fue *Heliconia psittacorum* y el agua utilizada como alimentación de los humedales proviene de las aguas residuales de la planta de tratamiento la Universidad Tecnológica de Pereira. A partir de lo expuesto, la autora determinó que el humedal planteado con una frecuencia de alimentación de 20 pulsos/d presentó mayor eficiencia con respecto a los demás sistemas, debido, a que realizó una remoción de nitrógeno amoniacal del 80%. Es de

importancia mencionar, que los humedales lograron remociones del 98% de DBO (Demanda biológica de oxígeno) y 93% de DQO (Demanda química de oxígeno), y un 87% SST (Sólidos suspendidos totales), logradas gracias a las características de la arena como medio filtrante, ya que facilitan el crecimiento y la adaptación de la biopelícula. Finalmente, se demostró que los humedales son sistemas eficientes para la depuración de aguas residuales (Paredes, 2014).

En el año 2015, Aragón, Parra y Peña, propusieron una solución ambientalmente sostenible para el tratamiento de las aguas residuales domésticas generadas en el Tecnoparque Agroecológico Yamboró del Sena-Pitalito, Huila. Por lo anterior, evaluaron un sistema de tratamiento de aguas residuales, el cual constaba inicialmente de un tanque séptico, seguido de dos humedales artificiales uno con *Heliconia psittacorum* y el otro con *Cyperus papyrus*. Utilizaron como lecho filtrante gravilla de 6 cm de diámetro en la parte inferior y gravilla de 3 cm de diámetro en la parte superior. Se concluyó que la utilización de estas dos plantas es una solución ambientalmente sostenible para el tratamiento de las aguas residuales, debido a que se obtuvieron altas remociones en DQO con 93%, Sólidos Sedimentables 100% y en coliformes fecales y totales 90% (Aragón Calderón, Parra Collazos, & Peña Torres, 2015).

A su vez, Orellana León realizó un estudio sobre el uso de los lodos obtenidos de las plantas de tratamiento de agua residual para la fabricación de ladrillos, para esto se seleccionaron cinco tipos de ladrillos con condiciones porcentuales diferentes de lodos, las cuales fueron: Ladrillos A (0% de adición de lodos residuales), Ladrillos B (10% de adición de lodos residuales), Ladrillos C (20% de adición de lodos residuales), Ladrillos D (30% de adición de lodos residuales), Ladrillos E (100% de adición de lodos residuales), las medidas del molde utilizado fueron 14.5 x 29.5 x 9.5; se realizó una mezcla compuesta por: arcilla + agua potable + aserrín + el porcentaje de lodo experimental; se fabricaron un total de 300 ladrillo (60 muestras por cada uno de los

porcentajes de lodos establecidos). Seguidamente, se llevó a cabo el proceso del secado de los ladrillos crudos mediante el aprovechamiento de la radiación solar durante 15 días, luego se construyó una pirámide para efectuar la cocción a una temperatura superior a los 750 °C y así mantener esas condiciones durante 3 días. A partir de lo anterior, se evidenció que los ladrillos tipo E se agrietaron durante el proceso de secado demostrando que el 100% de adicción de lodo residual no es idóneo para elaborar este producto. De Igual manera, se destaca que el ladrillo tipo B obtuvo mayor resistencia que los ladrillos convencionales, concluyendo que es posible aprovechar estos subproductos en el gremio de la construcción y contribuir a la economía circular (Orellana León, 2015).

Por otra parte, en el año 2016 Ramos Franco identificó que en la reserva el Malamo (Tunja, Boyacá) no contaban con un sistema de tratamiento de aguas residuales en las zonas veredales, por ende, realizaban vertimientos directos a las fuentes hídricas, por lo cual, surgió la necesidad de buscar una alternativa para solucionar dicha problemática. Siendo así, se realizaron investigaciones previas que se ajustaran al entorno, estableciendo que un proceso de fitorremediación era apto para la zona. Considerando lo anterior, se implementó un humedal artificial de flujo subsuperficial con el uso de *Cyperus papyrus* y *Schoenoplectus californicus*, el cual, constó de un sedimentador que cumplió la función de separar los residuos de gran tamaño para prevenir daños en el sistema que pudieran afectar su rendimiento. El humedal logró una eliminación del 95% de coliformes totales y un 98,5% de coliformes fecales, a su vez, removi6 27,4 % de DBO y 25,2% de DQO. Con esto, los habitantes tuvieron una respuesta positiva ante el proyecto ya que tiene un buen funcionamiento. (Ramos, Prieto, Cárdenas , & Bernal, 2016).

En agosto del mismo año, Sánchez & Vélez diseñaron y evaluaron un sistema de tratamiento conformado por humedales artificiales para la descontaminación de las aguas residuales; el

prototipo estaba conformado por un tanque aéreo de 500 litros en donde se almacenó el agua residual empleada para alimentar los tres humedales; las dimensiones de los prototipos eran 90cm de largo, 55 cm de ancho, 27 cm de radio con un volumen máximo de 103 litros, también se establecieron capas de sustrato de diferentes granulometría (arena gruesa 50%, granito #3 25% y grava gruesa 25%) funcionado como lecho filtrante y soporte de las especies vegetales y de los microorganismos. Se plantaron 15 individuos en cada unidad experimental a una densidad de 30 plantas por m²; en el primero de ellos se sembró la especie *Costus spicatus*, en el segundo la planta *Heliconia psittacorum* y en el tercero se conformó por las dos especies en cantidades iguales. Luego de pruebas experimentales, se obtuvieron mejores resultados en el humedal con la planta *Heliconia psittacorum* con un TRH 48 horas, el cual removió un 96% de DQO, 95% de DBO5 y de 99% para SST (Sánchez Gil & Vélez Yermis, 2016).

Posteriormente, en el año 2017, Torres & Claros evaluaron dos lechos filtrantes en reactores anaerobios de flujo ascendente para el tratamiento de las aguas residuales de la Universidad Surcolombiana. En la investigación seleccionaron como medio de soporte biotipos de guadua (*Angustifolia Kunth*), las cuales se cortaron de dos formas diferentes (semicírculos y cuartos de círculo) con el fin de comparar las remociones obtenidas por cada uno. Cada uno de los lechos fueron puestos dentro de los recipientes de vidrio con seccional cuadrada de 19.4 cm x 19,4 cm, altura de 40 cm, además, se suministró un volumen inicial de lodos provenientes de la PTAR del corregimiento de Bruselas-Huila. Seguidamente del arranque, se realizaron pruebas demostrando que el medio de soporte con mejor eficiencia fue el semicírculo, con una depuración del 47,13% de DBO, en SS de 54,54% y en coliformes del 79,58%. Señalando que el sistema implementado es una alternativa sencilla y ecológica para el tratamiento de aguas domésticas (Torres Rojas & Claros Ortiz, 2017).

En el año 2018, Moreno & Rangel evaluaron un humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal para el tratamiento de las aguas residuales provenientes de una vivienda rural en el municipio de Floridablanca. Para llevar a cabo el proyecto, los autores dimensionaron e implementaron un sistema de humedales con plantación de pasto Vetiver (*Chrysopogon zizanioides*), con el fin de evaluar la efectividad de los humedales en cuanto a la disminución de la carga contaminante, teniendo en cuenta las dimensiones de largo: ancho (2:1; 3:1; 4:1), crecimiento de la planta, parámetros como DBO, DQO, Sólidos, TRH, caudal, entre otros. De acuerdo con los resultados, el primer humedal presentó mejores remociones en los parámetros de DBO, DQO y Sólidos totales, correspondiendo a las dimensiones de 2.2 m y 1.1 m en la relación largo: ancho respectivamente (cumpliendo con la remoción 2:1), con un tiempo de retención de 3 días, un volumen necesario para la remoción de contaminantes de 0.93 m³ y un crecimiento promedio de la planta de 39 cm en 60 días. Se obtuvieron eficiencias de un 86% en DBO y un 82% en DQO (Moreno Mogollon & Rangel Plata, 2018).

Durante el mismo año, Vásquez & Vargas, realizaron una investigación sobre el aprovechamiento de lodos en la planta de tratamiento de aguas residuales del municipio de Funza. Este proyecto consistió en realizar una comparación de las características y nutrientes de dos cultivo(lechuga y zanahoria) en condiciones normales y el otro utilizando el lodo obtenido del proceso de la PTAR; el subproducto a utilizar inicialmente recibe un tratamiento preliminar, para la determinación de sus características químicas y biológicas fueron enviadas diferentes muestras al laboratorio de la universidad de los andes, dando como resultado que el lodo pertenece a la categoría A (utilizado en la agricultura, en plantaciones forestales, insumos de abonos, entre otros) como lo estipula el decreto 1287 del 10 de julio de 2014. A partir de esto se realiza un cultivo prueba piloto de zanahoria y lechuga + el lodo residual evidenciándose mejor crecimiento

en la lechuga. De acuerdo con lo anterior los autores concluyeron que el lodo es viable para la utilización como insumo para el cultivo de las hortalizas, ya que aportan nutrientes necesarios para el desarrollo de las plantas y así mismo se les da un segundo uso a estos, reduciendo los impactos que ocasiona la implementación de fertilizantes químicos al suelo (Vasquez Aleman & Vargas Martinez, 2018).

A mediados del 2018, Yepes realizó su investigación en el tratamiento de aguas grises mediante un reactor anaerobio de flujo ascendente. Este sistema fue fabricado en acrílico, con un diámetro interno de 9.12 cm, 1.19 m de altura y una capacidad de 3.5 Litros. Además, en la parte inferior se vertió lodo y en él se sumergió el medio de soporte (anillos de biopack). El reactor fue climatizado con agua residual sintética con el fin de lograr su arranque, seguidamente se procedió a la medición de los parámetros, los cuales fueron monitoreados tres veces por semana, dando como resultado que al pasar las 12 horas se obtuvo mayor remoción de materia orgánica y de las variables fisicoquímicos con un 41% de DQO y un 35% en DBO. Finalmente, se concluyó que este prototipo no es el más recomendado para tratar este tipo de aguas grises, y así mismo, sugieren un estudio detallado de todos los insumos utilizados en los hogares, para que de esta manera se seleccione una mejor alternativa, con el fin de obtener mejores resultados (Yepes Polanía, 2018).

De igual manera, Rosero evaluó diferentes filtros anaerobios de flujo ascendente, para dar solución a la problemática presentada en la granja Botana de la Universidad de Nariño, con el objetivo de lograr una remoción de la materia orgánica y de los sólidos presentes en los vertimientos de tipo pecuario. Para esto, el autor seleccionó diferentes medios de soporte como escombros, residuos PET(polietileno tereftalato), residuos PEBD (polietileno de baja densidad) y piedras de río. Posteriormente, realizó seguimiento de parámetros como DQO, DBO y SST en

cada uno de los filtros, dando como resultado mayores remociones en aquellos con medio de soporte de piedras y residuos PET de 76,46% - 73,81% para DBO y 56,18% - 57,58% para SST respectivamente, debido a su diseño y alta porosidad, lo que permitió una mayor área de contacto y mejor distribución del flujo de agua (Rosero Carvajal, 2018).

Después, Prieto & Velásquez, propusieron y evaluaron un reactor de filtro anaerobio de flujo ascendente (FAFA) a nivel de laboratorio, usando como medio de soporte tubo corrugado por su porosidad, estructura y uniformidad para la proliferación de microorganismos. El sistema de tratamiento constó de un tanque sedimentador, una bomba y finalmente el filtro anaerobio de flujo ascendente (FAFA). Por otra parte, para la evaluación del reactor FAFA realizaron 7 pruebas con distintos tiempos de retención hidráulica (8, 12, 16, 20, 24, 28, 32 hrs), cada uno con caudales diferentes (1.25, 0.83, 0.63, 0.50, 0.42, 0.36, 0.31 L/h , respectivamente). De acuerdo con lo anterior, los autores obtuvieron resultados favorables, los cuales fueron comparados con la normativa vigente. Se obtuvo una remoción del 80% de parámetros como grasas y aceites, DBO y DQO. Lo que demuestra que este reactor ayuda en la disminución de los impactos derivados de la mala disposición de los efluentes de aguas residuales domésticas (Prieto Parisaca & Velasquez Ponce, 2018).

En el año 2019, Figueroa realizó un diagnóstico de las condiciones de diseño, construcción y operación de las PTAR de la vereda la Florida y del centro de Sacrificio del municipio de Piendamó, este sistema constaba de un filtro anaerobio de flujo ascendente, el cual, tenía un caudal de diseño de 0,845 L/s, un medio filtrante de rosetas de polipropileno, un tiempo de retención (TRH) de 10, 51Horas, un volumen total de 33,64 m³ y un área superficial de 18,7 m². Este filtro cumple la función de elevar el nivel de eficiencia del tratamiento, realizando una remoción de materia orgánica y sólidos suspendidos para así mejorar las condiciones del efluente.

Finalmente, se determinó que hubo remociones de DBO en un 53% y DQO en un 55% (Rodríguez Figueroa, 2019) .

Además, Marín Bahamón desarrollo una propuesta de producción de fertilizante órgano-mineral, a partir de los lodos generados en la PTAR del municipio de Sopó, Cundinamarca, y así poder aprovechar el potencial de los nutrientes agronómicos y mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero que son ocasionadas al disponerse en un relleno sanitario. Para llevar a cabo el proyecto, realizó inicialmente una caracterización fisicoquímica y microbiológica de los lodos residuales, teniendo en cuenta los parámetros establecidos en la NTC 5167, para su posterior clasificación y tratamiento. Como materiales de soporte se utilizaron el papel periódico y las podas de césped. Posteriormente, definió las alternativas y criterios a tener en cuenta para seleccionar la mejor mediante una matriz PUGH, la cual dio como resultado emplear el sistema de compostaje en un reactor horizontal con volteo y con dos réplicas para la representatividad de datos. Cada reactor contenía la misma mezcla de materiales: 60% de lodo (32.95 kg), 39% de poda de césped (8.03 kg) y 1% papel periódico (0.23 kg); logrando una relación C/N de 23.75 y un porcentaje de humedad de 58.85% al inicio del compostaje. Una vez puesto en marcha el proceso, se realizó un seguimiento durante 40 días a variables como: temperatura, pH, humedad y cenizas. Una vez finalizado el ciclo, se caracterizó la mezcla transformada en abono orgánico y se procedió a introducir minerales procedentes de roca fosfórica, urea y cloruro de potasio, para así obtener un fertilizante organomineral. De acuerdo con los análisis obtenidos, se demostraron resultados de parámetros fisicoquímicos positivos en cuanto a la relación C/N de 9.73, cenizas de 55.65% y un pH de 7.4, mientras que en los análisis microbiológicos se observó lo contrario debido a la multiplicación de microorganismos patógenos (Marín Bahamón, 2019).

Finalmente, Rodríguez & Vargas evaluaron el potencial de los humedales artificiales implementados con la especie *Heliconia psittacorum*, se construyeron 4 humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal elaborados en concreto con un ancho 0.55 m, largo 0.85 m, profundidad de 0,40 m y un volumen para cada uno de 187 Litros, así mismo se asignaron válvulas para controlar los caudales. El primer humedal fue el testigo estaba compuesto de solamente una capa de 30 cm de sustrato (grava, gravilla y arena negra), los tres restantes (réplicas) estaban conformados por el mismo sustrato y adicionalmente con *Heliconia psittacorum*. Seguidamente, se implementó un tanque plástico (1000 Litros) elevado a 1.5 m de altura con el objetivo de buscar la gravedad necesaria para lograr la alimentación de cada humedal con agua residual sintética. Se realizaron pruebas experimentales con diferentes tiempos de retención (2, 5 y 8 días), a partir de esto se obtuvieron remociones de DQO de 76,16%, SST de 76,5%. (Rodríguez Rodríguez & Vargas Niño, 2019).

2.3 Marco Legal

Para el desarrollo de este proyecto, se debe tener en cuenta la siguiente normativa:

Tabla 4. *Normativa Colombiana*

Normativa	Descripción
Constitución Política de Colombia – 1991	Según lo establecido en el artículo 80, el estado deberá planificar el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales, con el fin de garantizar su desarrollo sostenible, conservación, restauración y sustitución. De igual manera, deberá prevenir y controlar cada uno de los factores del deterioro ambiental, imponer sanciones legales y exigir la reparación de los daños causados (Presidencia de la República, 2011).
Decreto 3930 de 2010	Se establece las disposiciones relacionadas con el uso y ordenamiento del recurso hídrico, de igual manera, los vertimientos a este recurso, suelo y alcantarillado (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2010).
Resolución 1207 del 2014	Se adoptan disposiciones relacionadas con el uso de aguas residuales tratadas (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014).

Tabla 4. (Continuación)

Resolución 0631 del 2015	Se establecen cada uno de los parámetros y valores máximos permisibles que deberán cumplir aquellos que realizan vertimientos puntuales a los cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015).
Decreto 1076 del 2015	En el capítulo 3 – Sección 5 donde se establece todo lo relacionado con la obtención de permisos de vertimientos y los planes de cumplimiento (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015) .
Resolución 330 de 2017	Donde se reglamentan los requisitos técnicos que se deben cumplir en cada una de las etapas de planeación, diseño, construcción, ejecución, operación y mantenimiento de toda la infraestructura relacionada con los servicios públicos domiciliarios (acueducto, alcantarillado y aseo). Además, el Capítulo 5 - Sección 3, hace referencia a los tratamientos descentralizados, destacando que este tipo de tecnologías deben ir acompañadas de un filtro anaeróbico y un tratamiento complementario (Ministerio de Salud y Protección Social, 2017) .
Decreto 050 de 2018	Artículo 2.2.3.3.4.9. Del vertimiento al suelo la cual se basa en la obtención de un permiso de vertimientos para aguas residuales domésticas tratadas (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018)

Nota: * Normativa Colombiana que rige los lineamientos mencionados en el proyecto.

3. Método

3.1 Realización del Diagnóstico de las Aguas Residuales Domésticas Generadas en el Campus Piedecuesta de la Universidad Santo Tomás – Seccional Bucaramanga, Teniendo en Cuenta el Manejo Actual y las Características Físicoquímicas y Microbiológicas de las Mismas

Actualmente el manejo de las aguas residuales domésticas generadas en el Campus de Piedecuesta de la Universidad Santo Tomás se da a partir de un sistema construido “*in situ*” que consta de un tanque séptico de doble cámara. Por lo anterior, se solicitó el informe de

caracterización de vertimientos realizado en el campus de Piedecuesta en agosto del 2018, con el objetivo de conocer la calidad de las aguas tratadas, mediante la medición de los parámetros propuestos en la Tabla 5. Este muestreo fue realizado por ECOSAM S.A.S, laboratorio acreditado ante el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia – IDEAM, mediante la Resolución de acreditación inicial No. 2053 del 28 de septiembre de 2015 y la Resolución de extensión por pruebas de evaluación de desempeño No. 0931 del 18 de mayo de 2016, lo que asegura una validez y representatividad del monitoreo de las muestras tomadas.

Tabla 5. *Parámetros físicos, químicos y biológicos*

Características					
Físicas		Químicas		Biológicas	
Parámetro	Método	Parámetro	Método	Parámetro	Método
Sólidos	SM 2540 D SM 2540 F.	DBO	SM 5210 B; 4500- O G	Coliformes fecales termotolerante	SM 9223 B
		DQO	Reflujo cerrado y volumetría. SM 5220 C.		
		Grasas y Aceites	SM 5520 B		
		Nitrógeno	SM 4500- Norg B - SM 4500 NH3 B, C		
Temperatura	SM 2550 B	Fósforo	SM 4500 P B, E		
		pH	SM 4500 H+B		
		Conductividad	SM 2510 A		
		Oxígeno Disuelto	Electrodo de Membrana		
Turbiedad	SM 2130 B	Tensoactivos	SAAM		
		Nitritos	J. Rodier, 1998		
		Nitratos	J. Rodier, 1998		
		Amonio	SM 4500- NH3 C		
		Hidrocarburos totales	SM 5520 D, F		
		Ortofosfatos	SM 5540 C		

Nota: * Método de las variables fisicoquímicos y biológicos.

Adaptado de Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2007). *Toma de Muestras de Aguas Residuales*.

3.2 Determinación de los Parámetros Críticos de Diseño que Influyen en la Eficiencia de un Sistema de Tratamiento Descentralizado de Acuerdo con las Características del Agua Residual a Tratar

De acuerdo con la revisión del estado de arte, se identificó en diversos estudios la evaluación de filtros anaerobios de flujo ascendente y humedales artificiales, como una alternativa viable para el tratamiento de aguas residuales domésticas, debido a las altas eficiencias teóricas encontradas en la remoción de los contaminantes presentes en el agua. Por lo anterior, se determinó que el tren de tratamiento idóneo para el manejo integral de las aguas residuales domésticas generadas en el Campus de Piedecuesta, debe estar conformado inicialmente por un tanque séptico, seguido de un filtro anaerobio de flujo ascendente y finaliza con un humedal artificial. Por esta razón, se propuso el diseño del sistema en mención, teniendo en cuenta las condiciones técnicas de diseño que influyen en el funcionamiento hidráulico y el manejo adecuado de los subproductos que se derivan de este tratamiento, siguiendo los lineamientos establecidos en la resolución 330 del 2017 (Ministerio de Salud y Protección Social, 2017).

Se determinaron los parámetros críticos de diseño para el tren de tratamiento propuesto, mediante la revisión bibliográfica en diferentes bases de datos: (Scopus, ScienceDirect, Repositorios institucionales de la Universidad Tecnológica de Pereira, Universidad Industrial de Santander, Universidad Pontificia Bolivariana, Universidad Santo Tomás, Google Académico, Libros Digitales, Environment Complete, Leyes.Info), tanto en el ámbito nacional e internacional, utilizando diversas estrategias de búsquedas a través de diversos descriptores como: “Anaerobic filters” AND “Sewage treatment” “wastewater treatment” AND “artificial

wetlands”, (Sistemas descentralizados OR Tratamiento de aguas residuales) AND (Humedales artificiales OR Filtros Anaerobios), “Resolución 330 del 2017”, “Decreto 1076 del 2015”.

Finalmente, se realizó una comparación de los criterios de diseño establecidos tanto en el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS) como en la literatura.

3.3 Propuesta del Diseño de un Tren de Tratamiento Descentralizado, el cual Cumple con los Requisitos Establecidos por la Normativa Ambiental Vigente, Para el Manejo de las Aguas Residuales Domésticas del Campus Piedecuesta

Se propuso el diseño de un sistema descentralizado, el cual está compuesto por un tanque séptico, seguido de un filtro anaerobio de flujo ascendente y un humedal artificial como tratamiento complementario, que permite una gestión adecuada de las aguas residuales generadas en el Campus Piedecuesta, de acuerdo con la revisión del estado de arte y lo establecido en el Reglamento Básico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico.

La propuesta de diseño contempla el desarrollo de las memorias de cálculo mediante hojas de Excel, planos de la red de alcantarillado del campus de Piedecuesta y la ubicación del sistema de tratamiento realizado en el programa AutoCAD 2D, además de un modelado en 3D del sistema de tratamiento descentralizado propuesto a partir de los Softwares “SketcUp” y “Solidworks”, y por último se llevó a cabo un renderizado del tratamiento para obtener un modelo real a través del programa “Vray”. Es importante mencionar que estas herramientas de diseño fueron obtenidas por licencias estudiantiles, las cuales no tienen ningún valor monetario.

4. Resultados y Discusión

Inicialmente se realizó una investigación detallada del municipio de Piedecuesta, con el fin de conocer su estructura económica social y ambiental, así mismo identificar las falencias de los servicios básicos de primera necesidad y la población más vulnerable, ya que el proyecto se localiza en este municipio. De igual manera, se tuvieron en cuenta las condiciones establecidas en la Resolución 330 del 2017 (Capítulo I – Artículo 8 y 10), donde nombran las consideraciones que se deben tener en cuenta para la ubicación de un sistema de tratamiento de aguas residuales como se evidencia a continuación:

4.1 Diagnóstico de las Aguas Residuales Domésticas

4.1.1 Diagnóstico a nivel municipal.

- Social

La administración actual del municipio busca mediante el programa “Piedecuesta mi ciudad social y humana” favorecer el ascenso de personas y grupos sociales de cualquier condición social con el fin de garantizar sus derechos fundamentales y el cubrimiento de las necesidades básicas. Así mismo, tiene como propósito la participación sin exclusión tanto en las acciones como en los beneficios del desarrollo, promocionando la equidad de género y la autonomía de la mujer, teniendo en cuenta el objetivo 5 de desarrollo sostenible que hace referencia a avanzar en la disminución de la violencia intrafamiliar y en la igualdad entre hombres y mujeres.

Por otra parte, mediante la estrategia de Piedecuesta la más educada e incluyente, busca promover la educación para el trabajo, mediante la participación del SENA y demás instituciones del sector privado, para de esta manera poder facilitar este proceso. De igual forma, pretende

alcanzar una cobertura universal en educación básica, avanzar en la cobertura en educación media y erradicar el analfabetismo (Ramirez Rojas, 2016).

- Ambiental

El municipio de Piedecuesta tendrá como referencia el componente de los recursos naturales establecido en el Plan Nacional de Desarrollo. De igual manera, con el cumplimiento de dos de los objetivos de desarrollo sostenible; el objetivo 15 contempla “Proteger, restaurar y promover la utilización sostenible de los ecosistemas terrestres, gestionar de manera sostenible los bosques, combatir la desertificación y detener y revertir la degradación de la tierra, y frenar la pérdida de diversidad biológica”, y el objetivo 13 plantea el compromiso de adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos. Según las estadísticas del observatorio metropolitano, para el 2014 el municipio contaba con 29,41 Ha de especies arbóreas y 28,22 Ha de zona de protección. Así mismo, para el 2016, en el municipio 5.52 m2 es el índice de espacio público verde por habitante y 2.35 Ha de bosque urbano por habitante (Ramirez Rojas, 2016).

Por otra parte, las ofertas de bienes y servicios que posee el municipio, desde la explotación con fines económicos, corresponde a bienes de madera, suelos agroforestales y minerales. Además, cuenta con bosques, vegetación de subpáramo y bosques secundarios, los cuales hacen parte de las zonas de protección ambiental del área metropolitana de Bucaramanga y de la cual se integra este municipio (Ramirez Rojas, 2016)

- Económico

El pilar de la economía de los Piedecuestanos es la agricultura, ya que cuenta con una gran diversidad de productos, debido a que el municipio está a una altura de 1.005 msnm, lo cual permite el desarrollo de diferentes cultivos como: arveja, maíz, cebolla, trigo, hortalizas, verduras, distintos pastos, arracacha y algunos frutales, caña de azúcar, tabaco, plátano, yuca, y

tomate. Es de importancia resaltar que los productos básicos de la economía piedecuestana son la caña de azúcar y el tabaco (Alcaldía de Piedecuesta , 2019).

4.1.2 Diagnóstico a nivel institucional (Universidad Santo Tomás – Seccional Bucaramanga).

- Social

La Universidad Santo Tomás desde su Plan Integral Multicampus “Proyección social e investigación pertinentes”, considera importante y necesario la implementación de lineamientos que permitan la integración nacional de la comunidad académica y al mismo tiempo, garantizar que los programas y proyectos de proyección social sean articulados con las demás funciones sustantivas (Universidad Santo Tomás, 2019).

Es por esto, que en el 2019 la universidad promovió el desarrollo de la Política Institucional de Responsabilidad Social Universitaria – RSU a nivel Colombia, como instrumento necesario para la proyección social y la extensión universitaria. Esta política considera como principios fundamentales la justicia, la ecología integral, el bien común, la utilidad al servicio del prójimo, el aprendizaje-servicio y la interdisciplinariedad (Universidad Santo Tomás, 2019).

- Ambiental

La Universidad Santo Tomás, actúa de manera responsable para proteger los recursos naturales, prevenir y/o minimizar los impactos ambientales que se puedan generar por sus actividades académicas y administrativas. Como lo estipula la Constitución Política de Colombia y en la normativa legal vigente.

Por lo anterior, desde el 2017 la universidad cuenta con una política ambiental a nivel Colombia, en la cual, se identifica el pensamiento humanista cristiano de Santo Tomás de Aquino,

en concordancia con la Encíclica “Laudato Si” sobre la importancia del cuidado de la “casa común”, y con el propósito de contribuir al desarrollo sustentable, promoviendo un ambiente sano, asegurar el uso racional de los recursos naturales, prevenir la contaminación resultado de las actividades, promover un pensamiento ético-ambiental y demás disposiciones aplicables, evaluando de manera sistemática los impactos ambientales y asegurando la mejora continua del Sistema Nacional de Gestión Ambiental (Universidad Santo Tomás, 2017).

4.1.3 Determinación de la población beneficiada. Mediante la ejecución del proyecto la población beneficiada será los administrativos, docentes, estudiantes y visitantes que frecuentan este campus para disfrutar los diferentes espacios que ofrece la sede, mejorando su salubridad. Por otra parte, la población beneficiada indirecta son las comunidades ubicadas aguas abajo, ya que, al momento de realizarse un tratamiento adecuado de las aguas residuales generadas, se disminuye los impactos socioambientales, mejorando su calidad de vida.

4.1.4 Características socioculturales de la población y participación comunitaria. La Universidad Santo Tomás, es una institución de educación superior, privada y católica, fundada y dirigida por frailes de la Orden de Predicadores de la Provincia de San Luis Bertrán de Colombia, organizada con carácter de fundación y sin ánimo de lucro. Esta universidad ofrece programas de formación científica, tecnológica y técnica en profesiones, ocupaciones y disciplinas; así mismo, ofrece programas de pregrado, especialización, maestría, doctorado y posdoctorado, en las modalidades presenciales, semipresenciales, abierta y a distancia. Actualmente, cuenta con Acreditación Institucional de Alta Calidad Multicampus y se encuentra

distribuida en diferentes ciudades del país como lo son: Bogotá, Bucaramanga, Tunja, Medellín y Villavicencio (Universidad Santo Tomás, 2018).

La Universidad Santo Tomás – Seccional Bucaramanga, cuenta con cuatro campus, los cuales se encuentran ubicados dentro del área metropolitana. Teniendo en cuenta lo anterior, para llevar a cabo el desarrollo del proyecto, se seleccionó el Campus de Piedecuesta, el cual se encuentra ubicado en el sector rural del municipio de Piedecuesta, en la vereda La Mata.

4.1.5 Estudios básicos.

4.1.5.1 Condiciones generales. Piedecuesta es un municipio colombiano del departamento de Santander, localizado a 17 km de Bucaramanga, perteneciendo a su área metropolitana, cuenta con una población de 186.223 habitantes ubicándolo en la primera categoría del primer grupo-grandes municipios (Congreso de la República, 2012), está compuesto por 344 kilómetros cuadrados de extensión territorial. Su geografía cuenta con múltiples valles, mesetas, montañas y colinas, entre otros. El municipio limita por el norte con Tona y Floridablanca, por el sur con Guaca, Cepitá, Aratoca y los Santos, por el oriente Santa Bárbara y finalmente por el occidente con Girón (Instituto Universitario de la Paz, 2014).

Se caracteriza por tener una temperatura de 20°C a 26°C durante el transcurso del año y ocasionalmente baja a menos de 17 °C. Adicionalmente, presenta una mayor precipitación del 25 de marzo a 30 de noviembre, con un 44% más de un 1 milímetro de líquido, así mismo, la mayor lluvia que presenta este municipio es un promedio de 151 milímetros. La velocidad promedio del viento permanece en un margen de más o menos de 4,9 kilómetros por hora (Weather Spark, 2020).

El campus se encuentra ubicado en la vereda La Mata como lo demuestra la figura 5, caracterizada por su zona alta conformada por el páramo y bosque alto-andino, ya que son ecosistemas de alta montaña ubicados al oriente de la región; además, se origina el nacimiento del Río Hato, abasteciendo la zona de expansión norte; y laderas occidentales del valle del Río de Oro, en la vereda Cristales (Instituto Universitario de la Paz, 2014).

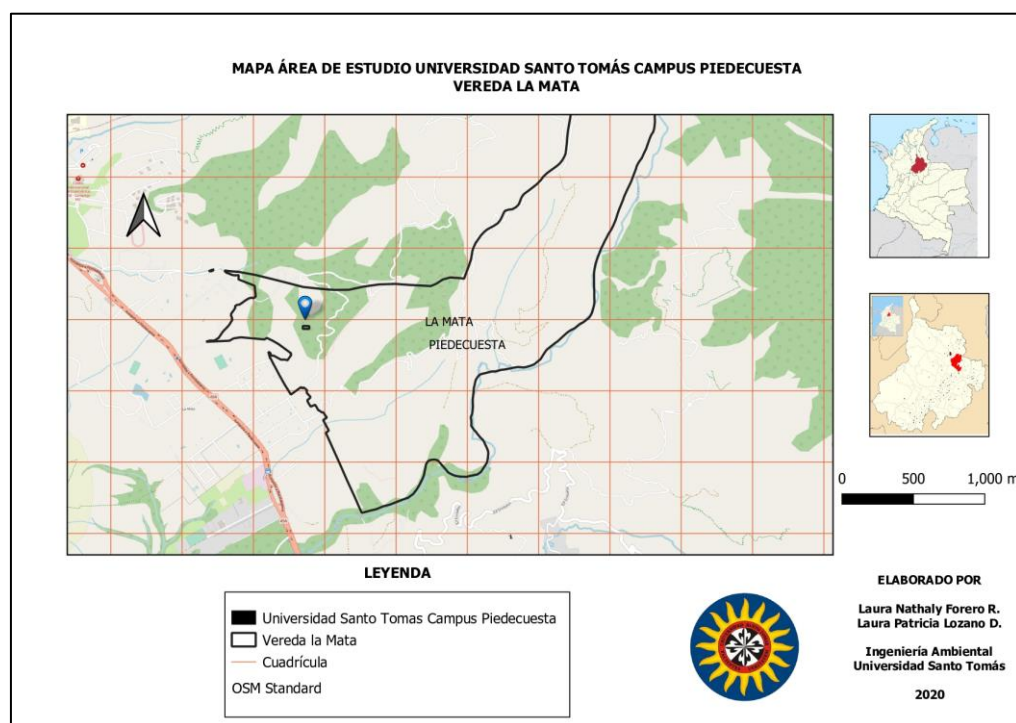


Figura 5. Ubicación del Área de influencia.

4.1.5.2 Disponibilidad del agua y balance hídrico. En el municipio de Piedecuesta nacen tres ríos (Oro, Hato y Manco) y cuenta con 15 quebradas: La mata, Guatiguará, Faltriqueras, El Rasgón, Sevilla, Honda, Loro, La Bella, La Zorra, El Abra, El Gaque, Grande, La Chorrera, Las Pavas, los Montes.

Actualmente el municipio de Piedecuesta consta con un alto cubrimiento del servicio de agua potable, ya que en 1968 construyeron una planta de tratamiento de agua potable, con una

capacidad nominal de 530l/s, ubicada en el sector de la colina, la cual se encuentra activa, es administrada por la Piedecuestana ESP prestadora de servicios públicos domiciliarios en la región nororiental.

Según las estadísticas (Ramírez Rojas, 2016) hay un total de 33,785 viviendas urbanas con conexión al acueducto, para una cobertura del servicio de agua potable del 100%. En cuanto al sector rural solo 894 viviendas tienen acceso a este servicio. Para la localidad la Mata (área de influencia del proyecto propuesto) el acueducto veredal es abastecido por la cuenca el Río Hato proporcionado este recurso a un promedio de 100 familias en total tanto para parte alta y baja del sector (Ramírez Rojas, 2016)

Actualmente el municipio cuenta con dos plantas de tratamiento de agua residual (PTAR): una de ellas es la planta “La Diva”, la cual no descontamina al 100% las aguas negras. Por otra parte, se encuentra la PTAR “El Santuario” que en los últimos años entró en funcionamiento, las cuales son coordinadas por la Piedecuestana E.S.P.

4.1.5.3 Geología, geomorfología, suelos y geotecnia. Gran parte del municipio de Piedecuesta está constituido por rocas ígneas y metamórficas con niveles importantes de minerales ferromagnesianos, esto llega a caracterizar la textura y composición de los niveles de meteorización, de forma que se presentan perfiles de textura areno arcillosa de colores pardos – rojizos, con porcentajes similares de tamaños de grano arcilla, limo y arena (Ulloa & Gómez, 2007).

Piedecuesta está en marcada por la falla de Bucaramanga al oriente, el nudo sísmico y la falla de los Santos al sur, la falla del río Suárez al occidente, las fallas de Ruitoque y río de Oro por el norte (Piedecuesta, Santander, 2012).

4.1.5.4 Disponibilidad de energía eléctrica y de Comunicaciones. El municipio de Piedecuesta consta con un sistema de alumbrado público concesionado con la firma Luces de Santander, el inventario de luminarias asciende a 10.624, las cuales requieren de mantenimiento y/o en su defecto reposición. En el área de influencia del proyecto cuenta con disponibilidad de energía las 24 Horas del día. En la tabla 6 se evidencia la cobertura municipal de este servicio.

Tabla 6. Cobertura municipal de energía eléctrica para el año 2014

Período	Municipio	Porcentaje de Cobertura Urbana
2014	Piedecuesta	100%
	AMB	99.88%

Nota: * Disponibilidad de la cobertura de energía eléctrica para el año 2014. Adaptado de Plan Desarrollo 2016-2019 (Ramírez Rojas, 2016). *Piedecuesta Mi Plan*.

En cuanto a las vías de acceso, el municipio tiene como objetivo realizar un mejoramiento periódico de las vías, la adquisición de un banco de maquinaria y el control efectivo del tránsito.

En el sector la mata la vía principal de acceso es la ruta nacional 45A, la cual es de tipo troncal que inicia en la ciudad de Bogotá y finaliza en el municipio de San Alberto, Cesar. Además, cuenta con una vía secundaria pavimentada que comunica con zonas residenciales y el campus de Piedecuesta de la Universidad Santo Tomás.

4.1.5.5 Estudios socioeconómicos. El municipio de Piedecuesta se conforma con tres sectores económicos principales, el primero se destacan las actividades agrícolas y pecuarias, el segundo sector de la economía caracterizado por una industria liviana, alimentos y el tercero de prestación de servicios donde se destaca los financieros, servicios de salud, educación entre otros.

En el Campus Piedecuesta presta servicios de educación superior de alta calidad, recreación, esparcimiento, zonas deportivas y entrenamiento.

4.1.6 Diagnóstico del manejo actual de las aguas residuales generadas en el Campus de Piedecuesta de la Universidad Santo Tomás. El Campus de Piedecuesta de la Universidad Santo Tomás cuenta con un sistema de alcantarillado (separado) privado conformado con dos tuberías: una para el transporte de los residuos sanitarios que conduce las aguas hasta el sistema de tratamiento existente y otra para las aguas pluviales (aguas lluvia), ya que son vertidas en un cuerpo hídrico sin tratamiento previo, evitando que sean afectadas por las cargas contaminantes de las aguas negras (Grundfos Colombia, 2020).

En la figura 6 se evidencia la distribución de la red de alcantarillado en toda la extensión del campus, identificando con color verde la red sanitaria y de color azul la red pluvial. La red sanitaria cuenta con 13 pozos de los cuales 4 hacen parte de la red nueva de alcantarillado, identificada en el plano con líneas punteadas y la red pluvial está conformada por 13 pozos. En el apéndice A y apéndice B se pueden detallar la memoria de pozos y su distribución.

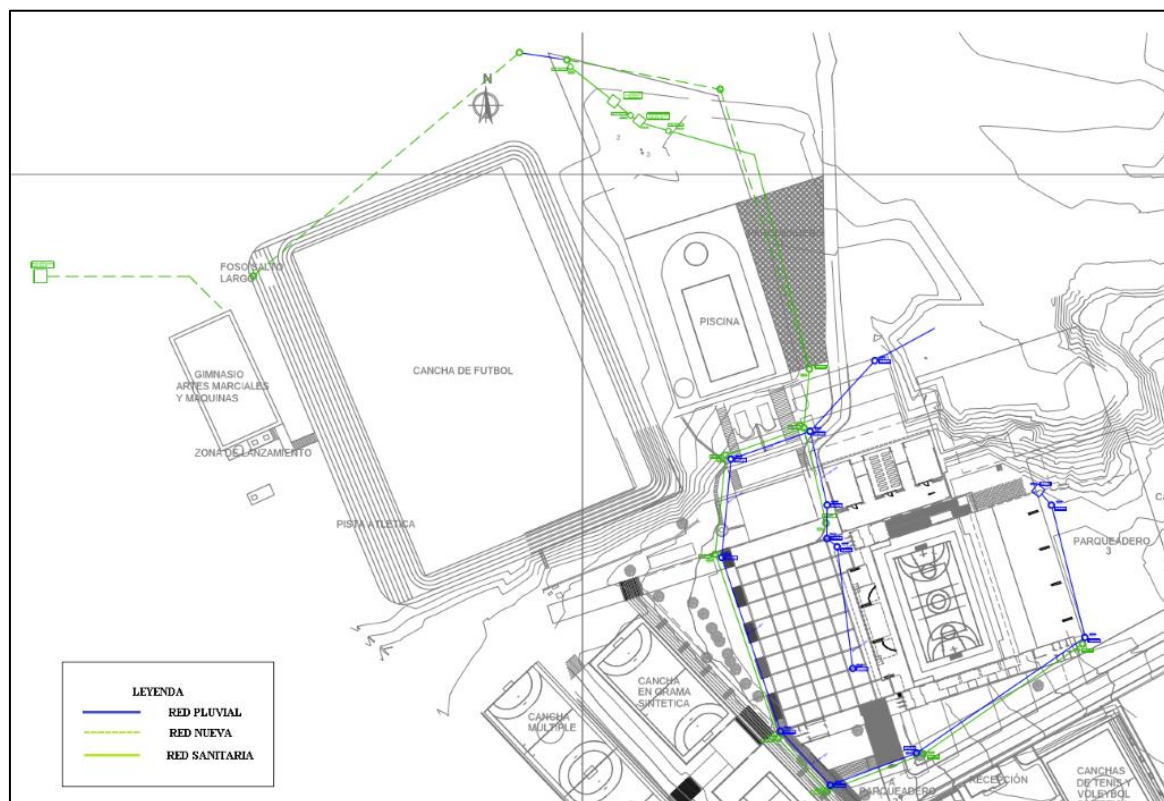


Figura 6. Distribución de la red de alcantarillado - Campus Piedecuesta.
Adaptado de la Universidad Santo Tomás.

Las aguas residuales domésticas provenientes del campus de Piedecuesta, se derivan de las diferentes actividades que se desarrollan como: educativas, administrativas, recreativas, entre otras. En la tabla 7 se demuestra las diferentes unidades sanitarias (baños, duchas, etc) con las que cuenta este campus, ya que de su utilización se producen residuos líquidos, los cuales son recolectados mediante la red de alcantarillado sanitaria que conducen directamente al sistema de tratamiento actual.

Tabla 7. *Inventarío de baterías sanitarias*

Inventarío	
Áreas	N° Espacios
Lavamanos	58
Puntos Sanitarios	70
Duchas	26
Cafeterías	1
Laboratorios	4

Nota: * Registró de las unidades sanitarias disponibles en el campus de Piedecuesta.

Adaptado del Departamento de Plata Física (Departamento de Planeación USTA, 2020).
Universidad Santo Tomas.

4.1.7 Descripción del sistema de tratamiento de aguas residuales existente en el campus Piedecuesta. El Campus de Piedecuesta de la Universidad Santo Tomás, cuenta con un sistema de tratamiento que consta de un tanque séptico de doble cámara de 2.2 m de ancho, 2.3 m de largo y 0.4 m de profundo (Figura 7); su función principal es la separación, y transformación fisicoquímica y biológica de la materia orgánica. Anteriormente, se presumía que el efluente de este sistema era vertido en el cuerpo receptor el cual no pudo ser reconocido ya que las entidades correspondientes no contaban con información primaria de la fuente hídrica, pero se identificó que durante su transporte la tubería estaba averiada produciendo infiltraciones de estas aguas al suelo, por tal motivo la universidad determinó construir en Enero del año 2020, un tanque de almacenamiento temporal (figura 8), donde sus aguas sean extraídas semestralmente por una entidad tercera que les brinda un servicio de tratamiento y disposición final, con el fin de evitar afectaciones en el suelo.

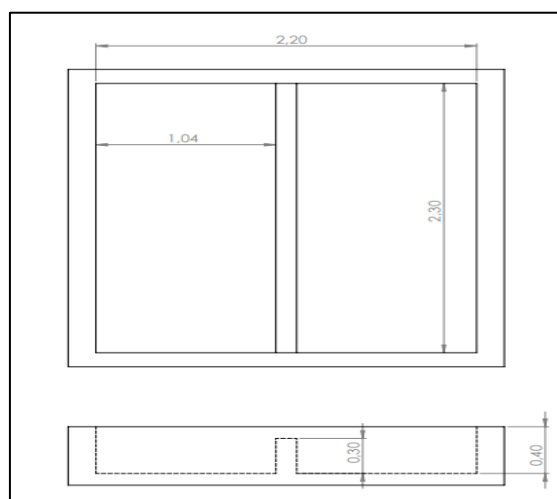


Figura 7. Plano frontal del tanque séptico.

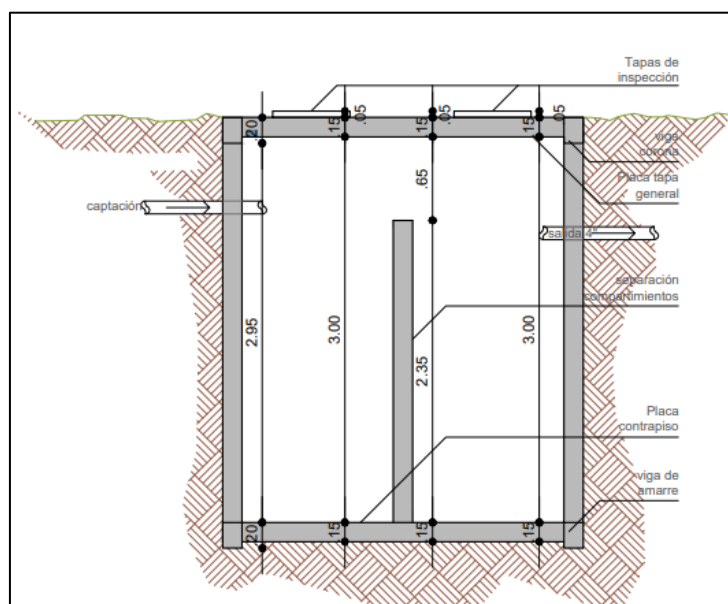


Figura 8. Plano frontal del tanque de almacenamiento.
Adaptado de La Universidad Santo Tomas.

En la resolución 330 del 2017 (Capítulo 5 - sección 3 - artículo 173) se establecen los parámetros generales de diseño de un tanque séptico construido *in situ* para tener en cuenta al momento de contemplar esta tecnología. Por lo anterior, en la tabla 9 se realiza una comparación

de los parámetros de diseño establecidos en la resolución junto a los criterios que se tuvieron en cuenta para la construcción del tanque existente del campus de Piedecuesta, con el fin de identificar el cumplimiento de las especificaciones establecidas por la normativa vigente.

Tabla 8. *Generalidades de los criterios de diseño del tanque séptico existente y su comparación con lo establecido en la resolución 0330 del 2017*

Tanque Séptico				
Parámetros de diseño				
Criterios	Resolución 330 del 2017	Sistema existente	Cumple	No Cumple
Tiempo de Retención hidráulica	12 a 24 horas	0.66 horas		x
Relación largo-ancho	-Mínimo de 2:1 -Máximo de 5:1	-largo: 2.3 m -ancho: 2.2 m		x
Cámaras	-Mínimo 2 (el volumen de la primera cámara deberá ser igual a 2/3 del total del volumen)	2 cámaras (el volumen de la primera cámara es menor a 2/3 del total del volumen)		x
Profundidad útil	-Mínimo 1.2 m	0.4 m		x

Nota: * Comparación de los parámetros de diseño del tanque séptico con la resolución 631 del 2017.

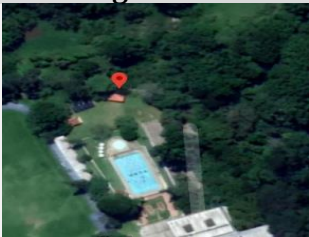
Antes de la construcción del pozo séptico fue diseñado con el objetivo de tratar las aguas residuales generadas en el campus, para que de esta manera sean vertidas al cuerpo hídrico receptor. Por otra parte, en la tabla 8 se ratifica que el sistema existente no cumple con las especificaciones de diseño mencionadas en la resolución 0330 del 2017. Es importante resaltar que la universidad cuenta con diferentes compromisos enfocados en dar cumplimiento al sistema del manejo integral del recurso hídrico, mediante acciones inter y multidisciplinarias académicas e investigativas con el objetivo de preservar este recurso. Por lo mencionado, no se considera pertinente que las aguas sean almacenadas para su recolección por una entidad tercera, considerando que se les puede brindar un manejo más óptimo, mediante el reúso de las mismas

y así mismo, generar un espacio académico a los programas enfocados en brindar un apoyo al sistema de gestión ambiental.

4.1.8 Características fisicoquímicas y microbiológicas de las aguas residuales generadas en el campus Piedecuesta. En el año 2018 se ejecutó un monitoreo realizado por el laboratorio ECOSAM S.A.S, con el fin de identificar el funcionamiento del sistema de tratamiento existente (tanque séptico), en cuanto a la remoción de las variables fisicoquímicas de interés sanitario establecidas en la normativa vigente.

Durante la caracterización de la calidad del vertimiento se establecieron dos puntos de monitoreo, los cuales se ubicaron en la entrada y la salida del sistema existente, como lo evidencia la Tabla 9.

Tabla 9. *Ubicación de los puntos de monitoreo*

Punto	Imagen satélite	Coordenadas	Imagen en primer plano
Punto 1: Entrada al pozo séptico		7.024116 N & - 73.059909W	
Punto 2: Salida del pozo séptico		7.024115 N & - 73.059945 W	

Nota: * Ubicación de los dos puntos de muestreo.

Adaptado de Laboratorio y Consultoría Ambiental ECOSAM S.A.S. (2018). *Monitoreo y Análisis de Agua Residual Doméstica para la Verificación del Sistema de Tratamiento – Séptico.*

Por otra parte, en la tabla 10 se describen los resultados de los parámetros obtenidos por el laboratorio de la empresa ECOSAM S.A.S y la comparación de los mismos con los lineamientos establecidos en la Resolución 0631 del 2015 (Capítulo V - artículo 8: vertimientos puntuales de aguas residuales domésticas de las actividades de servicios y de los prestadores del servicio público de alcantarillado a cuerpos de agua superficiales).

Tabla 10. *Resultados de la caracterización fisicoquímica y microbiológica de las aguas residuales de estudio*

Parámetro	Tratamiento existente		Unidades	Límites permisibles (Res. 631 del 2015)	Cumplimiento	
	Entrada	Salida			SI	NO
Nitratos	<0,2	<0,2	mg NO ₃ -N/L	Análisis y reporte	-	
Nitritos	0,093	<0,01	mg NO ₂ -N/L	Análisis y reporte	-	
Amonio (Nitrógeno amoniacal)	209	148	mg NH ₃ -N/L	Análisis y reporte	-	
Fósforo Total	6,06	3,63	mg PO ₄ -3 - P/L	Análisis y reporte	-	
Sólidos suspendidos totales	93,6	46	mg/L	90	X	
DBO ₅	221	147	mg O ₂ /L	90		X
Grasas y aceites	12,9	9,03	mg/L	20	X	
Nitrógeno Total	109,093	62,4	mg N/L	Análisis y reporte	-	
DQO	442	275	mg O ₂ /L	180		X
Coliformes Fecales Termo tolerantes	4884000	461100	NMP/100mL	Análisis y reporte	-	
Nitrógeno total	109	62,4	mg N/L	No aplica	-	
Ortofosfatos	12,8	9,89	mg P - PO ₄ -3 /L	Análisis y reporte	-	
Tenso activos	1,46	26	mg SAAM/L	Análisis y reporte	-	
Temperatura de la muestra	25,2	24,3	° C	Análisis y reporte	-	
Temperatura ambiente	26,4	25,2	° C	Análisis y reporte	-	
pH	8,86	8,19	Unidades pH	6 a 9	X	
Sólidos sedimentables	0,1	< 0,1	mL/L	5	X	

Nota: * Resultados del monitoreo efectuado por ECOSAM.

Adaptado de Laboratorio y Consultoría Ambiental ECOSAM S.A.S. (2018). *Monitoreo y Análisis de Agua Residual Doméstica para la Verificación del Sistema de Tratamiento – Séptico.*

Con los resultados obtenidos se determinó que el nitrato es la forma más oxidable del nitrógeno siendo menos tóxico, por lo que se puede acumular y descargar fácilmente sin alterar los

ecosistemas y la salud pública (Microlab Industrial, 2017). Los nitratos se encuentran disueltos en el agua, no tienen color ni sabor, pueden ser producidos por fuentes naturales o antropogénicas, siendo estas últimas las responsables del aumento de su concentración. De acuerdo con los resultados, los niveles de nitratos registrados en la entrada y salida del pozo séptico son $< 0.2 \text{ mg NO}_3\text{-N/L}$, lo que no representa un riesgo para el cuerpo de agua receptor (Palomares, 2013).

El nitrito es la forma de nitrógeno resultante de la oxidación biológica del nitrógeno amoniacal. Este parámetro es una especie química cuya toxicidad aguda puede llegar a ser incluso peor que la del amoníaco, pero no se volatiliza, es oxidada rápidamente a nitrato por acción microbiológica. Según el informe, se evidencian concentraciones bajas, por lo que no se suponen mayores alteraciones en las propiedades físicas del agua. En la entrada del pozo séptico se registraron magnitudes de $0,093 \text{ mg NO}_2\text{-N/L}$ y para la salida un valor por debajo del límite de cuantificación del método utilizado por el laboratorio $< 0,01 \text{ mg NO}_2\text{-N/L}$ (Microlab Industrial, 2017).

El nitrógeno total se compone por nitrógeno amoniacal y el nitrógeno orgánico, se construye por las formas de nitrógeno correspondientes al nitrato, nitrito y amonio (Sardiñas Peña & Pérez Cabrera, 2004). Es importante mencionar que el nitrógeno es un elemento de interés en las aguas residuales, debido a que es necesario para el crecimiento de los microorganismos y así garantizar el funcionamiento de los sistemas de tratamiento biológico; las aguas residuales domésticas suelen contener entre $20\text{-}50 \text{ mg/L}$ de nitrógeno total (Microlab Industrial, 2017).

Cuando se excede este límite, el nitrógeno se presenta como un contaminante que puede llegar a reducir el oxígeno disuelto de las aguas, ocasiona el crecimiento desmesurado de organismos fotosintéticos (Eliminación..., 2018). En la caracterización del vertimiento se obtuvo un valor para el punto 1 de $109,093 \text{ mg N/L}$ y en el punto 2 de $62,4 \text{ mg N/L}$, con una remoción de

42.80%. Lo anterior, deja en evidencia la necesidad de continuar reduciendo este parámetro en un sistema de tratamiento complementario con el fin de evitar consecuencias a futuro.

Por su parte, el amonio es un compuesto inorgánico del nitrógeno que se forma durante la degradación biológica de compuestos orgánicos de nitrógeno. Cuando hay presencia de oxígeno el amonio puede llegar a convertirse en nitrato (nitrificación), lo que produce el elevado consumo de oxígeno (Microlab Industrial, 2017). El comportamiento de este parámetro depende del pH, es decir: a pH ácido permanece disuelto en el agua como ion amonio mientras que, a pH alcalinos se transforma en gas amoniaco el cual es susceptible de volatilizarse al ambiente (Microlab Industrial, 2017).

El fósforo total es esencial para el crecimiento de plantas y animales, en las aguas residuales se encuentran como fosfatos, los cuales se clasifican en ortofosfatos, fosfatos condensados y fosfatos orgánicos. El empleo de detergentes y fertilizantes contienen grandes cantidades de fósforo, lo que provoca el aumento del contenido de fosfato en las aguas residuales domésticas, contribuyendo a la incrementación de mismo en las fuentes receptoras. En el monitoreo se registró para el punto de entrada un valor de 6,06 mg PO₄-P/L y para el punto de salida un nivel de 3,63 mg PO₄-P/L (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2004).

Los sólidos suspendidos son partículas que permanecen en suspensión en el agua debido al movimiento del líquido o que la densidad de la partícula sea menor o igual que la del agua. Estos sólidos desempeñan un papel importante como contaminantes, debido a la materia orgánica o inorgánica que los conforman, así como los agentes patógenos que son transportados en la superficie de dichas partículas. Es decir, cuanto menor sea el tamaño de la partícula, mayor será la carga patógena que puede ser transportada (Grundfos Colombia, 2017). El monitoreo realizado en el sistema de tratamiento determinó concentraciones de sólidos suspendidos para el punto de

entrada de 93,6 mg/L y para el punto de salida 46,0 mg/L, obteniendo porcentajes de remoción del 50.86%, lo que evidencia el cumplimiento de la normativa ambiental vigente, ya que el límite permisible es de 90 mg/L. Sin embargo, los sólidos remanentes principalmente de carácter coloidal pueden removerse en un sistema posterior.

Las grasas y aceites son todas aquellas sustancias de naturaleza lipídica que, al ser inmiscibles con el agua, permanecen en la superficie generando la aparición de natas y espumas, las cuales afectan cualquier tipo de tratamiento, además la presencia de grasas y aceites no permite el paso del oxígeno a la columna de agua, ni la salida de CO₂ hacia la atmósfera, por ende, deben ser eliminadas en los primeros procesos del tratamiento de las aguas residuales. De acuerdo con los resultados, se registró en la entrada del pozo séptico una concentración de 12.9 mg/L y para la salida una concentración de 9.03 mg/L, obteniendo una eficiencia de remoción del 30%, cumpliendo con el límite permisible que es 20 mg/L, lo que evidencia que en el campus no se generan altos aportes por este contaminante (Importancia..., 2018).

Los coliformes fecales son un subgrupo de los coliformes totales, generalmente se encuentran en las heces de animales y los seres humanos, se designan también como tolerantes por su capacidad de soportar niveles altos de temperaturas (Campos Pinilla, 2003). En la tabla 10 se registra que en punto 1 se encuentran 4.884.000 NMP/100mL y para la salida del pozo séptico 461100 NMP/100mL, dando como resultado una remoción del 90,55%, aunque en la resolución 0631 no presenta límites permisibles para este parámetro, es idóneo que no exista la presencia de estas bacterias. Indicando la imposibilidad de reutilizar el vertimiento para otros usos debido a las altas cargas de contaminantes patógenos.

Los ortofosfatos son considerados en las aguas estancadas y corrientes como el nutriente limitante, además es la forma más asimilable por los microorganismos, es utilizado como un

parámetro de control en los procesos biológicos de eliminación de fósforo. En el punto 1 del muestreo dio como resultado 12,8 mg P - PO₄ -3 /L y para el punto 2 9,89 mg P - PO₄ -3 /L, esto puede presentar el efecto de eutrofización y un agotamiento de oxígeno ocasionado la anoxia en las zonas profundas (DANE, 2010).

Los agentes tensoactivos se encuentran principalmente en productos de usos común como detergentes, shampoo, lubricantes, cremas, pinturas, entre otros. El método aplicable para determinar los Tensioactivos en aguas es a partir de sustancias activas al azul de metileno (SAAM), debido a que un colorante catiónico, transfieren el azul de metileno desde una solución acuosa a un líquido inmiscible en equilibrio. Esto ocurre durante la formación de un par iónico entre el anión (SAAM) y el catión azul de metileno (Rodriguez, 2007). Las concentraciones registradas en la entrada del pozo séptico fueron de 1,46 mg/L SAAM y para el punto salida Pozo séptico se registró un valor de 0,26 mg/L SAAM. En la normativa vigente ambiental no indican los límites permisibles de los tensioactivos. Es importante mencionar que si este parámetro no es removió correctamente puede incrementar el pH de las aguas residuales, la ruptura de la tensión superficial de los cuerpos receptores generando una pérdida de oxígeno disuelto y el incremento de nutrientes ocasionando el incremento descomunal de algas y generación de malos olores (Brand Romero, 2019).

La temperatura es un parámetro físico muy importante debido a su influencia en la velocidad de reacción y en el desarrollo de la vida acuática. Además, es importante tener un control de este parámetro ya que el aumento de la temperatura puede provocar cambios en la fauna y flora (Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico del Agua, 2016).

El pH es un parámetro químico que permite conocer la calidad del agua, indicando la acidez o alcalinidad de esta. En aguas residuales este parámetro en condiciones inadecuadas puede

presentar dificultades al momento de implementar tratamientos con procesos biológicos, por esta razón, es necesario tener un control adecuado de él (Carbotecnia, 2020). Se registró para el primer punto un promedio de 8,86 unidades de pH y para el segundo punto un promedio de 8,19 unidades de pH, el cual cumple con los límites establecidos en la resolución 0631. Si el parámetro no continúa moderado puede ocasionar la corrosión de las tuberías y un sabor salino al agua (PureWater Colombia SAS, 2018).

Los sólidos sedimentales son la cantidad de material que se sedimenta en una prueba en un período de tiempo en específico, puede ser determinados y expresados en función de un volumen (mL/L) o de una masa (mg/L), mediante volumetría y gravimetría respectivamente (Severiche, Castillo, & Acevedo, 2013). En la muestra compuesta se registró un promedio del punto 1 de 0,1 mL/L y para el punto 2 de <0,1 mL/L, dando cumplimiento a la normativa vigente.

La demanda biológica de oxígeno (DBO) es la cantidad de oxígeno necesaria para que los microorganismos puedan descomponer la materia orgánica biodegradable presente en el agua residual. Por esta razón, es importante controlar este parámetro junto con la DQO, con el fin de garantizar la calidad del vertimiento y así mismo, el cumplimiento con la normativa legal vigente. Según el monitoreo, se identificó que en la entrada del sistema se presentan niveles de DBO de 221 mg O₂/L, y a la salida 147 mg O₂/L, con una eficiencia de remoción de 33.48%, evidenciándose el incumplimiento de la concentración del efluente con respecto al límite permisible (Hidritec, 2016). Así mismo la demanda Química representa una medida de toda la materia orgánica e inorgánica presente ya sea diluida y/o suspendida, la cual puede ser químicamente oxidada por la acción de los agentes oxidantes, bajo condiciones ácidas (Ramírez Burgos & Durán Domínguez, 2008). Es decir, la cantidad de oxígeno necesario para oxidar toda la materia orgánica presente en el agua residual (Hidritec, 2016). Esta determinación involucra

todo el material orgánico, ya sea biodegradable o no biodegradable, puesto que es oxidado por el dicromato de potasio en medio ácido en la presencia de un catalizador. En la tabla 10 el resultado de la DQO es superior a la DBO esto es debido a que no todas las sustancias orgánicas presentes en el agua residual son biodegradables. Por otra parte, en el punto 1 del monitoreo la DQO tiene una concentración de 422 mg O₂/L y para el punto 2 de 275 mg O₂/L, generando una remoción de 37,78%, lo cual se evidencia que la concentración final no cumple con los límites permisibles establecidos en la Resolución 0631 de 2015 para la realización del vertimiento al cuerpo de agua. Por lo tanto, el sistema existente no es suficiente para tratar las aguas residuales generadas en el campus previo a un vertimiento.

Es importante mencionar que la demanda biológica de oxígeno (DBO) es un parámetro que demuestra el grado de contaminación orgánica, si existe una mayor presencia de esta, mayor será la DBO. Por lo anterior, existen diferentes rangos que caracterizan el nivel de contaminación, según los valores registrados en la tabla 10 los parámetros de DQO y DBO tanto para la entrada y la salida del pozo existente se encuentran dentro del rango de 100 a 500 mg/l, lo que demuestra que el vertimiento esta medianamente contaminado (Nihon Kasetsu, 2017).

La relación DBO/DQO es un indicador de la biodegradabilidad del agua residual a tratar, si en el resultado de esta condición se obtienen valores inferiores a 0,3 significa niveles bajos de biodegradabilidad, recomendándose para estos casos utilizar procesos fisicoquímicos, mientras que, cuando los valores son superiores a 0,4 se consideran muy biodegradables, es decir, en esta situación es viable la utilización de procesos biológicos, para la remoción de la materia orgánica (Nihon Kasetsu, 2017).

En la tabla 11 se demuestra el indicador de la biodegradabilidad tanto para la entrada y la salida del sistema de tratamiento existente en el campus de Piedecuesta de la universidad Santo Tomás.

Tabla 11. *Relación DBO/DQO*

Relación DBO/DQO	
Punto 1 (Entrada)	0.5
Punto 2 (Salida)	0.53

Nota: * Resultados obtenidos en los puntos de monitoreo.

De acuerdo con los resultados obtenidos de la caracterización fisicoquímica se identifica que el agua residual de estudio es de origen doméstica, catalogada de medía a fuerte, debido a que no se evidencia residuos líquidos de otra naturaleza (Oviedo, 2016). De igual manera, se determinó que a la salida del sistema la DQO y la DBO no cumple los límites establecidos en la resolución 631 del 2015, sin embargo, en la tabla 11 se demuestra que el sistema tiene un porcentaje alto de biodegradabilidad. Por lo tanto, se propone la implementación de un sistema biológico que conste de un tanque séptico, seguido de un filtro anaerobio de flujo ascendente y finaliza con un humedal artificial. Teniendo en cuenta que el campus se encuentra fuera de la cobertura de alcantarillado del municipio de Piedecuesta, sus aguas deben gestionarse de manera interna previa a su disposición final. Además, el Sistema de gestión ambiental de la Universidad, tiene como objetivo mejorar la gestión de las aguas residuales generadas como resultado de las actividades efectuadas en cada una de sus sedes.

4.1.9 Evaluación de alternativas. Para la ubicación del sistema de tratamiento de aguas residuales propuesto, se realizó una evaluación de alternativas teniendo en cuenta tres aspectos

(ambientales, sociales y económicos), para de esta manera seleccionar la zona más idónea para la implementación de dicho sistema, con el fin de disminuir y evitar incomodidades a la población que habita y visita el campus de Piedecuesta.

En la figura 9 se presentan las dos alternativas con su correspondiente ubicación a evaluar:

ALTERNATIVA 1	
IMAGEN 1	DESCRIPCIÓN
	Se encuentra ubicada en la parte posterior de la piscina, junto a los quioscos y la cancha de fútbol. Actualmente es la ubicación del sistema de tratamiento existente. Con coordenadas 7.024127 N & -73,059860 W.
ALTERNATIVA 2	
IMAGEN2	DESCRIPCIÓN
	Localizada en la parte inferior del gimnasio de artes marciales y maquinas; Con coordenadas 7.023499 N & -73.06534 W.

Figura 9. Ubicación de las alternativas 1 y 2

En la tabla 12 se identifican los criterios para tener en cuenta en cada uno de los aspectos por evaluar.

Tabla 12. *Criterios a evaluar*

Aspectos	Criterios
Económico	Disponibilidad de terreno
	Accesibilidad al sitio
	Costo de materiales (requerimientos, disponibilidad y transporte)
	Ejecución de las obras
Ambiental	Alteración del paisaje
	Percepción de olores
	Impactos ambientales en el área a intervenir
Social	Cercanía a zonas deportivas, sociales.
	Académicas.

Nota: * Aspectos tenidos en cuenta en la evaluación de alternativas.

En la tabla 13 se describen de manera detallada, con el fin de justificar su ponderación al momento de seleccionar el área adecuada para la implementación del sistema de tratamiento.

Tabla 13. *Justificación de los criterios evaluados*

Evaluación de alternativas		
Criterios	Alternativa 1	Alternativa 2
Aspecto Económico	Limitación en el área para futuras ampliaciones	Amplia disponibilidad de terreno
	Cuenta con zonas de fácil acceso	Dificultad en el acceso vehicular para el transporte de los materiales para llevar a cabo construcción del tren de tratamiento
Aspecto Ambiental	Presenta baja densidad de zona verde.	El lugar está rodeado de una amplia malla de árboles, arbustos y hierbas con el objetivo de ser utilizados como filtro ambiental.
	Percepción de malos olores por parte de los estudiantes, administrativos y trabajadores. Teniendo en cuenta la cercanía con zonas sociales.	Menor presencia de tránsito estudiantil, lo cual puede evitar incomodidades, como la percepción visual y olfativa.
Aspecto Social	Indisposición de la comunidad por su cercanía a zonas de esparcimiento (quioscos, canchas, etc.)	Zona lejana a los lugares de esparcimiento social.

Nota: * Descripción detallada de los criterios a evaluar.

En la tabla 14 se realizó una evaluación multicriterio, en donde se asignó un mismo porcentaje (33,333%) a los aspectos a evaluar, teniendo en cuenta que los tres son fundamentales para la selección de la alternativa. Seguidamente se hizo una valoración a partir del nivel de importancia como se refleja en la leyenda descrita en la tabla 15. De acuerdo con los resultados obtenidos, la alternativa 2 tuvo mayor valoración (6,33%) y su justificación se muestra en la Tabla 13; evidenciando que esta alternativa es idónea para la ubicación del sistema, ya que se encuentra alejado de las zonas donde se realizan diferentes actividades (educativas, deportivas, recreativas, etc), evitando las incomodidades que se pueden llegar a generar con el funcionamiento del sistema de tratamiento de aguas residuales.

Tabla 14. *Evaluación de alternativas*

Criterios	Porcentaje	Alternativa 1	Alternativa 2
Económico	33,333%	3	5
Ambiental	33,333%	3	7
Social	33,333%	5	7
Total		3,66663	6,33327

Nota: * Aplicación de la evaluación multicriterio.

Tabla 15. *Ponderación de los valores de intensidad*

LEYENDA	
INTENSIDAD	DEFINICION
1	De igual importancia
3	Moderada importancia
5	Importancia fuerte
7	Muy fuerte
9	Extrema

Nota: * Rango evaluativo.

Adaptado de Evaluación social de proyectos (Contreras, 2009) . *Evaluación Multicriterio*.

4.2 Parámetros Críticos que Influyen en la Eficiencia del Sistema de Tratamiento

Inicialmente se realizó una investigación en el ámbito nacional e internacional en búsqueda de diferentes estudios en donde se demuestran las experiencias obtenidas en el diseño e

implementación de un sistema descentralizado conformado por un tanque séptico, un filtro anaerobio y un humedal artificial. Lo anterior, con el objetivo de seleccionar aquellos criterios de diseño necesarios para llevar a cabo el desarrollo del presente proyecto.

De acuerdo con la revisión bibliográfica, se destacan las diversas ecuaciones contempladas en el Programa de las Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos (ONU-HABITAT), El Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento básico (RAS) y en los diferentes referentes teóricos consultados. Para el dimensionamiento de un tanque séptico se destacan los parámetros de diseño que se muestran en la Tabla 16.

Tabla 16. *Variables de diseño para el dimensionamiento de un tanque séptico*

Criterios de diseño	Tanque Séptico		
	Programa de las Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos – ONU HABITAT	Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico - RAS	Estado del Arte
Carga orgánica (Kg/día)	Información no identificada.	Información no identificada.	(Pinzón Hernández & Almeida Buitrago, 2010) mencionan la siguiente ecuación: $C.O = DBO_{afluente} \left(\frac{mg}{L} \right) * Q \left(\frac{m^3}{día} \right)$ En donde es necesario realizar una conversión de unidades y establecer el número de horas diarias que se trabaja. DECRETO 2667 DE 2012, establece: $Cc = Q * C * 0.0036 * t$ Donde: Cc = Carga Contaminante, en kilogramos por día (kg/día) Q = Caudal promedio de aguas residuales, en litros por segundo (l/s) C = Concentración del elemento, sustancia o compuesto contaminante, en mili-gramos por litro (mg/l) 0.0036 = Factor de conversión de unidades (de mg/s a kg/h) t = Tiempo de vertimiento del usuario, en horas por día (h)
Tiempo de retención hidráulica - TRH	>12 horas	En la resolución 0330 del 2017 indican que el TRH debe estar entre 12 a 24 horas.	(Barreros Ortiz, 2017) indica que el período de retención hidráulico será estimado mediante la siguiente fórmula: $PR = 1,5 - 0,3 * \text{Log}(P * q)$ DONDE: PR= Tiempo promedio de retención hidráulica en días. P= Población servida. q= Caudal de aporte unitario de aguas residuales, Lt/habitante*día. El tiempo mínimo de retención hidráulico será de 6 horas.

Tabla 16. (Continuación)

Volumen del tanque	Vr $= Q * TRH (m^3)$ Donde: -Q: Caudal o volumen promedio de aguas residuales ($m^3/día$) -TRH: tiempo de retención hidráulico (días) Seguidamente, se procede a hallar el volumen de los compartimientos 1 y 2 $V_{1c} = \frac{2}{3} * Vr (m^3)$ $V_{2c} = \frac{1}{3} * Vr (m^3)$	Información no identificada.	(Pinzón Hernández & Almeida Buitrago, 2010) establece la importancia de cumplir los siguientes ítems: * Rendimiento del proceso de tratamiento. * Almacenamiento de lodos y espumas. * Amortiguamiento de caudales pico. Por esta razón es importante determinar el volumen útil del tanque mediante la siguiente formula. $vu(m^3) = Q \left(\frac{m^3}{seg} \right) * t(seg)$ (Barreros Ortiz, 2017) mencionan la manera para hallar el volumen requerido para la sedimentación $Vz = 10^{-3} * (P * q) * PR$ DONDE: PR= Tiempo promedio de retención hidráulica en días. P= Población servida. q= Caudal de aporte unitario de aguas residuales, Lt/habitante*día.
Cámaras	Debe constar como mínimo de dos cámaras.	En la resolución 0330 del 2017 mencionan que el pozo deberá constar como mínimo de dos cámaras, el volumen de la primera cámara deberá ser igual a 2/3 del total del volumen.	(Pinzón Hernández & Almeida Buitrago, 2010) señalan que los tanques rectangulares es oportuno adoptar dos cámaras en serie y considerar que el volumen de la primera cámara será igual a 2/3v y de la segunda 1/3v. La distancia entre las cámaras y las paredes del tanque deben ser como mínimo 0,2m y no mayores de 0.30m. (Portilla Benavente, 2019) Menciona que, para mejorar la calidad de los efluentes, los tanques podrán dividirse en 2 o más cámaras. Pero es importante tener en cuenta que no se aceptan tanques de una sola cámara cuando la capacidad total del tanque no sea superior a los 5 m^3. Además, cuando el tanque séptico tenga 2 o más cámaras, la primera deberá tener una capacidad de por lo menos el 50% de la capacidad útil total.
Relación largo - ancho	El ancho del tanque se debe suponer La longitud depende del 1 y 2 compartimiento $L_{1c} = \frac{V_{1c}}{P * A} (m)$ $L_{2c} = \frac{V_{2c}}{P * A} (m)$ Donde: -V_{1c}: Volumen del primer compartimiento (m^3)	La relación debe ser como mínimo de 2:1 y como máximo de 5:1, según la resolución 0330 del 2017.	(Pinzón Hernández & Almeida Buitrago, 2010) mencionan la importancia del cumplimiento de esta restricción $2 \leq \frac{L}{h} \leq 4$ - El ancho del tanque debe tener como mínimo 0,60 m que garantice la entrada a la persona que lo construya o se encarga del mantenimiento. - El techo de los tanques deben ser losas removibles dotadas con registro de inspección que tendrán como mínimo 150mm de diámetro. (Portilla Benavente, 2019) establece que la relación largo ancho de un tanque séptico rectangular será como mínimo de 2:1

Tabla 16. (Continuación)

Profundidad útil	-V_{2c}: Volumen del segundo compartimiento (m^3) -P: profundidad (m) -A: ancho (m) Información no identificada.	La resolución 0330 del 2017 especifica que debe estar entre valores mínimo de 1.2 m y máximo de 2.8m, según el volumen útil obtenido.	(Pinzón Hernández & Almeida Buitrago, 2010) resaltan que la profundidad neta debe ser mayor a 0,75m; por lo general la profundidad no excederá el largo del tanque. (Portilla Benavente, 2019) hace referencia a: -Profundidad máxima de espuma sumergida (H_e en m) $H_e = \frac{0.7}{A}$ Donde: A: Área superficial del tanque séptico, en m^2 -Profundidad libre de lodos (H_o en m): es la distancia entre la parte superior de la capa de lodo y el nivel inferior de la Tee o cortina del dispositivo de salida, se relaciona con el área superficial del tanque séptico y se calcula: $H_o = 0.82 - 0.26 * A$ H_o, está sujeto a un valor mínimo de 0.3 m -Profundidad total efectiva: es la suma de la profundidad de digestión y almacenamiento de lodos ($H_d = V_d / A$), la profundidad del espacio libre (H_i) y la profundidad máxima de las espumas sumergidas (H_e) $H_{total\ efectiva} = H_d + H_i + H_e$
Altura total del tanque	A la profundidad se le debe restar 0.3 m del borde libre	Información no identificada.	(Pinzón Hernández & Almeida Buitrago, 2010) Es importante incluir en la altura total un borde libre entre el nivel del agua y la parte superior del tanque no menor a 300mm $hT(m) = Pu + 0.30$ (Portilla Benavente, 2019) demuestra que la profundidad de espacio libre (H_i) debe seleccionarse comparando la profundidad el espacio libre mínimo total calculado como $(0.1 + H_o)$ con la profundidad mínima requerida para la sedimentación (H_s), se elige la mayor profundidad. $H_s = \frac{V_s}{A}$ Donde: A= Área superficial del tanque séptico V_s= Volumen de sedimentación Además, establece que en todo tanque séptico habrá una cámara de aire de por lo menos 0.3 m de altura libre entre el nivel superior de las natas espumas y la parte inferior de la losa de techo.
Determinación de la separación de las aberturas de 4	Información no identificada.	Información no identificada.	(Pinzón Hernández & Almeida Buitrago, 2010) indica el extremo superior de las aberturas H_a, debe estar a más de 30 cm por debajo de P_u Separación: $\frac{b\ del\ tanque - (numero\ de\ aberturas * b1)}{numero\ de\ aberturas + 1}$

Tabla 16. (Continuación)

Tanque Divisorio	Información no identificada.	Información no identificada.	(Pinzón Hernández & Almeida Buitrago, 2010) insinúa que la altura del tabique debe admitir un espacio, bajo la cubierta del tanque, la cual será mínimo de 20 cm con el fin de habilitar el paso de gases de un compartimiento a otro. $ht(m) = hT(m) - 0.2$
Aberturas de intercomunicación de los tanques	Información no identificada.	Información no identificada.	(Pinzón Hernández & Almeida Buitrago, 2010) señala la intercomunicación entre cámaras será mediante aberturas con un área equivalente al 5% de la sección vertical útil del plano de separación del tanque; el número mínimo de aberturas es dos. Área de aberturas = 0,05 * la sección útil del tabique
Fondo falso	Información no identificada.	Información no identificada.	(Pinzón Hernández & Almeida Buitrago, 2010) guían que en el fondo del tanque deberá tener una pendiente de 2% orientada hacia el ingreso, además para los tanques divididos, el segundo compartimiento puede tenerla inclinada hacia la entrada, para el volumen del tanque se considera que el fondo es horizontal al nivel más alto, de esta manera, el efecto de la inclinación es aumentar el volumen.
Nivel de acumulación de lodos	Dependiendo de la tasa de remoción de SST y del flujo de entrada de aguas residuales (70 a 100 litros/persona/año)	Información no identificada.	Información no identificada.
Volumen de acumulación de lodos y desechos	Nivel de acumulación de lodos multiplicado por el nivel de acumulación de desechos	Información no identificada.	Información no identificada.
Intervalo para la remoción de lodos	>1 año	En el Título E aconsejan que se debe realizarse una remoción periódica de lodos por personal capacitado que disponga del equipo adecuado para garantizar que no haya contacto entre el lodo y las personas.	Información no identificada.

Nota: * Criterios de diseño de un tanque séptico.

Por otra parte, en la tabla 17 se evidencia cada uno de las ecuaciones y recomendaciones identificadas en los diferentes estudios para el diseño de los filtros anaerobios, así como los

requisitos establecidos en el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico.

Tabla 17. Variables de diseño para el dimensionamiento de un filtro anaerobio de flujo ascendente

Filtros Anaerobios con Flujo Ascendente (FAFA)														
Criterios de diseño	Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS	Estado del Arte												
Eficiencia De Remoción	En el Título E señalan la siguiente ecuación para la obtención de la eficiencia del tratamiento $E = 100(1 - E = 100(1 - \frac{k}{\theta^m})$ Donde: <table><tr><th>Configuración</th><th>Valor de m</th></tr><tr><td>*Porosidad: Max 0,46 *Área específica 130m²/m³</td><td>0,665</td></tr><tr><td>*Porosidad: Max 0,66 *Área específica 98m²/m³</td><td>0.660</td></tr></table> k: Constante de temperatura. m es según al coeficiente de porosidad y área específica de la piedra redonda de 4 a 7 cm.	Configuración	Valor de m	*Porosidad: Max 0,46 *Área específica 130m ² /m ³	0,665	*Porosidad: Max 0,66 *Área específica 98m ² /m ³	0.660	(Pinzón Hernández & Almeida Buitrago, 2010) demuestran la siguiente ecuación en donde demuestra la eficiencia de remoción de la carga contaminante del sistema. $E = \frac{S_0 - S}{S_0} * 100$ Donde: E: Eficiencia de remoción del sistema (%) S: Carga contaminante de salida (mg DBO/litro) S0: Carga contaminante de entrada (mg DBO/litro) (Figuerola Rodriguez,2019) $E = \frac{1 - k}{TRH^m}$ Donde: K: Tasa de acumulación de lodo digerido en días equivalente al tiempo de acumulación de lodo fresco m: coeficiente que varía según la porosidad y área específica de la piedra (Alvarado Arce, 2011) <table><tr><th>Configuración</th><th>Valor de m</th></tr><tr><td>*Porosidad: Max 0,46 *Área específica 130m²/m³</td><td>0,665</td></tr><tr><td>*Porosidad: Max 0,66 *Área específica 98m²/m³</td><td>0.660</td></tr></table> $E = 100(1 - 0,87 * TDH^{-0.50})$ TDH= Tiempo de retención hidráulica = V/Q (Pinzón Hernández & Almeida Buitrago, 2010) indican la fórmula para hallar la carga volumétrica. $C.O = \frac{S_0}{TRH}$ Donde: C.O: Carga orgánica Volumétrica (kg/m³*día) S0: Carga contaminante de entrada (mg DBO/litro) TRH: Tiempo de retención hidráulico (días)	Configuración	Valor de m	*Porosidad: Max 0,46 *Área específica 130m ² /m ³	0,665	*Porosidad: Max 0,66 *Área específica 98m ² /m ³	0.660
Configuración	Valor de m													
*Porosidad: Max 0,46 *Área específica 130m ² /m ³	0,665													
*Porosidad: Max 0,66 *Área específica 98m ² /m ³	0.660													
Configuración	Valor de m													
*Porosidad: Max 0,46 *Área específica 130m ² /m ³	0,665													
*Porosidad: Max 0,66 *Área específica 98m ² /m ³	0.660													
Carga Orgánica Volumétrica	Información no identificada.													

Tabla 17. (Continuación)

		(Comisión Nacional del agua, 2015)
		$COV = \frac{Q * So}{V}$
		DONDE: COV: Carga orgánica Volumétrica en (kgDQO/m ³ *día) o (kgDBO/m ³ *día). Q: Gasto en m ³ /d So: Concentración total de DBO en el afluente, en mg/L. V: Volumen total del filtro o volumen ocupado por el medio empacado, en m ³
Temperatura	Información no identificada.	(Pinzón Hernández & Almeida Buitrago, 2010) señalan que los filtros anaerobios operan satisfactoriamente en el rango mesofílico de temperaturas entre 25°C y 38°C
Nutrientes	Información no identificada.	(Pinzón Hernández & Almeida Buitrago, 2010) insinúan que los nutrientes deben ser adecuados para el desarrollo de los microorganismos dentro de un sistema anaerobio. El requerimiento de nutrientes del sistema es descrito generalmente por la relación mencionada
		$\frac{DBO_{entrada}}{N.P} = 7.0$
Diseño por carga orgánica volumétrica	Información no identificada.	(Pinzón Hernández & Almeida Buitrago, 2010) señalan la siguiente ecuación:
		$c.o = \frac{DBO_{afluente} \left(\frac{mg}{l} \right) * Q \left(\frac{m^3}{día} \right)}{Vu(m^3) * 1000}$
Tiempo de Retención Hidráulica	Información no identificada.	(Pinzón Hernández & Almeida Buitrago, 2010) señalan la siguiente fórmula:
		$TRH = \frac{Vu(m^3)}{Q \left(\frac{m^3}{día} \right)}$
		(Rodríguez Figueroa, 2019), indica que el TRH recomendado esta entre 2.5 a 12 horas. (ONU HABITAT, 2008) sugieren un TRH de: >24 horas
Proporciones geométricas	En el Título E se recomienda las siguientes proporciones geométricas	(Rodríguez Figueroa, 2019) recomienda para filtros de geometría rectangular:
	• h = 0.10H • P = 0.15H • Vr3 = 0.66 AbaseH Para filtros circulares: • Abase = $\pi D^2 / 4$ • D ≤ 2H • D = 3d	-Profundidad (H): entre 0.6-1.8 (m) -Largo (L): <2H -Porosidad del medio (P): entre 0.46-0.66 -Volumen: V= $Q * \left(\frac{TRH}{P} \right)$ (m3)

Tabla 17. (Continuación)

	• Para filtros rectangulares • $A_{base} = Lb$ • $b \leq L \leq 3b$ • $L \leq 2H$ • $l = (L - 0.5b)$ y ϕ de l coincide con ϕ de L • $0.6 \text{ m} \leq H \leq 1.80 \text{ m}$	(Prieto Parisaca & Velasquez Ponce, 2018) mencionan las siguientes ecuaciones: Altura total del reactor $h = h_{fondo\ falso} + h_{borde\ libre} + h_{medio\ de\ soporte}$ Donde: h= Altura total del reactor (m) $h_{fondo\ falso}$= Altura del falso fondo (m) $h_{medio\ de\ soporte}$= Altura del medio de soporte (m) $h_{borde\ libre}$= Espacio que separa el medio de soporte del colecto efluente. (Prieto Parisaca & Velasquez Ponce, 2018) sugieren la siguiente ecuación: VOLUMEN DEL FILTRO $V = Q \cdot TRH$ Donde: Q= Caudal medio en $\frac{m^3}{d}$ TRH= Tiempo de retención Hidráulico (días).
Volumen	En el Titulo E señala la obtención del volumen con la siguiente formula: $V_r = \theta_2 \cdot Q_d$ Donde: V_r: Volumen real del filtro (m^3) θ_2: Tiempo espacial de transito Q_d: caudal de diseño (m^3/s)	
Volumen del Lecho filtrante	En la resolución 0330 del 2017 indican que el filtro debe contar con un volumen de $0.02 \text{ a } 0.04 \text{ m}^3 \text{ por cada } 0.1 \frac{m^3}{día}$ de aguas residuales que se van a tratar; también será posible emplear material filtrante plástico.	(Pinzón Hernández & Almeida Buitrago, 2010) resaltan diferentes medios de soporte como lo son: la gravilla, materiales cerámicos, cilíndricos y esferas plásticas perforadas, bambú entre otros. (Prieto Parisaca & Velasquez Ponce, 2018) muestran las siguientes formulas: Volumen del medio de Soporte $v_{ms} = A \cdot h_{medio\ de\ soporte}$ Donde: v_{ms}= Volumen del medio filtrante (m^3) A= Área transversal del filtro anaerobio (m^2) $h_{medio\ de\ soporte}$= Altura del medio de soporte. (m).
Área Transversal	Información no identificada.	(Prieto Parisaca & Velasquez Ponce, 2018) señalan la siguiente ecuación para hallar área transversal: $A = \frac{V}{H}$ Donde: V=Volumen del filtro, en m^3 A= Área del filtro, en m^2 H= Altura total del filtro, en m (Comisión Nacional del agua, 2015) La carga hidráulica superficial se refiere al volumen del agua residual aplicada diariamente por unidad de superficie (área) del medio empacado del filtro. Para hallar se utiliza la siguiente ecuación: $CHS = \frac{Q}{A}$
Carga hidráulica superficial	Información no identificada.	

Tabla 17. (Continuación)

Nivel de acumulación de lodos	Información no identificada.	DONDE: CHS: Carga hidráulica superficial ($m^3/(m^2d)$) Q: gasto, en m^3/d A: área superficial del medio empacado (m^3) (ONU HABITAT, 2008) Dependiendo de la tasa de remoción de SST y del flujo de entrada de aguas residuales (70 a 100 litros/persona/año)
Nivel de acumulación de lodos y desechos	Información no identificada.	(ONU HABITAT, 2008) Nivel de acumulación de lodos multiplicado por el nivel de acumulación de desechos
Intervalo para remoción de lodos	Información no identificada.	(ONU HABITAT, 2008) >1 año

Nota: * Parámetros de diseño tenidos en cuenta en diversos estudios de filtros anaerobios de flujo ascendente.

Es importante resaltar el medio de soporte como un factor influyente en la eficiencia de los FAFA's, ya que en él se adhieren los microorganismos los cuales, cumplen una función esencial en la remoción de los diferentes parámetros como lo son la DBO, DQO y SST. En la tabla 18 se destacan algunos estudios en los demuestran experiencias con diversos materiales usados para este fin.

Tabla 18. Resumen de artículos de la utilización de Filtros Anaerobios de flujo ascendente

Referencia	Medio de soporte	% Remoción			
		DQO	DBO	SST	TRH
(Parra Rodriguez, 2006)	Vasos de Polietileno	45%	35%	IND*	IND
(Osorio Trujillo & Vásquez Botero, 2007)	Anillos de guadilla <i>Bambu phyllostachys</i>	62,42%	65%	62,43%	11,4 horas
(Alvarado Arce, 2011)	Tapas Plásticas	31,97%	72,25%	IND	IND
	Cilindros de Espuma	42,06%	52,40%	IND	IND
(Torres Rojas & Claros Ortiz, 2017)	Semicirculos de <i>Guadua Angustifolia Kunth</i>	IND	47,13%	55%	IND
(Rosero Carvajal, 2018)	Escombros	47,21%	71,92%	48,46%	IND
(Rosero Carvajal, 2018)	Residuos PET	47,51%	73,81%	57,58%	IND
(Prieto Parisaca & Velasquez Ponce, 2018)	Residuos PEBD	52,86%	74,15%	55,93%	IND
	Piedras de río	54,83%	76,46%	56,18%	IND
	Tubo Corrugado	80%	80%	IND	24 horas
(Yepes Polanía, 2018)	anillos de biopack	41%	35%	IND	12 horas
(Rodriguez Figueroa, 2019)	Rosetas de polipropileno	55%	53%	IND	10,51 horas

Nota: * Resumen de las eficiencias obtenidas en las diferentes fuentes bibliográficas: (IND información no disponible).

Para el filtro anaerobio se seleccionaron las tapas plásticas como medio de soporte debido a que se evidenció en las investigaciones excelentes remociones, y así mismo se les estarían dando un segundo uso a este residuo que con frecuencia se genera en el área de estudio.

Por otra parte, en la tabla 19 se demuestra los conceptos de diseño y algunas recomendaciones mencionadas en el Programa de las Naciones Unidas (ONU-HÁBITAT), en el RAS 2017 y en algunos estudios de distintos autores en donde contemplan diferentes ecuaciones con el propósito de realizar un diseño de un humedal artificial acorde a las necesidades plasmadas.

Tabla 19. *Variables de diseño para el dimensionamiento de un humedal artificial de flujo subsuperficial*

Criterios de diseño	Humedales artificiales de flujo subsuperficial		Estado del Arte
	Programa de las Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos – ONU HÁBITAT	Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico - RAS	
Tiempo de Retención Hidráulica	Información no identificada.	En la resolución 0330 del 2017 indican que el TRH es alrededor de 5 días.	(Moreno Mogollon & Rangel Plata, 2018) indican la siguiente formula: $T = \frac{n * L * A * h}{Q}$ Donde: T: tiempo de retención (días) n: porosidad del medio, fracción decimal L: longitud del humedal (m) A: ancho del humedal (m) h: profundidad del humedal (m) Q: caudal (m3/día) (Brand Torres, 2014), señala que el TRH se puede calcular como: $t = \frac{V}{Q} = \frac{L * W * y * n}{Q}$ Donde: L: longitud del humedal (m) W: ancho del humedal (m) y: altura de la lámina de agua o profundidad del humedal (m) n: porosidad del medio de soporte (m3/m3) Q: caudal promedio (Qentrada+Qsalida)/2 (m3/d)

Tabla 19. (Continuación)

Relación largo – ancho	Información no identificada.	La relación debe estar entre 3:1 a 4:1 según la resolución 0330 del 2017.	(Burgos Garcia, Forero Dominguez, & Rojas Gallardo, 2015) indica tres valores para el transito hidráulico: *Mínimo: 4 horas *Usual: 6 a 24 horas. *Max: 48 horas. (Moreno Mogollon & Rangel Plata, 2018) para su investigación aplicaron las relaciones de largo:ancho de 2:1, 3:1 y 4:1, mediante el despeje de la siguiente ecuación: $\text{Área} = X(\text{Ancho} * \text{Largo})$ Donde X, es el factor de la relación. (Burgos Garcia, Forero Dominguez, & Rojas Gallardo, 2015) indican hallar el ancho y largo de la siguiente forma: Ancho del Filtro: $b = 3 * H$ Se asume H Largo del filtro: $L = \frac{Vr}{h * H}$ Donde: Vr: Volumen real del filtro Fitopedológico. b: Ancho del filtro H: Valor asumido para la profundidad.
Eficiencia del filtro	Información no identificada.	Información no identificada.	(Burgos Garcia, Forero Dominguez, & Rojas Gallardo, 2015) indican el cálculo de la eficiencia del filtro fitopedológico: $E = 100 * (1 - \frac{k}{\theta^{md}})$ Donde: $md = m * e^{0.008 * (T - 15^{\circ})}$ Θ= Tiempo geométrico de digestión $\theta = \frac{vr}{Qcr}$

Tabla 19. (Continuación)

Volumen	Información no identificada.	Información no identificada.	(Burgos Garcia, Forero Dominguez, & Rojas Gallardo, 2015) mencionan la siguiente ecuación: Volumen de agua Vagua: $Vagua = t * Qcr$ Donde: t: Tiempo. Qcr: Caudal crítico para el filtro fitopedológico.
Caudal	Información no identificada.	Información no identificada.	(Andrade & Rosero, 2018) señalan: $Q = \frac{As * K}{\ln \left[\frac{C0}{Ce} \right]}$ Dónde: Q: Caudal del afluente de cada humedal, m3/día. As: Área superficial del primer tanque, m2. C0: Concentración de DBO a la entrada, mg/L. Ce: Concentración de DBO a la salida, mg/L. K: Constante de reacción de primer orden en base área para flujo pistón. Constante cinética de primer orden (K): $Kt = k_{20} * (\theta)^{(T-20)}$ Donde: Kt: proporción de la constante de temperatura de las aguas residuales d^{-1} K20: constante cinética para remoción de DBO5 θ : coeficiente para corrección de temperatura T: temperatura del agua residual.
Profundidad del sistema	Información no identificada.	En la resolución 0330 del 2017 indican la profundidad para el sistema, la cual debe estar entre 0,1 a 0,45m.	(Rodriguez Figueroa, 2019), indica que la profundidad del sistema debe ser menor o igual a 0.6 m (Moreno Mogollon & Rangel Plata, 2018), definió un valor estándar de 0.6 m basado en la literatura de Kolb. (Brand Torres, 2014), contempla que la profundidad del agua debe estar entre 0.3 a 0.61 m.

Tabla 19. (Continuación)

Conductividad hidráulica o Coeficiente de permeabilidad	Información no identificada.	Información no identificada.	(Arenas Ramirez & Nuncira Parra, 2010) mencionan que la Conductividad hidráulica o Coeficiente de permeabilidad representa la mayor o menor facilidad con la que el medio deja pasar el agua a través de él por unidad de área transversal a la dirección del flujo. Existen varios métodos de determinar este parámetro como lo es la ecuación de Darcy:
			$K = \frac{QL}{At \Delta H}$ Donde: K, permeabilidad (m/día) Q, Caudal (m³/día) L, Longitud (m) At, Área de la sección transversal (m²) Δ H, Carga constante de la columna de agua (m)
Área superficial	El As se puede decidir en base a la ecuación de Kickuth: $A_h = \frac{Q_d(\ln C_i - \ln C_e)}{K_{DBO}}$ Donde: A_h: área de superficie del lecho (m²) Q_d: nivel promedio de flujo diario de desechos (m³/d) C_i: concentración de DBO₅ en el afluente (mg/l) C_e: concentración de DBO₅ en el efluente (mg/l) K_{DBO}: Constante de velocidad (m/d) La constante de velocidad (K_{DBO}) es determinada a partir de la fórmula KTdn, donde: KT: K20(1.06)(T-20) K20: constante de velocidad a 20°C (d-1) T: temperatura de operación del sistema (°C)	En el Título E sugiere dos alternativas: -Usar los siguientes valores de carga hidráulica: 0.032 m²/L/día (para zonas frías o donde haya restricciones de espacio), y 0.021m²/L/día (para zonas donde haya restricciones de espacio) -Método incluyendo la cinética del proceso $As = \frac{Qd}{(LnCo - LnCe)} * \frac{1}{(Kt * D * n)}$ Donde: Qd: caudal de diseño (m³/d) Co: DBO₅ afluente (mg/L) Ce: DBO₅ efluente esperado (mg/L)	(Pantoja & Tarapues, 2017) señalan diferentes fórmulas para la estimación del As a partir de la DBO₅, según diferentes autores: -Kadlec: $As = \frac{Q}{K_A} \ln \left(\frac{C_0 - C^*}{C_e - C^*} \right)$ Donde: Q: caudal de diseño (m³/d) K_A: Constante de velocidad de reacción a 20°C Co: DBO₅ afluente (mg/L) Ce: DBO₅ efluente esperado (mg/L) C*: Concentración de fondo -Reed: $As = \frac{Q * Ln \left(\frac{C_0}{C_e} \right)}{K_T * (h) * (n)}$ Donde: Q: caudal de diseño (m³/d) Co: DBO₅ afluente (mg/L) Ce: DBO₅ efluente esperado (mg/L) Kt: constante cinética de primer orden dependiente de la temperatura (d-1)

Tabla 19. (Continuación)

	d: profundidad de la columna de agua (m) n: porosidad del sustrato (% expresado en forma de fracción)	Kt: constante cinética de primer orden dependiente de la temperatura (d-1) D: profundidad promedio del sistema (m) n: porosidad del medio de soporte principal en fracción decimas	h: profundidad promedio del sistema (m) n: porosidad del medio de soporte principal en fracción decimal. (Brand Torres, 2014), señala que el As se obtiene de la siguiente ecuación: $As = \frac{L * W}{K_t * y * n} \ln\left(\frac{Co}{C}\right)$ Donde: L: longitud del humedal (m) W: ancho del humedal (m) Q: caudal promedio (Qentrada+Qsalida)/2 (m³/d) Co: concentración a la entrada del sistema (mg/L) C: concentración de la salida del sistema (mg/L) K_t: constante cinética de primer orden (d⁻¹) y: altura de la lámina de agua o profundidad del humedal (m) n: porosidad del medio de soporte (m³/m³) Información no identificada.
Área o Sección transversal	Las dimensiones del lecho se derivan de la ley de Darcy, deben proporcionar flujo subsuperficial a través de la grava bajo condiciones promedio de flujo -Se puede usar el gradiente hidráulico en vez de la pendiente - La conductividad hidráulica se estabilizará a 10-3m/s en el humedal establecido $Ac = \frac{Q_s}{K_f \left(\frac{dH}{ds}\right)} (m^2)$	En el Titulo E indica la ecuación de la ley de Darcy, para determinar el área de la sección transeversal: $A_{st} = \frac{Q}{K_s * S} (m)$ Donde: Q: caudal de diseño (m3/s) Ks: conductividad hidráulica S: Concentración de DBO soluble del efluente (mg/L)	

Tabla 19. (Continuación)

	Donde: Qs: caudal promedio (m³/s) Kf: conductividad hidráulica del lecho completamente desarrollado (m/s) dH/ds: gradiente del fondo del lecho (m/m) * Para gravas con granulometría graduada se elige generalmente un valor de Kf de 1x10⁻³ a 3x10⁻³ m/s. En la mayoría de los casos, se utiliza un dH/ds del 1%		
Selección del lecho filtrante	El tamaño del diámetro de las partículas que conforman los lechos varía desde 0.2 a 30 mm. Se recomienda que las partículas de los lechos en las zonas de entrada y salida midan entre 40 y 80 mm de diámetro con el fin de minimizar las obstrucciones. Así mismo, deben extenderse desde la parte superior a la parte inferior del sistema. Para la zona de tratamiento, no parece existir una ventaja clara de la remoción de contaminantes con partículas de diferentes tamaños en el rango de 10 a 60 mm.	Información no identificada.	Información no identificada.

Tabla 19. (Continuación)

Profundidad del lecho	En Europa la profundidad del lecho es de 60 cm; en EEUU entre 30 a 45 cm; y un estudio experimental llevado a cabo en España demostró que con un promedio de 27 cm eran más efectivos con un promedio de profundidad de agua superior a los 50 cm.	En el Título E sugiere que la profundidad media del lecho sea 0.6 m y que la profundidad en la entrada no debe ser menor de 0.3m. Además, se recomienda que los lechos se construyan con al menos 0.5 m de cabeza sobre la superficie del lecho.	(Brand Torres, 2014), establece que la profundidad del medio debe estar entre 0,46-0,76m.
Gradiente del lecho	La superficie superior del lecho debe ser uniforme o casi uniforme con el fin de facilitar la plantación y la rutina de mantenimiento. Lo más práctico sería lograr que el fondo forme un gradiente uniforme a lo largo de la dirección del flujo desde la entrada hasta la salida, facilitando de esta manera el drenaje cuando sea necesario hacer el mantenimiento. Se recomienda que el gradiente sea de 0.5% a 1% para facilitar tanto la construcción como el drenaje correcto.	Información no identificada.	Información no identificada.
Pendiente	Información no identificada.	En el Título E recomiendan dos tipos de pendientes: - Pendiente exterior: 3H:1V -Pendiente interior 2H:1V	(Pantoja & Tarapues, 2017) recopila que la EPA (2000), recomienda que la pendiente sea del 1%, como factor de seguridad, lo que contribuiría a prevenir posibles atascamientos y zonas muertas en el momento del diseño.

Nota: * Ecuaciones de diseño de los Humedales Artificiales.

Por último, en la tabla 20 se realizó una recopilación de diferentes estudios en donde evaluaban la eficiencia de diversas especies para la remoción de variables fisicoquímicas y biológicas, con el fin de identificar la macrófita idónea para el presente proyecto.

Tabla 20. Resumen de artículos de la utilización de humedales artificiales

Referencia	Especie	Lecho Filtrante	% REMOCIÓN						
			DQO	DBO	SST	Coliformes Fecales	N	P	TRH
(Londoño Cardona & Marín Vanegas, 2009)	<i>Phragmites australis</i>	Grava	88%	92,50%	94,50%	IND	IND	IND	IND
(Marín Montoya & Correa Ramírez, 2010)	<i>Guadua angustifolia Kunth</i>	Arena	85,31%	92,21%	IND	IND	IND	IND	3-5 días
(Montoya, Ceballos, Casas, & Morató, 2010)	<i>Phragmites sp</i>	Grava de 3.2-6.4 mm	97,13%	99%	IND	IND	IND	IND	IND
	<i>Canna limbata</i>		95,94%	99%	IND	IND	IND	IND	IND
	<i>Heliconia psittacorum</i>		94,49%	97%	IND	IND	IND	IND	IND
(Pérez, Alfaro, Sasa, & Agüero, 2013)	<i>Cyperus papyrus</i>	Piedra “cuarta” de diámetro entre 1.5-2.5 cm	72%	92%	73%	IND	IND	75%	IND
(Cueva Torres & Rivadeneira Bravo, 2013)	<i>Echinochloa polystachya– Hitch</i>	Grava, arena y Tierra	50%	50%	IND	50%	IND	IND	IND
	<i>Eríochloa polystachya – Kunth</i>		50%	50%	IND	50%	IND	IND	IND
	<i>Brachiaria mutica – Forks</i>		50%	50%	IND	50%	IND	IND	IND
(Paredes, 2014)	<i>Heliconia psittacorum</i>	Arena	93%	98%	87%	IND	80%	IND	IND
(Aragón Calderón, Parra Collazos, & Peña Torres, 2015)	<i>Cyperus papyrus.</i>	Gravilla de 6-3 cm	93%	IND	100%	90%	IND	IND	IND
	<i>Heliconia psittacorum</i>		93%	IND	100%	90%	IND	IND	IND

Tabla 20. (Continuación)

(Ramos, Prieto, Cárdenas, & Bernal, 2016)	<i>Cyperus papyrus</i> y <i>Schoenoplectus californicus</i>	Grava	27,40%	27,40%	IND	98,50%	IND	IND	IND
(Sánchez Gil & Vélez Yermis, 2016)	<i>Heliconia psittacorum</i>	Arena gruesa, Granito y Grava.	96,00%	95%	99%	IND	IND	IND	48 horas
(Moreno Mogollon & Rangel Plata, 2018)	<i>Chrysopogon Zizanioides</i>	IND	82,00%	86%	IND	IND	IND	IND	3 días
(Rodríguez Rodríguez & Vargas Niño, 2019)	<i>Heliconia psittacorum</i>	Grava, gravilla y arena negra	76,16%	80,20%	76,50%	IND	IND	IND	5 días

Nota: * Síntesis de las remociones obtenidos en diferentes estudios de los Humedales Artificiales, (IND información no disponible).

A partir de la revisión se eligió la planta *Heliconia psittacorum*, ya que se adapta muy bien a zonas inundables, demostrando una efectividad en la eliminación de la carga contaminante. Además, es una planta ornamental de fácil acceso, que proporciona un buen aspecto al humedal artificial.

4.3 Dimensionamiento del Sistema Descentralizado

En la tabla 21 se demuestran los aspectos iniciales tenidos en cuenta para la realización del dimensionamiento del tren de tratamiento. Inicialmente se tomó una población de 1118 personas que corresponde a la capacidad máxima del Coliseo Sol de Alquino. Lo anterior debido a que no se pudo conocer la cantidad de estudiantes que hacen uso del campus por jornada con datos históricos de mínimo 5 años para analizar el comportamiento de la población. Este dato se usó para obtener el caudal máximo utilizado en el dimensionamiento del tanque de almacenamiento o igualación. Por otra parte, para el cálculo del caudal de diseño requerido para las unidades de

tratamiento restantes, se utilizó una población de 565 personas que corresponde a la capacidad máxima de las aulas del edificio Sol de Aquino. De esta manera, el tren de tratamiento estará en la capacidad de recibir un caudal de aguas residuales en su máxima capacidad de ocupación, y operar bajo un flujo diario correspondiente al caudal en su ocupación para las actividades académicas. Por otra parte, la Resolución contempla que el coeficiente de retorno debe ser de 0.85 y el coeficiente de consumo máximo diario de 1.5, teniendo en cuenta que son para sistemas de tratamiento nuevos; además, la dotación neta de consumo de agua es de 25 L/alumno*jornada, ya que el proyecto está ubicado en zona destinada al uso de actividades docentes y académicas y así como lo establece la tabla B.2.8 (Consumo para uso escolar) del título B-RAS. Para mayor detalle remitirse al apéndice C (Memoria de cálculos).

Tabla 21. Condiciones iniciales para el desarrollo del diseño

Condiciones Iniciales		
Población máxima (coliseo)	Personas	1118
Población máxima (aulas)	Personas	565
Coeficiente de Retorno	CR	0.85
Coeficiente de Consumo máximo diario	K1	1.5
Dneta	(L/Personas*día)	25
QMD (caudal máximo diario)	(m ³ /día)	35.636
Qmd (Caudal medio diario)	(m ³ /día)	12.006

Fuente: (Elaboración Propia)

4.3.1 Tanque de almacenamiento. El tanque de almacenamiento tiene como función recolectar el agua servida generada de las diferentes actividades que se llevan a cabo en esta sede. Para determinar la capacidad máxima del tanque se multiplico el caudal máximo diario 35.636 m³/día por un tiempo de retención hidráulico de 0.5 días, como se demuestra en la ecuación 1. Adicionalmente, se instalará dentro del tanque una bomba sumergible la cual tendrá como

función principal, controlar y distribuir el caudal en los demás sistemas, así como se demuestra en la figura 10.

$$V = Q * TRH = 17.818(m^3)$$

Ecuación (1)

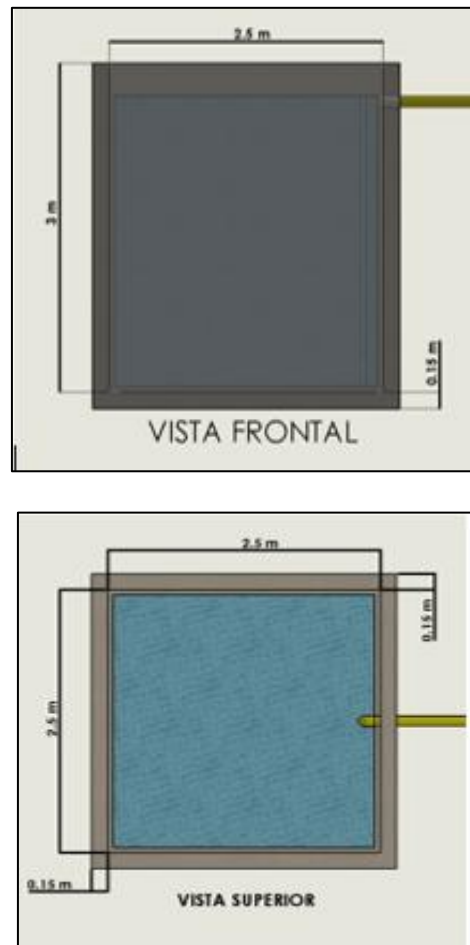


Figura 10. Dimensionamiento tanque de almacenamiento

4.3.2 Tanque séptico. El tanque séptico es un sistema tratamiento primario de las aguas residuales donde se realiza la transformación fisicoquímica y biológica de la materia orgánica presente en el agua de estudio (Aguirre, Vargas , Zeron, & Cruz, 2018). El tanque se diseñó a

partir del caudal medio diario (12 m³/día) como lo indica en el artículo 116 caudal de diseño de la Resolución 330 del 2017. En la figura 11 se observa el diseño de esta unidad de tratamiento.

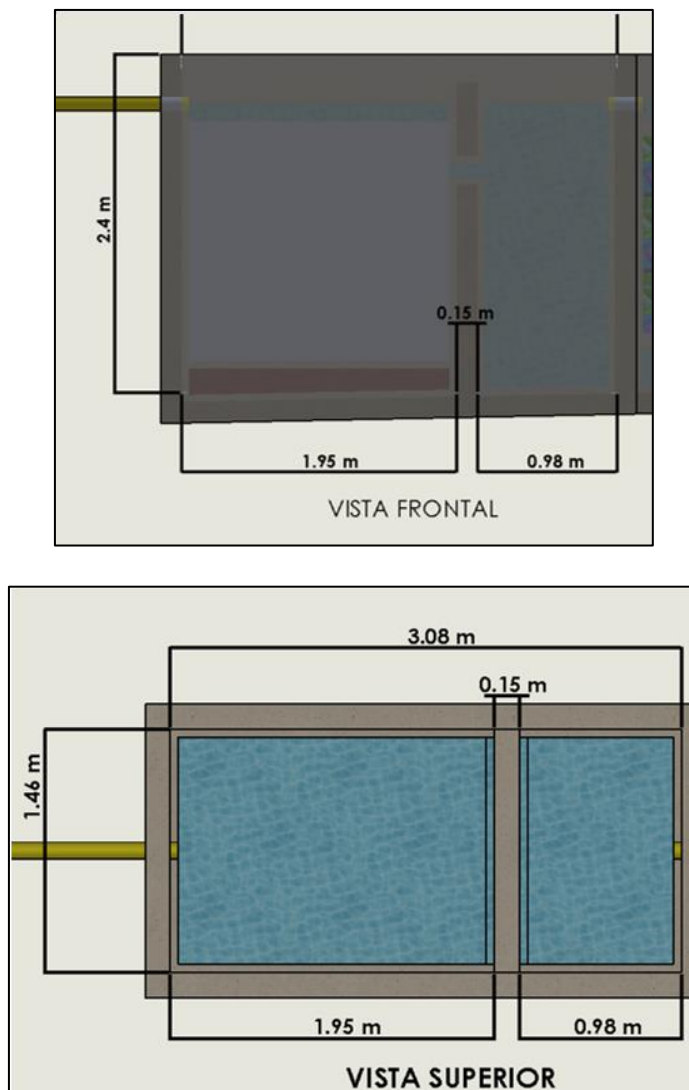


Figura 11. Dimensionamiento tanque séptico

4.3.2.1 Tiempo de retención hidráulico. Se estableció un tiempo de retención hidráulico de 12 horas tomado como referente diferentes investigaciones y lo estipulado en la resolución 330 del 2017, el cual es idóneo para que los sólidos se sedimenten en el fondo del tanque y comience el proceso de descomposición anaerobia.

4.3.2.2 Volumen del tanque. La resolución 0330 del 2017 menciona que el pozo deberá constar como mínimo de dos cámaras, donde la primera cámara tendrá un volumen igual a 2/3 del volumen total. Además, la primera cámara tendrá una pendiente de 2% orientada hacia la entrada, con el objetivo de almacenar los lodos.

El volumen útil del tanque se halló a partir de la multiplicación del caudal ($12 \text{ m}^3/\text{día}$), por un TRH de 0,5 días y un factor de mayoración de 1.5, con el fin de garantizar una seguridad en el diseño; por ejemplo, si se presenta un caudal superior al esperado. Así como se muestra en la ecuación 2:

$$Vr = Q * TRH = 9 \text{ (m}^3\text{)} \quad \text{Ecuación (2)}$$

4.3.2.3 Relación largo – ancho. En la resolución 330 del 2017, mencionan que la relación largo: ancho debe estar como mínimo 2:1 y como máximo 5:1, además de una profundidad útil según el volumen del sistema (mínimo 1.5 y máximo 2.5). Para el desarrollo del proyecto, se utilizó la relación mínima (2:1) y una profundidad útil de 2.1m.

Largo: 2,9m - **Ancho:** 1,4m

4.3.2.4 Carga orgánica. Para la determinación de esta variable se utilizó la ecuación 3:

$$CO = DBO_{\text{afluente}} * Q = 2.65 \text{ kg/día} \quad \text{Ecuación (3)}$$

4.3.2.5 Determinación del efluente DBO. Para el cálculo del efluente DBO se tuvo en cuenta la eficiencia (E) de 30% según lo establecido por la resolución 330 del 2017, S_0 es el afluente de DBO (221 mgDBO/L) y S es el efluente del Sistema, el cual se determinó mediante la ecuación 4.

$$E = \frac{S_0 - S}{S_0} * 100; S = 154 \left(\frac{\text{mgDBO}}{L} \right) \quad \text{Ecuación (4)}$$

4.3.3 Filtro anaerobio de flujo ascendente (FAFA). El filtro anaerobio es un tratamiento secundario usado posteriormente a un tanque séptico. Esta unidad estará acompañada con tapas plásticas como medio soporte, teniendo en cuenta que en el RAS 2017 recomiendan este tipo de material.

4.3.3.1 Volumen del FAFA. El volumen se determinó mediante la ecuación 5, utilizando un caudal de 12.006 m³/día y un tiempo de retención de 0.5 días, el cual se determinó a partir de las experiencias de investigaciones finalizadas.

$$V = Q * TRH = 9.005 (m^3) \quad \text{Ecuación (5)}$$

4.3.3.2 Volumen útil. Se determino a partir del porcentaje de porosidad del medio filtrante (0.84), el cual fue dividido por el volumen ya hallado, mediante la ecuación 6.

$$Vu = \frac{V}{\text{Porosidad medio filtrante}} = 10.720(m^3) \quad \text{Ecuación (6)}$$

4.3.3.3 Dimensionamiento. El FAFA estará diseñado posteriormente al tanque séptico con el fin de estar unido a la última cámara de este sistema, con el objetivo de reducir costos. Es importante resaltar que cada unidad de tratamiento funciona de forma independiente, como lo demuestra la figura 12.

La entrada del filtro se compone de un falso fondo, sobre él se deposita el material filtrante con el fin de evitar obstrucciones en la tubería. De igual forma la función de distribuir el caudal uniformemente.

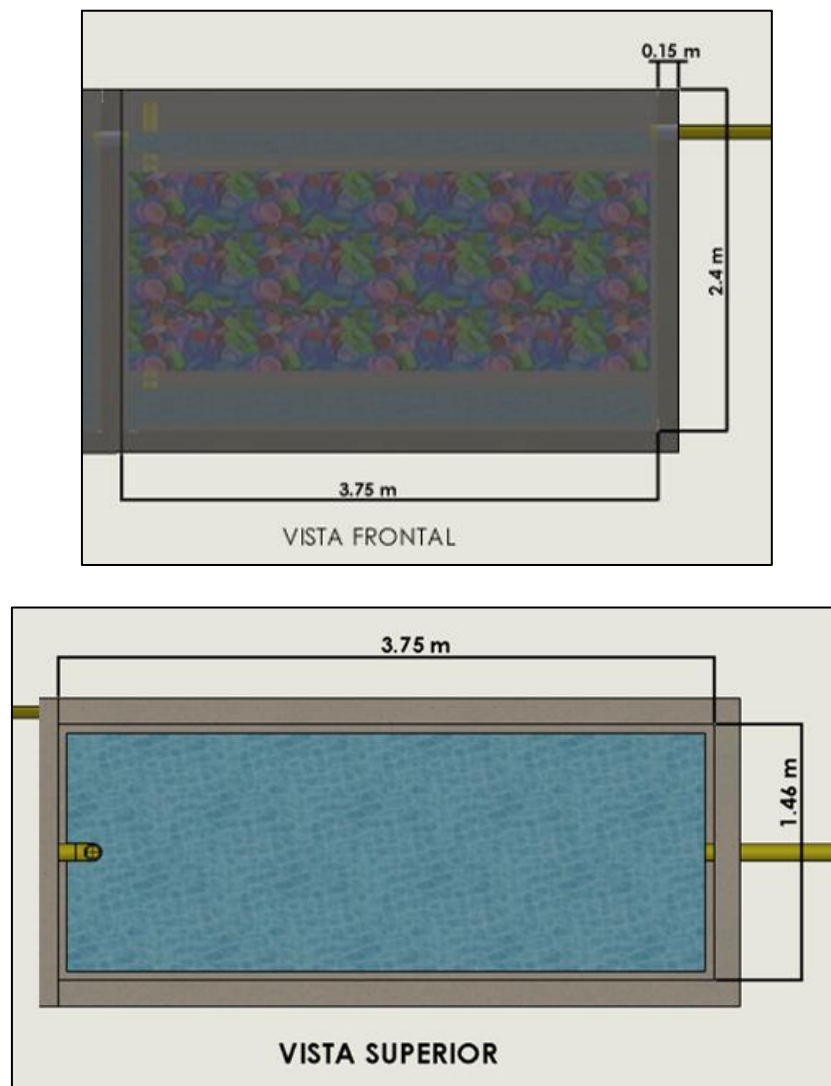


Figura 12. Dimensionamiento FAFA

4.3.4 Humedal artificial de Flujo Subsuperficial Horizontal. Los humedales artificiales son sistemas complementarios que tienen la capacidad de eliminar los contaminantes presentes en el agua.

4.3.4.1 Tiempo de retención hidráulica. En el RAS 2017 recomiendan un TRH alrededor de 5 días; para esta unidad de tratamiento se seleccionó un tiempo de 2 días, ya que en diferentes investigaciones se obtuvieron buenos resultados.

4.3.4.2 Volumen del Humedal. El volumen fue determinado a partir de la ecuación 7:

$$V = t * Q = 36.019(m^3) \quad \text{Ecuación (7)}$$

Posteriormente, se calculó el volumen útil del humedal, teniendo en cuenta la ecuación 8, donde el volumen hallado anteriormente, se divide en la porosidad del lecho filtrante 50% (arena gruesa).

$$Vu = \frac{V}{\text{Porosidad medio filtrante}} = 72.038(m^3) \quad \text{Ecuación (8)}$$

4.3.4.3 Dimensionamiento. El humedal se diseñó a partir de la relación largo-ancho establecida en la resolución 330 del 2017 (mínimo 3:1 y máximo 4:1), así como la profundidad comprendida entre 0.1 – 0.45 m, como se muestra en la figura 13. Para este proyecto, se seleccionó la condición mínima y una profundidad de 0.40, ya que las raíces de la planta *Heliconia pisttacorum* tienen un desarrollo máximo de 0.30 m. Además, el humedal estará recubierto con polietileno, el cual está perforado para permitir la entrada de las raíces de la planta. Finalmente, se realizó una distribución de las plantas a partir de una relación de 25 plantas por cada m² (Cueva Torres & Rivadeneira Bravo, 2013), dando como resultado 4502 plantas por un área de 180.094 m².

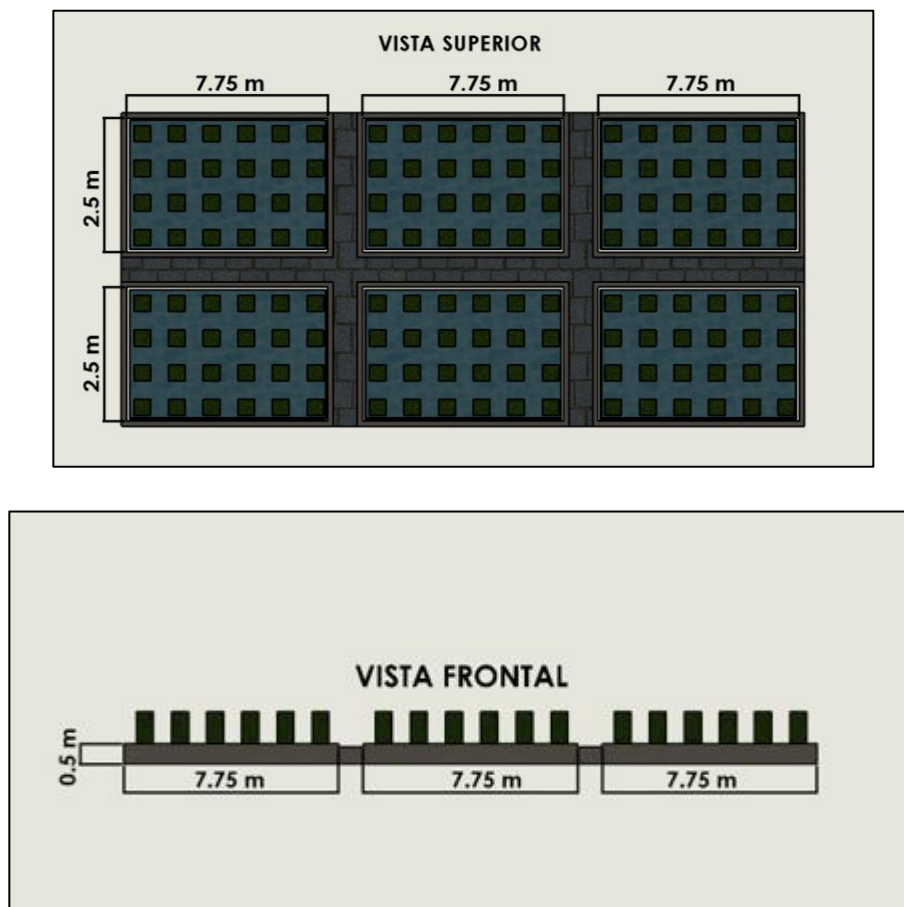


Figura 13. Diseño del humedal artificial

4.3.5 Diseño del tren de tratamiento descentralizado. En la figura 14 demuestra el diseño del sistema de tratamiento propuesto, el cual tiene la función de brindar un manejo adecuado a las aguas residuales generadas en el campus Piedecuesta- seccional Bucaramanga.

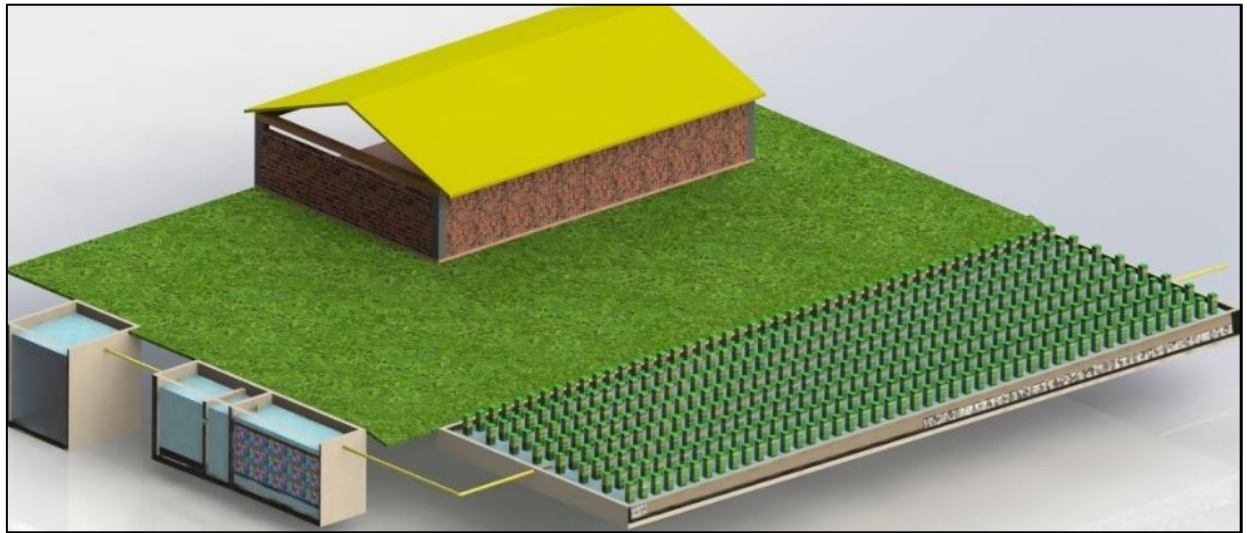


Figura 14. Diseño en 3D

4.3.6 Balance de masas. En la Figura 15 se puede observar el balance de masas efectuado al sistema de tratamiento descentralizado propuesto para el manejo de las aguas residuales generadas en el campus de Piedecuesta. Para llevar a cabo su realización se tuvieron en cuenta las eficiencias teóricas en la remoción de parámetros como DBO, DQO, SST y CF para cada unidad de tratamiento, establecidos en la resolución 330 del 2017 y los diferentes referentes bibliográficos.

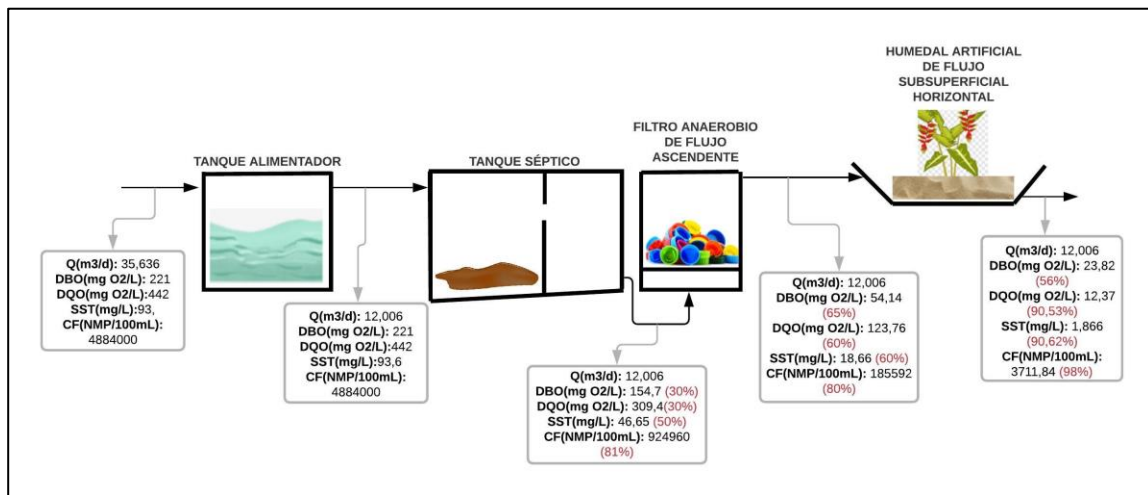


Figura 15. Balance de masas del sistema de tratamiento

Por lo anterior, en la resolución se contempla para el tanque séptico la remoción de las variables DBO y DQO, las cuales se encuentran dentro de un rango de 30-40%, en CF 81% y para SST entre 50-65%. Por otra parte, para los filtros anaerobios se establecen remociones entre 65-80% para DBO, 60-80% para DQO, un 80% CF y 60-70% para SST. Por último, para los humedales artificiales se seleccionaron las diferentes remociones obtenidas en las investigaciones en donde utilizaron la planta *Heliconia psittacorum*, por lo que se realizó un promedio de estos resultados, obteniendo un 56% DBO, 98% para CF, 90% DQO y SST. Cabe resaltar que para la realización del balance de masas se tomaron las eficiencias de menor valor para cada unidad de tratamiento.

Por otra parte, en la figura 16 y 17 se realizó una comparación del efluente obtenido en el sistema de tratamiento existente y el tren de tratamiento propuesto, con el objetivo de demostrar la efectividad de las unidades de tratamiento para el manejo integral de las aguas residuales generadas en el campus, obteniendo como resultado al final del sistema propuesto una

disminución del 89% de DBO, 97,2% de DQO, 99% de SST y 99% para CF, con respecto a las condiciones iniciales.

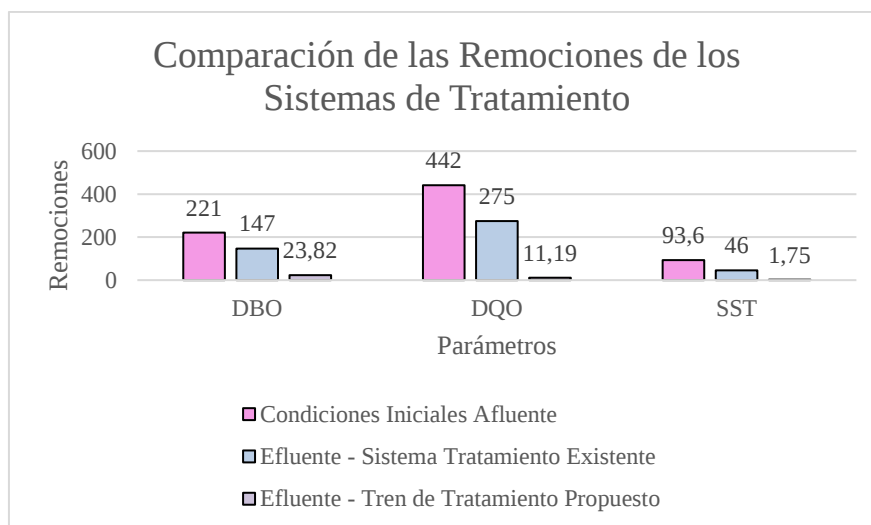


Figura 16. Comparación de Efectividad de los Sistemas de Tratamiento

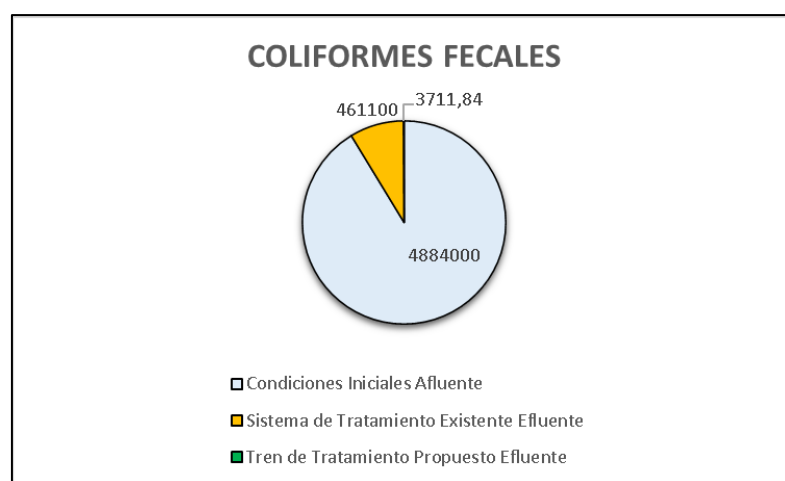


Figura 17. Comparación de las remociones obtenidas para los coliformes fecales

De igual manera, es importante tener en cuenta que en la Resolución 1207 del 2014 se establecen las disposiciones relacionadas con el uso de aguas residuales tratadas, donde su artículo 4 indica que si la “totalidad de las AR tratadas son para reuso no requiere permiso de

vertimiento por parte del Usuario Generador y no habrá pago correspondiente a Tasa Retributiva por la utilización directa e indirecta del agua como receptor de los vertimientos puntuales” (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014); es decir, mediante la implementación del proyecto se estaría dando un adecuado tratamiento a las aguas, garantizando el reúso de las mismas, con el fin de ser usadas en el mantenimiento de las áreas verdes, campos deportivos y jardines del campus de Piedecuesta, previo verificación de los microorganismos patógenos y demás variables sanitarias. No obstante, se proyecta un vertimiento al cuerpo de agua de acuerdo con lo establecido por la autoridad ambiental.

4.3.7 Mantenimiento del sistema de tratamiento. En la tabla 22 se evidencia el mantenimiento que se debe tener en cuenta en cada unidad de tratamiento del sistema propuesto, y de esta manera poder garantizar su eficiencia en remoción de los parámetros de interés sanitario.

Tabla 22. *Mantenimiento de las unidades de tratamiento*

Tanque de Almacenamiento	Tanque Séptico	Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente	Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial Horizontal
-Se debe realizar un proceso de inspección las cuales pueden ser rutinarias y periódicas. -Raspar manualmente la suciedad o incrustaciones, y así brindarles una adecuada disposición final a los residuos (E.R.C.A, 2018).	-Se debe inspeccionar como mínimo una vez al año. -Es necesario hacer extracción de la biomasa del tanque cuando la profundidad de los lodos se encuentre en un 40% de la altura del nivel máximo del agua. -La extracción de los lodos se realiza mediante el bombeo a vehículos cisterna; es importante recalcar que durante ese proceso no se debe lavar ni desinfectar el tanque. -La remoción de lodos se debe efectuar con personal capacitado que disponga del equipo adecuado, ya que es un residuo de carácter peligroso (Pinzón Hernández & Almeida Buitrago, 2010).	-Al pasar el tiempo, los sólidos obstruirán los poros del filtro, y así la creciente masa bacteriana se espesará excesivamente llegando a obstruir los poros. -Para determinar en qué momento se debe realizar limpieza en el filtro, se debe detectar la reducción de la eficiencia del sistema y aumento en el nivel de la lámina de agua -El tanque del filtro se debe revisar periódicamente para garantizar que continúen impermeables (Tilley & Ulrich, 2018).	-El material filtrante debe ser reemplazado entre los 5 o 10 años. -Es importante eliminar la hierba mala que puede llegar a competir con la planta asignada en el humedal. -Se debe inspeccionar con frecuencia los colectores de la entrada y la salida, con el fin de retirar los desechos que pueden obstruir su función. -Al pasar el tiempo del funcionamiento del humedal es necesario eliminar los sólidos acumulados, porque pueden reducir los tiempos de retención hidráulica (ONU HABITAT, 2008).

Nota: * Lineamientos establecidos para un adecuado funcionamiento del sistema de tratamiento.

Es importante resaltar que, al momento de hacer limpieza del tanque de almacenamiento, se debe programar en un día que no se desarrollen actividades que generen residuos líquidos, como en periodos vacacionales. Además, se sugiere tener un humedal independiente para el crecimiento de las macrófitas y así poder ser utilizadas como remplazo de las especies que ya terminaron su vida útil. De igual manera, es recomendable que no se extraigan los lodos en su totalidad, para así poder garantizar el arranque de las unidades de tratamiento.

5. Conclusiones

Actualmente el campus de Piedecuesta cuenta con un pozo séptico acompañado de un tanque de almacenamiento, en donde semestralmente una entidad tercera extrae las aguas generadas por un valor monetario, brindándoles un tratamiento y disposición final, ya que el sistema no es apto para remover la carga contaminante presente en el agua, producto de las actividades que se desarrollan en el campus.

Mediante el diagnóstico realizado del sistema de tratamiento de aguas residuales en el Campus de Piedecuesta de la Universidad Santo Tomás, se puede concluir que el sistema existente no cumple con las especificaciones de diseño indicadas en la resolución 330 del 2017, y a su vez no se identifica el cumplimiento de las concentraciones del efluente de DBO y DQO, establecidas en la Resolución 631 del 2015. Por otra parte, el campus cuenta con un alcantarillado privado el cual está conformado por dos tuberías, uno destinado para las aguas pluviales y el otro para el transporte de las aguas residuales, favoreciendo la gestión integral de las mismas.

La resolución 330 del 2017 indica que las zonas desprovistas de la cobertura de alcantarillado deben dotarse de sistemas de tratamiento descentralizados para el manejo de sus aguas. Por esta

razón, se realizó una detallada revisión bibliográfica para determinar los criterios de diseño apropiados, con el fin de lograr un adecuado dimensionamiento del tren tratamiento propuesto para el manejo integral de las aguas residuales generadas en el campus (conformado por un Tanque Séptico, un FAFA y un Humedal Artificial).

La evaluación multicriterio con el objetivo de determinar la ubicación óptima del sistema de tratamiento descentralizado demostró que la alternativa 2 ubicada en la parte inferior del gimnasio de artes marciales y maquinas con coordenadas 7.023499 N & -73.06534 W, tuvo mayor valoración (6.33) debido a que genera menos incomodidades directas a la comunidad tomasina.

A partir del balance de masas se pudieron determinar las características del agua tratada en cada unidad de tratamiento; considerando remociones del 30% para DBO- DQO, en CF 81% y en SST un 50% para el tanque séptico; el filtro anaerobio con un 60% de remoción de la DQO – SST, 80% en CF y un 65% de DBO; Finalmente, para el humedal artificial se consideró una eficiencia del 90% para DQO-SST, 98% en CF y un 56% de DBO.

Con el efluente final se pudo constatar remociones teóricas de los parámetros de interés sanitario: en la DBO se removió un 23,82mg/L, DQO - 12,376 mg/L, STT - 1,866 mg/L y para Coliformes fecales - 3711,84 NMP/100mL. Logrando el cumplimiento a los lineamientos establecidos en la Resolución 0631 del 2015.

Finalmente, se deja a consideración la continuación de la investigación en una fase experimental que permita evaluar eficiencia del tren de tratamiento propuesto y la calidad del efluente final, con el fin de determinar la posibilidad de reuso de acuerdo con lo establecido en la Resolución 1207 del 2014. Así mismo, se daría cumplimiento al Objetivo de Desarrollo Sostenible número 6 (Agua limpia y saneamiento), y el objetivo establecido por el Sistema de Gestión Ambiental de la Universidad Santo Tomás, el cual pretende mejorar la gestión de las

aguas residuales generadas como resultado de las actividades desarrolladas en todas las sedes y seccionales. Cabe resaltar que con este proyecto se creara un espacio interdisciplinario con las facultades de Ingeniera ambiental, Química ambiental e Ingeniería civil.

6. Recomendaciones

- Se recomienda hacer una nueva caracterización fisicoquímica y microbiológica del tratamiento existente, ya que por la contingencia sanitaria que se está viviendo actualmente, fue imposible desarrollar estas actividades, por lo cual se tuvo en cuenta la caracterización realizada en el año 2018 por el laboratorio ECOSAM S.A.S.

- Se sugiere evaluar el tren de tratamiento a escala piloto para verificar las eficiencias teóricas mencionadas y la calidad del efluente.

- Por otra parte, se recomienda realizar un reconocimiento detallado del terreno, con el fin de ratificar que la zona de estudio sea adapta para la ubicación del sistema de tratamiento; y así corroborar que no presenta inundaciones, y tampoco se tenga que realizar tala de vegetación endémica.

- De igual manera, si se lleva a cabo la construcción del sistema de tratamiento, es importante realizar una caracterización de los lodos producidos en el tratamiento descentralizado, con el propósito de brindarles un segundo uso a este residuo y así contribuir a la economía circular. Una de estas alternativas es la utilización de este subproducto como lo decreta 1287 de 2014, en donde se establecen dos categorías, la A para destinarse en zonas verdes, como producto para el uso de áreas privadas tales como jardines, cementerios y la agricultura; mientras que en la categoría B se utilizan para plantaciones forestales, remediación

de suelos contaminados, entre otros. Si la caracterización de los lodos no cumple con ninguna de las categorías mencionadas, se podrían destinar como agregados para materiales de construcción o la fabricación de ladrillos, como se evidencia en los estudios realizados por (Bermeo Barreto & Idrovo Heredia, 2014; Orellana León, 2015).

- Se sugiere la implementación de un filtro para gases en la salida del FAFA para reducir al máximo los niveles de emisiones nocivas a la atmósfera derivados del proceso, ya que no se produce un alto poder calorífico para el aprovechamiento en la producción de energía.
- Finalmente, es importante realizar una evaluación ambiental del vertimiento al agua superficial, para obtener el permiso correspondiente después de la construcción del proyecto; en el decreto 3930 de 2010 (artículo 2.2.3.3.5.1) mencionan los requisitos de la autorización.

Referencias Bibliográficas

- Aguirre, S., Vargas, M., Zeron, M., & Cruz, M. (2018). Tratamiento Primario de Aguas Servidas Mediante Tanque Séptico en Urbanización de Lurigacho, Lima. *Revista de Investigación Ciencia Tecnología y Desarrollo*, 41.
- Alcaldia de Piedecuesta. (Abril de 2019). *Piedecuesta Una Ciudad para la Gente*. Obtenido de <http://www.alcaldiadepiedecuesta.gov.co/Paginas/default.aspx>
- Alvarado Arce, A. A. (Enero de 2011). Evaluación de materiales de desecho como medio filtrante en filtros anaerobios de flujo ascendente (tesis pregrado). Cartago, Costa Rica. Recuperado el 8 de Noviembre de 2019, de https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/3020/Informe_final.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Ambientalys. (4 de Abril de 2018). *Parámetros microbiológicos controlados en aguas de consumo: bacterias coliformes*. Recuperado el 29 de Septiembre de 2019, de <https://www.ambientalys.com/bacterias-coliformes>
- Andrade, V. A., & Rosero, J. A. (2018). Evaluación de la remoción de materia orgánica en Humedales Artificiales de flujo subsuperficial a escala piloto como tratamiento de pulimento en las aguas residuales de FRIGOVITO S.A (Tesis posgrado). Pereira, Colombia. Recuperado el 30 de Octubre de 2020, de <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/handle/11059/9350/T333.918%20A553.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Aragón Calderón, R. A., Parra Collazos, A. Y., & Peña Torres, M. A. (Julio de 2015). Evaluación preliminar del funcionamiento de un sistema prototipo de humedales artificiales empleando *Heliconia psittacorum* y *Cyperus papyrus* para el tratamiento de aguas residuales. *Agroecología: Ciencia y Tecnología*, III(1), 7-12. Recuperado el 16 de Noviembre de 2019, de https://repositorio.sena.edu.co/bitstream/11404/6739/1/Agroecologia_ciencia_y_tecnologia_3_1_51-63.pdf

Arenas Ramirez, S. M., & Nuncira Parra, A. D. (05 de Noviembre de 2010). Evaluación de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales del sector industrial avícola. Bucaramanga, Santander, Bucaramanga. Recuperado el 3 de Noviembre de 2020, de <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2010/136094.pdf>

Arias Triguero, Ó. (2014). Estudio de la biodegradación de la materia orgánica en humedales contruidos de flujo subsuperficial. Barcelona, España.

Barreros Ortiz, M. A. (Enero de 2017). Diseño del Sistema de Alcantarillado Santiago con la Depuración de las Aguas Residuales del Sector San Isidro Nuevo, Parroquia Mulliquindil Santa Ana, Provincia de Cotopaxl. (Tesis Pregrado). Ambato, Ecuador. Recuperado el 3 de Noviembre de 2020, de https://mailustabucaedu-my.sharepoint.com/personal/martha_estevez_ustabuca_edu_co/_layouts/15/onedrive.aspx?ct=1603665952584&or=OWA%2DNT&cid=978d7d56%2D8e37%2Dd723%2D9d49%2D5fad746e0459&originalPath=aHR0cHM6Ly9tYWlscdXN0YWJ1Y2FlZHUtbXku c2hhcmVwb2ludC5jb20v

Bermeo Barreto, A. M., & Idrovo Heredia, E. P. (2014). *Aprovechamiento de lodos deshidratados generados en las plantas de tratamiento de agua potable y residual como agregado para*

materiales de construcción (Tesis de pregrado). Recuperado el 13 de Octubre de 2020, de <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/20868/1/Tesis.pdf>

Brand Romero, D. L. (2019). Efectos de los tensoactivos en el medio ambiente. *Gerencia Ambiental y Desarrollo Sostenible Empresarial*, 1-15. Recuperado el 14 de Octubre de 2020

Brand Torres, M. (2014). *Evaluación de un sistema humedal construido - tanque regulador como sistema de aprovechamiento de aguas lluvias en el campus de la Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, con base en criterios hidrológicos e hidráulicos (Tesis posgrado)*. Recuperado el 29 de Octubre de 2020, de <http://hdl.handle.net/10554/17081>

Burgos Garcia, J. L., Forero Dominguez, L. E., & Rojas Gallardo, J. A. (21 de Septiembre de 2015). Propuesta Técnica para el diseño de un Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales para el Municipio de Restrepo, Meta. Villavicencio, Colombia. Recuperado el 20 de Octubre de 2020, de https://repository.ucc.edu.co/bitstream/20.500.12494/12346/1/2015_propuesta_tecnica_dise%C3%B1o_.pdf

Campos Pinilla, C. (2003). Indicadores de contaminación fecal en aguas. En C. Díaz Delgado, *Agua potable para comunidades rurales, reuso y tratamientos avanzados de aguas residuales domésticas* (págs. 224-229). México, México: RIPDA-CYTED. Recuperado el 12 de Octubre de 2020

Carbotecnia. (13 de Agosto de 2020). *pH en el agua*. Recuperado el 14 de Octubre de 2020, de <https://www.carbotecnia.info/aprendizaje/quimica-del-agua/que-es-el-ph-del-agua/>

Carrera Vargas, S. M., & Florian Sanchez, A. M. (03 de Mayo de 2013). UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS TIPO FILTRO

ANAEROBIO DE FLUJO ASCENDENTE (FAFA) CON LENTEJA DE AGUA. Neiva, Huila, Colombia. Recuperado el 4 de Octubre de 2019

Castro Muñoz, C. M. (26 de Junio de 2007). *Calidad del agua*. Recuperado el 22 de Octubre de 2019, de <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/6154/9/c1.pdf>

Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico del Agua. (23 de Junio de 2016). *Características de las aguas residuales*. Recuperado el 18 de Septiembre de 2020, de <https://cidta.usal.es/cursos/etap/modulos/libros/Caracteristicas.PDF>

ChileCientifico. (4 de Marzo de 2019). *Conservación de la biodiversidad (In situ o Ex situ)*. Recuperado el Octubre1 de 2020, de <https://chilecientifico.com/conservacion-de-la-biodiversidad-in-situ-o-ex-situ/#:~:text=Por%20el%20contrario%2C%20conservaci%C3%B3n%20ex,arboretos%2C%20y%20bancos%20de%20semillas.>

Comisión Nacional del agua. (2015). *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento*. Recuperado el 29 de Octubre de 2020, de Diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales. Filtros anaerobios de flujo ascendente: https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/CONAGUA%202015.%20Manual%20Filtros%20anaerobios%20de%20flujo%20ascendente.pdf

Congreso de la República. (6 de Julio de 2012). *Ley 1551 del 2012*. Recuperado el 30 de Noviembre de 2020, de http://www.secretariassenado.gov.co/senado/basedoc/ley_1551_2012.html

Contreras, E. (2009). *Evaluación Social de Proyectos*. Recuperado el 2 de Noviembre de 2020, de

https://www.cepal.org/ilpes/noticias/paginas/7/35117/ev_social_ILPES_2009_4_multicriterio.pdf

Cueva Torres, E. Y., & Rivadeneira Bravo, F. A. (2013). Tratamiento de aguas residuales domésticas mediante un humedal artificial de flujo subsuperficial con vegetación herbácea. Santo Domingo, República Dominicana. Recuperado el 21 de Noviembre de 2019

DANE. (2010). *Fósforo Reactivo Disuelto*. Recuperado el 13 de Octubre de 2020, de <https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/pib/ambientales/Sima/FosforoTotales.pdf>

Delgadillo, O., Camacho, A., Pérez, L. F., & Andrade, M. (10 de octubre de 2010). Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales. Cochabamba, Bolivia. Recuperado el 9 de Mayo de 2020, de <https://core.ac.uk/download/pdf/48017573.pdf>

Departamento de Planeación USTA. (Septiembre de 2020). Inventario de las baterías sanitarias. Bucaramanga, Santander, Colombia. Recuperado el 28 de Octubre de 2020

Donado, R. (Agosto de 2013). *Plan de gestión para lodos generados en las PTAR-D de los municipios de Cumaral y San Martín de los Llanos en el Departamento del Meta (Tesis posgrado)*. Recuperado el 4 de Septiembre de 2020, de <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/13496/DonadoHoyosRoger2013.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

E.R.C.A. (2018). *Mantenimiento de PTAP, PTAR & PTARD*. Recuperado el 15 de Noviembre de 2020, de <https://www.ercasas.com.co/mantenimiento-de-plantas-ptap-ptar-ptard/>

Eliminación... (21 de Mayo de 2018). Eliminación del nitrógeno en las aguas residuales. *Conneting Waterpeople*. Recuperado el 29 de Noviembre de 2020, de <https://www.iagua.es/noticias/aema/eliminacion-nitrogeno-aguas-residuales>

Empresa pública de alcantarillado en Santander. (25 de Noviembre de 2017). *Informe de gestión*.

Recuperado el 28 de Agosto de 2019, de <https://www.empas.gov.co/wp-content/uploads/2018/04/INFORME-DE-GESTION-EMPAS-2017-WEB.pdf>

Espigares Garcia, & Pérez López. (18 de Marzo de 2008). *Composición de las aguas residuales*.

Recuperado el 13 de Agosto de 2019, de http://cidta.usal.es/cursos/EDAR/modulos/Edar/unidades/LIBROS/logo/pdf/Aguas_Residuales_composicion.pdf

Fundación para el conocimiento Madrid. (16 de Mayo de 2013). *Humedales artificiales como*

sistemas naturales de depuración de aguas residuales. Conceptos e hisotrias. Recuperado el 29 de Noviembre de 2020, de <https://www.madrimasd.org/blogs/remtavares/2013/05/16/131891#:~:text=A%20lo%20largo%20del%20humedal,procesos%20biol%C3%B3gicos%20aerobios%20como%20anaerobios>.

Gomez Plata, A. H., & Alvarez Sequeda, G. M. (Septiembre de 2008). Evaluación de la eficiencia

de un filtro anaerobio de grava a escala piloto, análisis comparativo con un filtro anaerobio de guadua-PTAR (Tesis de pregrado). Bucaramanga, Colombia. Recuperado el 22 de Marzo de 2020, de https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/234/digital_16622.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Gonzalez, M. (20 de Enero de 2016). Tratamiento de Agua Residual, Tratamiento Primario.

Grundfos Colombia. (23 de Noviembre de 2017). *Sólidos en suspensión*. Recuperado el 11 de

Octubre de 2020, de <https://co.grundfos.com/service-support/encyclopedia-search/suspended->

solids.html#:~:text=Los%20s%C3%B3lidos%20en%20suspensi%C3%B3n%20son,de%20la%20calidad%20del%20agua.

Grundfos Colombia. (2020). *Alcantarillado*. Recuperado el 5 de Septiembre de 2020, de <https://co.grundfos.com/service-support/encyclopedia-search/sewer-system.html>

Hidritec. (23 de Septiembre de 2016). *Tratamiento de aguas residuales y disminución de DQO*. Recuperado el 19 de Octubre de 2020, de <http://www.hidritec.com/hidritec/tratamiento-de-aguas-residuales-y-disminucion-de-dqo#:~:text=La%20DQO%20o%20Demanda%20Qu%C3%ADmica,presente%20en%20un%20agua%20residual>

Importancia... (9 de Abril de 2018). *La importancia de la separación de aceites y grasas en el tratamiento del agua residual urbana*. Recuperado el 12 de Octubre de 2020, de <https://www.iagua.es/noticias/teqma/importancia-separacion-aceites-y-grasas-tratamiento-agua-residual-urbana>

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (13 de Mayo de 2004). *Fósforo total en Agua por Digestion Acida - Método del Acido Ascorbico*. Recuperado el 11 de Octubre de 2020, de <http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/F%C3%B3sforo+Total+en+Agua+M%C3%A9todo+del+Acido+Asc%C3%B3rbico.pdf/bf2f449b-4b9b-4270-b77e-159258d653e2>

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (4 de Junio de 2007). *Demanda bioquímica de oxígeno 5 días, encubación y electrometría*. Recuperado el 30 de Septiembre de 2020, de

<http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/Demanda+Bioqu%C3%ADmica+de+Ox%C3%ADgeno..pdf/ca6e1594-4217-4aa3-9627-d60e5c077dfa>

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (28 de Diciembre de 2007).

Demanda química de oxígeno por reflujo cerrado y volumetria. Recuperado el 1 de

Octubre de 2020, de

<http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/Demanda+Qu%C3%ADmica+de+Ox%C3%ADgeno..pdf/20030922-4f81-4e8f-841c-c124b9ab5adb>

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2 de Agosto de 2007). *Sólidos*

suspendidos totales en agua secados a 103-105°C. Recuperado el 30 de Septiembre de

2019, de

<http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/S%C3%B3lidos+Suspendidos+Total+es+en+aguas.pdf/f02b4c7f-5b8b-4b0a-803a-1958aac1179c>

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (10 de Septiembre de 2007). *Toma*

de muestras de aguas residuales. Recuperado el 13 de Septiembre de 2019, de

http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38158/Toma_Muestras_AguasResiduales.pdf/f5baddf0-7d86-4598-bebd-0e123479d428

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (30 de Agosto de 2017).

Determinación de Escherichia Coli y Coliformes totales en agua por el metodo de

filtración por membrana. Recuperado el 24 de Octubre de 2019, de

<http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/Coliformes+totales+y+E.+coli+en+Agua+Filtraci%C3%B3n+por+Membrana.pdf/5414795c-370e-48ef-9818-ec54a0f01174>

Instituto Universitario de la Paz. (2014). *Estudio de potencialidades del territorio para la*

identificación de brechas que orienta la nueva oferta educativa de la UNIPAZ.

Recuperado el 13 de Agosto de 2020, de <https://unipaz.edu.co/assets/documento-estudio-de-potencialidades2.pdf>

Laboratorio y Consultoría Ambiental ECOSAM S.A.S. (Agosto de 2018). Monitoreo y Análisis de Agua Residual Doméstica para la Verificación del Sistema de Tratamiento - Séptico. Piedecuesta, Santander, Colombia.

Laverde Sarmiento, J. D., & Salazar Florez, Y. V. (13 de Diciembre de 2017). Utilización de humedales artificiales para el tratamiento de aguas borras generadas en estaciones de servicio en el departamento de Cordoba. Montería, Colombia. Recuperado el 8 de Mayo de 2020, de <https://repositorio.unicordoba.edu.co/handle/ucordoba/464>

Londoño Cardona, L. A., & Marín Vanegas, C. (2009). Evaluación de la eficiencia de remoción de materia orgánica en humedales artificiales de flujo horizontal subsuperficial alimentados con agua residual sintética (tesis pregrado). Pereira, Risaralda, Colombia: UTP. Recuperado el 10 de Noviembre de 2019, de <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/handle/11059/1817/628162L847.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Marín Bahamón, D. (2019). *Propuesta de aprovechamiento de lodos residuales provenientes de una PTAR del municipio de Sopo Cundinamarca para la producción de un fertilizante organo-mineral (Tesis pregrado)*. Recuperado el 12 de Noviembre de 2019, de <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/7393/1/6122932-2019-1-IQ.pdf>

Marín Montoya, J. P., & Correa Ramírez, J. C. (2010). Evaluación de la remoción de contaminantes en aguas residuales en humedales artificiales utilizando la Guadua Angustifolia Kunth. Pereira, Risaralda, Colombia. Recuperado el 22 de Noviembre de

2019, de
<http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/handle/11059/1801/6283M337.pdf?sequence=1>

Marín Sanabria, A., & Torres, E. (13 de Septiembre de 2012). Optimización del humedal artificial subsuperficial para tratamiento de aguas residuales. *Ingenio libre*, 29-38. Recuperado el 12 de Mayo de 2019, de <https://docplayer.es/12030860-Optimizacion-del-humedal-artificial-subsuperficial-para-tratamiento-de-aguas-residuales.html>

Martínez Soza, L. (17 de Junio de 2010). *Estudio de la evolución de una ETAP para la adecuación legislativa (Tesis Pregrado)*. Obtenido de <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/10383/Annex.pdf?sequence=3&isAllowed=y>

Mena, P. A. (16 de Diciembre de 2014). Evaluación de la eficiencia de tratamiento de aguas residuales domésticas, implementando un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) en el colegio comfamiliar siglo XXI (Tesis posgrado). Pasto, Colombia. Recuperado el 12 de Marzo de 2020, de https://bibliotecadigital.exactas.uba.ar/download/tesis/tesis_n5825_MenaCabrera.pdf

Merino Solís, M. d. (24 de Febrero de 2017). Mecanismos de remoción de materia orgánica y nutrientes en un sistema de tratamiento pasivo de aguas residuales minicipales. Jalisco, México. Recuperado el 8 de Mayo de 2020, de <https://ciatej.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1023/422/1/Mar%C3%ADa%20de%20la%20Luz%20Merino%20Sol%C3%ADs.pdf>

Microlab Industrial. (17 de Marzo de 2017). *Las formas múltiples del Nitrógeno (amónio-nitrato-nitrato-nitrificación-desnitrificación)*. Recuperado el 10 de Octubre de 2020, de <https://www.aguasresiduales.info/revista/blog/las-formas-multiples-del-nitrogeno>

Milanes Hernández, E. (2010). *Diseño de un humedal subsuperficial de flujo vertical para el tratamiento de aguas residuales en la UCLV*. Recuperado el 29 de Noviembre de 2020, de <https://dspace.uclv.edu.cu/bitstream/handle/123456789/1285/Q07036.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (25 de Octubre de 2010). *Decreto 3930 de 2010*. Recuperado el 7 de Septiembre de 2019, de https://www.redjurista.com/Documents/decreto_3930_de_2010_ministerio_de_ambiente_y_vivienda_y_desarrollo_territorial.aspx#/

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (25 de Julio de 2014). *Resolución 1207 de 2014*. Recuperado el 12 de Noviembre de 2020, de minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/normativa/Res_1207_2014.pdf

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (25 de Julio de 2014). *Resolución 1207 del 2014*. Recuperado el 28 de Septiembre de 2020, de https://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/normativa/Res_1207_2014.pdf

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (26 de Mayo de 2015). *Decreto 1076 de 2015*. Recuperado el 8 de Septiembre de 2019, de <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=78153>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (Abril de 18 de 2015). *Resolución 631 de 2015*.

Recuperado el 7 de Septiembre de 2019, de
https://docs.supersalud.gov.co/PortalWeb/Juridica/OtraNormativa/R_MADS_0631_2015.pdf

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (16 de Enero de 2018). *Decreto 050 de 2018*.

Recuperado el 8 de Septiembre de 2019, de
<http://es.presidencia.gov.co/normativa/normativa/DECRETO%2050%20DEL%2016%20ENERO%20DE%202018.pdf>

Ministerio De Desarrollo Economico- Dirección General de Agua Potable y Saneamiento Básico.

(17 de Noviembre de 2000). *Documentación Técnico Normativa Del Sector De Agua Potable y Saneamiento Básico*. Obtenido de
http://www.minvivienda.gov.co/Documents/ViceministerioAgua/010710_ras_titulo_a_.pdf

Ministerio de Salud y Protección Social. (14 de Febrero de 2017). *Resolución 330 de 2017*.

Recuperado el 8 de Septiembre de 2019, de
https://www.minsalud.gov.co/Normatividad_Nuevo/Resoluci%C3%B3n%200330%20de%202017.pdf

Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (Agosto de 2018). *Plan Director de Agua y*

Saneamiento Básico (2018 - 2030). Recuperado el 12 de Octubre de 2019, de
<http://www.minvivienda.gov.co/Documents/ViceministerioAgua/Plan%20Director.pdf>

Montoya, J. I., Ceballos, L., Casas, J. C., & Morató, J. (Diciembre de 2010). Estudio comparativo de la remoción de materia orgánica en humedales construidos de flujo horizontal

- subsuperficial usando tres especies de macrófitas. *Revista EIA*, 75-84. Recuperado el 22 de Noviembre de 2019, de <https://www.redalyc.org/pdf/1492/149218986006.pdf>
- Moreno Mogollon, J. R., & Rangel Plata, J. T. (Septiembre de 2018). Evaluación de un humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal prototipo plantado con sistema vetiver para el tratamiento de aguas residuales en una vivienda rural del municipio de Floridablanca. Bucaramanga, Colombia. Recuperado el 18 de Noviembre de 2019
- Nihon Kasetsu. (20 de Noviembre de 2017). *DBO y DQO para caracterizar aguas residuales*. Obtenido de <https://nihonkasetsu.com/es/dbo-y-dqo-para-caracterizar-aguas-residuales/>
- ONU HABITAT. (04 de Febrero de 2008). *Manual de Humedales Artificiales*. Recuperado el 9 de Septiembre de 2020, de https://issuu.com/frederys1712doc/docs/manual_de_humedales_artificiales
- Orellana León, X. O. (2015). *Uso de los lodos, producto del tratamiento de aguas residuales, para la fabricación de ladrillos*. Recuperado el 23 de Octubre de 2020, de http://repositorio.ucsg.edu.ec/bitstream/3317/4344/1/T-UCSG-PRE-ING-IC-128.pdf?fbclid=IwAR1Xm4ch3x4G_BRsbdEwlepk2qjvNtaJ7qHH43exZJacKBjoGOoHbrQyaCI
- Organización de las Naciones Unidas. (2016). *Agua Limpia y Saneamiento*. Recuperado el 15 de Septiembre de 2020, de https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/wp-content/uploads/sites/3/2016/10/6_Spanish_Why_it_Matters.pdf
- Oscar, D. (10 de octubre de 2010). *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales*. Obtenido de <https://core.ac.uk/download/pdf/48017573.pdf>
- Osorio Trujillo, A. F., & Vásquez Botero, J. C. (2007). Evaluación de la remoción de la materia orgánica en filtros anaerobios de flujo ascendente utilizando aguas residuales sintéticas

- (Tesis pregrado). Pereira, Colombia. Recuperado el 8 de Noviembre de 2019, de <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/handle/11059/827/6283O83er.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Oviedo. (16 de Abril de 2016). *Naturaleza del agua residual doméstica y su tratamiento*. Recuperado el 12 de Septiembre de 2019, de http://www.biblioteca.udep.edu.pe/bibvirudep/tesis/pdf/1_135_183_88_1242.pdf
- Palomares, A. (20 de Julio de 2013). *Contaminación del agua por nitratos y técnicas para su tratamiento*. Recuperado el 10 de Octubre de 2020, de <https://www.esferadelagua.es/agua-y-tecnologia/contaminacion-del-agua-por-nitratos-y-tecnicas-para-su-tratamiento>
- Pantoja, H. A., & Tarapues, G. (2017). Remoción carga contaminante con humedales artificiales de tipo piloto sub-superficial horizontal (HAFSSh), Granja Botana, Nariño (Tesis pregrado). San Juan de Pasto, Colombia. Recuperado el 18 de Agosto de 2020, de <http://sired.udenar.edu.co/5947/1/REMOCI%C3%93N%20CARGA%20CONTAMINANTE%20CON%20HUMEDALES%20ARTIFICIALES%20DE%20TI.pdf>
- Paredes, L. (2014). Remoción de contaminantes en la estabilización de humedales construidos de flujo verticas, sembrados con Heliconia sp, para el tratamiento de aguas residuales domésticas (Tesis pregrado). Pereira, Colombia. Recuperado el 21 de Octubre de 2019, de <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/handle/11059/4813/333918P227.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Parra Rodriguez, L. M. (Noviembre de 2006). *Operación de un filtro anaerobio de flujo ascendente (FAFA) hasta alcanzar el estado estable (Tesis pregrado)*. Recuperado el 9 de Junio de 2020, de <https://core.ac.uk/download/pdf/11051607.pdf>
- Pérez, R., Alfaro, C., Sasa, J., & Agüero, J. (Enero-Junio de 2013). Evaluación del funcionamiento de un sistema alternativo de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales. *Uniciencia*(1), 332-340. Recuperado el 18 de Noviembre de 2019, de <https://www.redalyc.org/pdf/4759/475947762019.pdf>
- Petticrew, E., & Kalff, J. (1992). Flujo de agua y retención de arcilla en lechos de macrófitos sumergidos. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2483 - 2489.
- Piedecuesta, Santander. (2012). *Plan Estrategico De Gestion 2012- 2015*. Recuperado el 1 de Septiembre de 2020, de https://piedecuestanaesp.gov.co/images/Control_Interno_/plan_gestion/CAP._II_DIAGNOSTICO_GENERAL.pdf?fbclid=IwAR2K1Vj3r9PJ0O7r2ARxiucn3DczGxwBzXsJZom-30Mz1hA1eqFsiNpR1wQ
- Pinzón Hernández, L. D., & Almeida Buitrago, O. (21 de Mayo de 2010). Diseño, Contrucción y Puesta En Marcha De Un Modelo De Tratamiento Para Las Aguas Residuales Generadas En La Producción de Panela (Tesis Pregrado). Bucaramanga, Santander, Colombia. Recuperado el 25 de Septiembre de 2020, de <http://www.panelamonitor.org/media/docrepo/document/files/disenio-construccion-y-puesta-en-marcha-de-un-modelo-de-tratamiento-para-las-aguas-residuales-generadas-en-la-producc.pdf>
- Portilla Benavente, E. M. (2019). Sistema integrado tanque séptico y humedal de flujo horizontal para el tratamiento de agua residual doméstica (Tesis pregrado). Lima, Perú. Recuperado

el 3 de Noviembre de 2020, de
<http://190.119.243.88/bitstream/handle/UNALM/4417/portilla-benavente-evelyn-milagros.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Presidencia de la República. (Septiembre de 2011). *Constitución Política Colombia*. Recuperado el 8 de Septiembre de 2019, de
<http://wsp.presidencia.gov.co/Normativa/Documents/Constitucion-Politica-Colombia.pdf>

Prieto Parisaca, A., & Velasquez Ponce, V. R. (2018). Diseño, construcción y evaluación de un reactor de filtro anaerobio de flujo ascendente (FAFA) a nivel de laboratorio para el tratamiento de agua residual doméstica (Tesis pregrado). Arequipa, Perú. Recuperado el 16 de Noviembre de 2019, de <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/6086>

PureWater Colombia SAS. (15 de Marzo de 2018). *¿Qué es el pH del agua?* Recuperado el 18 de Octubre de 2020, de [https://purewater.com.co/que-es-el-ph-del-agua/#:~:text=El%20pH%20es%20una%20de,iones%20de%20hidr%C3%B3geno%20\(H%20%2B\)](https://purewater.com.co/que-es-el-ph-del-agua/#:~:text=El%20pH%20es%20una%20de,iones%20de%20hidr%C3%B3geno%20(H%20%2B))

Rabat Blázquez, J. (Junio de 2016). Análisis de los modelos de diseño de los sistemas naturales de depuración. España. Recuperado el 12 de Marzo de 2020, de https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/57213/1/Analisis_de_los_modelos_de_diseno_de_los_sistemas_na_Rabat_Blazquez_Jorge.pdf

Ramírez Burgos, L. I., & Durán Domínguez, M. d. (2008). *Demanda Química de Oxígeno de muestras acuosas* (Vol. I). México D.F: UNAM. Recuperado el 16 de Octubre de 2020

Ramírez Rojas, D. A. (28 de Mayo de 2016). *Plan de Desarrollo 2016-2019*. Recuperado el 22 de Mayo de 2020, de

<http://www.alcaldiadepiedecuesta.gov.co/MiMunicipio/ProgramadeGobierno/Plan%20deDesarrollo%202016-2019.pdf>

Ramos, A., Prieto, J. M., Cárdenas, D. M., & Bernal, M. S. (2016). Implementación de un sistema de fitorremediación en zona aledaña a reserva forestal protectora El Malmo, Boyacá, Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, VII(1), 93-103. Recuperado el 17 de Noviembre de 2019, de <https://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/riaa/article/view/1540/1861>

Remtavares. (2 de Febrero de 2008). *Los metales pesados en las aguas residuales*. Recuperado el 29 de Noviembre de 2020, de <https://www.madrimasd.org/blogs/remtavares/2008/02/02/83698>

Rodriguez Figueroa, K. (2019). Diagnóstico de las Condiciones de Diseño, Construcción y Operación de Las Plantas de Tratamiento de Aguas Residual de la Vereda la Florida y Del Centro De Sacrificio Del Municipio De Piendomó (Tesis Pregrado). Santiago de Cali, Colombia. Recuperado el 18 de Noviembre de 2019, de <https://red.uao.edu.co/bitstream/10614/11790/4/T08873.pdf>

Rodríguez Rodríguez, S. D., & Vargas Niño, Y. (2019). Evaluación del potencial de humedales artificiales piloto, implementados con la especie *Heliconia psittacorum*, en la remediación de aguas residuales domésticas de bajo caudal para zonas rurales del piedemonte llanero. Villavicencio, Colombia. Recuperado el 20 de Noviembre de 2019, de <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/16743/2019sararodriguez.pdf?sequence=13&isAllowed=y>

Rodriguez, C. H. (31 de Agosto de 2007). *Tensoactivos Aniónicos en Agua - Método SAAM*. Recuperado el 15 de Octubre de 2020, de

<http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/Tensoactivos+en+agua%2C+m%C3%A9todo+SAAM..pdf/d0859c8f-b5c4-4125-98eb-f157a72cf830>

Rosero Carvajal, E. J. (2018). *Repositório Institucional Universidad de Manizales*. Recuperado el 15 de Noviembre de 2019, de <http://ridum.umanizales.edu.co:8080/xmlui/handle/6789/3591>

Sánchez Gil, L. F., & Vélez Yermis, F. (Agosto de 2016). Diseño y evaluación de un sistema pilito para la descontaminación de aguas residuales generadas en la UFPSO. empleando las especies *COSTUS SPICATUS* y *HELICONIA PSITTACORUM*. Ocaña, Colombia. Recuperado el 18 de Noviembre de 2019

Sánchez, J. (14 de Julio de 2017). Saneamiento descentralizado y reutilización sustentable de las aguas residuales municipales en México. *Sociedad y Ambiente*(5), 119-143. Obtenido de <http://www.scielo.org.mx/pdf/sya/n14/2007-6576-sya-14-119.pdf>

Sánchez, J., Peña, E., Madera, C., & Medina, J. (Diciembre de 2013). *Bioprospección de plantas nativas para su uso en procesos de biorremediación: Caso Heliconia Psittacorum (Heliconiaceae)*. Recuperado el 13 de Mayo de 2020, de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0370-39082013000400004

Sardiñas Peña, O., & Pérez Cabrera, A. (2004). Determinación de nitrógeno amoniacal y total en aguas de consumo y residuales por el método del fenato. *Revista Cubana de Higiene y Epidemiología*, 42(2). Recuperado el 10 de Octubre de 2020, de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1561-30032004000200002

- Severiche, C., Castillo, M., & Acevedo, R. (2013). *Manual de Métodos Analíticos para la Determinación de Parámetros Fisicoquímicos Básicos en Aguas*. Cartagena de Indias: eumed.net. Recuperado el 17 de Octubre de 2020
- Sosa Rodriguez, F. M. (Enero de 2013). Cultivo del género *Heliconia*. 34(1), 24-32. Recuperado el 30 de Noviembre de 2020, de <http://scielo.sld.cu/pdf/ctr/v34n1/ctr04113.pdf>
- Tilley, E., & Ulrich, L. (2018). *Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente*. Recuperado el 17 de Noviembre de 2020, de SSWM: <https://sswm.info/es/gass-perspective-es/tecnologias-de/tecnologias-de-saneamiento/recoleccion-y-almacenamiento/filtro-anaerobio-de-flujo-ascendente>
- Torres Rojas, A., & Claros Ortiz, J. P. (Junio de 2017). Evaluación de dos lechos filtrantes anaeróbicos de flujo ascendente en guadua (*Angustifolia Kunth*) para el tratamiento de las aguas residuales de la Universidad SurColombiana -Sede Pitalito. Pitalito Huila, Colombia. Recuperado el 17 de Noviembre de 2019
- Ulloa, A., & Gómez, S. (Abril de 2007). *Proyecto de Investigación Geológica E Hidrogeologica en La Region Central Del Departamento De Sanatnder*. Recuperado el 1 de Septiembre de 2020, de <http://recordcenter.sgc.gov.co/B10/22005005024661/Documento/pdf/2105246611101000.pdf>
- Universidad Santo Tomás. (10 de Octubre de 2017). *Acuerdo N° 42*. Recuperado el 6 de Julio de 2020, de http://gestionambiental.usta.edu.co/images/Acuerdo_No._42_-_Pol%C3%ADtica_Ambiental.pdf

Universidad Santo Tomás. (2018). *Estatuto Orgánico*. Recuperado el 25 de Julio de 2020, de [http://www.usta.edu.co/images/documentos/documentos-](http://www.usta.edu.co/images/documentos/documentos-institucionales/estatutos/estatuto-organico.pdf)

[institucionales/estatutos/estatuto-organico.pdf](http://www.usta.edu.co/images/documentos/documentos-institucionales/estatutos/estatuto-organico.pdf)

Universidad Santo Tomás. (25 de Junio de 2019). *Acuerdo N° 29*. Recuperado el 15 de Agosto de 2020, de [http://www.ustabuca.edu.co/images/documentos/documentos-](http://www.ustabuca.edu.co/images/documentos/documentos-institucionales/politicas/Polit_Nacional-Respon-Social-Universitaria-Acuerdo%20No29-Santoto-Bucaramanga.pdf)

[institucionales/politicas/Polit_Nacional-Respon-Social-Universitaria-Acuerdo%20No29-Santoto-Bucaramanga.pdf](http://www.ustabuca.edu.co/images/documentos/documentos-institucionales/politicas/Polit_Nacional-Respon-Social-Universitaria-Acuerdo%20No29-Santoto-Bucaramanga.pdf)

Valencia, E., Silva, I., & Narváez, C. (2010). Sistema Descentralizados Integrado y Sostenibles para el Tratamiento de Aguas Residuales Domesticas. *Ingeniería y Región*, 65-72. Recuperado el 12 de octubre de 2019, de <https://core.ac.uk/reader/229705940>

Vasquez Aleman, J. P., & Vargas Martinez, G. (2018). *Aprovechamiento de lodos planta de tratamiento en aguas residuales municipio de Funza, como insumo de cultivo y mejoramiento del suelo (Tesis pregrado)*. Recuperado el 15 de Noviembre de 2019, de <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/16425/1/Trabajo%20de%20Grado%20-%20%20Lodos%20Funza.pdf>

Weather Spark. (2020). *El Clima Promedio en Piedecuesta*. Recuperado el 13 de Agosto de 2020, de [https://es.weatherspark.com/y/24370/Clima-promedio-en-Piedecuesta-Colombia-](https://es.weatherspark.com/y/24370/Clima-promedio-en-Piedecuesta-Colombia-durante-todo-el-a%C3%B1o)

[durante-todo-el-a%C3%B1o](https://es.weatherspark.com/y/24370/Clima-promedio-en-Piedecuesta-Colombia-durante-todo-el-a%C3%B1o)

Yepes Polanía, C. M. (2018). Tratamiento de aguas grises de lavandería por medio de un reactor anaerbio de flujo ascendente con manto de lodos (UASB) híbrido. Bogotá, Colombia. Recuperado el 16 de Noviembre de 2019, de <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/20647/YepesPolaniaCarlaYepes2018.pdf?sequence=2&isAllowed=y>