



CARTA DE AUTORIZACIÓN

CÓDIGO

AP-BIB-FO-06

VERSIÓN

1

VIGENCIA

2014

PÁGINA

1 de 1

Neiva, 5 de noviembre de 2021

Señores

CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA

Ciudad

Los suscritos: Pablo Inti Polanía Beltrán, con C.C. No. 1075262783 y Cristhian Alexander Bahamón Cuéllar, con C.C. No. 1075290295, Autor(es) de la tesis y/o trabajo de grado titulado “Diseño de un sistema de saneamiento sostenible utilizando humedales artificiales de flujo subsuperficial en el municipio de Íquira – Huila como alternativa a un sistema de saneamiento convencional”, presentado y aprobado en el año 2021 como requisito para optar al título de ingeniero civil; Autorizamos al CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN de la Universidad Surcolombiana para que, con fines académicos, muestre al país y el exterior la producción intelectual de la Universidad Surcolombiana, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

- Los usuarios puedan consultar el contenido de este trabajo de grado en los sitios web que administra la Universidad, en bases de datos, repositorio digital, catálogos y en otros sitios web, redes y sistemas de información nacionales e internacionales “open access” y en las redes de información con las cuales tenga convenio la Institución.
- Permita la consulta, la reproducción y préstamo a los usuarios interesados en el contenido de este trabajo, para todos los usos que tengan finalidad académica, ya sea en formato Cd-Rom o digital desde internet, intranet, etc., y en general para cualquier formato conocido o por conocer, dentro de los términos establecidos en la Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, Decreto 460 de 1995 y demás normas generales sobre la materia.
- Continúo conservando los correspondientes derechos sin modificación o restricción alguna; puesto que, de acuerdo con la legislación colombiana aplicable, el presente es un acuerdo jurídico que en ningún caso conlleva la enajenación del derecho de autor y sus conexos.

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, “Los derechos morales sobre el trabajo son propiedad de los autores”, los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.

Pablo Inti Polanía Beltrán:

Cristhian Alexander Bahamón Cuéllar:

Firma:

Pablo Polanía

Firma:

Cristhian Bahamón

Vigilada Mineducación



TÍTULO COMPLETO DEL TRABAJO:

Diseño de un sistema de saneamiento sostenible utilizando humedales artificiales de flujo subsuperficial en el municipio de Íquira – Huila como alternativa a un sistema de saneamiento convencional

AUTOR O AUTORES:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
Polania Beltran	Pablo Inti
Bahamon Cuellar	Cristhian Alexander

DIRECTOR Y CODIRECTOR TESIS:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
Duarte Toro	Mauricio

ASESOR (ES):

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre

PARA OPTAR AL TÍTULO DE: Ingeniero Civil

FACULTAD: Ingeniería

PROGRAMA O POSGRADO: Programa de ingeniería de Civil

CIUDAD: Neiva

AÑO DE PRESENTACIÓN: 2021

NÚMERO DE PÁGINAS: 112

TIPO DE ILUSTRACIONES (Marcar con una X):

Diagramas Fotografías ___ Grabaciones en discos ___ Ilustraciones en general Grabados ___ Láminas ___ Litografías ___ Mapas ___ Música impresa ___ Planos Retratos ___ Sin ilustraciones ___ Tablas o Cuadros

SOFTWARE requerido y/o especializado para la lectura del documento: Ninguno

Vigilada Mineducación

La versión vigente y controlada de este documento, solo podrá ser consultada a través del sitio web Institucional www.usco.edu.co, link Sistema Gestión de Calidad. La copia o impresión diferente a la publicada, será considerada como documento no controlado y su uso indebido no es de responsabilidad de la Universidad Surcolombiana.



MATERIAL ANEXO: Ninguno

PREMIO O DISTINCIÓN (En caso de ser LAUREADAS o Meritoria):

PALABRAS CLAVES EN ESPAÑOL E INGLÉS:

<u>Español</u>	<u>Inglés</u>	<u>Español</u>	<u>Inglés</u>
1. Sistemas de tratamiento	Treatment systems	6. _____	_____
2. Aguas residuales	Wastewater	7. _____	_____
3. Alcantarillados	Sewers	8. _____	_____
4. Plantas depuradoras	Treatment plants	9. _____	_____
5. Sistema lagunar	Lagoon system	10. _____	_____

RESUMEN DEL CONTENIDO: (Máximo 250 palabras)

Las inversiones en proyectos de saneamiento básico son escasas, por lo que las ciudades y municipios pequeños tienen problemas de contaminación del agua. Por otra parte, los sistemas de tratamiento de aguas residuales en áreas urbanas y rurales se caracterizan por ser centralizados, de alto costo, exigente operación y mantenimiento. Aunque se construyen alcantarillados y plantas depuradoras centralizadas en estas zonas, estos no siempre son viables. También es común encontrarse sistemas descentralizados en áreas rurales, siendo los tanques sépticos los más comunes. Esta problemática genera que las aguas residuales de las cabeceras municipales y áreas rurales del departamento del Huila se viertan en su mayoría en las fuentes hídricas sin ningún tratamiento, provocando problemas de salud y contaminación. Como alternativa a lo anterior, en los últimos años se han propuesto diferentes tipos de sistemas, los cuales son no convencionales. En el presente proyecto se propone un sistema de saneamiento sostenible utilizando humedales artificiales de flujo subsuperficial. Se presentará el diseño de cada una de las estructuras que lo conforman, anexando planos, presupuesto, y un manual de operación y mantenimiento. Finalmente, utilizando una matriz de selección se comparará en diversos aspectos con un sistema lagunar, debido a que este es uno de los sistemas más utilizados en la región.

ABSTRACT: (Máximo 250 palabras)

Investments in basic sanitation projects are scarce, which is why small cities and municipalities have water pollution problems. On the other hand, wastewater treatment



systems in urban and rural areas are characterized by being centralized, high-cost, demanding operation and maintenance. Although sewers and centralized treatment plants are built in these areas, they are not always viable. It is also common to find decentralized systems in rural areas, with septic tanks being the most common. This problem causes the wastewater from the municipal capitals and rural areas of the Huila department to be discharged mostly into water sources without any treatment, causing health problems and contamination. As an alternative to the above, in recent years different types of systems have been proposed, which are unconventional. This project proposes a sustainable sanitation system using subsurface flow constructed wetlands. The design of each of the structures that comprise it will be presented, attaching plans, budget, and an operation and maintenance manual. Finally, using a selection matrix, it will be compared in various aspects with a lagoon system, since this is one of the most widely used systems in the region.

APROBACION DE LA TESIS

Nombre Presidente Jurado: JAIME IZQUIERDO BAUTISTA

Firma:

Nombre Jurado: JAIME IZQUIERDO BAUTISTA

Firma:

Nombre Jurado: GUISEL ALEXANDRA LOPEZ RODRIGUEZ

Firma:

Diseño de un sistema de saneamiento sostenible utilizando humedales artificiales de flujo subsuperficial en el municipio de Íquira – Huila como alternativa a un sistema de saneamiento convencional

Presentado por:

Cristhian Alexander Bahamón Cuéllar

Pablo Inti Polanía Beltrán

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de **Ingeniero Civil**

Director (a):

Mauricio Duarte Toro, M.Sc.

Línea de Investigación:

Estructuras Hidráulicas

Universidad Surcolombiana

Facultad de Ingeniería, Programa de Ingeniería Civil

Neiva, Colombia

2021

Nota de aceptación

Presidente del jurado

Jurado

Jurado

Neiva, julio 2021

Agradecimientos

Queremos agradecer al M.Sc. Mauricio Duarte Toro, por ser el director de este proyecto, quién nos aportó su conocimiento para el buen desarrollo del presente trabajo.

También queremos agradecer a cada uno de los docentes del programa de ingeniería civil quienes hicieron parte en nuestra formación integral, no solo como futuros profesionales, sino, ante todo, como seres humanos.

Finalmente, queremos agradecer a nuestras familias y seres queridos, por apoyarnos a lo largo de estos años; pero sobre todo a nuestros padres que, con su constante guía y cariño, nos condujeron hasta aquí.

Resumen

En Colombia, las inversiones en proyectos de saneamiento básico son escasas, por lo que las ciudades y municipios pequeños tienen problemas de contaminación del agua. Por otra parte, los sistemas de tratamiento de aguas residuales en áreas urbanas y rurales se caracterizan por ser centralizados, de alto costo, exigente operación y mantenimiento. Además, en zonas rurales, la cobertura en alcantarillado y tratamiento de aguas residuales es baja. La construcción de alcantarillados en estas zonas resulta más costosa que en áreas urbanas; y los sistemas de tratamiento centralizados convencionales son más difíciles de operar y mantener. Aunque se construyen alcantarillados y plantas depuradoras centralizadas en estas zonas, estos no siempre son viables. También es común encontrarse sistemas descentralizados en áreas rurales, siendo los tanques sépticos los más comunes.

Esta problemática genera que las aguas residuales de las cabeceras municipales y áreas rurales del departamento del Huila se viertan en su mayoría en las fuentes hídricas sin ningún tratamiento, provocando problemas de salud y contaminación. Como alternativa a lo anterior, en los últimos años se han propuesto diferentes tipos de sistemas, los cuales son no convencionales. En el presente proyecto se propone un sistema de saneamiento sostenible utilizando humedales artificiales de flujo subsuperficial. Se presentará el diseño de cada una de las estructuras que lo conforman, anexando planos, presupuesto, y un manual de operación y mantenimiento. Finalmente, utilizando una matriz de selección se comparará en diversos aspectos con un sistema lagunar, siendo este muy usado en la región.

Palabras clave: agua, sistemas de tratamiento, aguas residuales, alcantarillados, plantas depuradoras, sistema lagunar.

Abstract

In Colombia, investments in basic sanitation projects are scarce, which is why cities and small municipalities have water pollution problems. On the other hand, wastewater treatment systems in urban and rural areas are centralized, high-cost, demanding operation and maintenance. Furthermore, in rural areas, coverage in sewerage and wastewater treatment is low. The construction of sewers in these areas is more expensive than in urban areas, and conventional centralized treatment systems are more challenging to operate and maintain. Although sewers and centralized treatment plants are built in these areas, they are not always viable. It is also common to find decentralized systems in rural areas, where septic tanks are the most common.

All this causes the wastewater from the municipalities and rural areas of the Huila department to be discharged mostly into water sources without any treatment, causing pollution and health problems. As an alternative, in recent years, different types of systems have been proposed, which are unconventional. This project proposes a sustainable sanitation system using subsurface flow constructed wetlands. The design of each of the structures that comprise it will be presented, attaching plans, budget, and an operation and maintenance manual. Finally, using a selection matrix, it will be compared in different aspects with a lagoon system widely used in the region.

Keywords: water, treatment systems, wastewater, sewers, treatment plants, lagoon system.

Tabla de contenido

	Pág.
Agradecimientos	3
Resumen	iv
Abstract	v
Tabla de contenido	vi
Lista de figuras	viii
Lista de tablas	ix
Listado de anexos	x
Capítulo 1. Introducción	11
1.1 Descripción del problema	12
1.2 Antecedentes	13
1.3 Justificación	15
1.4 Objetivos	18
1.4.1 Objetivo general	18
1.4.2 Objetivos específicos	18
Capítulo 2. Marco teórico	20
2.1 Generalidades	20
2.1.1 Contexto territorial	20
2.1.2 Contexto demográfico	22
2.2 Tratamiento de aguas residuales	22
2.2.1 Principales contaminantes	23
2.2.3 Tratamiento primario	25
2.2.4 Tratamiento secundario	26
2.2.5 Tecnologías de tratamiento	29
Capítulo 3. Metodología	33
3.1 Caracterización de las aguas residuales	34
3.2 Diseño del sistema de saneamiento sostenible	36
3.2.1 Proyección de la población.	36
3.2.2 Caudal de diseño.	38
3.2.3 Diseño de la criba	41
3.2.4 Diseño de desarenador.	46
3.2.5 Diseño de vertedero Sutro.	48
3.2.6 Diseño de tanque Imhoff.	49
3.2.7 Humedal artificial de flujo subsuperficial	50

3.3	Manual de operación y mantenimiento	55
3.4	Comparación de las alternativas	56
3.4.1	Calificación de los procesos de tratamiento	58
3.4.2	Evaluación de alternativas	59
Capítulo 4. Resultados y análisis de resultados		60
4.2	Diseño de sistema sostenible de tratamiento de aguas residuales	62
4.2.1	Estimación de la población	62
4.2.2	Estimación del caudal de diseño	63
4.2.3	Diseño del interceptor	64
4.2.4	Diseño del canal de entrada	65
4.2.5	Diseño de la criba	66
4.2.6	Diseño desarenador	68
4.2.7	Diseño vertedero Sutro	69
4.2.8	Diseño tanque Imhoff	70
4.2.9	Diseño de humedal artificial de flujo subsuperficial	71
4.3	Manual de operación y mantenimiento	75
4.4	Comparación de alternativas	76
Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones		78
5.1	Conclusiones	78
5.2	Recomendaciones	79
Bibliografía		80

Lista de figuras

	Pág.
Figura 2 – 1: Localización geográfica del municipio de Íquira	21
Figura 2 – 2: Disposición de un humedal subsuperficial horizontal	28
Figura 3 – 1: Metodología empleada.	33
Figura 3 – 2: Puntos de vertimiento de recolección de muestras.	35
Figura 3 – 3: Diferentes formas de rejillas.	43
Figura 3 – 4: Relaciones hidráulicas en tuberías.	45
Figura 3 – 5: Posibles ubicaciones del proyecto.	51

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 2 – 1: Generalidades de las tecnologías sostenibles en sus diferentes etapas	30
Tabla 2 – 2: Sistemas naturales vs sistemas convencionales	31
Tabla 3 – 1: Datos de censos anteriores en el Municipio de Íquira.	37
Tabla 3 – 2: Dotación neta máxima según la altura promedio sobre el nivel del mar	39
Tabla 3 – 3: Parámetros de rejillas	42
Tabla 3 – 4: Coeficiente de pérdidas para rejillas	43
Tabla 3 – 5: Datos para diseño de desarenador	48
Tabla 3 – 6: Parámetros de diseño tanque Imhoff	49
Tabla 3 – 7: Características del medio según su tamaño efectivo	52
Tabla 3 – 8: Criterios de carga para humedales de flujo subsuperficial	52
Tabla 4 – 1: Cargas contaminantes del vertimiento N°1 “Lagartija”	59
Tabla 4 – 2: Cargas contaminantes del vertimiento N°2 “Guacharaca”	60
Tabla 4 – 3: Cargas contaminantes del vertimiento N°3 “Conejo”	60
Tabla 4 – 4: Estimación de la población	62
Tabla 4 – 5: Caudales de diseño	63
Tabla 4 – 6: Diámetro tubería en interceptor	63
Tabla 4 – 7: Relaciones hidráulicas en el interceptor para distintos caudales	64
Tabla 4 – 8: Dimensionamiento del canal	65
Tabla 4 – 9: Datos para diseño de la criba	65
Tabla 4 – 10: Diseño de criba	66
Tabla 4 – 11: Resumen diseño criba	66

Tabla 4 – 12: Pérdida de carga en rejillas	67
Tabla 4 – 13: Diseño de Desarenador	67
Tabla 4 – 14: Resultados diseño de vertedero Sutro	69
Tabla 4 – 15: Resultados diseño de tanque Imhoff	69
Tabla 4 – 16: Dimensiones del humedal para el tratamiento de aguas residuales	72
Tabla 4 – 17: Rendimientos esperados del humedal	73
Tabla 4 – 18: Matriz de evaluación de alternativas	75

Listado de anexos

Anexo A: Cargas contaminantes de las empresas administradoras de alcantarillado.

Anexo B: Planos preliminares, tanque Imhoff y humedales artificiales de flujo subsuperficial.

Anexo C: Presupuesto total del sistema de tratamiento sostenible.

Anexo D: Manual de operación mantenimiento.

Anexo E: Matriz de calificación de cada uno de los atributos para las dos alternativas de tratamiento.

Capítulo 1. Introducción

El presente trabajo consta de 5 capítulos, comenzando con El Capítulo 1, (Introducción), donde se presenta la descripción del problema, los antecedentes, la justificación y los objetivos del proyecto.

El capítulo 2 (Marco teórico) está dividido en dos partes; en primer lugar, presenta los conceptos generales del municipio de Íquira, describiendo las condiciones de población y ubicación, en segundo lugar, habla sobre el tratamiento de las aguas residuales, en qué consiste, sus niveles de tratamiento y, su estructura general.

El capítulo 3 (Metodología), como su nombre lo indica, propone la metodología para realizar el diseño de un sistema de saneamiento sostenible conformado por humedales subsuperficiales para el municipio de Íquira, Huila. Este capítulo está dividido en cuatro etapas; primero, la caracterización de las aguas residuales, inicio de todo el proceso; segundo, la realización del diseño de un sistema de saneamiento sostenible, conformado por una criba, desarenador, tanque Imhoff y humedales artificiales de flujo subsuperficial; tercero, el manual de operación y mantenimiento; y por último, la comparación de la alternativa planteada frente a otra de tipo convencional y muy usada en la región, como lo sería el sistema lagunar; definiendo diferentes aspectos que abordan lo técnico, económico y ambiental y se define el cómo influyen en la selección.

En el capítulo 4 (Resultados y análisis de resultados) se disponen los resultados y sus respectivos análisis, allí se dará cumplimiento a los objetivos, realizando la caracterización de las aguas residuales, la proyección de la población y la estimación de los caudales, luego, se llevará a cabo el diseño de cada una de las estructuras que conforman el sistema, entregando finalmente planos, presupuesto total y un manual de operación y mantenimiento del sistema que están adjuntos en los anexos. Una vez acabado el diseño, se entregará la comparación de las dos alternativas mediante una matriz de selección planteada por la Universidad Nacional Autónoma de México (2013). Finalmente se proporcionará una serie de conclusiones y recomendaciones, reflejado en el capítulo 5.

Los anexos van desde el Anexo A hasta el Anexo E, los componentes de cada uno son los siguientes: El Anexo A consiste en mostrar los parámetros fisicoquímicos de las aguas residuales de Íquira. El Anexo B muestra los planos de cada una de las estructuras del sistema. El Anexo C enseña el presupuesto total que tendrá el sistema de saneamiento diseñado. El Anexo D es el manual de operación y mantenimiento de cada una de las estructuras del sistema. El Anexo E muestra la matriz de calificación de cada uno de los atributos para las dos alternativas de tratamiento.

1.1 Descripción del problema

Colombia es uno de los países con más recursos naturales, especialmente cuando de fuentes hídricas se habla. Sin embargo, las inversiones en los proyectos de saneamiento básico son escasas, por lo que las ciudades y municipios pequeños a menudo tienen problemas de contaminación del agua. Los sistemas de tratamiento de aguas residuales diseñados y construidos en áreas urbanas y rurales se caracterizan por ser centralizados, de alto costo y exigente operación y mantenimiento (Valencia & Narváez, 2010).

En las zonas rurales, la cobertura en alcantarillado y tratamiento de aguas residuales es baja. La construcción de alcantarillados en áreas rurales es relativamente más costosa que en áreas urbanas; y los sistemas de tratamiento centralizados convencionales son más difíciles de operar y mantener. Aunque en las zonas rurales se construyen alcantarillados y plantas depuradoras centralizadas, estos no son siempre viables por razones topográficas y económicas. Igualmente, es usual encontrarse con sistemas descentralizados en estas zonas, siendo los tanques sépticos el caso más común (Valencia & Narváez).

Las aguas residuales que se generan en las cabeceras municipales y en las áreas rurales del departamento del Huila se vierten en su mayoría a las fuentes hídricas sin ningún tratamiento, provocando problemas de salud y contaminación. Como alternativa a lo anterior, en los últimos años se han propuesto diferentes tipos de sistemas, los cuales tienen en común ser no convencionales. En el presente proyecto se propone un sistema de saneamiento sostenible utilizando humedales artificiales de flujo subsuperficial. Para lo cual se presentará el diseño de cada una de las estructuras que lo conforman, anexando planos, presupuesto y un manual de operación y mantenimiento. Al final, utilizando una matriz de selección se comparará en

diversos aspectos técnicos, económicos y ambientales con un sistema lagunar, siendo este de tipo convencional y muy usado en la región.

Se espera que este trabajo, sirva como una base para futuras investigaciones en el estudio de sistemas de tratamiento no convencionales, para que los municipios del departamento del Huila cuenten con más alternativas para la protección de las fuentes hídricas que bañan la región.

1.2 Antecedentes

La utilización de los humedales para mejorar la calidad del agua no es reciente, su uso para la recepción de aguas residuales se remonta a comienzos del siglo XX. (Arteaga-Cortez et al, 2017) Los humedales y las ciénagas se consideraron como los mejores receptores de agua, ya que realizan un papel purificador (OMS, 1999). Estos son capaces de retener sedimentos, nutrientes y tóxicos de forma natural que puedan estar contenidos en los sedimentos e igualmente, transformar los nutrientes contenidos mediante procesos biológicos y químicos propios de las plantas y sus microorganismos (Tabilo-Valdivieso, 1999).

Desde hace más de un siglo se utilizan plantas para el tratamiento de aguas residuales. Los primeros trabajos para el empleo de humedales de flujo subsuperficial se generaron en el Max Planck Institute de Alemania, realizados por K. Seidel en 1953, en donde buscaba disminuir la fertilización excesiva, la contaminación y la acumulación de sedimentos de las aguas por medio de plantas que fueran apropiadas para ello (Brix, 1995, Arteaga-Cortez et al, 2017). Posteriormente, en 1974, siguiendo sus directrices, se construyó en Alemania el primer humedal artificial europeo a escala real. Aunque, los humedales artificiales de flujo superficial comenzaron a emplearse a principios de la década de 1970 en algunos estados de Estados Unidos a modo de tratamientos terciarios, recibiendo aguas ya tratadas previamente (Salas et al, 2007).

En los humedales artificiales los mecanismos de depuración del agua se fundamentan en la eliminación de sólidos en suspensión mediante fenómenos de sedimentación y filtración, que se facilitan por el paso del agua a través del conjunto formado por el soporte de gravas, los tallos y raíces de las plantas acuáticas. La materia orgánica retenida, por acción de microorganismos, se

transforma en compuestos más simples, siendo más fáciles de asimilar por el ecosistema artificial recreado en el humedal. El oxígeno requerido por los microorganismos es proveído no sólo por los procesos fotosintéticos que pueden darse en superficie, sino principalmente por las raíces de las plantas (Lozano-Rivas, 2012, p.185).

Diversos trabajos realizados sobre el tema exponen a los humedales como un sistema eficiente para la purificación de aguas residuales, Fernández et al. (2015) exponen que los humedales sirven principalmente para la remoción de nitrógeno y fósforo; en el caso del nitrógeno corresponden a procesos biológicos y fisicoquímicos, mientras que para el fósforo son procesos de acumulación de sedimentos. También advierten sobre los límites que puede tener un humedal, afirmando que solamente si el aporte de agua residual está controlado dentro de los límites de depuración total que puede ofrecer el humedal, podría ser tolerada su aplicación. Concluyendo que los resultados obtenidos muestran la eficacia del método para la depuración de aguas residuales de una forma natural y económica, con un gasto mínimo de energía y un mantenimiento relativamente sencillo. Por otro lado, Lara (1999) afirma que los humedales artificiales son una tecnología viable para la depuración de aguas residuales, especialmente si éstas son de origen urbano, y pueden llegar a tener un gran futuro en los países con menos recursos económicos con climas tropicales. A esta misma conclusión llegan Silva & Zamora (2005), debido a sus bajos costos en instalación, energía y suministro, operación y mantenimiento.

En Colombia se han realizado diversos estudios en este campo, como los realizados por Granados (2018) y Torres & Marín (2012), llegando a la conclusión que un humedal artificial puede ser una solución adecuada como tratamiento de aguas residuales, logrando una eficiencia de remoción bastante alta y en buenas condiciones de operación y mantenimiento adecuado, resulta ser en sí un tratamiento biológico de alta eficiencia en términos de remoción de materia orgánica. Por otro lado, en la parte ambiental afirman que el proyecto genera varios impactos positivos, tales como el incremento en la calidad del agua superficial y subterránea, la disminución en la contaminación del suelo y la reducción de emisiones de gases efecto invernadero. Entre los impactos negativos que expone Granados están la remoción de cobertura vegetal por excavación, la remoción de suelo por excavación y la generación de residuos por

mantenimiento y abandono. También se conocen estudios desarrollados en la Universidad Tecnológica de Pereira para evaluar la eficiencia y factibilidad de la utilización de algunos tipos de humedales en pequeñas comunidades del municipio (Villegas, Guerrero, & Castaño, 2006). Estos condujeron a la implementación de una planta de tratamiento de aguas residuales, la cual incluye humedales de flujo subsuperficial y cuya operación inició en 2003 arrojando buenos rendimientos. También se destacan las investigaciones realizadas en la utilización de humedales artificiales para el tratamiento de las aguas residuales en el país hechas por Arjona (1987) y Baena (1986), quienes utilizaron diferentes especies de pastos con la técnica de la película nutriente para el tratamiento de aguas residuales domésticas, y el de López (1998) quien estudia varias especies de pastos para el tratamiento de aguas residuales de producción de café, ambos con resultados alentadores (Artunduaga, 2006).

En el Huila, la Corporación Autónoma Regional del Alto Magdalena - CAM, es la encargada del seguimiento e inspección de las 20 plantas existentes en el departamento. De las cuales el 23% son lagunas aerobias facultativas o de oxidación, mientras que el otro 77% son sistemas compuestos por reactores, digestores, filtros anaerobios o tanques Imhoff. Se destaca que el 46% de los municipios del departamento no cuentan con plantas de tratamiento de aguas residuales, entre los que se tienen los municipios de Íquira, Neiva, Pitalito, Garzón y La Plata, siendo estos cuatro últimos, los municipios que más contaminación aportan con un 72% (CAM, 2017). En el transcurso de los años el Departamento ha ido adelantando estudios y diseños previos de plantas de tratamiento de aguas residuales, sin embargo, no hay estudios sobre un sistema de saneamiento sostenible utilizando humedales artificiales de flujo subsuperficial, como el propuesto aquí.

1.3 Justificación

Según el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2018), el Departamento de Huila es el segundo departamento del país con mayor participación en el volumen total de agua demandada; por ello la necesidad de conservar la calidad de las fuentes hídricas de la región. Parte de esta

calidad proviene del correcto tratamiento de las aguas residuales, ya que esto es un factor importante en la salud y la calidad de vida de la población.

Las aguas residuales son un componente crítico en el ciclo del agua y deben ser tomadas en cuenta durante todo el ciclo de gestión de esta; desde la captación, el tratamiento, la distribución, el uso, la recolección y el tratamiento posterior hasta su reutilización y retorno final al medio ambiente, donde se repone la fuente para las subsiguientes captaciones de agua. Las aguas residuales no tratadas tienen diversos impactos negativos en la salud humana, el medio ambiente y las actividades productivas, algunos de estos son: aumento de la carga de morbilidad, disminución de la biodiversidad, degradación de los ecosistemas acuáticos, reducción de la productividad industrial y agrícola, costos más altos del tratamiento del agua para su uso, entre otros. (UNESCO, 2017)

Siendo el ambiente sano parte de las necesidades básicas que el Estado está obligado a satisfacer (Unicef, 2007), el tratamiento del agua resulta un pilar fundamental para lograr este objetivo. Sin embargo, en el 2017, la UNESCO declaró que en Latinoamérica sólo 20% de las aguas residuales municipales e industriales eran tratadas. En Colombia, según el Departamento Nacional de Planeación (DPN, 2018), para el 2016 se trataban el 42,2% de las aguas residuales domésticas del país. En cuanto a las Plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR), la Superintendencia de Servicios Públicos en su informe de 2018, “Estudio Sectorial de los servicios públicos domiciliarios de Acueducto y Alcantarillado”, afirmó que únicamente el 48,2% de los municipios del país cuentan con estas, es decir que cerca del 52% no cuentan con un correcto desagüe de efluentes. En el caso del Huila, el 46% de los municipios no cuentan con tratamiento de aguas residuales. (Superservicios, S. d., 2018).

Colombia, como uno de los países impulsores de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y su agenda 2030, aprobada por la Asamblea General de Naciones Unidas en el 2015 (DPN, 2018), tiene entre sus metas dentro de esta agenda, lograr para el 2030 que el 68,6% de aguas residuales domésticas sean tratadas de manera segura. Ya que parte de sus objetivos dentro de la agenda de los ODS es prolongar el aprovechamiento de los recursos a lo largo de su ciclo de vida, esto se puede lograr aumentando el tratamiento de las aguas residuales para mejorar los índices de calidad de agua e incrementando la productividad hídrica del país.

Por su parte el municipio de Íquira en su Plan De Desarrollo (2020), tiene como visión municipal que sus habitantes gocen de una mejor calidad de vida y vivan en una sociedad responsable con el medio ambiente, estipulando como uno de los pilares del municipio la sostenibilidad para la planeación del territorio urbano y rural, con mecanismos que ayuden a mitigar los impactos al medio ambiente. Sobre la elaboración de una PTAR en el municipio, el gerente de las Empresas Públicas de Íquira, Sebastián Tamayo (2021), manifestó que la población del municipio de Íquira se vería beneficiada con su construcción, ya que descontaminaría la fuente receptora del municipio, que es el Río Íquira.

Resulta evidente la importancia de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR), que buscan eliminar los contaminantes que trae el agua proveniente de las descargas de agua residual tanto domiciliarias como industriales y devolverla, libre de organismos contaminantes a la corriente del cauce correspondiente (Amezquita y Bejarano, 2018). Este proyecto plantea la elaboración de un sistema que consiga devolver el agua usada en actividades antropogénicas de forma segura al ciclo natural, generando menores impactos ambientales. Existen varios tipos y niveles de tratamiento de aguas residuales cuya elección depende de la naturaleza de los contaminantes, de la carga de contaminación y del uso final anticipado del efluente.

La tendencia en la elaboración de sistemas para el tratamiento de aguas residuales en áreas metropolitanas ha evolucionado hacia sistemas de “hormigón y acero”, es decir, los llamados tratamientos convencionales. Estos sistemas demandan altos costos de energía y mano de obra, lo que puede suponer un gran costo para una comunidad pequeña. Sin embargo, frente a las costosas técnicas convencionales de tratamiento de aguas residuales existen una serie de sistemas alternativos basados en los mecanismos de depuración existentes en la naturaleza, denominados “sistemas de tratamiento naturales” en la cual la energía es tomada de la naturaleza misma (Mena, 2008). Dentro de estas alternativas para la depuración de aguas contaminadas se encuentran los humedales artificiales.

Estos sistemas, en comparación con otros tipos de tratamiento de aguas residuales, ofrecen diferentes ventajas, entre las cuales se destacan la sencillez operativa, ya que requiere de una necesidad mínima de personal, de equipos electromecánicos y de personal calificado (González,

2011). Además, el consumo energético es bajo, o incluso nulo si las aguas residuales a tratar pueden circular por gravedad hasta los humedales. Al carecer de equipos mecánicos no existe posibilidad de averías y ya que las aguas a tratar en los humedales de flujo subsuperficial no están expuestas al aire, la producción de olores es mínima (Salas et al, 2007, p.93). Los humedales de flujo subsuperficial cuentan con la gran ventaja de tener una vida útil amplia, lo que presenta igualmente un beneficio económico, su eficiencia es alta y no genera contaminación paisajística, por el contrario, contribuye a un embellecimiento del entorno por las plantas utilizadas (Moncada, 2016), y son capaces de tener una perfecta integración ambiental. Son estas razones las que hacen de estos sistemas una alternativa atractiva para comunidades pequeñas.

En el departamento del Huila las condiciones actuales del tratamiento de aguas residuales no son las más favorables, por ello, el presente trabajo “DISEÑO DE UN SISTEMA DE SANEAMIENTO SOSTENIBLE, UTILIZANDO HUMEDALES ARTIFICIALES DE FLUJO SUBSUPERFICIAL EN EL MUNICIPIO DE ÍQUIRA -HUILA COMO ALTERNATIVA A UN SISTEMA DE SANEAMIENTO CONVENCIONAL”, no es solo una alternativa para dar solución a la problemática ambiental en el municipio de Íquira, sino también una propuesta factible como alternativa a un sistema de saneamiento convencional, en el ámbito tanto económico como ecológico, y a la vez pertinente con las necesidades del entorno.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Diseñar un sistema de saneamiento sostenible conformado por cribado, desarenador, tanque Imhoff y humedales artificiales de flujo subsuperficial para el municipio de Íquira - Huila y contrastarlo con un sistema de saneamiento convencional.

1.4.2 Objetivos específicos

- Realizar la caracterización de las aguas residuales del municipio de Íquira - Huila.
- Diseñar las obras necesarias del sistema de saneamiento sostenible, según los requerimientos establecidos en el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS.

- Comparar el sistema de saneamiento sostenible con uno convencional, teniendo en cuenta criterios técnicos, ambientales y económicos.
- Elaborar un manual de mantenimiento y operación de las obras del sistema de saneamiento sostenible.

Capítulo 2. Marco teórico

En este capítulo se presentan los conceptos fundamentales para el desarrollo de este proyecto. Por un lado, aquellos relacionados al municipio de Íquira, como el contexto territorial y demográfico de este. Por otro lado, aquellos relacionados con el tratamiento de las aguas residuales, como el proceso al cual nos referimos y que abarca esta propuesta, conformado por un tratamiento preliminar, un tratamiento primario y un tratamiento secundario. Dentro de esto se incluirán también las tecnologías de tratamiento más importantes.

2.1 Generalidades

La actividad económica del municipio de Íquira corresponde a la estructura básica similar a la mayoría de los municipios del departamento del Huila, sustentado en la existencia de un sector primario, donde las actividades agropecuarias priman sobre las demás; un sector secundario inexistente por la ausencia total de transformación de materias primas y un sector terciario representado por la actividad comercial menor de los centros poblados y la prestación de los servicios públicos básicos de la comunidad (Secretaría de salud de Íquira, 2013).

2.1.1 Contexto territorial

Ubicación geográfica. El municipio de Íquira está localizado en el occidente del departamento del Huila. Su Cabecera Municipal queda a 75 Kilómetros de Neiva capital del departamento del Huila. Su extensión territorial es de 532 km². La precipitación anual promedio es de 1.600 mm, su altura es de 1400 m.s.n.m, la temperatura media en la cabecera municipal es de 22°C. (Secretaría de salud de Íquira, 2013). La ubicación del municipio dentro del Departamento del Huila será presentada en la figura 2 – 1.



Figura 2 – 1: Localización geográfica del municipio de Íquira

Fuente: Secretaría de salud de Íquira, 2013.

Fuentes hídricas. El municipio está bañado por dos ríos principales: el río Íquira, el cual cruza aproximadamente 3 Kilómetros al oriente del casco urbano. Este río está junto al río Pedernal, el afluente del río Yaguará, el cual es uno de los afluentes más importantes del río Magdalena en la subregión occidental del país. También se encuentra el río Callejón, formado por la confluencia de los ríos Pacarní y Yaguaracito, pasa aproximadamente 3 Kilómetros al suroriente de la cabecera municipal de Íquira. Otros ríos que atraviesan el municipio son: el río Yaguaracito, el río El Pato y el río San Francisco. Cerca del casco urbano del municipio cruzan dos quebradas que llevan agua permanente, además dentro del perímetro urbano se presentan varios zanjones que nacen allí y son de carácter intermitente (Secretaría de salud de Íquira, 2013).

Aspectos ambientales. Algunos ecosistemas estratégicos se han declarado zonas de reserva para la conservación y protección de los recursos naturales, debido a su importancia regional por su alta producción hídrica y diversidad biológica de flora y fauna silvestre. Su localización estratégica por la cercanía a las afluentes hídricas, además de una red vial interconectada a todos los municipios circunvecinos, muestra procesos de desarrollo ligados al crecimiento económico y social del municipio, pero en detrimento del medio ambiente, produciendo un bajo

aprovechamiento de sus recursos naturales sin procesos de prevención y manejo ambiental. (Secretaría de salud de Íquira, 2013)

2.1.2 Contexto demográfico

Población. Para el año 2019, la población del municipio de Íquira fue de 13.612 habitantes, el 17.70% (2.410) de población urbana y el 82.30% (11.202) de población rural (Departamento Nacional de Planeación, 2019). De acuerdo con la Secretaría de salud de Íquira (2013), el Municipio de Íquira cuenta con aproximadamente 2.415 viviendas, de las cuales 648 (26.83%) pertenecían al área urbana y 1.767 (73.17%) a la zona rural. (Secretaría de salud de Íquira, 2013)

2.2 Tratamiento de aguas residuales

Las aguas residuales se pueden definir como aquellas que han sido contaminadas por sus diferentes usos en una comunidad, con la presencia de sólidos que se han introducido en ellas y han sido transportadas por el sistema de alcantarillado (Romero, 2000). Estas aguas residuales deben ser recogidas y conducidas a cuerpos de agua receptores o al mismo terreno. El tratamiento de las aguas residuales es la determinación de los contaminantes existentes que deben ser eliminados en estas aguas y en qué cantidad. Para tener una respuesta se requiere analizar las condiciones del entorno, la legislación vigente y las normas reguladoras, es decir, para cada caso concreto se obtendrá una respuesta específica (Metcalf & Eddy, 1995).

Para realizar el tratamiento es necesario realizarlo en distintas etapas, sucesivas entre sí, estos son: el tratamiento primario, que contempla el uso de operaciones físicas para la eliminación de los sólidos sedimentables y flotantes presentes, el tratamiento secundario, que son procesos biológicos y químicos que se emplean para eliminar la mayor parte de la materia orgánica y el proceso terciario (o tratamiento avanzado), donde se emplean combinaciones adicionales de los procesos con el fin de eliminar otros componentes (Metcalf & Eddy, 1995). Previo a estos tres procesos de tratamiento es necesario un tratamiento preliminar o pretratamiento, el cual debe realizarse por medio de procesos físicos y/o mecánicos, instalados de modo que permitan la retención y remoción del material extraño presente en las aguas negras y que pueda interferir los procesos de tratamiento (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2000).

2.2.1 Principales contaminantes

Parámetros Fisicoquímicos: Sólidos suspendidos totales

Los sólidos suspendidos (SST) se reconoce como un parámetro asociado a cantidades de materia orgánica y material suspendido de pequeño tamaño, tales como la arena. Está directamente asociado con la turbidez del agua natural, lo cual se relaciona con la destinación del recurso para el consumo público y con las condiciones de la fauna acuática. Por eso es el interés existente en este parámetro, ya que una concentración de sólidos elevada producirá disturbios en el crecimiento de los huevos de los peces, modificando su movimiento natural, afectando su migración y reduciendo la abundancia de alimentos (Empresas Públicas de Íquira, 2021).

Parámetros Orgánicos y microbiológicos: Demanda Biológica de Oxígeno

La Demanda Biológica de Oxígeno (DBO) es un parámetro ampliamente utilizado para caracterizar la carga contaminante de residuos domésticos. Este parámetro da una referencia de la cantidad necesaria de oxígeno para estabilizar un desecho. Una de sus ventajas es que mide la cantidad de materia orgánica que es oxidada por las bacterias, y su principal desventaja es el largo periodo que transcurre entre la toma de la muestra y los resultados finales (5 días para el DBO₅) (Empresas Públicas de Íquira, 2021).

2.2.2 Pretratamiento o tratamiento preliminar

El tratamiento preliminar de las aguas residuales elimina los grandes materiales sólidos entregados por las alcantarillas que podrían obstruir el flujo a través de la planta o dañar el equipo. Estos materiales están compuestos por objetos flotantes como trapos, madera, materia fecal y partículas de arena más pesadas (Tebbutt, 1983). Este debe realizarse por medio de procesos físicos y/o mecánicos, como rejillas, desarenadores y trampas de grasa, dispuestos convencionalmente de modo que permitan la retención y remoción del material extraño presente en las aguas negras y que pueda interferir los procesos de tratamiento (Ministerio de Desarrollo Económico, 2000).

2.2.2.1 Cribado

El cribado es el proceso de utilizar una criba o rejilla para separar material grueso del agua. Romero (2000, p. 287) define que la criba puede ser de cualquier material agujereado, puede ser una lámina metálica o de materiales como madera o concreto, con agujeros redondos, cuadrados o de cualquier forma geométrica, pero la forma más usada es la criba construida con barras o varillas de hierro o acero. La abertura de las rejillas depende del objetivo del sistema, según su abertura pueden ser de finos o gruesos. Romero considera que las aberturas mayores a 64 mm son cribas de gruesos y las iguales a menores de 64 mm son cribas para finos. Ramalho (1990, p. 92) define que las rejillas de finos tienen aberturas de 5 mm o menos, y las cribas de gruesos suelen estar entre los 4 y 9 cm. Las cribas pueden ser de limpieza manual o mecánica. Ramalho explica que la unidad de cribado se emplea para remover del agua sólidos en suspensión de diferentes tamaños y están conformadas principalmente de barras de acero que detienen los objetos que puedan obstruir o tapar bombas, válvulas, tuberías y equipos que estén después de esta unidad.

El diseño estructural de la rejilla debe ser el adecuado para que esta no falle cuando esté taponada, los aspectos a tener en cuenta al diseñar la criba o rejilla son: las dimensiones del canal de aproximación a la rejilla, las variaciones en la profundidad de flujo dentro del canal, el espaciamiento entre las barras, el método de control de la rejilla y el método de limpieza (Romero, 2000, p.288).

2.2.2.2 Desarenador

En el tratamiento de aguas residuales, el desarenador tiene como función remover arena, grava, partículas u otro material sólido pesado que tenga velocidad de asentamiento o peso específico bastante mayor que el de los sólidos orgánicos degradables de las aguas residuales. Los desarenadores se usan para proteger el equipo mecánico del desgaste anormal y para reducir la formación de depósitos pesados en tuberías, canales y conductos. Estos pueden ubicarse al comienzo del sistema de tratamiento, si con ello facilitan la operación de las demás etapas del proceso (Romero, 2000, pp.293-294). Las rejillas se pueden ubicar antes del desarenador para facilitar la remoción de arena y limpieza de canales de desarenado.

2.2.3 Tratamiento primario

Se considera como unidad de tratamiento primario a todo sistema que permite remover material en suspensión, excepto material coloidal o sustancias disueltas presentes en el agua (MINAM, 2009). El tratamiento es realizado mediante un proceso físico para la eliminación de los sólidos sedimentables y flotantes presentes en el agua residual (Metcalf & Eddy, 1995), o fisicoquímico que incluya la sedimentación de sólidos en suspensión, u otros procesos en los que la DBO5 de las aguas residuales que entren, se reduzca, y el total de sólidos en suspensión en las aguas residuales de entrada se reduzca también (CENTA, 2008).

2.2.3.1 Tanque Imhoff

Es una unidad de tratamiento primario cuya finalidad es la remoción de sólidos suspendidos. De acuerdo con la Organización Panamericana de Salud, OPS, (2005) los tanques Imhoff ofrecen ventajas para el tratamiento de aguas residuales domésticas para comunidades de 5000 habitantes o menos, ya que integran la sedimentación del agua y a digestión de los lodos sedimentados en la misma unidad. Estos tanques tienen una operación muy simple y no requiere de partes mecánicas; sin embargo, para su uso concreto es necesario que las aguas residuales pasen por los procesos de tratamiento preliminar de cribado y remoción de arena. El tanque Imhoff típico es de forma rectangular y se divide en tres compartimentos: Cámara de sedimentación, cámara de digestión de lodos y un área de ventilación y acumulación de natas.

Las aguas residuales fluyen a través de la cámara de sedimentación, los sólidos sedimentables resbalan por las paredes inclinadas del fondo de la cámara de sedimentación pasando a la cámara de digestión a través de la ranura con traslape existente en el fondo del sedimentador, de esta forma se remueven gran parte de los sólidos sedimentables (OPS, 2005). Los gases y partículas ascendentes se producen en el proceso de digestión, son desviados hacia la cámara de natas o área de ventilación. Los lodos acumulados en el digestor se extraen periódicamente y se conducen a lechos de secado, en donde el contenido de humedad se reduce por infiltración, después de lo cual se retiran y dispone de ellos enterrándose o siendo utilizados para mejoramiento de los suelos.

2.2.4 Tratamiento secundario

En el tratamiento secundario los procesos biológicos y químicos son empleados para eliminar la mayor parte de la materia orgánica (Metcalf y Eddy, 1995, p.3). Los procesos biológicos, o secundarios, se emplean para convertir la materia orgánica fina coloidal y disuelta en el agua residual en floc biológico sedimentable y sólidos inorgánicos que pueden ser removidos en tanques de sedimentación. Estos procesos se emplean junto con procesos físicos y químicos para el tratamiento preliminar y primario del agua residual (Ministerio de Desarrollo Económico, 2000). El proceso de tratamiento secundario tiene como objetivo reducir la DBO ejercida al reducir la materia orgánica (Abdel-Raouf et al., 2012).

2.2.4.1 Humedales artificiales

Los humedales artificiales son sistemas de ingeniería que han sido diseñados y construidos intencionalmente a partir de sitios que no son humedales para utilizar los procesos naturales que involucran la vegetación de los humedales (Brix, 1994), los suelos y los conjuntos microbianos asociados para ayudar en el tratamiento de las aguas residuales (Vymazal, 2010). Incluso se ha demostrado que para el manejo de aguas pluviales en áreas urbanas y urbanizadas es posible desde una perspectiva tecnológica y de ingeniería (Carlisle & Mulamootil, 1991; Arteaga-Cortez et al, 2017). Los humedales artificiales están diseñados para aprovechar muchos de los mismos procesos que ocurren en los humedales naturales, pero lo hacen dentro de un ambiente más controlado. El mecanismo de eliminación de contaminantes de los humedales artificiales incluye procesos físicos, químicos y biológicos.

Estos sistemas se consideran una solución técnica, económica y ambientalmente sostenible para el tratamiento de aguas residuales en pequeñas comunidades, ya que son eficientes en la remoción de contaminantes y tienen alta capacidad de filtrado, se están volviendo cada vez más comunes en todo el mundo como una tecnología rentable y estéticamente agradable que puede reemplazar el tratamiento tradicional de aguas residuales (Araújo et al., 2008; Powell et al., 2009). Los humedales de flujo subsuperficial también se pueden usar como tratamiento primario y secundario para tratar aguas residuales domésticas; desechos industriales y agrícolas; drenaje de ácido minero; agua subterránea contaminada; aguas residuales de refinerías de petróleo; compost y otras aguas contaminadas (Davis et al., 1995; Zidan et al., 2015), y han logrado

mejorar la calidad del agua en entornos áridos, así como en entornos que soportan inviernos duros (Powell, 2009). La eficiencia del humedal construido depende de varios factores como la temperatura, la carga hidráulica aplicada, la vegetación, los medios, etc. (Tilak et al., 2016; Solano et al., 2004).

Los humedales artificiales se pueden clasificar como sistemas superficiales (FWS) o subsuperficiales (SFW), los SFW pueden clasificarse de acuerdo con la dirección del flujo, es decir, horizontal y vertical (Vymazal, 2010; Arteaga-Cortez et al, 2017). Los humedales de flujo superficial se asemejan a marismas naturales o áreas de humedales, con charcos de agua estancada. Estos se inundan y exponen la superficie del agua en los sistemas a la atmósfera (Brix, 1993). Por el contrario, los humedales de flujo subsuperficial tratan las aguas residuales en lechos de grava debajo de la superficie del suelo y, por lo general, no tienen agua independiente (Powell, 2009). En los sistemas con flujo horizontal subsuperficial, el medio se mantiene saturado de agua, mientras que en los sistemas de flujo vertical el medio no está saturado, porque el agua generalmente se aplica a intervalos cronometrados y se deja filtrar a través del medio (Brix, 1993).

El sustrato seleccionado para el humedal debe proporcionar un entorno adecuado para el crecimiento de las plantas, el desarrollo de las raíces, la descomposición de la materia orgánica y la retención de nutrientes. (Nocetti et al., 2020). En el humedal subsuperficial proporciona un camino a través del cual pueden moverse las aguas residuales y superficies en las que pueden vivir los microorganismos. (Zidan, 2015). En la práctica, la grava y el suelo son los medios más utilizados en los humedales artificiales subsuperficiales. Por su parte, las macrófitas del humedal tienen funciones valiosas específicas del sitio, como proporcionar un hábitat adecuado para la vida silvestre y dar a los sistemas una apariencia estética (Brix, 1994). Existen también sistemas combinados, en estos, sistemas horizontales de flujo subterráneo y de flujo vertical están operando en serie, lo que se representa en un aprovechamiento de las diferentes características de ambos tipos de humedales (Mena, 2008), intensificando los procesos de tratamiento, Brix plantea que de esta forma se pueden reducir los requisitos de superficie. Mena expone que las ventajas de estos sistemas combinados radica en que mientras que en los humedales de flujo vertical

predominan los procesos aerobios, en los de flujo horizontal predominan los procesos anóxicos y anaerobios, esta alternancia favorece la eliminación de algunos contaminantes.

Los humedales artificiales SFW tienen un buen potencial para la reutilización de agua y nutrientes, tolerancia a una alta variabilidad y han sido reconocidos como una opción de gestión sostenible de aguas residuales para los países tropicales en desarrollo (Stefanakis et al., 2014; Kadlec y Wallace, 2008; Stottmeister et al., 2003). Los porcentajes de remoción de sólidos suspendidos de los humedales artificiales en todo el mundo son generalmente altos y de acuerdo con Vymazal (2002), este es uno de los parámetros con mayor porcentaje de eliminación en humedales con flujo subsuperficial. Los humedales SFW suelen tener una alta eficiencia de eliminación de DQO y DBO, y más alta que los humedales FWS (Vymazal et al., 2006).

Humedales construidos con flujo subsuperficial horizontal. Los humedales construidos con flujo subterráneo horizontal consisten en lechos de grava o rocas sellados por una capa impermeable, y plantados con vegetación de humedales (Figura 2 – 2). El agua residual se alimenta en la entrada y fluye a través del medio poroso bajo la superficie del lecho en un recorrido más o menos horizontal hasta llegar a la zona de salida, donde se recoge y se descarga (Vymazal, 2010).

Disposición esquemática de un humedal artificial con flujo subterráneo horizontal.

1 zona de distribución de entrada llena de piedras grandes; 2 capa impermeable; 3 material de filtración; 4 vegetación; 5 nivel de agua en la cama; 6 zona de recolección de flujo de salida; 7 tubo de drenaje; 8 estructura de salida con ajuste del nivel del agua.

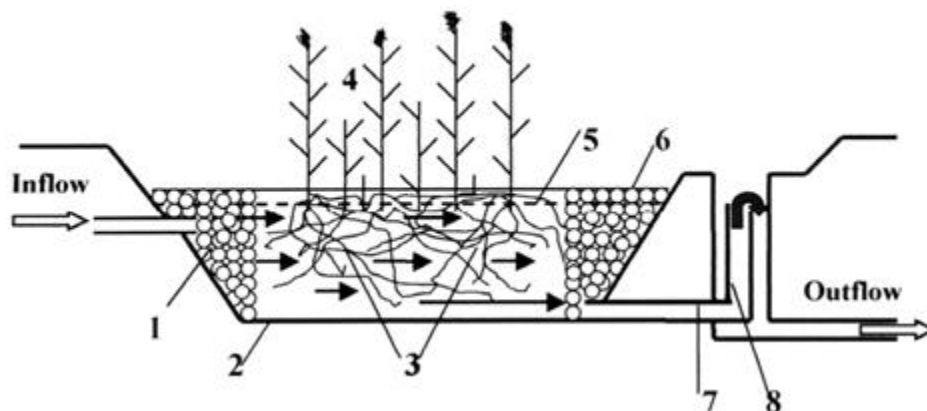


Figura 2 – 2: Disposición de un humedal subsuperficial horizontal

Fuente: (Vymazal, 2010).

2.2.5 Tecnologías de tratamiento

2.2.5.1 Procesos convencionales de tratamiento

Depuración Biológica. Se lleva a cabo mediante la eliminación de los contaminantes biodegradables por medio de una biocenosis o comunidad de microorganismos principalmente bacterias y otros organismos mantenida en un ambiente con un control especial. En esta etapa se consiguen importantes rendimientos en eliminación de DBO (Bermeo, 2016). Existen cuatro grupos principales de procesos biológicos: procesos aerobios, procesos anóxicos, procesos anaerobios y procesos combinados aerobios con anóxicos o con anaerobios. Dentro de cada grupo hay diferentes tipos dependiendo el tipo de crecimiento, así mismo dependiendo del régimen de flujo predominante los procesos pueden ser de flujo continuo o intermitente y del tipo de mezcla completa, flujo en pistón o flujo arbitrario.

Tratamiento Aerobio

Lodos Activados. El tratamiento biológico de aguas residuales mediante el proceso de fangos activados se realiza a través de un tanque o reactor biológico, donde se mantiene un cultivo bacteriano aerobio en suspensión y se realiza la oxidación de la materia orgánica. El ambiente aerobio en el reactor se consigue mediante el uso de difusores, que también sirve para mantener el líquido mezcla en estado de mezcla completa al cabo de un periodo determinado de tiempo (Bermeo, 2016).

Digestión Aerobia. Es el método más usado en plantas con caudales menores a 220 L/s para estabilizar su componente orgánico. En plantas grandes no es el método preferido por sus altos costos de operación del equipo de aireación. El proceso de digestión aerobia es semejante al proceso de lodos activados (Romero, 2000).

Tratamientos Anaerobio

Reactor anaerobio de flujo ascendente. Conocido en inglés como UASB, es un proceso en el cual el agua residual se introduce por el fondo del reactor y fluye a través de un manto de lodo conformado por granos biológicos o partículas de microorganismos. El tratamiento se efectúa por contacto del agua residual con el lodo granulado, en el cual se deben desarrollar bacterias con buenas características de sedimentación (Romero, 2000).

Sistemas lagunares

Lagunas aireadas. Es un estanque de 2 m a 5 m de profundidad hecho para el tratamiento biológico de aguas residuales. Usa un equipo de aireación mecánica con el objeto de suministrar oxígeno y mezclar (Romero, 2000). Una laguna aireada se diseña como laguna aerobia, con suficiente introducción de potencia, para mantener todos los sólidos en suspensión, o facultativa, con un nivel de potencia apenas suficiente para crear turbulencia requerida para la dispersión de oxígeno y permitir sedimentación de sólidos. Las lagunas aireadas facultativas son las más usadas porque producen un buen efluente, los niveles de potencia son inferiores, requieren control mínimo y la remoción de lodos es poco frecuente. Las lagunas aerobias se usan bastante para aguas residuales industriales. Un sistema con lagunas permite obtener remociones de DBO mayores del 90% (Romero, 2000).

2.2.5.2 Procesos sostenibles

Las tecnologías sostenibles para el tratamiento del agua se basan en procedimientos naturales de depuración que no requieren de aditivos químicos. Eliminan las sustancias contaminantes usando vegetación acuática, el suelo y microorganismos (Morató, 2006). Normalmente requieren una mayor superficie que las tecnologías convencionales, menor energía y tienen una producción de fangos reducida, por lo que esta alternativa es especialmente apropiada para zonas rurales. A continuación, en la tabla 2 -1 se evidencian algunas ventajas de estas tecnologías.

CAPTACIÓN	<ul style="list-style-type: none">✓ Bajo costo y fácil construcción✓ Consumo de energía nulo o escaso✓ Mantenimiento y operación sencillos✓ No agresivos para el medio ambiente✓ Viables y eficientes para pequeñas comunidades
------------------	---

TRATAMIENTO	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Buen rendimiento degradación contaminantes ✓ Buena eliminación de microorganismos patógenos ✓ Simplicidad operacional y escaso mantenimiento ✓ Bajos costes de construcción y consumo energético ✓ Baja producción de residuos e impacto sonoro Buena integración medioambiental
REUSO	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Incrementan las disponibilidades del recurso ✓ Agua regenerada disponible donde ha sido usada ✓ Caudales de abastecimiento estables ✓ Disminuyen los vertidos a la red de saneamiento urbano ✓ Ahorro en el proceso de depuración de aguas.

Tabla 2-1: Generalidades de las tecnologías sostenibles en sus diferentes etapas

Fuente: Morató, 2006

Comparación de los sistemas no convencionales y los sistemas convencionales. Los sistemas sostenibles no requieren altas demandas de energía ni un funcionamiento costoso o sofisticado, siendo fáciles de adaptar a diferentes contextos geográficos (Lourenço & Nunes, 2020).

Un humedal artificial es notablemente menos intensivo en carbono que un sistema de tratamiento centralizado típico cuando se incluyen las emisiones inducidas por los insumos en las etapas de construcción y operación (Shao et al., 2013).

La ingeniería ecológica de los humedales artificiales es notablemente menos intensiva en el uso de la tierra que la del sistema de tratamiento centralizado, dichos sistemas tradicionales requieren una gran cantidad de insumos externos, lo que podría inducir un uso mucho mayor de la tierra en los procesos ascendentes en comparación con los humedales (Fan et al., 2021).

Se ha demostrado que los humedales artificiales se usan con éxito en el tratamiento descentralizado de aguas residuales en regiones con baja densidad de población y / o con gran

disponibilidad de tierra (Machado et al., 2016). En la tabla 2 – 2 se muestra una comparación entre sistemas naturales y convencionales.

Sistemas Naturales	Sistemas Convencionales
Coste proyecto medio	Elevado coste proyecto
Bajo coste mantenimiento	Alto coste mantenimiento
Bajo o nulo consumo energético	Requiere consumo energético
No requiere personal técnico	Requiere personal técnico
Producción fangos baja o nula	Elevada producción fangos
Buena Integración en el medio	Baja Integración en el medio
No genera malos olores	Producción malos olores

Tabla 2-2: Sistemas naturales vs sistemas convencionales

Fuente: Morató, 2006

Capítulo 3. Metodología

En este capítulo se establecen las fases que deben considerarse para desarrollar los objetivos del proyecto, como muestra la figura 3 – 1. Se presenta como se realizará la caracterización de las aguas residuales, cuáles son los parámetros para diseñar un sistema sostenible de tratamiento de aguas residuales conformado por humedales subsuperficiales, cuál será la base para la realización de un manual de operación y mantenimiento del sistema y cómo se realizará la comparación de este sistema con un sistema convencional, el cual será un sistema lagunar. Para los fines de este proyecto, el punto de referencia aquí es el municipio de Íquira, en el Departamento del Huila.

Alcances

Se pretende realizar el diseño de un sistema de tratamiento de aguas residuales que abarque la población del casco urbano del municipio de Íquira - Huila, identificando las diferencias en los factores ambientales y los costos de funcionamiento; entre un sistema de saneamiento sostenible y uno convencional. Se plantea llevar a cabo un diseño que cuente con un humedal artificial de flujo subsuperficial como principal descontaminador de las aguas residuales.

Tipo de investigación

Con base en los objetivos planteados en la investigación, se determina que la naturaleza de la investigación será descriptiva, en la cual, según Lerma (2009) se identifica y detalla el desarrollo del objeto de estudio, además de describir las partes, categorías o clases que lo componen, e investigación aplicada, que de acuerdo a Lozada (2014) busca la generación de conocimiento con aplicación directa a los problemas de la sociedad o el sector productivo.

La investigación comprenderá distintas variables, tanto dependientes como independientes. Las variables independientes son: población en el caso urbano, altitud, temperatura media, tanto del agua como del ambiente. Dichas variables presentan unas subvariables como la geografía y desarrollo del sector. Las variables dependientes son: dotación neta, consumo neto, caudal de diseño y porcentaje de contaminantes en el efluente. Las subvariables serían el número de habitantes, el tipo de producción y desarrollo en el sector.

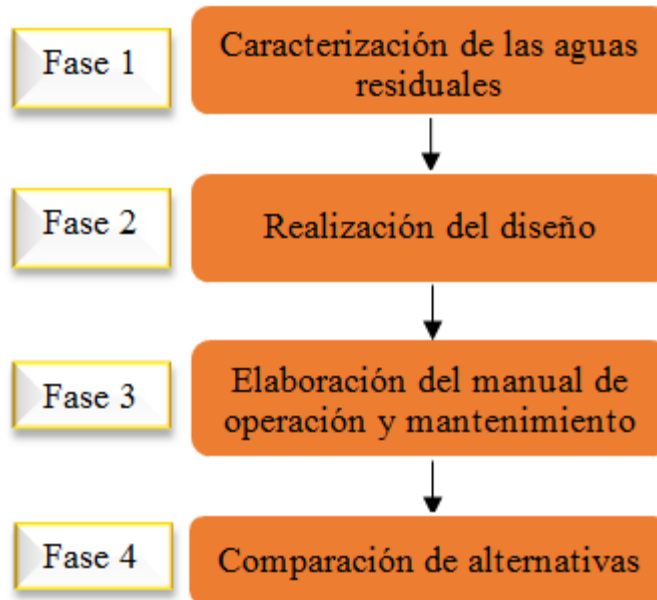


Figura 3 – 1: Metodología empleada.

3.1 Caracterización de las aguas residuales

Todo el proceso empieza por la recopilación de información sobre la composición de las aguas residuales. Ya que este es uno de los factores de los cuales depende la selección del proceso de tratamiento de aguas residuales (Romero, 2000).

Los datos requeridos para la realización del diseño fueron otorgados por Las Empresas Públicas de Íquira, la recolección y análisis de estos datos fue realizado por Laboratorio, Agua y Recolección S.A.S. el día 23 de junio de 2021 en tres puntos de descarga del municipio (Figura 3 - 2). En su informe relacionan la caracterización fisicoquímica y microbiológica del agua residual doméstica generada por las actividades diarias de los habitantes del municipio de Íquira en el Departamento del Huila. Los vertimientos son descargados directamente sin tratamiento en el Río Íquira.

La recolección de las muestras y análisis de laboratorios se realizaron teniendo en cuenta las metodologías definidas en el “Standard Methods for Examination of Water and Wastewater”, 23° edición, 2017 y en el U.S. EPA, utilizando además un programa de aseguramiento de la calidad en el muestreo y el análisis de campo para correlacionar las condiciones del entorno con el comportamiento del vertimiento. El método para la preservación de la muestra para el

parámetro de DBO5 fue el SM20 5210 B y SM20 2540 para el SST.



Figura 3 – 2: Puntos de vertimiento de recolección de muestras.

Fuente: Empresas Públicas de Iquira, 2021

La medición se llevó a cabo durante 24 horas en los 3 puntos de vertimiento de agua residual doméstica (llamados Lagartija, Guacharaca y Conejo) proveniente de las actividades de los habitantes del municipio. La toma consistió en la toma de 24 alícuotas por punto, una cada hora, con el fin de medir las variaciones en la temperatura, como en los demás parámetros medidos.

Los datos de los resultados de la caracterización del agua residual pueden observarse en mayor detenimiento en el Anexo A.

El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2015) define los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales domésticas y de aguas residuales no domésticas que las empresas prestadoras de servicio público de alcantarillado deben cumplir.

En el caso de DBO, en cada vertimiento se obtuvieron las siguientes cargas: en el punto de vertimiento N°1: Lagartija se obtuvo una carga de 118,60 *mg/L*. En el punto de vertimiento

Nº2: Guacharaca se obtuvo una carga de 103,10 *mg/L*. En el punto de vertimiento Nº3: Conejo se obtuvo una carga promedio de 58,70 *mg/L*. (Empresas Públicas de Íquira, 2021). De acuerdo con el Ministerio de Ambiente y Desarrollo sostenible el valor máximo permisible de este será 90 *mg/L*.

Mientras que para los SST, en cada vertimiento se obtuvieron las siguientes cargas: en el punto de vertimiento Nº1: Lagartija se obtuvo una carga de 50 *mg/L*. En el punto de vertimiento Nº2: Guacharaca se obtuvo una carga de 45,71 *mg/L*. En el punto de vertimiento Nº3: Conejo se obtuvo una carga de 35,00 *mg/L*. (Empresas Públicas de Íquira, 2021) su valor máximo permisible es igualmente de 90 *mg/L*.

Según el estudio de Aguas del Huila (2014), el municipio de Íquira cuenta con una red de alcantarillado que da cobertura al 99,00 % de la zona urbana, área de estudio de este proyecto, pero un nulo porcentaje de aguas residuales tratadas.

3.2 Diseño del sistema de saneamiento sostenible

3.2.1 Proyección de la población.

Es un cálculo que hace referencia al crecimiento aproximado previsto en el número de habitantes de un lugar para un año futuro dado. Establecido el tiempo de diseño en 25 años se determina la proyección de la población. Para eso se cuenta con los datos de los censos anteriores realizados en el municipio, que pueden verse en la tabla 3 – 1.

AÑO	HABITANTES
1964	1858
1973	1963
1985	2038
1993	3389
2005	2352
2017	2410

Tabla 3 – 1: Datos de censos anteriores en el Municipio de Íquira.

Fuente: DANE, 2017

Para calcular la capacidad de tratamiento de la PTAR del municipio de Íquira, se emplea la cifra de población de la cabecera municipal obtenido en el último censo realizado en el año 2017, reportada por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística – DANE.

El Reglamento Técnico Del Sector De Saneamiento Básico y Agua Potable, RAS 2000, en el título B, establece que el método de cálculo para la proyección de la población depende del nivel de complejidad del sistema. Se calculará la población utilizando cualquiera de los siguientes modelos matemáticos: aritmético o geométrico. Seleccionando el modelo que arroje el valor crítico, es decir, el de mayor valor.

Método aritmético supone un crecimiento vegetativo balanceado por la mortalidad y la emigración. La ecuación para calcular la población proyectada es la siguiente:

$$P_f = P_{uc} + \frac{P_{uc} - P_{ci}}{T_{uc} - T_{ci}} \times (T_f - T_{uc})$$

Donde: P_f = Población correspondiente al año para el que se quiere realizar la proyección (habitantes).

P_{uc} = Población correspondiente a la proyección del DANE (habitantes).

P_{ci} = Población correspondiente al censo inicial con información (habitantes).

T_{uc} = Año correspondiente al último año proyectado por el DANE.

T_{ci} = Año correspondiente al censo inicial con información.

T_f = Año al cual se quiere proyectar la información.

Método geométrico. El crecimiento es geométrico si el aumento de la población es proporcional al tamaño de esta; la ecuación empleada es:

$$P_f = P_{uc}(1 + r)^{T_f - T_{uc}}$$

Donde: P_f = población futura

T_f = Año al cual se quiere proyectar la información

T_{uc} = Año correspondiente al último año proyectado por el DANE.

Puc= Población correspondiente a la proyección del DANE (habitantes).

r: Tasa de crecimiento anual

La tasa de crecimiento anual se calcula de la siguiente manera:
$$r = \left(\frac{P_{uc}}{P_{ci}} \right)^{\frac{1}{(T_{uc}-T_{ci})}} - 1$$

Donde: r = Tasa de crecimiento anual

Pf = Población correspondiente al año para el que se quiere realizar la proyección (habitantes). Puc= Población correspondiente a la proyección del DANE (habitantes).

Pci= Población correspondiente al censo inicial con información (habitantes).

Tuc= Año correspondiente al último año proyectado por el DANE

3.2.2 Caudal de diseño.

Los aportes de aguas residuales deben determinarse con base en información de consumos y/o mediciones recientes registradas en la localidad. Los caudales que se requiere calcular son los siguientes:

1. Caudal de aguas residuales domésticas. Dependiendo de si se cuenta con la proyección de demanda de agua potable o la proyección de agua potable por suscriptor o se utilice la proyección de la población, se utilizan distintas fórmulas para el cálculo del caudal.
2. Caudal de aguas residuales no domésticas.
3. Caudal medio diario.
4. Caudal máximo horario.
5. Caudal de conexiones erradas.
6. Caudal de infiltración.
7. Caudal de diseño.

Los caudales deben relacionarse con la población de aporte de cada descarga para determinar los correspondientes aportes de agua residual per cápita. Al no contar con la proyección de demanda de agua potable en el municipio, se determina la proyección de la población al término del periodo de diseño.

Periodo de diseño. Es el tiempo para el cual se prevé que opere la planta de tratamiento, fija las condiciones básicas del proyecto como la capacidad del diseño para atender la demanda futura, la densidad actual y la durabilidad de los materiales, equipos empleados y operación de la planta (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2000). Para este proyecto se utilizará un periodo de diseño de 25 años.

Dotación. Debido a que el acueducto del municipio de Iquira no cuenta con registros históricos de consumo, para el cálculo de la dotación se tuvo como referencia lo planteado por el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico RAS 2000.

Dotación neta. Corresponde a la cantidad mínima de agua requerida para satisfacer las necesidades básicas de un habitante. De acuerdo con el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio (2017) depende de la altura sobre el nivel del mar a la que se encuentre el municipio.

Íquira tiene una altitud promedio de 1400 m.s.n.m y su cabecera municipal tiene una altitud promedio de 1200 m.s.n.m. En la tabla 3 – 2, se consigna el valor de la dotación neta máxima correspondiente a la altitud que presenta Íquira.

Altura promedio sobre el nivel del mar de la zona atendida	Dotación neta máxima (L/hab · día)
1000 - 2000 m.s.n.m	130

Tabla 3 – 2: Dotación neta máxima según la altura promedio sobre el nivel del mar

Fuente: Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio (2017)

Consumo doméstico. Se define que la ecuación para calcular el caudal doméstico utilizando la proyección de la población es la siguiente (Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio Colombia, 2017):

$$Q_{md} = \frac{C_R \times P \times d_{neta}}{86400}$$

Donde: Qmd= Caudal doméstico

P = población futura

dneta = Dotación neta

CR= Coeficiente de retorno

Coeficiente de retorno: Según el acuerdo 0330 del 2017 del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio (2017) se debe tomar un valor de 0.85.

Caudal Medio Diario. Se debe calcular como la suma de los aportes domésticos, industriales, comerciales e institucionales (Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio Colombia, 2017).

$$QMD = QD + QI + QC + QIN$$

Donde: QMD = caudal medio diario

QD = Caudal aguas doméstica

QI = caudal industrial

QIN = Caudal institucional

Caudal Máximo horario. Según el Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio Colombia (2017). Se utiliza la siguiente ecuación:

$$QMH = QMD \times k_2$$

Donde: QMH = Caudal máximo horario

QMD = caudal medio diario

k2= Factor de mayoración

Factor de mayoración. El factor de mayoración para estimar el caudal máximo horario, con base en el caudal medio diario, tiene en cuenta las variaciones en el consumo de agua por parte de la población. Al no ser posible calcularlo utilizando valores de campo se utilizan fórmulas empíricas. Estas fórmulas empíricas pueden estar en función del número de habitantes o del caudal medio diario. El valor debe estar entre 1.4 y 3.8. Con el objetivo de obtener un factor que tome en cuenta tanto la población como el caudal medio diario se utiliza un valor promedio entre la Ecuación de Flores y la Ecuación de Tchobanoglous (EPM, 2013).

$$F = \frac{3.5}{P^{0.1}} \text{ Ecuación de Flores}$$

$$F = \frac{3.7}{QMD^{0.0733}} \text{ Ecuación de Tchobanoglous}$$

Caudal de infiltración y conexiones erradas. La infiltración debe estimarse a partir de aforos en el sistema, pero ante la ausencia de información, se debe utilizar un factor (k_1) entre 0,1 y 0,3 $L/s \cdot ha$. Para las conexiones erradas se permite el uso de un valor máximo (k_2) de 0,2 $L/s \cdot ha$ (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2017). Se utilizará un valor de 5 L/s para ambos valores para la determinación del caudal.

Caudal de Diseño. El caudal de diseño se obtiene de sumar el caudal máximo horario, los aportes por filtraciones y conexiones erradas (Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio Colombia, 2017).

$$QD = QMH + Q_{inf} + Q_{ce}$$

Para la determinación de los caudales de diseño es necesario contar con estudios de campo que analicen el comportamiento de la población, y evalúen la cantidad de comercio e industria que tiene la ciudad o municipio (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2000). También se puede determinar los tipos de consumo del municipio con datos aportados por la empresa prestadora de servicios encargada del alcantarillado. Para este proyecto se contó con el aporte de los datos de los caudales de cada uno de los vertimientos durante 24 horas, obteniendo así un valor promedio para cada punto de muestreo.

3.2.3 Diseño de la criba

Como consideraciones generales se tienen de base el RAS 2000 y la resolución 033 de 2017. También se consideran los parámetros de diseño de Romero (2000) y Metcalf & Eddy (1995), los cuales se especificarán en la Tabla 3 – 7.

Tipo de limpieza. Con caudal de diseño menor a 100 L/s se permite el uso de limpieza manual.

Espaciamiento de barras. Para rejillas de limpieza manual, se tomará espaciamiento de 3 cm.

Velocidad de aproximación. Para una limpieza manual se permite una velocidad mínima de aproximación de 0.3 y 0.6 m/s. (Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio Colombia., 2000) Se permite una velocidad máxima de 1,2 m/s para caudal máximo y de 0,3 m/s para caudal mínimo.

FUENTE:	Romero (2000)	Metcalf & Eddy (1995)	Romero (2000)	Metcalf & Eddy (1995)
Características	De limpieza manual		De limpieza mecánica	
Ancho de las barras, cm	0,5 - 1,5	0,5 - 1,5	0,5 - 1,5	0,5 - 1,5
Profundidad de las barras, cm	2,7 - 7,5	2,5 - 3,8	2,7 - 7,5	2,5 - 3,8
Abertura o espaciamiento, cm	2,5 - 5	2,5 - 5	1,5 - 7	1,5 - 7
Pendiente con la vertical	30° - 45°	25° - 50°	0° - 30°	50° - 82,5°
Velocidad de acercamiento, m/s	0,3 - 0,6	0,3 - 0,45	0,6 - 1	-
Perdida de energía permisible, cm	15	15	15	15

Tabla 3 – 3: Parámetros de rejillas

Fuente: Adaptación de Romero (2000) y Metcalf & Eddy (1995)

Pérdida de carga. Para su cálculo se recomienda usar la siguiente ecuación (Romero, 2000):

$$H = \beta * \left(\frac{w}{b}\right)^{1.33} h_v * \text{sen}\theta$$

Donde: H = pérdida de energía. (m)

β = factor de forma de las barras.

w = ancho máximo de la sección transversal de las barras, en la dirección del flujo (m).

b = espaciamiento o separación mínima entre barras (m).

h_v = altura o energía de velocidad del flujo de aproximación (m).

θ = ángulo de la rejilla con la horizontal (°)

La energía de velocidad del flujo de aproximación se calculó con la siguiente fórmula: $h_v = \frac{v^2}{2 * g}$

Donde β debe obtenerse de la tabla 3 – 8, en conjunto con la figura 3 – 2.

Sección transversal							
Forma	A	B	C	D	E	F	G
β	2,42	1,83	1,67	1,035	0,92	0,76	1,79

Tabla 3 – 4: Coeficiente de pérdidas para rejillas
 Fuente: Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio, 2000

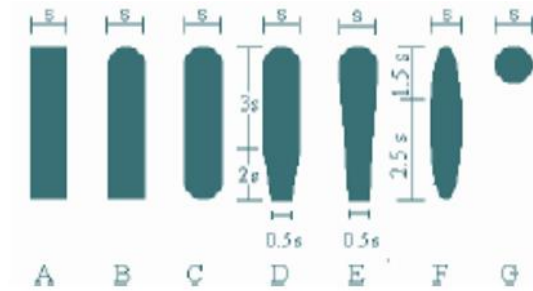


Figura 3 – 3: Diferentes formas de rejillas
 Fuente: Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio, 2000

La forma de las barras a implementar es circular (G), el coeficiente de pérdida β es de 1,79.

Eficiencia de la reja. Es la relación entre el espaciamiento de la reja y el ancho de la barra.

$$E = \frac{\text{Espaciamiento}}{\text{Espaciamiento} + \text{Ancho barra}}$$

3.2.3.1 Interceptor de aguas residuales

Velocidad mínima. El Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio Colombia no establece una velocidad mínima base, pero se puede tomar de base los parámetros propuestos por las Empresas Públicas de Neiva E.S.P. (2014) y las Empresas Públicas de Medellín (2013) en las cuales se especifica que con el fin de mantener limpias las tuberías y lavar los sólidos depositados durante períodos de bajo caudal, la velocidad mínima recomendada para una tubería de alcantarillado de aguas residuales es 0.45 m/s.

Velocidad máxima. La velocidad máxima de diseño del colector no debe sobrepasar los 5.0 m/s.

Relación máxima entre profundidad de flujo y diámetro de la tubería en los alcantarillados sanitarios. El valor máximo permisible de la profundidad del flujo para el caudal de diseño en un colector es de 85% del diámetro interno de este (EPM, 2013).

Diámetro de tubería del interceptor. La tubería utilizada será tubería Novafort PAVCO, de acuerdo con el Manual Técnico de PAVCO para tubosistemas para alcantarillado (2020), para obtener el diámetro mínimo requerido para el interceptor se utiliza la ecuación de Manning para tubería circular a sección llena. Debe verificarse el número de Froude, para conocer qué tipo de flujo se tiene en la tubería, subcrítico, crítico o supercrítico. Si se obtiene un flujo supercrítico es necesario considerar la construcción de elementos de disipación de velocidad.

$$Q = \frac{0,312}{n} * D^{\frac{8}{3}} * s^{\frac{1}{2}} \qquad V = \frac{0,397}{n} * D^{\frac{2}{3}} * s^{\frac{1}{2}} \qquad Fr = \frac{V}{(g * y)^{1/2}}$$

Donde: Q = Caudal

V = Velocidad

Fr = Número de Froude

D = Diámetro de la tubería

s = Pendiente

n = Coeficiente de rugosidad de Manning

y = Tirante en el canal

Al conocer el caudal de diseño, la pendiente (s) y la n de Manning para las tuberías Novafort se puede determinar el diámetro mínimo requerido. Seleccionada la tubería, con su caudal y velocidad a tubo lleno, se deben determinar estos valores para los distintos caudales: QMD, QMH y QD. Estas relaciones hidráulicas se estiman con una gráfica (figura 3 – 3) que muestra la variación de los elementos hidráulicos de una sección circular fluyendo parcialmente llena como función de la relación entre la profundidad de flujo y el diámetro interno real de la tubería.

Al dividir el caudal a tubo lleno con los distintos caudales de diseño con el caudal de la tubería a flujo lleno se obtiene un valor (Q tubo lleno) que se ubica en la sección de parámetros hidráulicos de la figura 3 – 3, en ese punto se traza una línea recta y donde se intercepte con la curva de caudal se traza otra línea hacia la sección de relación profundidad / diámetro (y/D), el valor obtenido se multiplicará con el valor del diámetro interno de la tubería y así se obtendrá el tirante (y) para el caudal analizado.

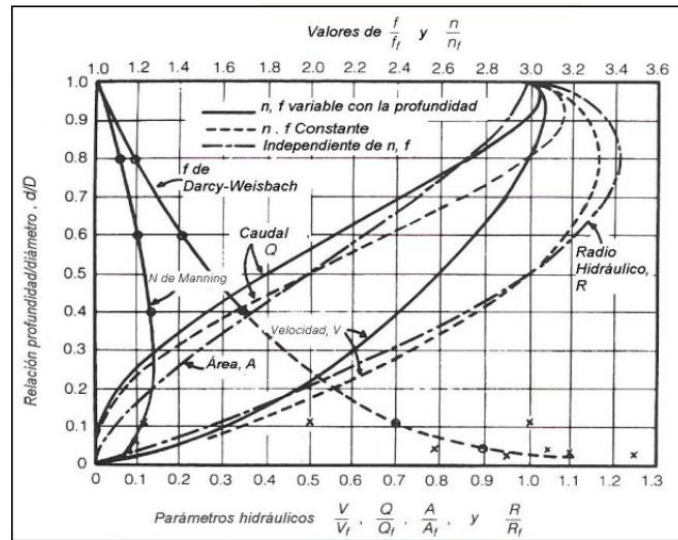


Figura 3 – 4: Relaciones hidráulicas en tuberías

Fuente: Empresas Públicas de Medellín. E. S. P (2013)

3.2.3.2 Canal de entrada

El canal de aproximación a la rejilla debe ser diseñado para prevenir la acumulación de arena u otro material pesado aguas arriba de esta. (Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio Colombia, 2000). Para dimensionar el canal se utiliza la ecuación de Manning, al conocer el coeficiente de Manning (n), el caudal (Q) y la pendiente (S), se despeja la ecuación dejando los términos

$$\text{dependientes del tirante (A, R)}. Q = \frac{A \cdot R^{2/3} \cdot S^{1/2}}{n} \rightarrow A \cdot R^{2/3} = \frac{n \cdot Q}{S^{1/2}}$$

Donde: R = Radio hidráulico, en m

S = Pendiente del fondo del canal, en m/m

n = Coeficiente de rugosidad

A = Área del canal, en m²

Q = Caudal de diseño, m³/s

Con un valor de tirante calculado, se procede a determinar la base del canal utilizando la fórmula: $b=2y$ Obtenido el valor de b , se aproxima a un valor que facilite el proceso constructivo, con ese nuevo valor de b , se vuelve a calcular el tirante (y) del canal. Esto se hace para los tres caudales, posteriormente se verifica la velocidad con cada caudal y que esté entre

los rangos aceptados de velocidad máxima de 1,2 m/s y mínima de 0,3 m/s (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2000).

Longitud del canal. Depende del tiempo que se desee que tarde el flujo en ser transportado desde el interceptor hasta la rejilla.

$$L = \frac{Q}{A * T}$$

Donde: L= Longitud del canal de entrada

Q= Caudal de diseño

A= Área del canal

T= Tiempo de llegada

3.2.4 Diseño de desarenador.

Localización y Número de desarenadores. Se localiza después de las rejillas y tendrá dos unidades de desarenado.

Velocidad horizontal. Será de 0,3 m/s. La velocidad de diseño permite la circulación a través de la unidad de la mayor parte de la materia orgánica y la puesta en suspensión de todas aquellas partículas orgánicas que hayan sedimentado, pero permite la sedimentación de la arena pesada (Metcalf & Eddy, 1995).

Velocidad de sedimentación partícula diámetro crítico. Está dado por la siguiente ecuación:

$$v_s = \frac{g}{18} * \frac{\rho_s - \rho}{\mu} * \phi^2$$

Donde: V = Velocidad de aproximación m/s

g = Gravedad (981 cm/s²)

V_s = Velocidad de sedimentación (cm/s)

ρ_s = peso específico de la partícula

ρ = peso específico del agua

μ = viscosidad cinemática

ϕ = diámetro de la partícula (cm)

Tasa de desbordamiento superficial. Debe estar entre 700 y 1600 m³/m²/día. (Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio Colombia, 2017)

Limpieza. Al tener un caudal inferior a los 50 L/s, será de limpieza manual.

Dimensionamiento de desarenador

Área de la sección transversal. El área de la sección transversal vendrá impuesta por el caudal y el número de canales (Metcalf & Eddy, 1995).

El ancho y la longitud teórica de los desarenadores está determinado por las siguientes ecuaciones (Mendonça, 2000, p180):

$$b = \frac{Q_{max}}{H * V}$$

$$L_t = \frac{Q * V}{V_s}$$

Donde: b = Ancho del desarenador, en m

Q = Caudal máximo, en m³/s

H = Altura máxima de la lámina de agua, para el caudal máximo, en m.

V = Velocidad de flujo, usualmente igual a 0,30 m/s.

L_t = Longitud teórica, en m

Q = Caudal máximo, en m³/s

V = Velocidad, en m/s

V_s = Velocidad de sedimentación, en m/s

Longitud real. Se incluye una longitud adicional para tener en cuenta la turbulencia que se produce a la entrada y a la salida del canal; para lo cual se recomienda un incremento mínimo del 50% de la longitud teórica prevista (Metcalf & Eddy, 1995) y que sea de 10 a 30 veces la altura de la lámina de agua (Lozano-Rivas, 2012). Para este diseño se seleccionó un valor adicional que cumpliera estas recomendaciones y permitiera que la tasa de desbordamiento superficial estuviera dentro de los parámetros permitidos.

Datos		
Caudal máximo	0,0255	m ³ /s
Número de unidades	2	
Temperatura agua	20	°
Viscosidad Cinemática	0,01010789	cm ² /s
Diámetro crítico	0,2	mm
Diámetro crítico	0,02	cm
Peso específico	2,5	g/cm ³
Gravedad	981	cm/s

Tabla 3 – 5: Datos para diseño de desarenador

Fuente: Autores

3.2.5 Diseño de vertedero Sutro.

En el Título E, del RAS – 2000, se recomienda controlar la velocidad en el desarenador mediante vertederos Sutro o con secciones transversales que garanticen los rangos de velocidad especificados para diferentes alturas de la lámina de agua. Por tanto, se toma la decisión de diseñar un vertedero Sutro, que estará regido por la siguiente ecuación:

$$Q = 4,173(L \times H^{1/2}) \times H$$

$$Constante = L \times H^{1/2}$$

Donde: Q = Caudal (m³/s)

H = Altura sobre el vertedero (m)

L = Ancho de la apertura del vertedero a altura H sobre la cresta del vertedero (m)

Con el fin de mantener uniforme la velocidad en el canal bajo condiciones de flujo variable, la altura de flujo en el canal debe ser proporcional al flujo, esto se consigue manteniendo el factor $L \times H^{1/2}$ constante (Romero, 2000).

3.2.6 Diseño de tanque Imhoff.

El tanque Imhoff generalmente se utiliza para poblaciones tributarias de 5,000 personas o menos, lo que se ajusta totalmente a la población proyectada de 2779 habitantes en el casco urbano del municipio de Íquira. Es la estructura que garantizará el tratamiento primario en el sistema, estando ubicado inmediatamente después del vertedero Sutro. El tanque Imhoff a diseñar será de tipo rectangular.

Los parámetros para tener en cuenta en la realización del diseño del tanque Imhoff son los consignados en la tabla 3 – 18. Donde se consignan valores obtenidos anteriormente, además de datos referenciados con los establecidos por el Título e, del RAS – 2000, como lo serían la tasa de sedimentación, el periodo de retención en horas, el volumen de digestión, la relación largo – ancho, el espaciamiento libre de la pared del digestor al sedimentador, el ángulo del fondo del sedimentador, la distancia del fondo del sedimentador a la altura máxima de lodos y la inclinación de la tolva en el digestor.

PARÁMETROS DE DISEÑO	Valores	RAS, Título e
Población futura (habitantes)	2779,00	<5000
Dotación de agua [$L/(Hab \cdot dia)$]	130,00	
Factor de retorno	0,85	
Altitud promedio (m.s.n.m)	1123,00	
Temperatura mes más frío (°C)	18,00	
Tasa de sedimentación [$m^3/(m^2 \cdot d)$]	25	25 – 40
Periodo de retención (horas)	2,00	2 a 4
Borde libre (m)	0,30	
Volumen de digestión (L/Hab a 15°C)	70,00	55 – 100
Relación L/B (teórico)	5,00	2:1 a 5:1
Espaciamiento libre pared digestor al sedimentador (m)	1,50	> 1,0

Ángulo fondo sedimentador (grados)	50,00	50 – 60
Distancia fondo sedimentador a altura máxima de lodos (zona neutra) (m)	0,50	0,45 – 0,60
Factor de capacidad relativa	0,82	
Espesor muros sedimentador (m)	0,30	
Inclinación de tolva en digestor (grados)	15,00	15 – 30
Número de troncos de pirámide en el largo	2,00	
Número de troncos de pirámide en el ancho	1,00	
Altura del lodo en digestor (m)	2,70	

Tabla 3 – 6: Parámetros de diseño tanque Imhoff

Fuente: Autores

Remoción esperada en el Tanque Imhoff. Para una remoción de DBO de 30% en el tanque imhoff, (OPS, 2005) la DBO afluente al humedal será:

$$DBO = 109,38 \text{ mg/L} * 0,30 = 76,57 \text{ mg/L}$$

Para una remoción de SST del 10% en y de 30% en el tanque imhoff (OPS, 2005), la SST afluente al humedal será:

$$SST = 47,45 \text{ mg/L} * 0,30 = 28,47 \text{ mg/L}$$

3.2.7 Humedal artificial de flujo subsuperficial

Localización. Se ubica después del tanque Imhoff como tratamiento secundario.

Profundidad del humedal. Para humedales de flujo sumergido la profundidad debe estar entre 0,1 y 0,45 m. (Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio Colombia, 2017). El lecho principal será de grava mayor a 20 mm de diámetro, por lo tanto, se pone una capa de grava fina de 150 mm para ayudar al enraizamiento inicial de la vegetación (Lara, 1999).

Relación largo-ancho. Debe estar entre 3:1 a 4:1

Área superficial. Para la determinación del área superficial del humedal utiliza el método recomendado por el Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio Colombia (2000) en el cual se incluye la cinética del proceso:

$$As = Q * \frac{LnCo - LnCe}{Kt * D * n}$$

Donde: As = Área superficial del humedal, m²

Q = Caudal medio diario, m³/d

Kt = Constante de temperatura, d⁻¹

n = Porosidad del sistema

D = Profundidad del humedal, m

Co = Concentración de DBO en el afluente, mg/l

Ce = Concentración de DBO en el efluente, mg/l

Sección transversal. Para determinar el área de la sección transversal se usa la ley de Darcy

$$AT = \frac{Q}{Ks * S}$$

Donde: AT = Área transversal, m²

Q = Caudal de diseño, m³/s

Ks = Conductividad hidráulica, m²/ m².d

S = Pendiente del fondo

Constante de temperatura. Depende de la temperatura del ambiente y del agua. Para una temperatura estimada del agua de 18°C se tiene:

$$Kt = K_{20}(1,06)^{(T-20)}$$

$$K_{20} = 1,104$$

$$Kt = K_{20}(1,06)^{(18-20)} = 0,983 \text{ d}^{-1}$$

Medio de transporte del flujo. Para definir la porosidad y la conductividad hidráulica se establece el tamaño efectivo del medio del lecho del humedal. Este será de 32 mm, la porosidad (η) y la conductividad hidráulica (k_s) se determinan por la siguiente tabla:

Medio	Tamaño efectivo mm	Porosidad	Conductividad hidráulica $m^3/m^2 \cdot d$
Arena media	1	0,3	500
Arena gruesa	2	0,32	1.000
Arena y grava	8	0,35	5.000
Grava media	32	0,4	10.000
Grava gruesa	128	0,45	100.000

Tabla 3 – 7: Características del medio según su tamaño efectivo
Fuente: Romero, 2000

3.2.7.1 Rendimiento Humedal artificial. Para los valores de carga orgánica y carga hidráulica permisibles en el humedal, se tomarán los valores recomendados por Romero (2000), estos valores se observan en la tabla 3 – 8.

Criterio	Valor
Carga Hidráulica superficial, $m^3/Ha \cdot d$	470 - 1970
Carga orgánica, $Kg DBO/Ha \cdot d$	<112

Tabla 3 – 8. Criterios de carga para humedales de flujo subsuperficial

Fuente: Romero, 2000

La carga hidráulica se calcula con la siguiente ecuación (Romero, 2000)

$$CH = \frac{Q}{A}$$

Donde: CH= Carga hidráulica, $m^3/Ha \cdot d$

Q=Caudal, m^3/d

A=Área superficial, Ha

Para la carga orgánica se tiene la siguiente ecuación (Romero, 2000)

$$CO = \frac{C_o * Q}{A}$$

Donde: CO= Carga orgánica, Kg DBO/Ha · d

Q=Caudal, m³/d

A=Área superficial, Ha

C₀= concentración del afluente, Kg/L

Remoción DBO. Con el fin de determinar el rendimiento del humedal subsuperficial para la remoción de DBO se utilizará la ecuación de RAS 2000 y la ecuación de Romero, 2000), primero se procede a determinar la concentración del contaminante del efluente (C_e).

Según RAS 2000, la concentración del contaminante efluente se determina de la ecuación de área superficial. Una vez conocido el área superficial que tendrá el humedal se podrá reformular la ecuación para que esta quede en función de la concentración efluente.

De acuerdo con Romero (2000), la concentración del contaminante efluente se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$C_e = C_o * e^{-Kt}$$

Donde: C_e= concentración del efluente, mg/L

C₀= concentración del afluente, mg/L

K = constante de remoción, d⁻¹

t = tiempo de retención, d; calculado con base en la profundidad del agua, el área superficial del lecho y el caudal afluente.

Para el cálculo de K se utiliza la siguiente ecuación (Romero, 2000):

$$K_{20} = K_0(37,31 * \eta^{4,172})$$

Donde: K₀= constante óptima de remoción, para medio con zona de raíces completamente desarrollada.

K₀= 1,839 d⁻¹ para aguas residuales municipales

K₀= 0,198 d⁻¹ para aguas residuales industriales

K_{20} = constante a 20°C, d^{-1}

η = porosidad total del medio, fracción decimal

Remoción SST. La remoción de sólidos suspendidos totales (SST) en el humedal puede calcularse con la ecuación (Lara, 1999):

$$SSE = SSA (0,1058 + 0,0011 * CH)$$

Donde: SSE = sólidos suspendidos totales del efluente, mg/L

SSA = sólidos suspendidos totales del afluente, mg/L

CH = carga hidráulica, cm/d

Resultados esperados de eficiencia de remoción. Para DBO y SST se determinará restando el contaminante afluente con el contaminante efluente, dividiendo ese resultado con el contaminante afluente y multiplicando este resultado por 100.

3.2.8 Ubicación del proyecto

Actualmente, Las empresas Públicas de Íquira no cuentan con un predio destinado para la elaboración de un sistema de tratamiento de aguas residuales y tampoco cuenta con recursos propios para su construcción o realización de estudios, lo cual se espera con la colaboración de los recursos que tiene el municipio en el Plan Departamental de Agua (Tamayo, 2021).

Como referencia se pueden identificar dos zonas en las cuales podría desarrollarse el proyecto, la zona referenciada como 1 se ubicaría cerca de los dos vertimientos de aguas residuales que no cumplen con la normativa actual. Mientras que la zona referenciada 2, es la zona en la cual el municipio de Íquira planeo llevar a cabo una PTAR en el año 2007. (Empresas Públicas de Íquira, 2021).

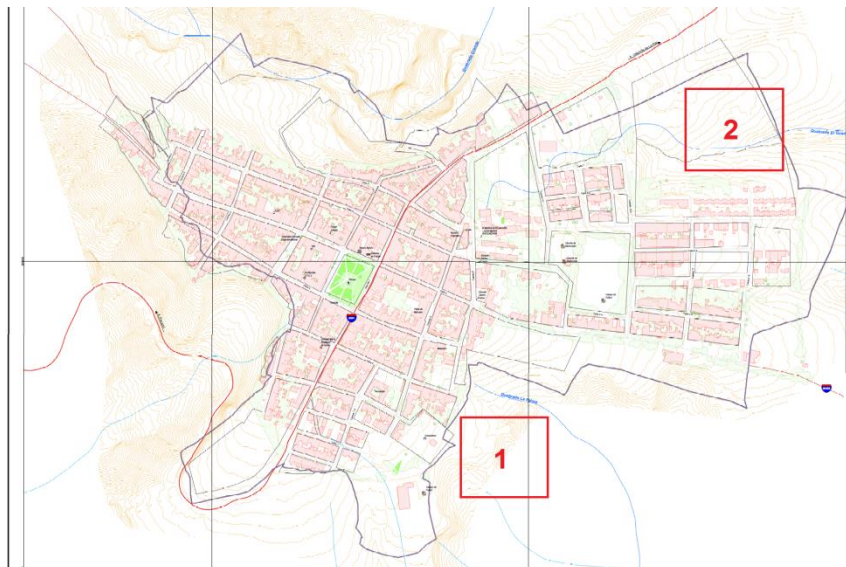


Figura 3 – 5: Posibles ubicaciones del proyecto

Fuente: Autores, 2021

3.3 Manual de operación y mantenimiento

A pesar de que los sistemas de humedales son simples en su funcionamiento, necesita ser operado y mantenido correctamente para un óptimo rendimiento. Para la elaboración del manual de operación y mantenimiento de cada una de las estructuras, se consultó las recomendaciones y especificaciones dadas por el RAS – 2000, el acuerdo 0330 del 2017 del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, y la guía para el diseño y construcción de un humedal construido con flujo subsuperficial de la USEPA.

Se recopiló la información encontrada en la mencionada bibliografía, para cada estructura que conforma el sistema de tratamiento, dando recomendaciones que ayuden a preservar la vida útil de cada obra para que no interfiera en el desempeño del sistema.

Cabe recalcar, que no fueron necesarias instrucciones complejas, puesto que una de las ventajas de ser un sistema sostenible, es que el gasto energético es nulo, por lo que no se cuenta con ningún equipo electromecánico ni dispositivos eléctricos diversos. Lo que convierte al sistema de tratamiento en un sistema de operación y mantenimiento sencillo. No se requieren equipos especiales, ni personal técnico o especializado, siendo esta una de las muchas ventajas que prevé un sistema de saneamiento sostenible.

En la estructura que más cuidado se debe prestar, será en el sistema conjunto de humedales artificiales de flujo subsuperficial, debido a que son las estructuras clave en el proceso del

tratamiento del agua en el sistema, además de ser la estructura más vulnerable, ya sea por animales dañinos, lluvias extremas, actos antropogénicos, entre otros.

3.4 Comparación de las alternativas

Una vez definido el diseño del sistema, se procede a crear la matriz de selección, donde, se pueden considerar tres atributos significativos de evaluación, los cuales incluyen elementos propios de la idea y perfil de proyecto de planta de tratamiento de agua residual, así como la operación y el mantenimiento de esta: el atributo técnico, el económico y el ambiental (Rodríguez Miranda et al., 2015). La matriz planteada por la Universidad Nacional Autónoma de México sigue estos tres atributos principales de análisis, por tanto, los subdivide en los siguientes puntos:

Aplicabilidad del proceso. Este aspecto implica el grado de adecuación o pertinencia del proceso de acuerdo con las características particulares del agua residual a tratar, así como de la calidad requerida para el agua tratada (Universidad Nacional Autónoma de México, 2013). En el caso de Íquira, su nivel de complejidad corresponde a un nivel medio, esto significa que no son necesarios procesos tan complejos, debido a que las consideraciones del flujo, la tolerancia del tratamiento a las variaciones del flujo y las características del agua residual, no varían de manera considerable y hace posible que cualquier tratamiento se adapte a las circunstancias.

Generación de residuos. Los tipos y cantidades de residuos sólidos, líquidos o gaseosos generados por un proceso de tratamiento de agua residual, deben ser conocidos o estimados (Universidad Nacional Autónoma de México, 2013). No todos los productos podrán ser reutilizados y no se puede permitir que lleguen al medio a contaminar, porque no se estaría cumpliendo con el principal objetivo del tratamiento de aguas residuales y ese es el cuidado del medio ambiente.

Aceptación por parte de la comunidad. Una obra como ésta deberá ser aceptada por la organización a la que dará servicio y por los vecinos. La estrategia de comunicación del proyecto desde etapas tempranas es fundamental para tener éxito en este aspecto (Universidad Nacional Autónoma de México, 2013). Siendo Íquira uno de los 17 municipios del departamento del Huila que no cuenta con una planta de tratamiento de aguas residuales (CAM, 2017), se presume que la comunidad aceptaría dicha obra que mejoraría notablemente la calidad de vida.

Generación de subproductos con valor económico o de uso. En algunas plantas de tratamiento de aguas residuales es posible generar subproductos con valor económico los cuales pueden representar ventajas adicionales al tratamiento, pues significan entradas de dinero y un aprovechamiento de recursos que contribuye a la sustentabilidad (Universidad Nacional Autónoma de México, 2013). Anteriormente, se mencionó la importancia de adecuados tratamientos, para darle un valor y uso económico a ciertos productos, como podrían ser los lodos, lo que beneficiaría a Íquira al ser un municipio que es caracterizado por su agricultura, basada en cultivos de cacao, café, frijol, lulo, arveja, maíz, el plátano, la yuca, hortalizas, granadilla, mora y tomate de árbol (Alcaldía de Íquira, 2018).

Vida útil. Este concepto responde a la interrogante sobre cuánto tiempo durará operando la planta de tratamiento de aguas. Generalmente hay dos partes en la vida útil de una planta de tratamiento de aguas: la de la infraestructura y la de los equipos electromecánicos rotatorios y dispositivos electrónicos diversos (Universidad Nacional Autónoma de México, 2013).

Esto depende del tratamiento que se realice, pero es de gran importancia debido a que la planta debe ser diseñada por lo menos para una vida útil de veinticinco años. El periodo de tiempo es establecido dependiendo del nivel de complejidad.

Requerimientos de área. El área requerida para la construcción de una planta de tratamiento puede ser un factor fundamental en la toma de decisiones. La poca disponibilidad de terreno o el alto costo de este pueden influir de manera decisiva en la factibilidad de ciertos procesos (Universidad Nacional Autónoma de México, 2013).

Costo. El considerar todos los costos en el análisis financiero del proyecto es indudablemente la práctica adecuada para apoyar la selección del proceso, ya que se determina el costo real por metro cúbico tratado (Universidad Nacional Autónoma de México, 2013). Si bien es cierto que dentro de los costos se encuentra la inversión y los costos operacionales y de mantenimiento, surge el problema de que para Íquira no existe un presupuesto estimado, por tanto, no se sabe cuánto tendrá que invertirse.

Diseño y construcción. Así como en el punto anterior, este aspecto tiene una gran influencia en la toma de decisiones, pero al igual que la inversión, los datos del contratista y del personal a contratar para la construcción, no son posibles de asumir, sin embargo, teniendo presente el tipo de tecnologías de tratamiento, su construcción y aplicación en la región, hace posible asumir que tan complejo será la construcción de la planta de tratamiento de aguas residuales, considerando la complejidad en su tren de tratamiento.

Operación. Bajo este aspecto se agrupan conceptos que están relacionados con el funcionamiento de la planta de tratamiento para garantizar la producción del agua tratada deseada, como son la flexibilidad de operación, confiabilidad del proceso, complejidad de su operación, requerimientos de personal y disponibilidad de repuestos y centros de servicio para los equipos (Universidad Nacional Autónoma de México, 2013).

Entorno e impacto al medio ambiente. Este criterio engloba los efectos relacionados con la operación de la planta sobre el ambiente y viceversa. Incluye la influencia de la temperatura sobre el proceso, la producción de ruido, contaminación visual, producción de malos olores, generación de gases de efecto invernadero y la reproducción de insectos o animales potencialmente dañinos a la salud (Universidad Nacional Autónoma de México, 2013).

Finalmente, a cada uno de los criterios de la matriz ya definidos se les asigna un porcentaje de importancia, pero para cada criterio, la alternativa evaluada tiene un puntaje de referencia, por tanto, el porcentaje es igual para el análisis de las dos alternativas de tratamiento, mientras que los puntajes son variados para cada uno de ellos. La información para evaluar el sistema convencional conformado por un sistema lagunar, se obtuvo de las publicaciones de Mendoza (2000) y Yañez (1995) sobre sistemas de lagunas de estabilización para el tratamiento de aguas residuales.

3.4.1 Calificación de los procesos de tratamiento

Para la calificación de cada uno de los parámetros se establece lo siguiente:

- Si la calificación tiene un valor de 0, significa que no aplica. No es muy usada, depende de las condiciones del sitio, pero para este caso la calificación de 0 no será usada.

-
- Si la calificación tiene un valor de 1, significa que el tratamiento tiene un desempeño insuficiente para el parámetro evaluado.
 - Si la calificación tiene un valor de 3, significa que el tratamiento cumple un desempeño aceptable en el parámetro que se está evaluando y que por tanto puede ser usado.
 - Finalmente, si la calificación tiene un valor de 5, el tratamiento cumple de una manera satisfactoria y sobresaliente con el parámetro que se está evaluando.

La matriz que contiene la calificación de cada uno de los aspectos anteriormente mencionados para cada alternativa se puede observar en el Anexo E.

3.4.2 Evaluación de alternativas

Definido lo anterior, se procede a aplicar las calificaciones de cada tratamiento en la matriz de selección, dicha matriz se subdivide en cinco partes, la primera la denominaremos generalidades, que comprende desde la aplicabilidad del proceso hasta el requerimiento de área; la segunda los costos, donde se incluye el de inversión si aplica; la tercera diseño y construcción, que comprende desde tecnología ampliamente probada hasta la complejidad de construcción; la cuarta se denomina operación e incluye desde la flexibilidad de operación hasta la disponibilidad de repuestos; y finalmente el entorno, que abarca desde influencia de la temperatura hasta condiciones para la reproducción de animales dañinos. Las calificaciones se colocan según las descripciones hechas al inicio del título (Barón, 2020).

Capítulo 4. Resultados y análisis de resultados

En este capítulo se presentan los resultados de cada una de las fases establecidas para el desarrollo del proyecto, buscando dar solución a lo planteado en el capítulo anterior y dar cumplimiento a los objetivos propuestos inicialmente.

4.1 Caracterización de las aguas residuales

Los resultados de los análisis fisicoquímicos del agua residual de los tres vertimientos de aguas residuales del municipio son presentados en las tablas 4 – 1, donde se presentan los resultados de caracterización del vertimiento N°1 “Lagartija”, 4 – 2, donde se muestran los resultados del vertimiento N°2 “Guacharaca” y 4 – 3, donde se muestran los resultados del vertimiento N°3 “Conejo”. Donde además, se comparan los datos con los valores límites propuestos por la resolución 0631 de 2015 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Los datos mostrados en las tablas 4 – 1, 4 – 2 y 4 – 3 fueron obtenidos del análisis de las aguas residuales realizado por las Empresas Públicas de Íquira en el año 2021.

PARAMETRO	UNIDAD	RESOLUCION 631, Art. 8°	RESULTADO	NIVEL DE CUMPLIMIENTO
GENERALES				
pH	Unidades de	6,00 – 9,00	7,29	CUMPLE
DBO ₅	mgO ₂ /L	90,00	118,60	NO CUMPLE
DQO	mgO ₂ /L	180,00	266,70	NO CUMPLE
Grasas y Aceites	mg/L	20,00	30,00	NO CUMPLE
Detergentes – Tenso activos	mg SAAM/L	Análisis y Reporte	5,55	-
Solidos Suspendidos Totales - SST	mg/L	90,00	50,00	CUMPLE
COMPUESTOS DE FORFORO				
Ortofosfatos	mg PO ₄ /L	Análisis y Reporte	1,96	-
HIDROCARBUROS				
Hidrocarburos Totales (TPH)	mg/L	Análisis y Reporte	< 10,00	-

Tabla 4 – 1: Cargas contaminantes del vertimiento N°1 “Lagartija”

Fuente: Empresas Públicas de Íquira, 2021

PARAMETRO	UNIDAD	RESOLUCION 631, Art. 8°	RESULTADO	NIVEL DE CUMPLIMIENTO
GENERALES				
pH	Unidades de	6,00 – 9,00	7,36	CUMPLE
DBO ₅	mgO ₂ /L	90,00	103,10	NO CUMPLE
DQO	mgO ₂ /L	180,00	204,90	NO CUMPLE
Grasas y Aceites	mg/L	20,00	51,06	NO CUMPLE
Detergentes – Tenso activos	mg SAAM/L	Análisis y Reporte	4,57	-
Solidos Suspendidos Totales - SST	mg/L	90,00	45,71	CUMPLE
COMPUESTOS DE FORFORO				
Ortofosfatos	mg PO ₄ /L	Análisis y Reporte	1,79	-
HIDROCARBUROS				
Hidrocarburos Totales (TPH)	mg/L	Análisis y Reporte	< 10,00	-
COMPUESTOS DE NITROGENO				
Nitratos	mg NO ₃ /L	Análisis y Reporte	< 0,50	-
Nitritos	mg NO ₂ /L	Análisis y Reporte	< 0,005	-
Nitrógeno Amoniacal	mg NH ₃ - N/L	Análisis y Reporte	19,40	-
Nitrógeno Total	mg N/L	Análisis y Reporte	31,17	-

Tabla 4 – 2: Cargas contaminantes del vertimiento N°2 “Guacharaca”

Fuente: Empresas Públicas de Íquira, 2021

PARAMETRO	UNIDAD	RESOLUCION 631, Art. 8°	RESULTADO	NIVEL DE CUMPLIMIENTO
GENERALES				
pH	Unidades de	6,00 – 9,00	7,30	CUMPLE
DBO ₅	mgO ₂ /L	90,00	58,70	CUMPLE
DQO	mgO ₂ /L	180,00	112,57	CUMPLE
Grasas y Aceites	mg/L	20,00	28,57	NO CUMPLE
Detergentes – Tenso activos	mg SAAM/L	Análisis y Reporte	1,33	-
Solidos Suspendidos Totales - SST	mg/L	90,00	35,00	CUMPLE
COMPUESTOS DE FORFORO				
Ortofosfatos	mg PO ₄ /L	Análisis y Reporte	0,691	-
HIDROCARBUROS				
Hidrocarburos Totales (TPH)	mg/L	Análisis y Reporte	< 10,00	-
COMPUESTOS DE NITROGENO				
Nitratos	mg NO ₃ /L	Análisis y Reporte	< 0,50	-
Nitritos	mg NO ₂ /L	Análisis y Reporte	< 0,005	-
Nitrógeno Amoniacal	mg NH ₃ - N/L	Análisis y Reporte	4,65	-
Nitrógeno Total	mg N/L	Análisis y Reporte	13,28	-

Tabla 4 – 3: Cargas contaminantes del vertimiento N°3 “Conejo”

Fuente: Empresas Públicas de Íquira, 2021

Al analizar las tres tablas de los tres vertimientos de aguas residuales del municipio se puede observar que el vertimiento N°1 “Lagartija” no cumple con los límites máximos permisibles para el parámetro de DBO5, mientras que el parámetro de SST sí cumple con los niveles máximos permisibles enmarcados en el artículo 8° de la Resolución 631 de 2015, para Actividades de vertimiento de Aguas Residuales Domésticas ARD, sobre el receptor hídrico, el cuál es el Río Íquira.

En el punto de vertimiento N°2 “Guacharaca” se obtuvo que para el parámetro DBO5 no cumple con los valores límites máximos permisibles, pero sí cumple los valores límites enmarcados en el artículo 8° de la Resolución 631 de 2015, para Actividades de vertimiento de Aguas Residuales Domésticas ARD para el parámetro de SST.

Finalmente se observa que para el vertimiento N°3 “Conejo”, los valores de DBO5 y SST cumplen con los niveles máximos permisibles enmarcados en el artículo 8° de la Resolución 631 de 2015, para Actividades de vertimiento de Aguas Residuales Domésticas ARD

Al observar los tres puntos de vertimiento, se observa que el valor de los parámetros contaminantes en los vertimientos “Lagartija” y “Guacharaca” supera los valores permisibles para el parámetro de DBO5, por tanto, no cumplen con la normativa vigente en el país. Lo que hace indispensable una intervención para disminuir la presencia de la carga contaminante y así cumplir con los criterios establecidos.

4.2 Diseño de sistema sostenible de tratamiento de aguas residuales

4.2.1 Estimación de la población

Teniendo los datos de los censos anteriores, indicados en la tabla 3 – 1 y el periodo de diseño, establecido en 25 años, se calcula la proyección de habitantes para el año 2046 mediante ambos métodos proporcionados por el RAS – 2000. En la tabla 4 – 2 se pueden observar los resultados de la proyección para ambos métodos.

PROYECCIÓN POBLACIÓN		
REGISTRO HISTÓRICO		
AÑO	HABITANTES	
1964	1858	
1973	1963	
1985	2038	
1993	3389	
2005	2352	
2017	2410	
MÉTODO GEOMÉTRICO		
AÑO	PF	R
2021	2457,78	0,0049
2026	2518,84	0,0049
2031	2581,42	0,0049
2036	2645,55	0,0049
2041	2711,28	0,0049
2046	2778,64	0,0049
TOTAL HABITANTES		2779
MÉTODO ARITMÉTICO		
TOTAL HABITANTES		2712

Tabla 4 – 4: Estimación de la población

Fuente: Autores

El resultado más crítico será el utilizado para hallar el caudal de diseño, por tanto, se usa el resultado del método geométrico con una población de 2779 habitantes.

4.2.2 Estimación del caudal de diseño

Teniendo definida ya la población proyectada con un periodo de diseño de 25 años, la dotación neta y el coeficiente de retorno, se prosigue a calcular el consumo doméstico de la siguiente manera:

$$Q_{md} = \frac{0,85 \times 2779 \text{ hab} \times 130 \text{ L/hab} \cdot \text{día}}{86400} = 3,55 \text{ L/s}$$

Una vez determinado el caudal de diseño para un periodo de diseño de 25 años, este se suma con los valores de caudal obtenidos en los muestreos de los puntos de vertimiento en los puntos Lagartija y Guacharaca para obtener los valores de caudal medio diario.

$$QMD = 3,55 \text{ L/s} + 3,38 \text{ L/s} = 6,93 \text{ L/s}$$

Ya determinado el caudal medio diario, solo queda por determinar el caudal máximo horario y el caudal de diseño. La tabla 4 – 6 muestra los valores para cada uno de estos, que fueron hallados haciendo uso de las ecuaciones indicadas en el capítulo 3.

CAUDALES	(L/S)
Caudal medio diario (QMD)	6,93
Caudal máximo horario (QMH)	15,523
Caudal de diseño (QD)	25,523

Tabla 4 – 5: Caudales de diseño

Fuente: Autores

4.2.3 Diseño del interceptor

Con el fin de obtener las velocidades en la tubería para los distintos caudales, se estimó un valor de diámetro mínimo de tubería que puede soportar el caudal máximo, así como la pendiente del interceptor y con el coeficiente de Manning para tubería de PVC, se calculó la velocidad y caudal de tubo lleno según la ecuación de Manning. Dichos resultados se observan en la tabla 4 – 5.

Pendiente del interceptor	0,005	m/m
Coeficiente de Manning interceptor	0,009	
Diámetro mínimo interceptor	180,54	mm
Diámetro seleccionado	182	mm
Caudal tubo lleno	26,08	L/s
Velocidad tubo lleno	1,0017	m/s

Tabla 4 – 6: Diámetro tubería en interceptor

Fuente: Autores

Los resultados de las relaciones hidráulicas en el interceptor para distintos caudales se muestran en la tabla 4 – 6. Se puede observar, los caudales de tubo lleno para cada caudal, las relaciones de cada tirante con el diámetro de la tubería (y/D), los tirantes correspondientes, además, se cumplen las velocidades máximas y mínimas en la tubería estando por encima de 0,45 m/s y debajo de 5 m/s. El número de Froude está siempre por debajo de 1, lo que indica que el flujo es subcrítico en la tubería. Por último, se determina que la relación entre la profundidad del flujo (y) y el diámetro interno de la tubería (d) se encuentra por debajo del 85%, lo que indica que cumple con el valor máximo permisible para el caudal de diseño en un colector.

Tipo	Q (L/s)	Q tubo lleno	y/D	y (m)	V/vs	V (m/s)	Froude	Relación y/d
QMD	25,52	0,9787	0,8	0,150	1,13	1,132	0,94713	82%
QMH	15,52	0,5954	0,55	0,100	1,01	1,012	0,99040	
QD	6,93	0,2658	0,35	0,064	0,79	0,78	0,98998	

Tabla 4 – 7: Relaciones hidráulicas en el interceptor para distintos caudales

Fuente: Autores

4.2.4 Diseño del canal de entrada

El caudal de diseño, la pendiente del canal y el coeficiente de Manning serán los tres datos de entrada para determinar el predimensionamiento del canal. Por medio de la ecuación de Manning se calculó un tirante (y) y una base (b) iniciales. El valor de la base (b) se aproximó a un número más exacto, por facilidad constructiva, y se recalculó el tirante para cada caudal, obteniendo así el área, perímetro, radio hidráulico, la velocidad y el número de Froude, estos datos se observan en la tabla 4 – 8.

La velocidad del flujo dentro del canal para los tres distintos caudales, cumple con las velocidades máximas y mínimas permisibles, estando por debajo de 1,2 m/s y por encima de 0,3 m/s. El flujo es subcrítico para cada uno de los caudales.

4.2.5 Diseño de la criba

Para el diseño de la criba se establecen los parámetros de entrada: los distintos caudales, el ancho del canal, el borde libre, el tirante crítico del canal, el ángulo de inclinación de las rejillas, el espaciamiento entre las rejillas, el espesor de las barras de las rejillas, la profundidad de las barras, la longitud de las barras de la rejilla y el tipo de reja a utilizar. Estos valores pueden verse en la tabla 4 – 8.

Datos del canal		
QD	0,0255	m ³ /s
S	0,001	m/m
<i>n</i>	0,013	concreto
Predimensionamiento canal		
y	0,166	m
b	0,332	m

Dimensiones ajustadas			
b (m)	0,3 m		
Caudal	QD	QMH	QMD
y (m)	0,184	0,12	0,071
A (m ²)	0,055	0,036	0,019
P (m)	0,669	0,539	0,427
R (m)	0,083	0,066	0,045
V (m/s)	0,462	0,408	0,3231
Froude	0,343	0,369	0,388
Borde libre (m)	0,3	0,37	0,41

Tabla 4 – 8: Dimensionamiento del canal

Fuente: Autores

Con los datos de diseño de la criba ya establecido, se procede a hallar los valores de la eficiencia de la criba, el área total incluyendo las barras, así como la útil de escurrimiento, la longitud del canal, número de barras, la revisión del ancho del canal sin los bordes y el espaciamiento en los bordes, los cuales, se pueden detallar en la tabla 4 – 9, que recopila los datos de diseño de la criba.

QD	25,52 L/s
QMH	14,30 L/s
QMD	5,86 L/s
Ancho canal de entrada (B)	0,3 m
Borde libre	0,3 m
Tirante agua antes de la reja (y)	0,18 m
Pendiente Canal entrada	0,001
Ángulo de inclinación rejas	45 °
Espaciamiento entre rejas (e)	3 cm
Espesor barra (wb)	0,635 cm
Profundidad de la barra	3,8 cm
Longitud rejilla	0,68 m
Tipo de rejilla	G
β	1,79

Tabla 4 – 9: Datos para diseño de la criba

Fuente: Autores

Eficiencia de la criba (E) = $e/(e + wb)$	0,825
Área total incluyendo barras (S) = $B \times Y$	0,055 m
Área útil de escurrimiento (su) = $S \times E$	0,046 m ²
Longitud canal, $T > 3seg = Q/(S \times T)$	1,477 m
Se toma de longitud	1,5 m
Número de barras	7,42779 barras
Se toma	8 barras
Revisión ancho canal sin bordes	0,26 m
Espaciamiento en los bordes	0,020 m a cada lado

Tabla 4 – 10: Diseño de criba

Fuente: Autores

En la tabla 4 – 10 se resume los valores del tirante, área, área útil, velocidad del canal, velocidad de la reja estando limpia y estando sucia al 50%, para cada uno de los tres caudales.

Caudal		Tirante	Área	Área útil	Vel. canal	V reja limpia	V reja sucia al 50%
m ³ /s		m	m ²	m ²	m/s	m/s	m/s
QD	0,0255	0,184	0,055	0,046	0,462	0,559	1,119
QMH	0,0143	0,127	0,038	0,031	0,4080	0,494	0,989
QMD	0,0059	0,0715	0,021	0,017	0,3231	0,391	0,783

Tabla 4 – 11: Resumen diseño criba

Fuente: Autores

Por último, determinando la altura de velocidad de flujo de aproximación (hv), se verificó la pérdida de carga en las rejillas (H) para cada uno de los caudales en las condiciones de reja limpia y reja sucia al 50%, siendo estos valores menores al límite permisible de 15 cm. Lo anterior, se enseña en la tabla 4 – 11.

Al terminar el diseño del sistema de cribado se observa que, para un tiempo de llegada del agua del interceptor a las rejillas de 3 segundos, se obtuvo una longitud de canal de 1,5 m. La rejilla estará conformada por 8 barras y tendrá una base de 0,3 m, la altura del canal estará determinada por el tirante máximo, que será de 0,18 m y con un borde libre de 0,3 m, se tiene una altura de 0,48 m.

Caudal		hv reja limpia	H (Reja limpia)		hv reja sucia	H (Reja sucia al 50%)	
m ³ /s		m	m	cm	m	m	cm
QD	0,0255	0,0160	0,0025	0,2548	0,0638	0,0102	1,0192
QMH	0,0143	0,012	0,0019	0,1990	0,0498	0,0079	0,7961
QMD	0,0059	0,0078	0,0012	0,1248	0,021265	0,0049	0,4991

Tabla 4 – 12: Pérdida de carga en rejillas

Fuente: Autores

En cuanto a la pérdida de carga se tiene que cumple con los parámetros establecidos, incluso cuando esté sucia al 50%, el tipo de rejillas utilizadas fueron rejillas circulares que tienen un coeficiente de pérdidas superior a cuatro tipos de rejillas, pero menor a otras dos, es decir que, si las pérdidas de carga fueran un problema en el diseño y no cumplieran, podrían utilizarse otro tipo de rejillas, pero para este caso no es necesario.

4.2.6 Diseño desarenador

Con los parámetros de diseño ya definidos en la tabla 3 – 5, se presenta el diseño del desarenador en la tabla 4 – 12.

Desarenador		
Velocidad de sedimentación partícula diámetro crítico (vs)	3,235 0,0324	cm/s m/s
Velocidad horizontal (Vh)	0,3	m/s
Ancho del desarenador (wb)	0,51	m
Ancho a utilizar	0,55	m
Tirante	0,155	m
Área seccional (AT)	0,043	m ²

Longitud Teórica (Lc)	1,434	m
Longitud Real (Lr)	2,6	m
Relación largo : ancho	4,73: 1	
Área longitudinal (A)	0,715	m ²
Tasa de desbordamiento superficial (Tds)	1542,06	m ³ /m ² · d
Estimación material retenido	0,02	m ³ /día
Profundidad útil depósito inferior	0,186	m
Volumen almacenamiento de arena	0,48329018	m ³

Tabla 4 – 13: Diseño de Desarenador

Fuente: Autores

La velocidad horizontal (Vh) cumple con lo establecido por el RAS – 2000 donde se especifica que debe estar entre 0,2 m/s y 0,4 m/s. Al mismo tiempo, cumple con lo determinado en el acuerdo 0330 del 2017 del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, que recomienda que dicha velocidad se mantenga en 0,3 m/s. También se cumple con la relación largo – ancho para desarenadores de flujo horizontal que está especificado entre 2,5:1 y 5:1. La tasa de desbordamiento superficial (Tds) que debe tener un valor entre 700 y 1600 m³/m² · d Se logró cumplir con una longitud real (Lr) de 2,6 m y un ancho a utilizar de 0,55 m. Se logró determinar que, al aumentar el ancho a utilizar se disminuyó el tirante.

4.2.7 Diseño vertedero Sutro

Teniendo los datos de entrada, como son el caudal máximo, el tirante y ancho del canal, y asumiendo la altura a la cresta del vertedero en 0,02 m, se despeja el ancho del vertedero (L) y se tiene:

$$L = \frac{0,0255 \text{ m}^3/\text{s}}{4,173(0,155 - 0,02)^{3/2}} = 0,1237 \text{ m} \rightarrow 0,125 \text{ m}$$

$$\text{Constante} = 0,0459$$

Los resultados del vertedero Sutro, se presentan en la tabla 4 – 13, donde se comprueba que la velocidad después del desarenador se mantiene en aproximadamente 0,3 m/s. Dando cumplimiento a su función de control de velocidad.

Perfil del vertedero Sutro		
H (m)	Q (m ³ /s)	V (m/s)
0,155	0,0257	0,303

Tabla 4 – 14: Resultados diseño de vertedero Sutro

Fuente: Autores

4.2.8 Diseño tanque Imhoff

Con los parámetros ya definidos en la tabla 3 – 6, se realiza el diseño de la estructura. La tabla 4 – 14 muestra los resultados de los cálculos para el tanque Imhoff.

RESULTADOS	Valores
Caudal medio (L/día)	598,75
Área de sedimentación (m ²)	24,948
Ancho zona sedimentador (B), (m)	2,2
Largo zona sedimentador (L), (m)	11
Prof. zona sedimentador (H), (m)	2,00
Altura del fondo del sedimentador (m)	1,31
Altura total sedimentador (m)	3,6
Volumen de digestión requerido (m ³)	160,00
Ancho tanque Imhoff (Bim) (m)	5,8
Volumen de lodos en digestor (m ³)	197,00
Área superficial libre (%)	51,72%
Altura del fondo del digestor (m)	0,77
Altura total tanque Imhoff (m)	7,58
Área de lecho de secado (m ²)	245,00

Tabla 4 – 15: Resultados diseño de tanque Imhoff

Fuente: Autores

La cámara de digestión del tanque Imhoff queda diseñada para cumplir con una capacidad de almacenamiento de lodo de 6 meses, tal y cómo lo especifica el título E, del RAS. También, cumple con las restricciones de L/B de la zona del sedimentador, L/Bim, el porcentaje de área superficial libre y la altura total del tanque.

$$L/B = \frac{11,0 \text{ m}}{2,2 \text{ m}} = 5,0 \leq 5,0 \quad Ok$$

$$L/Bim = \frac{11,0 \text{ m}}{5,80 \text{ m}} = 1,9 > 1,50 \quad Ok$$

$$\% \text{Área superficial libre} = \frac{2(\text{Espaciamiento libre digestor y sedimentador})(L)}{(Bim)(L)}$$

$$\% \text{Área superficial libre} = 52\% > 30\% \quad Ok$$

$$\text{Altura total tanque Imhoff} = 7,58 \text{ m} \leq 10 \text{ m} \quad Ok$$

4.2.9 Diseño de humedal artificial de flujo subsuperficial

Área superficial (As). Para una remoción mínima de DBO de 85%, se tiene que el total del área requerida es:

$$As = 598,8 \frac{m^3}{d} * \frac{\ln\left(76,57 \frac{mg}{L}\right) - \ln\left(76,57 \frac{mg}{L} * 0,14\right)}{0,983 \text{ d}^{-1} * 0,45 \text{ m} * 0,4}$$

$$As = 6656,19 \text{ m}^2$$

Área transversal (AT). Para una pendiente de 1% se tiene:

$$AT = \frac{598,8 \frac{m^3}{d}}{1000 \frac{m}{d} * 0,01 * 0,1} = 52,57 \text{ m}^2$$

Ancho del humedal (a). Se determina dividiendo el área transversal obtenida por la profundidad del humedal:

$$a = \frac{52,57 \text{ m}^2}{0,45 \text{ m}} = 116,81 \text{ m}$$

Longitud del humedal (L). $\frac{6656,19m^2}{116,81m} = 57 m$

Relación Longitud:Ancho (L:a) Esta debe estar entre 3:1 y 4:1, de acuerdo con el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio (2017)

$$\frac{57 m}{116,81 m} = 0,49: 1$$

Para cumplir con el requerimiento de relación de longitud:ancho, debe ajustarse el ancho del humedal, ya que la longitud es un parámetro que no cambiará, debido a que es la relación entre el ancho y el área del humedal.

Para ajustar el ancho del humedal se procede a la utilización de sistemas conjuntos de humedales, para cumplir con los parámetros de L:a se utilizarán 6 sistemas de humedales artificiales.

Es necesario recalcular los valores de las medidas del humedal:

Área requerida de cada humedal:

$$As \text{ por humedal} = \frac{6656,19 m^2}{6} = 1083 m^2$$

Área transversal para cada humedal.

$$AT = \frac{598,8 \frac{m^3}{d} / 6}{1000 \frac{m}{d} * 0,01 * 0,1} = 8,76 m^2$$

Ancho de cada humedal.

$$a = \frac{8,76 m^2}{0,45 m} = 19 m$$

Relación Longitud:Ancho de cada humedal.

$$\frac{57 m}{19 m} = 3: 1 \quad ok$$

En la tabla 4 - 15 se presenta un resumen de los resultados del diseño del humedal artificial subsuperficial. Donde se incluyen la cantidad de sistemas, el caudal, el área superficial total, el

área superficial y transversal de cada humedal, la longitud, el ancho, la relación L:a, la pendiente de cada humedal y el material que tendrá como lecho filtrante.

Parámetro	Valor	Unidad
Sistemas	6	humedales
Caudal, Q	598,8	m ³ /d
Área superficial, As	6.498	m ²
Área transversal, At	8,76	m ²
Profundidad humedal	0,45	m
Área superficial de cada celda del humedal	1083	m ²
Ancho, a	19	m
Longitud, L	57	m
Pendiente del lecho, S	0,01	m/m
Relación L:a	3:1	
Material lecho filtrante	Grava media, 32 mm	

Tabla 4 – 16: Dimensiones del humedal para el tratamiento de aguas residuales

Fuente: Autores

Rendimiento Humedal artificial.

Carga hidráulica.

$$CH = \frac{598,8 \text{ m}^3/\text{d} *}{6.498 \text{ m}^2 * 10000 \text{ Ha}} = 921,440 \text{ m}^3/\text{Ha}.\text{d}$$

Carga orgánica

$$CO = \frac{76,57 * Q}{6.498 \text{ m}^2} = 70,551 \text{ kg DBO /ha}.\text{d}$$

Remoción DBO.

Según la ecuación del RAS, 2000

$$6.498 \text{ m}^2 = 598,8 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} * \frac{\text{Ln}\left(76,57 \frac{\text{mg}}{\text{L}}\right) - \text{Ln}Ce}{0,983 \text{ d}^{-1} * 0,45 \text{ m} * 0,4}$$

$$Ce = 11,232 \text{ mg/L}$$

Según las ecuaciones de Romero (2000)

Constante de remoción de DBO₅

$$K_{20} = 1,839 d - 1 (37,31 * 0,4^{4,172}) = 1,50$$

Tiempo de detención:

$$t = \frac{6.498 m^2 * 0,45 m * 0,4}{598,8 m^3/d} = 1,95 d$$

Concentración de DBO efluente

$$C_e = 76,57 \frac{mg}{L} * e^{-1,50*2} = 4,085 mg/L$$

Remoción SST.

$$SSE = 28,47 mg/L (0,1058 + 0,0011 * 9,21 cm/d) = 3,3 mg/L$$

Resultados esperados de eficiencia de remoción.

Para DBO₅: Según las ecuaciones del RAS 2000:

$$\frac{76,57 \frac{mg}{L} - 11,23 \frac{mg}{L}}{76,57 mg/L} * 100\% = 85,33\%$$

Según la ecuación de Romero (2000)

$$\frac{76,57 \frac{mg}{L} - 4,085 \frac{mg}{L}}{76,57 mg/L} * 100\% = 95\%$$

Para SST

$$\frac{28,47 \frac{mg}{L} - 3,3 \frac{mg}{L}}{28,47 mg/L} * 100\% = 88,44\%$$

Los resultados de rendimientos esperados de la carga orgánica, la carga hidráulica, la carga efluente y la eficiencia de remoción de SST y DBO₅ serán presentados en la tabla 4 – 1.

Parámetro	Valor
Carga de SST efluente, mg/L	3,3
Carga de DBO ₅ efluente, mg/L (RAS 2000)	11,232
Carga de DBO ₅ efluente, mg/L (Romero, 2000)	4,085
Carga orgánica del humedal (<i>kg DBO /ha. d</i>)	70,551
Carga hidráulica superficial (<i>m³/ha. d</i>)	921,44
Eficiencia Remoción DBO ₅ (RAS 2000)	85,33%

Eficiencia Remoción DBO5 (Romero, 2000)	95%
Eficiencia Remoción SST	88,44%

Tabla 4 – 17. Rendimientos esperados del humedal para el tratamiento de aguas residuales

Fuente: Autores

El diseño del sistema sostenible de aguas residuales cumple con los requerimientos de eficiencia en remoción y funcionalidad de sistema desde la intercepción del agua residual cruda hasta su salida de la planta de tratamiento. Requiere estar conformado por un sistema de pretratamiento de rejillas, desarenador y un vertedero sutro; un sistema de tratamiento primario, que en este caso será un tanque Imhoff y para el tratamiento secundario, se necesitan cinco humedales artificiales de flujo subsuperficial, siendo este el fin del sistema.

Los resultados esperados de eficiencia de tratamiento de agua residual, según los diseños, tendrán valores entre 85% a 95% de remoción de DBO₅ y de 88% de remoción de SST.

Los planos de cada una de las estructuras que conforman el sistema de tratamiento están adjuntos en el Anexo B.

Parte del diseño del sistema de saneamiento corresponde al costo total que tendrá el sistema, por ello se realiza el presupuesto total del sistema tomando de base los valores de precios unitarios expuestos en la página web Construdata.com. Este presupuesto está en el Anexo C.

4.3 Manual de operación y mantenimiento

Para la elaboración del manual de operación y mantenimiento del sistema de tratamiento de aguas residuales diseñado en el presente proyecto, se siguió las recomendaciones dadas para cada una de las estructuras que conforman el sistema, por parte del Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS, la resolución número 0330 de 2017 del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, y la guía para el diseño y construcción de un humedal construido con flujo subsuperficial de la USEPA.

El manual de operación y mantenimiento se puede observar en el Anexo E.

4.4 Comparación de alternativas

Compuesta por cinco columnas, A hasta E, la tabla 4 – 17, muestra la forma para calcular la matriz. En la columna A, se colocan los porcentajes de valor determinados para cada parámetro; en la columna B, se muestra el nombre de cada parámetro evaluado; en la columna C, se coloca la calificación por tratamiento, es decir, tratamiento sostenible y/o tradicional; en la columna D, se tiene la calificación de la columna C dividida sobre cinco, con algunas condiciones; y finalmente, en la columna E se tiene el resultado de la multiplicación entre el valor de la columna A por el valor de la columna D.

#	A	B	C: Calificación		D		E	
			Sostenible	Tradicional	C/5		D*A	
1	3%	Aplicabilidad del proceso	4	5	0,8	1	0,024	0,03
2	4%	Generación de residuos	4	3	0,8	0,6	0,032	0,024
3	1%	Aceptación por parte de la comunidad	5	5	1	1	0,01	0,01
4	6%	Generación de subproductos con valor económico o de reúso	1	1	0,2	0,2	0,012	0,012
5	4%	Vida útil	5	5	1	1	0,04	0,04
6	7%	Requerimiento de área	1	2	0,2	0,4	0,014	0,028
7		Costo						
7.1		Operación y mantenimiento	5	4				
7.2	25%	Sumar las casillas 7.2 dividir el total entre 5. El resultado anotar en la casilla 7.2D			1	0,8	0,25	0,2
8		Diseño y construcción						
8.1		Tecnología ampliamente aprobada	3	5				
8.2		Complejidad en la construcción y equipamiento	4	4				
8.3	10%	Sumar las casillas 8.1 y 8.2 y dividir el total entre 10. El resultado anotar en la casilla 8.3D			0,7	0,9	0,07	0,09
9		Operación						
9.1		Flexibilidad de operación	5	3				
9.2		Confiabilidad del proceso	3	5				
9.3		Complejidad de operación del proceso	5	5				
9.4		Requerimiento de personal	5	5				
9.5		Disponibilidad de repuestos y centros de servicio	5	5				
9.6	30%	Sumar las casillas de 9.1 a 9.5 y dividir el total entre 25. El resultado anotar en la casilla 9.6D			0,92	0,92	0,276	0,276
10		Entorno						

10.1		Influencia de la temperatura	3	1				
10.2		Producción de ruido	5	5				
10.3		Contaminación visual	5	5				
10.4		Producción de malos olores	5	1				
10.5		Generación de gases de efecto invernadero	5	1				
10.6		Condiciones para la reproducción de animales dañinos	3	3				
10.7	10%	Sumar las casillas 10.1 a 10.6 y dividir el total entre 30. El resultado anotarlo en la casilla 10.7D			0,87	0,53	0,09	0,05
11	100%	Sumar los valores de la columna E y anotar el resultado en la casilla 11E					0,81	0,76

Tabla 4 – 18: Matriz de evaluación de alternativas

Fuente: Autores

Se puede observar que el sistema sostenible de humedales artificiales obtuvo menor calificación en los parámetros de requerimiento de área, debido a que el sistema lagunar requiere menos área para su construcción y funcionamiento, y en los parámetros de diseño y construcción y aplicabilidad del proceso, en estos, los humedales obtienen una valoración menor al tratamiento de lagunas debido a que el tratamiento lagunar es uno de los tratamientos más usados en el Departamento del Huila y demuestra ser una tecnología ampliamente aprobada, caso contrario a los humedales, que son una tecnología poco explorada no solo a nivel regional, sino, a nivel nacional.

Igualmente, puede observarse que la mayor ventaja del sistema de humedales artificiales frente al sistema de lagunas radica en su adecuación al entorno, siendo esto visible en factores como la influencia de la temperatura, la producción de olores y la huella de carbono que producen cada sistema. Los humedales al ser construidos de flujo subsuperficial no tienen problemas de olores y su propia naturaleza hace que sean sumideros de carbono.

Es evidente así que la alternativa sostenible, la misma planteada en el presente proyecto, superó en calificación total a la alternativa tradicional, obteniendo 0,81 frente a 0,76 respectivamente; lo que indica que según los criterios evaluados resulta ser una mejor alternativa.

Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

- Se verificó que para los vertimientos Guacharaca y Lagartija, los niveles de DBO_5 no cumplen con lo establecido en la resolución 631 del 2015, pero para SST, los niveles sí se encuentran por debajo del valor límite, esto, para actividades de vertimiento de aguas residuales domésticas, sobre el receptor hídrico “Río Íquira”.
- Se observó que los humedales artificiales subsuperficiales sirven para la eliminación de contaminantes biológicos en el agua residual, por ello son utilizados como tratamiento secundario. Lo que hace necesario que el sistema cuente con un pretratamiento y un sistema primario previo para su correcto funcionamiento. Estos sistemas fueron diseñados para cumplir con los requerimientos y recomendaciones exigidas por el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio en el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico - RAS. Dando como resultado un sistema que presenta una alta eficiencia de remoción de los contaminantes a tratar.
- Se comparó el sistema de saneamiento sostenible conformado por humedales artificiales de flujo subsuperficial con un sistema lagunar, teniendo como criterios de evaluación el costo, diseño y construcción, operación e impacto en el entorno. Lo que permitió observar las principales diferencias, las ventajas y desventajas entre ambos sistemas. El sistema planteado en el presente proyecto obtuvo un mejor desempeño debido a que en diversos parámetros la calificación del sistema obtuvo mayor valor, lo que arrojó un puntaje superior en la matriz de selección. Sacando la mayor ventaja en los parámetros de generación de residuos, costos y entorno.
- La elaboración del manual de mantenimiento y operación para cada una de las estructuras que conforman el sistema de saneamiento siguiendo las recomendaciones dadas por el RAS, permite un buen desarrollo de las actividades en el sistema y no perjudicar su desempeño e integridad a lo largo de la vida útil establecida.

5.2 Recomendaciones

- Si se desea implementar el diseño del sistema de saneamiento del presente proyecto, es necesario realizar un estudio del comportamiento social y económico del municipio, con el fin de obtener valores de consumo ajustados con la realidad. También será importante tener información actualizada del aporte de aguas por parte de la empresa prestadora del servicio de alcantarillado.
- Para complementar el diseño es necesario concretar la disponibilidad del terreno, ya que la adquisición del terreno se puede dificultar por la falta de interés en su venta por parte de propietarios.
- El diseño presentado, podría optimizarse con la utilización de sistemas de humedales híbridos, que podrían generar una eficiencia similar o igual al sistema de humedales subsuperficiales planteado, pero con la ventaja de reducir el requerimiento de área.
- Para no interferir en la vida útil y en el buen funcionamiento de cada una de las estructuras que conforman el sistema de tratamiento de aguas residuales, es necesario seguir las recomendaciones dadas en el manual de operación y mantenimiento.

Bibliografía

- Abdel-Raouf, N., Al-Homaidan, A. A., & Ibraheem, I. B. M. (2012). Microalgae and wastewater treatment. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 19(3), 257–275.
<https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2012.04.005>
- Amezquita, D., & Bejarano, P. (2018). Evaluación de la planta de tratamiento de aguas residuales del Municipio de Gachancipá. Obtenido de
<https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/16684/1/trabajo%20de%20grado%20gachancipa%20final%20con%20imagen.pdf>
- Araújo, A., Sousa, E., Albuquerque, A., (2008). Longitudinal dispersion in a horizontal subsurface flow constructed wetland a numerical solution. *Anziam J.* 50, 339–353.
<https://doi.org/10.21914/anziamj.v50i0.1367>
- Arteaga-Cortez, V., Quevedo, A., Valle-Paniagua, D., Castro, M., Bravo, A. & Ramírez, J. Estado del arte: una revisión actual a los mecanismos que realizan los humedales artificiales para la remoción de nitrógeno y fósforo. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. *Tecnología y ciencias del agua.* vol.10 no.5 Jiutepec sep./oct. 2019 Epub 15-Feb-2020. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2019-05-12>
- Artunduaga, O. A. S. (2006). Alternative of low cost to purify water waster in countries in via of development humedar I.
- Barón (2020). Alternativa Para El Tratamiento De Aguas Residuales Urbanas Para El Municipio De Tello – Huila. Universidad Surcolombiana.
- Bermeo, M. (2016). Tratamiento de aguas residuales: Técnicas convencionales (2.a ed.). Guayaquil, Ecuador.
http://142.93.18.15:8080/jspui/bitstream/123456789/68/1/COMPLETO_libro_aguaUltimoPDF.pdf

- Brix, H., (1994). Functions of macrophytes in constructed wetlands. *Water Sci. Technol.* 29 (4), 71–78. DOI: 10.2166/wst.1994.0160
- Brix, H. (1994) Use of constructed wetlands in water pollution control: historical development, present status, and future perspectives. *Water Sci Technol* 1 October 1994; 30 (8): 209–223. doi: <https://doi.org/10.2166/wst.1994.0413>
- Brix, H. (1993). Wastewater treatment in constructed wetlands: system design, removal processes, and treatment performance. In Moshiri, G.A. (ed.) *Constructed wetlands for water quality improvement*. Lewis Publishers, Boca Raton, Ann Arbor, London, Tokyo. pp. 9-22. DOI: 10.1201/9781003069997-3
- CAM. (2017) CAM realizó seguimiento a Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales del Huila.. Retrieved July 21, 2021, from <https://www.cam.gov.co/1325-cam-realizó-seguimiento-a-plantas-de-tratamientos-de-aguas-residuales-del-huila.html>
- Carlisle. T. & Mulamootil, G. (1991) ARTIFICIAL WETLANDS FOR THE TREATMENT OF STORMWATER, *Canadian Water Resources Journal / Revue canadienne des ressources hydriques*, 16:4, 331-343, DOI: 10.4296/cwrj1604331
- CENTA. (2008). Manual de depuración de aguas residuales urbanas. In Centa, Secretariado de Alianza por el agua, Ecología y Desarrollo.
- Construdata.com (s.f.). Revisado el 26 de julio de 2021. [Construdata.com]
- Davis, L., Edwards, R., Garber, L., Isaacs, B., 1995. *A Handbook of Constructed Wetlands, General Considerations, Vol. 1*, US Environmental Protection Agency (EPA), Washington DC
- DBT, 2019. Manual on constructed wetland as an alternative technology for sewage management in india. Department of Biotechnology (DBT), New Delhi.

Departamento Nacional de Planeación (2019). Iquira, Huil.

http://www.sirhuila.gov.co/images/sirhuila/SIR_2019/FICHAS_DE_CHARACTERIZACION_2019/Iquira.pdf

Empresas Públicas de Íquira. (2021). Informe Caracterización De Vertimientos. Lac. Laboratorio, agua & calibración S.A.S.

Empresas Públicas de Íquira. (2021). Ubicación proyecto PTAR del año 2007

<https://drive.google.com/drive/folders/1qooUPaUwJ7uT4JqIW88HRzM7OzKq3qeZ?usp=sharing>

Empresas Públicas de Neiva. (2014). Disposiciones Técnicas Complementarias Para El Diseño Y Ejecución De Obras E Instalaciones Hidráulicas Empresas Públicas De Neiva E.S.P.

Empresas Públicas de Medellín. (2013). Normas de Diseño de Sistemas de Alcantarillado de las Empresas Públicas de Medellín. E. S. P.

Fan, Y., Wu, X., Shao, L., Han, M., Chen, B., Meng, J., Wang, P., & Chen, G. (2021). Can constructed wetlands be more land efficient than centralized wastewater treatment systems? A case study based on direct and indirect land use. *Science of the Total Environment*, 770, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144841>

Fernandez, J., Muñoz, J., Beascochea, E., & Curt, M. (2015). “Manual de Fitodepuración. Filtros de Macrofitas en flotación”. (U. P. Madrid, Editor) Recuperado el 1 de junio de 2020, de <https://www.fundacionglobalnature.org/macrophytes/documentacion/Cap%EDtulos%20Manual/Cap%EDtulos%201%20a%202.pdf>

González Escobar, F. D. (2011). Diseño de una Planta de Tratamiento Piloto de Aguas Residuales Domésticas para el Conjunto Residencial Matisse utilizando un Humedal Artificial. Universidad San Francisco De Quito. Obtenido de: <http://repositorio.usfq.edu.ec/bitstream/23000/1238/1/101772.pdf>

- Granados, M. (2018). Estudio De Factibilidad De La Implementación De Humedales Artificiales Para El Tratamiento De Aguas Residuales En Ecosistema De Alta Montaña En Toquilla. (U. Libre, Ed.) Recuperado el 2020, de <https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/11576/Proyecto%2C%20art%2C%20ADculo%20y%20plantilla%20congreso.pdf?sequence=1&isAllowed=y&fbclid=IwAR2AAODdbj5fT6V9m7mffWbp-pHZuQLTHuWMhkTGslgdwQCAsLI3B7AfRjg>
- Kadlec, R.H.; Wallace, S.D. (2008) Treatment Wetlands, 2nd ed.; CRC Press: Boca Raton, FL, USA.
- Lara, J. (1999). Depuración de Aguas Residuales Municipales con Humedales Artificiales. (U. P. Cataluña, Ed.) Recuperado el 2020, de <https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2011/06/depuracionaguasresidualesconhumedalesartificiales.pdf>
- Lerma, H. D. (2009). Metodología de la investigación: propuesta, anteproyecto y proyecto. Cuarta edición. Bogotá: Ecoe Ediciones.
- Lourenço, N., Nunes, L. M., (2020). Review of Dry and Wet Decentralized Sanitation Technologies for Rural Areas: Applicability, Challenges and Opportunities. *Environmental Management* 65, 642–664. <https://doi.org/10.1007/s00267-020-01268-7>
- Lozano-Rivas, W. A. (2012). Fundamentos De Diseño De Plantas Depuradoras De Aguas Residuales. Universidad Nacional Abierta y a Distancia. Obtenido de: https://www.researchgate.net/publication/298354134_Disenio_de_Plantas_de_Tratamiento_de_Aguas_Residuales
- Machado, A.I., Beretta, M., Fragoso, R., Duarte, E., (2016). Overview of the state of the art of constructed wetlands for decentralized wastewater management in Brazil. *Journal of Environmental Management* 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.11.015>

- Mena Sanz, J. (2008). Depuración de aguas residuales con humedales artificiales: Ventajas de los sistemas híbridos. Congreso Nacional del Medio Ambiente. Cumbre del Desarrollo Sostenible.
- Mendoça, S. (2000). Sistemas de lagunas de estabilización. Cómo utilizar aguas residuales tratadas en sistemas de regadío.
- Metcalf & Eddy. (1995). Ingeniería de aguas residuales tratamiento, vertido y reutilización (3.a ed., Vol. 1). MCGRAW HILL.
- Ministerio del Ambiente - MINAM, (2009). Manual para MUNICIPIOS ECOEFICIENTES. Lima: Ministerio del Ambiente - MINAM.
- Ministerio de Desarrollo Económico, (2000) Ministerio de Desarrollo Económico. (2000). Título E-Tratamiento de aguas residuales. Reglamento Técnico Del Sector De Agua Potable Y Saneamiento Basico, 150.
www.minvivienda.gov.co/Documents/ViceministerioAgua/010710_ras_titulo_e_.pdf
- Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio Colombia. (2000a). RAS 2000, Título A - Aspectos generales de los sistemas de agua potable y saneamiento básico. In Reglamento Técnico Del Sector De Agua Potable Y Saneamiento Básico.
- Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio Colombia. (2000b). RAS 2000, Título D - Sistemas de recolección y evacuación de aguas residuales domésticas y aguas lluvias. In Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico.
http://www.minvivienda.gov.co/Documents/ViceministerioAgua/TITULO_D.pdf
- Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio Colombia. (2017). Resolución 0330 - 2017.
<http://www.minvivienda.gov.co/ResolucionesAgua/0330 - 2017.pdf>
- Morató, J., Subirana, A., Gris, A., Carneiro, A. & Pastor, R. (2006). Tecnologías sostenibles para la potabilización y el tratamiento de aguas residuales. Revista Lasallista de Investigación,

- 3(1),19-29.[fecha de Consulta 17 de Marzo de 2021]. ISSN: 1794-4449. Disponible en:
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=695/69530105>
- Nocetti E, Maine MA, Hadad HR, Mufarrege MLM, Di Luca GA, Sánchez GC. (2020) Selection of macrophytes and substrates to be used in horizontal subsurface flow wetlands for the treatment of a cheese factory wastewater. *Sci Total Environ.* 2020 Nov 25; 745:141100. Epub 2020 Jul 21. PMID: 32758752.DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.141100.
- OMS, (1999). Estudios técnicos de sustitución aplicables al saneamiento de aguas servidas de pequeñas comunidades: Sistemas de tratamiento de aguas servidas por medio de humedades artificiales. Santa Fé; Canadá: Societé Québécoise d'Assanissement des Eaux;Organización Panamericana de la Salud;Centro Nacional del Agua (CENAGUA).
- OPS (2005). Guía Para El Diseño De Tanques Sépticos, Tanques Imhoff Y Lagunas De Estabilización.
https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/OPS%202005.%20Gu%C3%ADa%20para%20el%20dise%C3%B1o%20de%20tanques%20s%C3%A9pticos.pdf
- PAVCO (2020). Manual Técnico Tubosistemas para alcantarillado Novafort Novaloc.
<https://pavcowavin.com.co/download/14>
- Powell, J., Homer, J., Glassmeyer, C., Sauer, N., 2009. Alternative wastewater treatment: on-site biotreatment wetlands at the Fernald Preserve Visitors Center. In: WM Conference, Phoenix, Arizona.
- Ramalho, R. (1990). Tratamiento de aguas residuales. Barcelona: Reverté, S.A.
- Rodríguez Miranda, J. P., García Ubaque, C. A., & Pardo Pinzón, J. (2015). Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales. *Revista Tecnura*, 19(46), 149. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015.4.a12>

- Romero, J. (2000). Tratamiento de Aguas Residuales. Teoría y principios de diseño. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Salas, J. J., Pidre, J. R., & Sanchez, L. (2007). Manual de tecnologías no convencionales para la depuración de aguas residuales: Humedales Artificiales. En J. J. Salas Rodriguez, J. R. Pidre Bocado, & L. Sanchez Fernandez. Sevilla: CENTA.
- Silva, A., & Zamora, H. (2005). Humedales Artificiales. (U. N. Colombia, Ed.) Recuperado el 2020, de <http://bdigital.unal.edu.co/1106/1/angelasofiasilvahernandariozamora.2005.pdf>
- Secretaria De Salud De Iquira, (2013). Documento De Analisis De Situacion De Salud Con El Modelo De Los Determinantes Sociales De Salud Del Municipio De Iquira 2012
- Shao, L., Wu, Z., Zeng, L., Chen, Z.M., Zhou, Y., Chen, G.Q., 2013. Embodied energy assessment for ecological wastewater treatment by a constructed wetland. *Ecol. Model.* 37 (4), 622–628.
- Solano, M.L., Soriano, P., Ciria, M.P., 2004. Constructed wetlands as a sustainable solution for wastewater treatment in small villages. *Biosyst. Eng.* 87 (1), 109–118.
- Stefanakis, A., Akratos, C.S., Tsihrintzis, V.A., 2014. Vertical Flow Constructed Wetlands: Eco-Engineering Systems for Wastewater and Sludge Treatment. Newnes.
- Stottmeister, U., Wießner, A., Kuschik, P., Kappelmeyer, U., Kästner, M., Bederski, O., et al., 2003. Effects of plants and microorganisms in constructed wetlands for wastewater treatment. *Biotechnol. Adv.* 22 (1–2), 93–117.
- Tabilo-Valdivieso, E. (1999) El Beneficio de los humedales en América Central: el potencial de los humedales para el desarrollo. 2a. ed. -- Turrialba, C.R.: WWF; Heredia, C.R.: Universidad Nacional, Programa Regional en Manejo de Vida Silvestre.

- Tamayo, S. (2021) Respuesta Solicitud de Información trabajo de Grado. 21 de octubre, 2021.
<https://docs.google.com/document/d/1ildhQV2bJ9aG8dJroSziKIk6PM1-CQHUqNzvmnu2EmQ/edit?usp=sharing>
- Tebbutt, T.H.Y., 1983. Principles of water quality control. Pergammon Press, Oxford.
- Tilak, A.S., Wani, S.P., Patil, M.D., Datta, A., 2016. Evaluating wastewater treatment efficiency of two field scale subsurface flow constructed wetlands. *Current Sci.* 110 (09), 1764.
- Torres, E., & Marin, A. (2012). Optimización Del Humedal Artificial Subsuperficial Para Tratamiento De Aguas Residuales. (U. L. Colombia, Ed.) Recuperado el 2020, de <http://www.unilibre.edu.co/revistaingeniolibre/revista-11/art2.pdf>
- Universidad Nacional Autónoma de México. (2013). Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales. In Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales (1st ed.).
- Valencia, E., Silva, I. J., & Narváez, C. P. (2010). Sistemas descentralizados integrados y sostenibles para el tratamiento de aguas residuales domésticas. *Ingeniería y Región*, 7, 65-72. Retrieved July 20, 2021, from <https://journalusco.edu.co/index.php/iregion/article/download/801/1540?inline=1>
- Villegas, J., Guerrero, J., & Castaño, J. (2006). Septic Tank-Up Flow Anaerobic Filter-Subsurface Flow Constructed Wetland systems aimed at wastewater treatment in small localities in Colombia. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia*, vol.29, no.3, p.269-281.
- Vymazal, J. (2010). Constructed Wetlands for Wastewater Treatment. *Water*, 2(3), 530–549. MDPI AG. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.3390/w2030530>

Vymazal, J., Greenway, M., Tonderski, K., Brix, H., Mander, Ü., (2006). Constructed wetlands for wastewater treatment. In: *Wetlands and Natural Resource Management*. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 69–96.

Vymazal, J., 2002. The use of sub-surface constructed wetlands for wastewater treatment in the Czech Republic: 10 years experience. *Ecol. Eng.* 18 (5), 633–646.

Yañez, F. (1995). *Lagunas de estabilización* (Centro panamericano de ingeniería sanitaria y ambiental (ed.)).

Zidan, A.A., El-Gamal, M.A., Rashed, A.A., Abd El-Hady, M.A., (2015) Wastewater treatment in horizontal subsurface flow constructed wetlands using different media (setup stage), *Water Science*, 29:1, 26-35, DOI: 10.1016/j.wsj.2015.02.003

ANEXO A: ESTUDIO DE CARACTERIZACIÓN DE VERTIMIENTOS.

8.1. PUNTO DE VERTIMIENTO N° 1: “Lagartija”

Tabla N° 3. Datos de Campo. Punto de vertimiento “Lagartija” – municipio de Íquira.

N°	HORA	T. AMBIENTE	T. AGUA	pH	CONDUCTIVIDAD	SDT	S. SEDIMENTABLES	CAUDAL
		(°C)	(°C)	Unidades	(µS/cm)	(mg/L)	(mg/L)	(L/s)
1	09:00	26.60	22.70	7.46	211.60	105.20	0.50	0.81
2	10:00	26.60	23.60	7.31	340.30	167.30	0.50	1.62
3	11:00	21.90	22.60	7.14	183.20	90.26	0.30	0.02
4	12:00	21.80	23.00	7.52	658.20	323.00	0.10	2.14
5	13:00	22.50	22.70	7.24	362.20	178.00	0.10	2.70
6	14:00	22.30	23.20	7.38	354.90	174.80	0.50	2.12
7	15:00	21.80	28.80	7.29	208.10	102.50	0.90	1.51
8	16:00	26.30	22.30	7.41	249.40	122.70	1.30	1.49
9	17:00	24.00	22.20	7.21	156.60	77.19	1.70	1.51
10	18:00	23.90	22.00	7.25	173.70	81.23	1.90	1.74
11	19:00	21.80	21.20	7.14	403.40	202.30	1.00	1.44
12	20:00	21.70	21.10	7.31	402.10	204.50	0.90	1.35
13	21:00	21.10	21.00	7.29	405.70	194.30	0.90	1.42
14	22:00	21.00	20.30	7.12	159.50	81.14	0.30	0.86
15	23:00	20.10	19.50	7.14	163.30	78.15	0.20	1.03
16	00:00	19.00	18.30	7.21	166.20	82.29	0.50	1.27
17	01:00	19.20	18.10	7.23	112.10	56.43	0.20	0.66
18	02:00	19.00	17.90	7.43	114.20	55.39	0.10	0.77
19	03:00	18.30	17.80	7.16	412.30	197.90	0.30	0.81
20	04:00	18.10	17.20	7.47	426.70	210.30	0.20	0.76
21	05:00	18.00	17.10	6.99	433.20	207.90	0.70	1.19
22	06:00	18.10	17.00	7.31	444.20	222.70	0.90	1.94
23	07:00	19.50	18.10	7.32	441.70	221.80	1.10	1.84
24	08:00	21.30	18.80	7.43	539.30	272.40	1.30	1.96
25	09:00	21.20	18.90	7.41	461.70	128.10	1.00	1.22
PROMEDIO		21.40	20.62	7.29	319.35	153.51	0.70	1.37

Fuente: LAC. LABORATORIO, AGUA Y CALIBRACIÓN S.A.S., 2021.

Tabla N° 10. Rangos permisibles según **resolución 631 de 2015**, actividades de vertimiento de Aguas Residuales Domesticas ARD, del punto denominado "**Lagaritja**" comparativa con los resultados de laboratorio señaladas a continuación:

PARAMETRO	UNIDAD	RESOLUCION 631, Art. 8°	RESULTADO	NIVEL DE CUMPLIMIENTO
GENERALES				
pH	Unidades de	6,00 – 9,00	7,29	CUMPLE
DBO ₅	mgO ₂ /L	90,00	118,60	NO CUMPLE
DGO	mgO ₂ /L	180,00	266,70	NO CUMPLE
Grasas y Aceites	mg/L	20,00	30,00	NO CUMPLE
Detergentes – Tenso activos	mg SAAM/L	Análisis y Reporte	5,55	-
Solidos Suspendidos Totales - SST	mg/L	90,00	50,00	CUMPLE
COMPUESTOS DE FORFORO				
Ortofosfatos	mg PO ₄ /L	Análisis y Reporte	1,96	-
HIDROCARBUROS				
Hidrocarburos Totales (TPH)	mg/L	Análisis y Reporte	< 10,00	-
COMPUESTOS DE NITROGENO				
Nitratos	mg NO ₃ /L	Análisis y Reporte	< 0,50	-
Nitritos	mg NO ₂ /L	Análisis y Reporte	0,006	-
Nitrógeno Amoniacal	mg NH ₃ - N/L	Análisis y Reporte	14,20	-
Nitrógeno Total	mg N/L	Análisis y Reporte	30,09	-

Fuente: LAC. LABORATORIO, AGUA Y CALIBRACION S.A.S., 2021.

8.3. PUNTO DE VERTIMIENTO N° 2: “Guacharaca”

Tabla N°4. Datos de Campo. Punto de vertimiento “Guacharaca” – municipio de Íquira.

N°	HORA	T. AMBIENTE	T. AGUA	pH	CONDUCTIVIDAD	SDT	S. SEDIMENTABLES	CAUDAL
		(°C)	(°C)	Unidades	(μS/cm)	(mg/L)	(mg/L)	(L/s)
1	09:00	27.60	25.40	7.69	297.80	150.30	0.70	2.62
2	10:00	26.30	22.60	7.26	551.20	271.90	0.30	3.39
3	11:00	21.80	22.70	7.47	421.80	207.20	0.50	2.83
4	12:00	21.70	22.90	7.49	425.30	212.10	0.40	2.91
5	13:00	23.10	23.50	7.39	354.90	174.40	1.10	2.37
6	14:00	23.30	23.40	7.37	351.80	172.70	0.90	2.25
7	15:00	22.90	22.60	7.32	342.60	171.10	0.70	3.17
8	16:00	23.60	22.90	7.43	350.80	172.50	0.50	2.24
9	17:00	23.30	22.70	7.40	352.40	167.10	0.80	2.87
10	18:00	21.80	21.50	7.61	634.20	318.20	0.90	2.25
11	19:00	21.70	21.30	7.34	641.30	320.10	0.70	1.32
12	20:00	21.70	21.00	7.29	639.90	321.90	0.90	1.38
13	21:00	21.30	20.90	7.20	454.50	226.50	1.00	1.67
14	22:00	21.20	20.30	7.21	411.10	205.90	0.90	1.19
15	23:00	20.00	19.50	7.27	408.00	204.10	0.30	0.02
16	00:00	19.00	18.30	7.34	431.20	206.40	0.10	0.60
17	01:00	19.00	18.10	7.38	219.20	205.30	0.20	1.53
18	02:00	19.00	17.90	7.39	211.90	107.30	0.10	0.49
19	03:00	18.50	17.90	7.27	204.10	102.40	0.30	0.45
20	04:00	18.10	17.40	7.14	199.80	100.10	0.40	1.12
21	05:00	18.00	17.30	7.22	347.40	309.20	0.70	1.60
22	06:00	18.00	17.20	7.28	667.20	334.60	0.90	2.15
23	07:00	19.60	17.70	7.40	498.10	249.40	0.90	3.11
24	08:00	21.30	18.90	7.48	484.30	120.20	1.30	3.00
25	09:00	21.50	19.00	7.47	302.70	246.70	0.90	3.70
PROMEDIO		21.33	20.51	7.36	408.14	211.10	0.66	2.01

Fuente: LAC. LABORATORIO, AGUA Y CALIBRACIÓN S.A.S., 2021.

Tabla N° 11. Rangos permisibles según **resolución 631 de 2015**, actividades de vertimiento de Aguas Residuales Domesticas ARD, del punto denominado "Guacharaca" comparativa con los resultados de laboratorio señalados a continuación:

PARAMETRO	UNIDAD	RESOLUCION 631, Art. 8°	RESULTADO	NIVEL DE CUMPLIMIENTO
GENERALES				
pH	Unidades de	6,00 – 9,00	7,36	CUMPLE
DBO ₅	mgO ₂ /L	90,00	103,10	NO CUMPLE
DQO	mgO ₂ /L	180,00	204,90	NO CUMPLE
Grasas y Aceites	mg/L	20,00	51,06	NO CUMPLE
Detergentes – Tenso activos	mg SAAM/L	Análisis y Reporte	4,57	-
Solidos Suspendidos Totales - SST	mg/L	90,00	45,71	CUMPLE
COMPUESTOS DE FORFORO				
Ortofosfatos	mg PO ₄ /L	Análisis y Reporte	1,79	-
HIDROCARBUROS				
Hidrocarburos Totales (TPH)	mg/L	Análisis y Reporte	< 10,00	-
COMPUESTOS DE NITROGENO				
Nitratos	mg NO ₃ /L	Análisis y Reporte	< 0,50	-
Nitritos	mg NO ₂ /L	Análisis y Reporte	< 0,005	-
Nitrógeno Amoniacal	mg NH ₃ - N/L	Análisis y Reporte	19,40	-
Nitrógeno Total	mg N/L	Análisis y Reporte	31,17	-

Fuente: LAC. LABORATORIO, AGUA Y CALIBRACION S.A.S., 2021.

8.5. PUNTO DE VERTIMIENTO N° 3: “Conejo”

Tabla N° 5. Datos de Campo. Punto de vertimiento “Conejo” – municipio de Íquira.

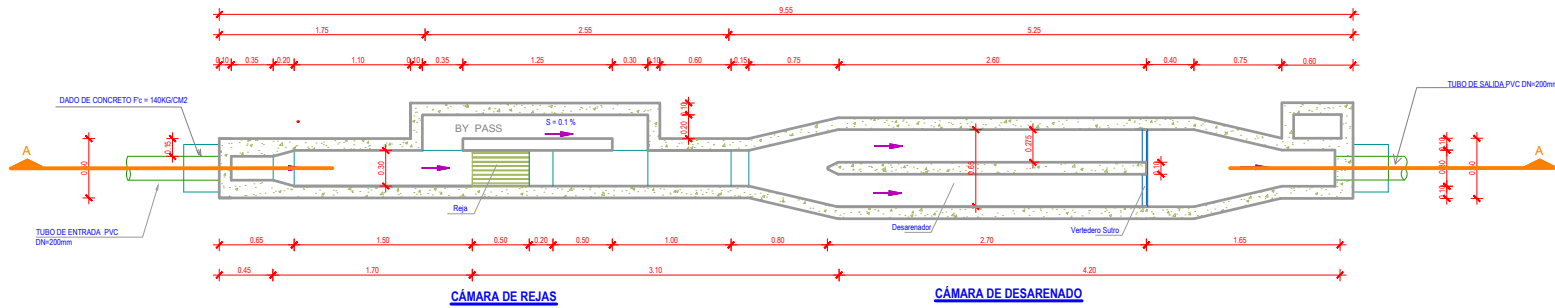
N°	HORA	T. AMBIENTE	T. AGUA	pH	CONDUCTIVIDAD	SDT	S. SEDIMENTABLES	CAUDAL
		(°C)	(°C)	Unidades	(μS/cm)	(mg/L)	(mg/L)	(L/s)
1	09:00	28.10	27.30	7.14	293.10	147.10	2.50	23.07
2	10:00	28.30	27.10	7.16	285.50	153.30	2.30	22.15
3	11:00	25.70	24.80	7.63	240.30	127.70	1.40	18.13
4	12:00	25.50	24.70	7.29	249.70	128.30	1.70	18.43
5	13:00	22.10	22.00	7.28	261.60	111.00	1.30	19.07
6	14:00	23.50	22.10	7.31	249.30	108.40	2.50	21.15
7	15:00	23.50	22.00	7.40	211.70	107.20	1.00	17.57
8	16:00	22.30	22.00	7.32	218.40	112.30	0.90	16.10
9	17:00	22.00	21.40	7.31	187.40	89.14	1.50	15.29
10	18:00	22.00	21.20	7.42	102.40	100.10	1.80	18.14
11	19:00	21.90	20.40	7.53	199.80	109.30	1.30	17.67
12	20:00	21.90	20.20	7.22	198.60	123.60	1.40	16.42
13	21:00	21.10	20.00	7.24	191.50	111.40	1.00	15.06
14	22:00	20.30	19.30	7.26	192.30	113.70	0.50	13.78
15	23:00	20.10	19.10	7.19	183.10	149.80	0.30	12.15
16	00:00	20.00	18.30	7.23	198.40	120.20	0.30	10.02
17	01:00	20.10	18.40	7.17	60.13	73.12	0.20	9.83
18	02:00	19.30	18.10	7.43	64.45	77.29	0.10	8.91
19	03:00	19.20	17.90	7.40	72.19	84.02	0.30	8.11
20	04:00	18.30	17.50	7.13	63.63	63.49	0.50	9.35
21	05:00	18.20	17.50	7.20	188.90	150.20	0.60	10.72
22	06:00	18.10	17.30	7.25	182.40	147.90	0.90	10.19
23	07:00	19.40	18.70	7.42	301.60	173.20	1.50	12.87
24	08:00	19.50	18.4	7.11	299.00	143.60	1.90	15.79
25	09:00	19.50	18.3	7.53	313.10	167.60	2.10	16.94
PROMEDIO		21.60	20.56	7.30	200.34	119.72	1.19	15.04

Fuente: LAC. LABORATORIO, AGUA Y CALIBRACIÓN S.A.S., 2021.

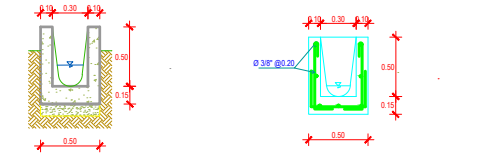
Tabla N° 12. Rangos permisibles según resolución 631 de 2015, actividades de vertimiento de Aguas Residuales Domesticas ARD, del punto denominado "Conejo" comparativa con los resultados de laboratorio señalados a continuación:

PARAMETRO	UNIDAD	RESOLUCION 631, Art. 8°	RESULTADO	NIVEL DE CUMPLIMIENTO
GENERALES				
pH	Unidades de	6,00 – 9,00	7,30	CUMPLE
DBO ₅	mgO ₂ /L	90,00	58,70	CUMPLE
DQO	mgO ₂ /L	180,00	112,57	CUMPLE
Grasas y Aceites	mg/L	20,00	28,57	NO CUMPLE
Detergentes – Tenso activos	mg SAAM/L	Análisis y Reporte	1,33	-
Sólidos Suspendidos Totales - SST	mg/L	90,00	35,00	CUMPLE
COMPUESTOS DE FORFORO				
Ortofosfatos	mg PO ₄ /L	Análisis y Reporte	0,691	-
HIDROCARBUROS				
Hidrocarburos Totales (TPH)	mg/L	Análisis y Reporte	< 10,00	-
COMPUESTOS DE NITROGENO				
Nitratos	mg NO ₃ /L	Análisis y Reporte	< 0,50	-
Nitritos	mg NO ₂ /L	Análisis y Reporte	< 0,005	-
Nitrógeno Amoniacal	mg NH ₃ - N/L	Análisis y Reporte	4,65	-
Nitrógeno Total	mg N/L	Análisis y Reporte	13,28	-

Fuente: LAC. LABORATORIO, AGUA Y CALIBRACION S.A.S., 2021.

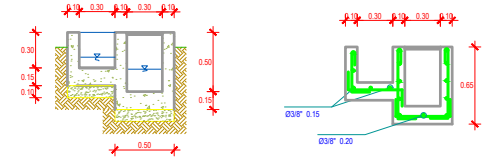


VISTA PLANTA DE CÁMARA DE REJAS Y DESARENADOR



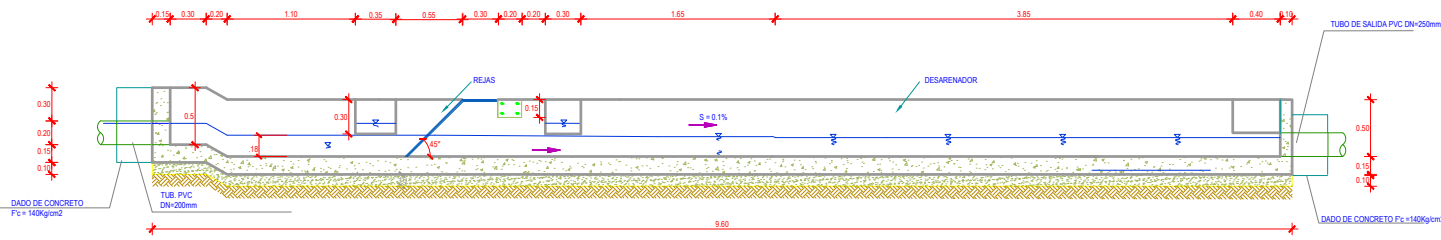
CORTE B - B

CORTE B - B (DETALLE DE ARMADURA)

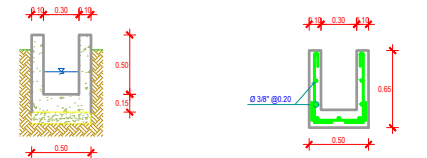


CORTE C - C

CORTE C - C (DETALLE DE ARMADURA)

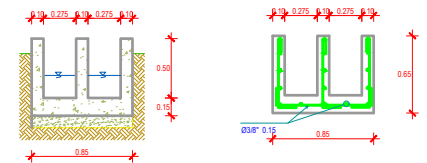


CORTE A - A
ESC. 1/25



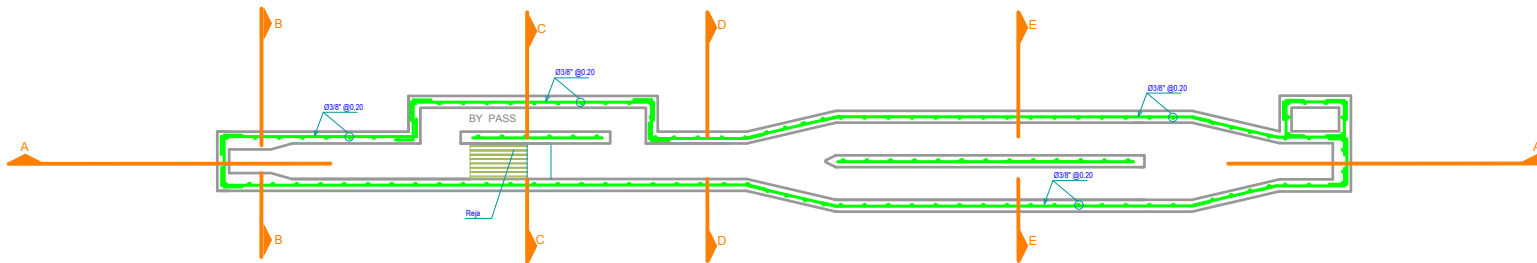
CORTE D - D

CORTE D - D (DETALLE DE ARMADURA)

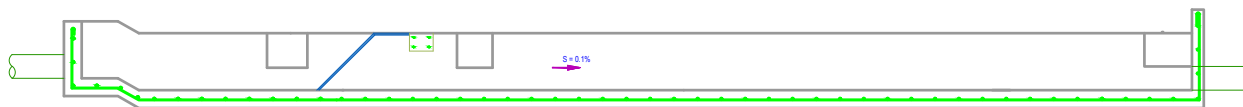


CORTE E - E

CORTE E - E (DETALLE DE ARMADURA)

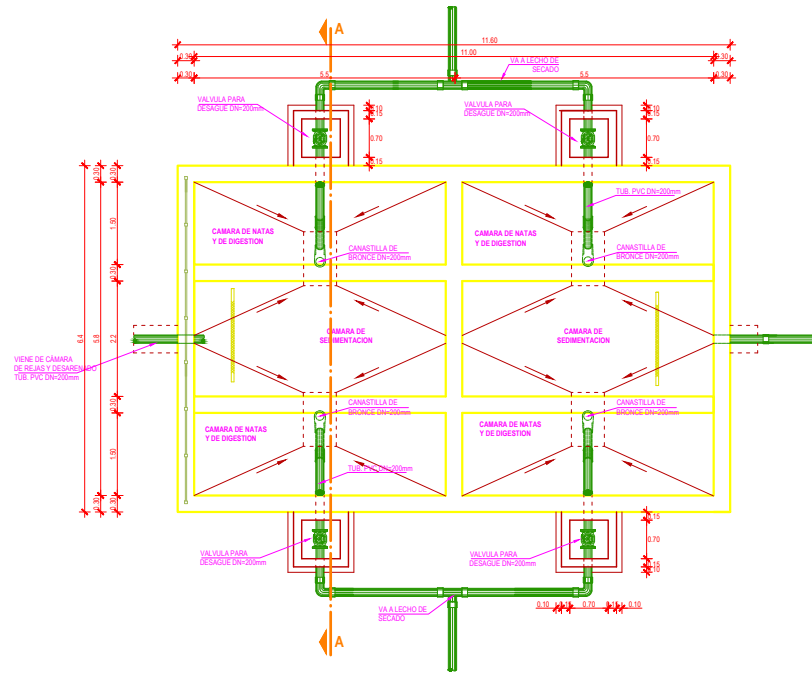


PLANTA (DETALLE ARMADURA)

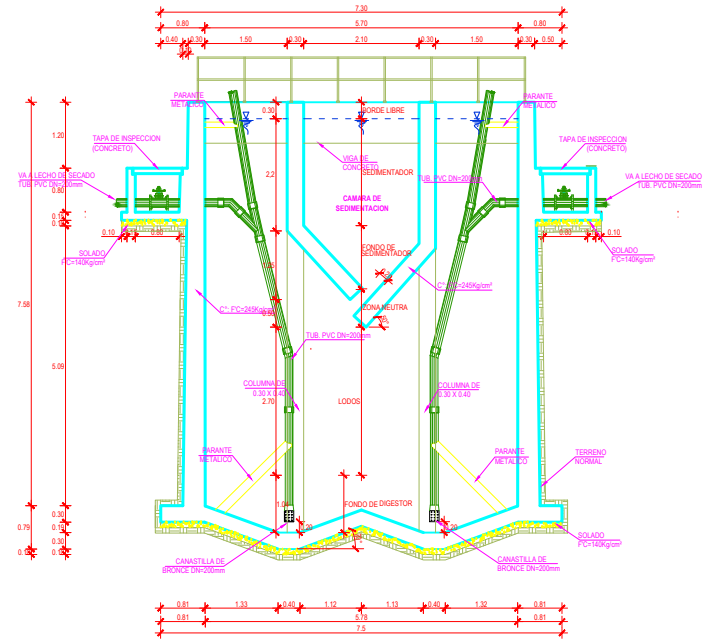


CORTE A - A (DETALLE DE ARMADURA)

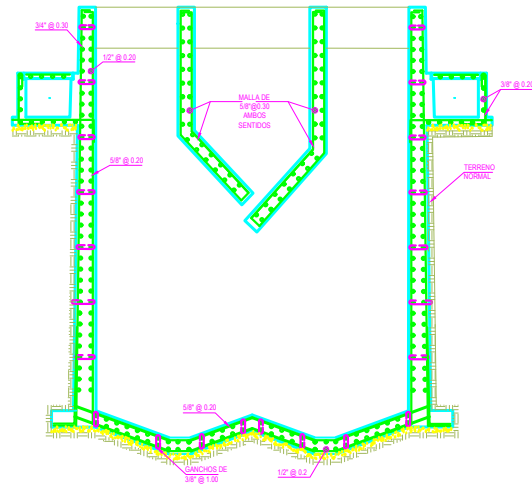
ESPECIFICACIONES TECNICAS	
CONCRETO ARMADO	En losa de fondo $f_c = 210 \text{ kg/cm}^2$ En muros $f_c = 210 \text{ kg/cm}^2$
CONCRETO SIMPLE	Solado $e = 4"$ $f_c = 140 \text{ kg/cm}^2$
ACERO DE REFUERZO	Sider, Grado 60, $f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$
ESFUERZO PORTANTE DEL TERRENO	Mínimo $\sigma = 1.50 \text{ kg/cm}^2$ En losa de fondo $R = 7.50 \text{ cm}$
RECURRIMIENTOS	En Cimientos $R = 7.50 \text{ cm}$ En muros $R = 5.00 \text{ cm}$ En Losas macizas, columnas, vigas: $R = 3.0 \text{ cm}$
REVOQUES	En interiores con Impermeabilizante 1:2 En exteriores solaqueado



PLANTA DE TANQUE IMHOFF



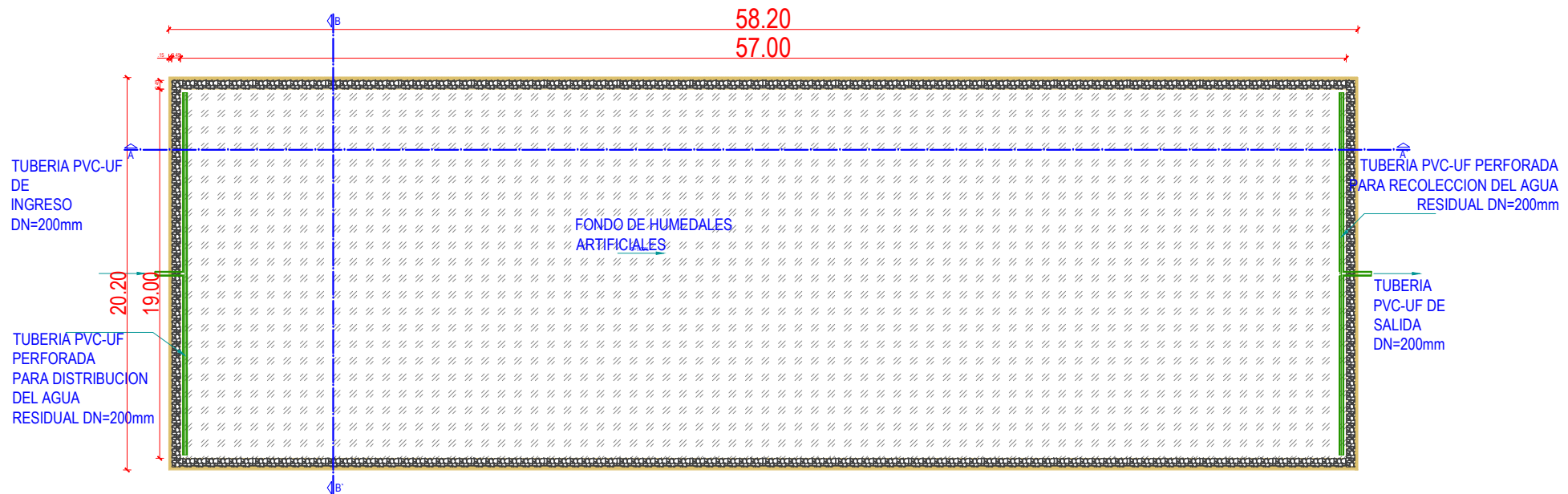
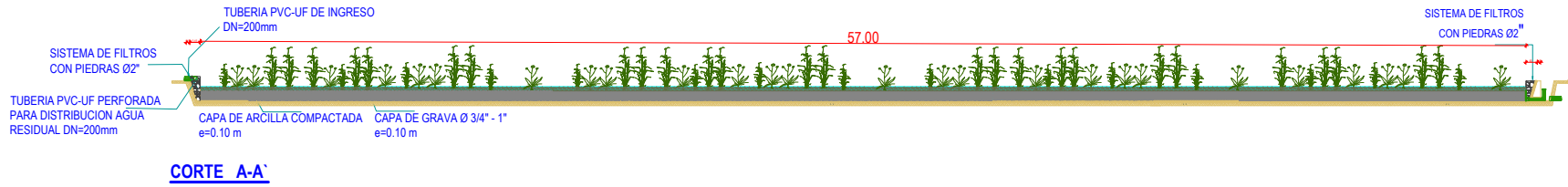
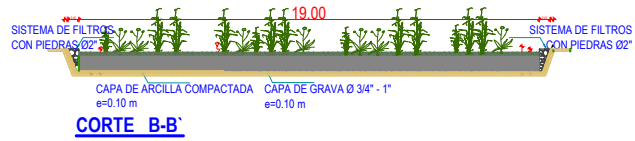
CORTE A-A: ELEMENTOS DE TANQUE IMHOFF

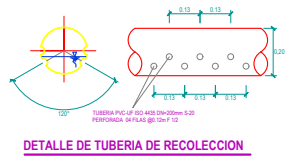


CORTE A-A / ELEMENTOS DE TANQUE IMHOFF: ESTRUCTURAS

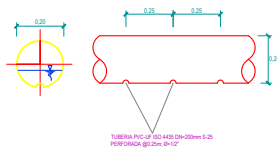
ESPECIFICACIONES TECNICAS

- CONCRETO EN GENERAL $f_c=28\text{kg/cm}^2$
SOLADO $f_c=18\text{kg/cm}^2$
- CEMENTO PORTLAND TPO I
- ACERO $f_y=420\text{kg/cm}^2$
- RECUBRIMIENTO En losa de fondo $R = 7.5 \text{ cm}$
En Casetas $R = 7.5 \text{ cm}$
En muros $R = 5.0 \text{ cm}$
En Losas macizas $R = 3.0 \text{ cm}$
- REVOQUES En interiores con impermeabilizante 1:3
En exteriores sobaqueado con mortero simple 1:4





DETALLE DE TUBERIA DE RECOLECCION



DETALLE DE TUBERIA DE DISTRIBUCION

LEYENDA

ARCILLA COMPACTADA	
GRAVA Ø 3/4" - 1"	
ARENA	
PIEDRA Ø 2"	
AGUA RESIDUAL	

ANEXO C: PRESUPUESTO TOTAL DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO SOSTENIBLE

PRESUPUESTO PTAR					
ÍTEM	DESCRIPCIÓN DE ÍTEMS	UNIDAD	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL
PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES SOSTENIBLE EN EL MUNICIPIO DE ÍQUIRA, HUILA					
1.0	ACTIVIDADES PRELIMINARES				
1.1	Localización y replanteo	Gl	1,00	\$ 750.000	\$ 750.000
1.2	Señalización preventiva	Gl	1,00	\$ 1.500.000	\$ 1.500.000
				SUBTOTAL	\$ 2.250.000
2.0	TRATAMIENTO PRELIMINAR				
2.1	Concreto 28 MPa	m3	4,70	\$ 780.000	\$ 3.666.000
2.2	Acero de refuerzo f'y = 60.000 psi	kg	475,00	\$ 4.500	\$ 2.137.500
2.3	Vertedero Sutro	und	2,00	\$ 75.000	\$ 150.000
2.4	Rejillas de cribado en acero inoxidable de 1.0 m de long. *3/8"*1 1/2"	und	1,00	\$ 350.000	\$ 350.000
2.5	Suministro e instalación de compuerta metálica 0.35x0.60 m	und	2,00	\$ 125.000	\$ 250.000
2.6	Bandeja de escurrimiento en concreto de 21.1 MPa con orificios de 1" de 0.25*0.40 m	und	1,00	\$ 480.000	\$ 480.000
2.7	Compuertas manuales en acrílico e = 2 mm de 0.30*0.75 m	und	2,00	\$ 185.000	\$ 370.000
2.8	Suministro e instalación de escalera de gato altura 2,70 m	und	1,00	\$ 350.000	\$ 350.000
2.9	Lámina para pasarela cal 1/4	und	1,00	\$ 125.000	\$ 125.000
2.10	Reglilla de aforo	und	1,00	\$ 25.000	\$ 25.000
				SUBTOTAL	\$ 7.903.500
3.0	TANQUE IMHOFF				
3.1	Descapote e = 25 - 50 cm	m2	93,80	\$ 2.800	\$ 262.640
3.2	Excavación material común de 0.0 a 1.5 m (máquina) con bombeo	m3	140,70	\$ 25.000	\$ 3.517.500
3.3	Excavación material común de 1.5 a 3.0 m (máquina) con bombeo	m3	69,41	\$ 28.000	\$ 1.943.480
3.4	Relleno de material proveniente de la excavación	m3	93,07	\$ 21.000	\$ 1.954.470
3.5	Solado de limpieza concreto ciclópeo e = 0.20 m	m3	9,38	\$ 520.000	\$ 4.877.600
3.6	Concreto 28 Mpa impermeabilizado	m3	71,01	\$ 680.000	\$ 48.286.800
3.7	Acero de refuerzo f'y = 60.000 psi	kg	17278,00	\$ 4.500	\$ 77.751.000
3.8	Concreto ciclópeo de relleno	m3	4,35	\$ 580.000	\$ 2.523.000
3.9	Pantallas deflectoras en acrílico de 1.60x0.50 m	und	4,00	\$ 258.000	\$ 1.032.000

3.10	Compuertas manuales en acrílico e = 2 mm de 0.50*0.75 m	und	2,00	\$	125.000	\$	250.000
3.11	Suministro e instalación de compuerta metálica 0.35x0.60 m	und	2,00	\$	125.000	\$	250.000
3.12	Retiro y disposición de material sobrante	m3	117,04	\$	25.000	\$	2.926.000
					SUBTOTAL		\$ 145.574.490
4.0	HUMEDAL SUBSUPERFICIAL						
4.1	Localización y replanteo	m2	6498,00	\$	1.831	\$	11.897.838
4.2	Descapote y limpieza	m3	499,00	\$	16.120	\$	8.043.880
4.3	Excavación a máquina	m3	1299,60	\$	11.387	\$	14.798.545
4.4	Compactación material existente	m3	254,92	\$	5.240	\$	1.335.781
4.5	Geomembrana	m2	6498,00	\$	15.427	\$	100.244.646
4.7	Tubería conexión Ø 4"	m	1681,75	\$	17.174	\$	28.882.375
4.8	Tubería perforada Ø 4"	m	647,30	\$	21.669	\$	14.026.344
4.12	Vegetación	und	4530,00	\$	3.403	\$	15.415.590
4.13	Material de sustrato	m3	4248,72	\$	9.417	\$	40.010.196
					SUBTOTAL		\$ 234.655.194
5.0	LECHOS DE SECADOS						
5.1	Descapote e = 25 - 50 cm	m2	263,68	\$	2.800	\$	738.304
5.2	Excavación material común de 0.0 a 1.5 m (máquina) con bombeo	m3	222,48	\$	25.000	\$	5.562.000
5.3	Concreto 21.1 MPa impermeabilizado	m3	58,66	\$	680.000	\$	39.888.800
5.4	Solado de limpieza concreto ciclópeo e = 0.20 m	m3	52,74	\$	620.000	\$	32.698.800
5.5	Cubierta en teja asbesto cemento (Eternit) N6	m2	228,25	\$	125.000	\$	28.531.250
5.6	Gravilla seleccionada, según diseño	m3	20,70	\$	250.000	\$	5.175.000
5.7	Arena lavada para filtro, según diseño	m3	46,96	\$	250.000	\$	11.740.000
5.8	Murete en ladrillo con pañete interior	m2	139,46	\$	85.000	\$	11.854.100
5.9	Acero de refuerzo f'y = 60.000 psi	kg	5279,40	\$	4.500	\$	23.757.300
5.10	Relleno material proveniente de la excavación T3	m3	33,37	\$	21.000	\$	700.770
5.11	Retiro y disposición de material sobrante	m3	189,11	\$	25.000	\$	4.727.750
5.12	Válvula Ø 4" HG tubería de lodos PVC RDE 41, incluye caja y tapa	und	12,00	\$	1.250.000	\$	15.000.000
5.13	Yee Ø 4" de 45°	und	48,00	\$	58.000	\$	2.784.000
5.14	Codos Ø 4" de 90°	und	12,00	\$	25.000	\$	300.000
5.15	Tees de 4" a 6"	und	12,00	\$	150.000	\$	1.800.000

5.16	Tubería a válvulas Ø 4"	ml	7,20	\$	25.000	\$	180.000
5.17	Tubería perforada Ø 4"	ml	223,20	\$	28.000	\$	6.249.600
					SUBTOTAL	\$	191.687.674

					SUBTOTAL PTAR	\$	582.070.858
					AIU (30%)	\$	174.621.258
					TOTAL PTAR	\$	756.692.116

ANEXO D: MANUAL DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

CANAL DE ENTRADA

Operación y Mantenimiento

Debe hacerse una medición semanal de caudales y niveles en los canales, con el fin de establecer la pendiente de la línea de gradiente hidráulico y verificar si están ocurriendo cambios en la rugosidad del canal o en el área mojada, debidos a problemas de sedimentación o erosión.

El lavado y la limpieza de los canales deben hacerse semestralmente.

REJILLAS

Operación y Mantenimiento

Las rejillas manuales tienen que ser limpiadas dos veces por día, por la mañana y por la tarde. Si esto no se realiza se puede provocar un reflujo.

En periodos de lluvias la limpieza de la planta de tratamiento debería de repetirse cada hora.

Es de mucha importancia de que cada persona que realiza la limpieza debe usar guantes de protección de hule, para retirar los objetos retenidos en la rejilla evitando el riesgo de infección.

Para el buen mantenimiento de las rejillas se debe limpiar todos los días con agua a presión.

Para evitar los malos olores producido por el resto de material secado de la rejilla aplicar oxido de calcio hidratado (cal).

DESARENADOR

Operación y mantenimiento

Al tener un caudal inferior a 50 L/s su limpieza se realizará manualmente.

En desarenadores de limpieza manual que se usen con aguas negras combinadas debe llevarse a cabo lo siguiente:

1. Medición periódica del lecho de arena acumulado.
2. Aislamiento del desarenador en el momento en que la arena ocupe $2/3$ del volumen.
3. Drenaje del agua residual en la cámara. Este se puede realizar, en algunas instalaciones, por medio de canalizaciones que devuelven el líquido drenado al afluyente o a una unidad del sistema de tratamiento adoptado.

4. Remoción de la arena.
5. Estimación de la cantidad de arena removida para los registros en las fichas de operación.
6. Transporte del material removido hacia el sitio de disposición.
7. Lavado del desarenador para ser utilizado nuevamente.
8. Analizar una muestra de la arena removida en términos de sólidos volátiles. Adopción de medidas de corrección para las muestras que presenten alto contenido de estos.
9. Verificación de la cantidad de arena en las unidades subsecuentes.
10. Remoción de la arena, si fuera el caso, retenida en las demás unidades de tratamiento.

Para los desarenadores de limpieza mecánica, la operación debe ser similar a los de limpieza manual, cumpliendo además con lo siguiente:

1. Mantenimiento los equipos de acuerdo con el manual de instrucciones del fabricante.
2. Mantenimiento del movimiento del equipo libre de obstrucciones.
3. Lavado diario, con chorros de agua, de las paredes y los raspadores.
4. Vaciado y revisión, por lo menos una vez por año, de las unidades. Debe ensayarse el equipo que se encuentre inmerso, así como la condición de la estructura.

Con el fin de evitar excesos de materia orgánica en el material removido se recomienda lo siguiente:

1. Aumentar la velocidad.
2. Disminuir el tiempo de retención. Para lograr esto puede reducirse el área de la sección transversal.

Para evitar el arrastre de arena en el efluente se recomienda:

- a) Remover con mayor frecuencia la arena acumulada.
- b) Colocar en funcionamiento otro vertedero.
- c) Aumentar el área de la sección transversal de la cámara. Se recomienda además que el desarenador cuente con un sistema de desvío del flujo o paso directo.

TANQUE IMHOFF

Cámara de sedimentación

Es conveniente que el material con que se construya las paredes y el fondo de la cámara de sedimentación, sean lo más lisos posibles, para evitar la retención del lodo en la cámara de sedimentación. El más común es el concreto reforzado. La abertura situada en el fondo del sedimentador deberá tener de 15 a 20 cm entre sus bordes. Uno de los lados deberá prolongarse para evitar el paso de los gases al sedimentador; esta prolongación deberá tener una proyección horizontal de 0,15 a 0,20 m.

Operación y mantenimiento

Puesto que no existen partes mecánicas en un tanque Imhoff, debe prestarse atención a lo siguiente:

1. Eliminar diariamente las grasas, natas y sólidos flotantes, del compartimiento de sedimentación.
2. Raspar semanalmente los lados y fondos inclinados del compartimiento de sedimentación, con un cepillo de goma, para quitar los sólidos que se hayan adherido y que pueden descomponerse.
3. Limpiar semanalmente la ranura del compartimiento de sedimentación. Puede emplearse un rastrillo de cadena.
4. Cambiar el sentido del flujo por lo menos una vez al mes, cuando así esté previsto en el diseño del tanque.
5. Controlar la nata en la cámara de natas, rompiéndola por medio de chorros de mangueras a presión, manteniéndola húmeda con aguas negras del compartimiento de sedimentación y quitándola cuando su espesor llegue a unos 60 a 90 cm.
6. La descarga de lodos debe hacerse antes que su nivel llegue a estar cerca de 45 cm de distancia de la ranura del compartimiento de sedimentación. Es mejor descargar pequeñas cantidades con frecuencia, que grandes cantidades en mucho tiempo. Los lodos deben descargarse a una velocidad moderada y regular para que no se forme un canal a través de los lodos, que deje descargar lodos parcialmente digeridos y parte del líquido que haya sobre los lodos digeridos. La descarga no debe ser total, sino que debe dejarse la cantidad necesaria para el inculo. Cuando

menos una vez al mes, debe determinarse el nivel a que lleguen los lodos en su compartimiento. Lo mejor y más recomendable es emplear para ello una bomba.

7. Después de cada descarga de lodos, las líneas de descarga deben escurrirse y llenarse con agua o con aguas negras, para impedir que los lodos se endurezcan y obturen la tubería.

8. Prevención de la formación de "espumas". Debe hacerse todo lo posible para impedir la formación de espumas, debido a que a veces es muy difícil corregir esta situación una vez que se ha presentado. La formación de espumas va asociada generalmente con una condición de acidez en los lodos y puede prevenirse en tales casos, o corregirse mediante un tratamiento con cal, para contrarrestar la acidez de los lodos. Cuando se formen espumas es recomendable solicitar la colaboración de un ingeniero sanitario experimentado. Sin embargo, hay unas cuantas medidas sencillas que, en ciertas circunstancias, remedian o mejoran esta situación.

LECHO DE SECADO DE LODOS

Operación y mantenimiento

Se debe tener un manual de operación y mantenimiento que contemple los siguientes aspectos:

- Control de olores.
- Control del lodo influente.
- Control de las dosificaciones.
- Operación bajo condiciones de carga mínima y máxima.
- Operación bajo condiciones de caudal mínimo y caudal máximo.
- Programa de inspección periódico.

HUMEDALES DE FLUJO SUBSUPERFICIAL

Para un adecuado mantenimiento de un humedal artificial se tienen en cuenta los siguientes objetivos:

- El agua debe tener contacto total con las plantas, y con el lecho para una mejor eficiencia.
- Proporcionarle un ambiente saludable al humedal.
- Llevar un monitoreo constante del crecimiento de la vegetación

- Monitorear que el caudal de agua alcance a todas las partes del humedal.

Operación y mantenimiento

La operación y mantenimiento rutinarios de los humedales de flujo subsuperficial son similares a los de las lagunas facultativas, e incluyen el control hidráulico y de la profundidad del agua, la limpieza de las estructuras de entrada y descarga, el corte de la hierba en bermas, la inspección de la integridad de estas, el manejo de la vegetación del humedal y el monitoreo rutinario.

Se recomienda que la superficie del humedal se cubra con vegetación. La elección de la vegetación depende del tipo de residuos, de la radiación solar, la temperatura, la estética, la vida silvestre deseada, las especies nativas y la profundidad del humedal. Se deben usar dos celdas en serie. Las celdas deben ser impermeabilizadas para evitar la infiltración. Es esencial que las raíces tengan siempre acceso a agua en el nivel de los rizomas en todas las condiciones de operación. Para medios muy permeables con alta conductividad hidráulica (tales como la grava), se recomienda que el nivel de agua se mantenga alrededor de 2 a 5 cm por debajo de la superficie del lecho.

Se recomienda utilizar grava con un diámetro cercano a los 30 mm (3/4"). Si se utiliza grava con diámetros muy grandes de substrato, se incrementa la velocidad del paso del agua, resultando en un flujo turbulento y que no se cumpla la ley de Darcy para el diseño. Caso contrario ocurre con grava de tamaño demasiado pequeño, esta reduce la velocidad del paso de agua originando zonas con presencia de agua en la superficie y flujos preferenciales.

Control de rendimiento del sistema. Se deben realizar muestreos semestrales para verificar el correcto funcionamiento de la planta de tratamiento. Los parámetros mínimos para analizar son el pH, los sólidos totales, los sólidos suspendidos, la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5), la Demanda Química de Oxígeno, el nitrógeno como amonio y los coliformes termotolerantes. Estos muestreos deben realizarse a la salida del agua de la planta de tratamiento.

Hidrología. Se debe tener un monitoreo permanente de que el agua se esté moviendo a través de todo el humedal, que los residuos generados no bloqueen el flujo de agua a través de este, y no se esté estancando el agua, ya que esto trae consigo algunos problemas como los mosquitos. Siempre monitorear los flujos y niveles del agua, el caudal del agua.

Vegetación. La vegetación debe ser monitoreada regularmente, se debe de eliminar posibles especies que puedan afectar la vegetación y residuos que puedan obstruir el espacio entre plantas o el agua. Todo material muerto o a punto de morir debe ser removido para prevenir que el material que está en descomposición ingrese en los espacios vacíos. En el manejo de la vegetación en estos humedales no es necesario la poda rutinaria y disposición del material podado, el corte y la remoción rutinaria de la vegetación no proporciona un beneficio significativo en cuanto al tratamiento.

Estructuras. Al presentarse un cambio en el caudal o en los niveles del agua, se debe realizar un control estricto de las estructuras del humedal, por lo que puede afectar el lecho o la vegetación. En este caso los daños realizados a las estructuras ya sea por corrosión, u obstrucción se deben de corregir rápidamente, para evitar fallos y reparaciones que puedan ser costosas a largo plazo.

Control de la fauna. El control de la vida silvestre debe ser muy riguroso, existen especies, las cuales pueden atravesar los lechos, y consumen la vegetación del humedal artificial; los mosquitos los cuales causan problemas de salud y molestias. Para evitar este inconveniente se debe crear condiciones en el humedal que no favorezcan a los mosquitos, o al desarrollo de larvas. Evitar y vigilar los estancamientos de agua, por residuos que obstruyan el paso del agua. En este caso el uso de insecticidas o aceites no es de gran ayuda, ya que el uso de estas en humedales artificiales con alta carga de materia orgánica es ineficiente su uso por que el humedal absorbe y se diluye rápidamente en el agua. Se debe tener un cuidado enorme con esto por posible contaminación al humedal. El control de mosquitos puede no ser requerido en sistemas de humedales de flujo subsuperficial en la medida que la superficie del agua se mantenga debajo de la superficie superior del medio.

Mantenimiento del lecho. Al ser cinco las celdas para el humedal, se debe poder inhabilitar cada celda con el objetivo de hacerles mantenimiento (limpieza, reemplazo de piedras, etc.). Se recomienda que anualmente se inunde en sentido contrario la estructura para extender la vida del sistema. Esto se puede hacer con una manguera de alta presión insertada en la línea de recolección del efluente.

ANEXO E: MATRIZ DE CALIFICACIÓN DE CADA UNO DE LOS ATRIBUTOS PARA LAS DOS ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO

La alternativa 1 corresponde al sistema de tratamiento sostenible conformado por humedales artificiales de flujo subsuperficial. Mientras que la alternativa 2 corresponde al sistema lagunar.

Factor evaluado	Comentarios	Alternativa	
		1	2
Aplicabilidad del proceso	Los dos tratamientos han sido aplicados en el ámbito mundial, en el caso de lagunas su uso ha sido más común. Sin embargo, en términos generales, el proceso de tratamiento del sistema por humedales artificiales es un poco más sensible al tratamiento de lagunas frente a las variaciones.	4	5
Generación de residuos	Las lagunas producen grandes cantidades de gases de efecto invernadero, situación que no se presente en el tratamiento por humedales artificiales; los lodos, para ambos tratamientos solo surgen en los periodos de limpieza, lo cual puede suceder cada cierto de tiempo.	4	3
Aceptación por parte de la comunidad	Con una buena campaña de comunicación para informar a la comunidad, ninguno de los métodos debería tener problema en su aceptación.	5	5
Generación de subproductos con valor económico o de uso	En ambos tratamientos, su problema es el tiempo, tarda años en ser usados estos lodos y con frecuencia no son de gran utilidad, son llevados hasta el depósito de residuos más cercano.	1	1
Vida útil	Ambos tratamientos tienen una vida útil extensa. Recordando que esto se refiere a los equipos y no del tiempo de vida de la planta en sí.	5	5
Requerimiento de	Es frecuente que el sistema de lagunas requiera una mayor	1	3

área	<p>área, aunque esta sea la versión en la que menos área se requiera. Para el tratamiento mediante humedales artificiales, el requerimiento de área es mayor, siendo este un rasgo que representa una desventaja en su aplicación.</p>		
Costo de operación y mantenimiento	<p>Ambos tratamientos son beneficiosos ya que no requieren un consumo de energía eléctrica, llegando a ser este de cero para los dos, pero la cantidad de operaciones de ensayos que deben hacer para el tratamiento mediante lagunas, son bastantes y eso aumenta su coste de operación, pero no en gran medida.</p>	5	4
Tecnología ampliamente probada	<p>El sistema de lagunas es uno de los primeros sistemas de tratamiento en aparecer en la región, siendo ampliamente utilizado, caso contrario al sistema de humedales artificiales, que representa una estrategia relativamente nueva no solo en la región, sino en todo el territorio nacional, pero que, a nivel mundial, ha venido a más su aplicación para el tratamiento de aguas residuales, dando muy buenos resultados.</p>	3	5
Complejidad de construcción y mantenimiento	<p>Para ambos sistemas su construcción es fácil, pues no requieren gran complejidad, lo único que causa es que, al requerir grandes áreas, sea dependiente del terreno en donde se quiera construir.</p>	4	4
Flexibilidad de la operación	<p>El tratamiento por lagunas tiene una operación simple pero que conlleva un gran número de operaciones de carácter rutinario e intensivos y al ser un proceso tan dependiente de condiciones externas hace que algunas veces sea difícil su normalidad. Por su parte, el tratamiento por humedales artificiales, además de tener una operación simple, no requiere de un gran número de operaciones rutinarias ni intensivas.</p>	5	3

<p>Confiabilidad del proceso</p>	<p>El sistema de lagunas al ser un sistema más completo obtiene un mejor tratamiento. Por su parte, el sistema de humedales artificiales presenta unos porcentajes de eficiencia altos, comparables a otros sistemas de tratamiento, pero debido a su poca aplicabilidad en la región, su calificación es menor al sistema de lagunas.</p>	<p>3</p>	<p>5</p>
<p>Complejidad de operación del proceso</p>	<p>La operación del tratamiento por lagunas es simple, las operaciones son rutinarias y una vez que se llega a una planificación de todo lo que se debe hacer, es fácil su operación. Así mismo, el tratamiento de humedales artificiales presenta gran facilidad en su operación del proceso.</p>	<p>5</p>	<p>5</p>
<p>Requerimiento de personal</p>	<p>Entre más complejo es el sistema, mayor cantidad de personal es requerido y a su vez la capacitación que deben tener cada uno de estos, por tanto, este aspecto es directamente proporcional al punto anterior.</p>	<p>5</p>	<p>5</p>
<p>Disponibilidad de repuestos y centros de servicio</p>	<p>Ambos sistemas de tratamiento no requieren de una mayor dificultad en este punto.</p>	<p>5</p>	<p>5</p>
<p>Influencia de la temperatura</p>	<p>Los procesos realizados en las lagunas son dependientes de la temperatura, las variaciones ocasionan que no se realice un adecuado tratamiento, aunque Íquira muestre una temperatura en promedio de 20 - 25 °C, las variaciones climáticas por mínimas que sean pueden afectar su desempeño.</p> <p>En el tratamiento por medio de humedales artificiales, la temperatura también influye en el desarrollo de los procesos, pero no en gran medida como lo es en las lagunas.</p>	<p>3</p>	<p>1</p>

Producción de ruido	Los dos sistemas no producen ruido, ya que son sistemas naturales.	5	5
Contaminación visual	Esto es más establecido a los diseños, los dos tratamientos tienen la característica de ser agradables a la vista.	5	5
Producción de malos olores	Las lagunas tienen una mayor producción de olores, en cambio en el tratamiento por humedales artificiales, al ser estos subsuperficiales; esto no ocurre.	5	1
Huella de carbono	Las emisiones de gases de efecto invernadero son un producto principal de las lagunas y causan un gran impacto. Tal efecto no se presenta en los humedales artificiales, siendo estos incluso sumideros de carbono.	5	1
Animales dañinos	En las lagunas los entes patógenos pueden a llegar ser determinantes. Mientras que, para los humedales artificiales, los roedores pueden llegar a representar un riesgo para la integridad de estos.	3	3