



**ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS DE BAJO COSTO PARA EL TRATAMIENTO  
DEL AGUA EN EL MUNICIPIO DE SAN CAYETANO CUNDINAMARCA VEREDA  
PINIPAY – SECTOR LA CARRERA**

Leidy Esmeralda Espinosa Vargas

Código 10481817794

Sidney Yulissa Gómez Alarcón

Código 10481817058

**Universidad Antonio Nariño**

Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental

Programa Ingeniería Civil

Bogotá, Colombia

2022

ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS DE BAJO COSTO PARA EL TRATAMIENTO DEL  
AGUA EN EL MUNICIPIO DE SAN CAYETANO CUNDINAMARCA VEREDA PINIPAY –  
SECTOR LA CARRERA

Leidy Esmeralda Espinosa Vargas

Sidney Yulissa Gómez Alarcón

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:

Ingeniero Civil

Director (a):

PhD.c. Ing. Didier Camilo Sierra Flórez

Línea de Investigación:

Proyecto de Investigación

Universidad Antonio Nariño

Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental

Programa Ingeniería Civil

Bogotá, Colombia

2022

**NOTA DE ACEPTACIÓN**

El trabajo de grado titulado

\_\_\_\_\_, Cumple con

los requisitos para optar

Al título de \_\_\_\_\_.

\_\_\_\_\_

Firma del Tutor

\_\_\_\_\_

Firma Jurado

\_\_\_\_\_

Firma Jurado

## Tabla de Contenido

<b>Índice de Figuras.....</b>	<b>5</b>
<b>Índice de Tablas .....</b>	<b>7</b>
<b>Índice de Ecuaciones.....</b>	<b>8</b>
<b>Agradecimientos.....</b>	<b>9</b>
<b>1. Resumen.....</b>	<b>10</b>
<b>2. Abstract .....</b>	<b>11</b>
<b>3. Introducción .....</b>	<b>12</b>
<b>4. Antecedentes.....</b>	<b>14</b>
<b>5. Objetivos.....</b>	<b>20</b>
5.1. General .....	20
5.2. Específicos .....	20
<b>6. Justificación.....</b>	<b>21</b>
<b>7. Marco Teórico.....</b>	<b>22</b>
7.1. Tipos de Agua .....	22
7.2. Purificación del Agua.....	23
7.3. Parámetros de Calidad del Agua .....	24
7.3.1. <i>Parámetros Organolépticos</i> .....	24
7.4. Índice de Riesgo de Calidad del Agua para Consumo Humano IRCA .....	25
7.5. Cálculo del Índice de Calidad de Agua para Consumo Humano (IRCA) .....	28
7.6. Clasificación del Nivel de Riesgo en Salud Según el IRCA por Muestra y Mensual	29
7.7. Plantas de Tratamiento de Agua Potable (PTAP).....	30
<b>8. Diseño Metodológico.....</b>	<b>36</b>
<b>9. Análisis y Resultados Obtenidos.....</b>	<b>39</b>
9.1. Generación Estado del Conocimiento de Tipos de PTAP. ....	39
9.2. Diagnóstico Zonal de la Vereda Pinipay - San Cayetano, Cundinamarca.....	43

9.2.1.	<i>Ubicación de la Zona</i> .....	43
9.2.2.	<i>Condiciones de la Quebrada y Estructura de Acueducto Existente</i> .....	44
9.2.3.	<i>Caudal de Diseño</i> .....	49
9.2.4.	<i>Caudal Actual del Acueducto</i> .....	51
9.2.5.	<i>Identificación de Condiciones Topográficas</i> .....	52
9.2.6.	<i>Geología y Geomorfología</i> .....	54
9.2.7.	<i>Características Hidrológicas, Climatológicas y Meteorológicas</i> .....	55
9.3.	Caracterización del Agua de Abastecimiento de la Aoblación de la Vereda Pinipay	57
9.4.	Identificación de Alternativas para el Tratamiento de Agua de la Vereda Pinipay ...	61
9.4.1.	<i>Construcción de Herramienta de Análisis Jerárquico (AHP)</i> .....	79
9.5.	Diseño Conceptual de la Planta de Tratamiento de Agua Potable.....	83
9.5.1.	<i>Bases del Diseño</i> .....	83
9.5.2.	<i>Cámara de Aforo</i> .....	83
9.5.3.	<i>Floculador - Sedimentador</i> .....	84
9.5.4.	<i>Filtro</i> .....	85
9.5.5.	<i>Sistema de Dosificación de Químicos a Gravedad</i> .....	85
<b>10.</b>	<b>Conclusiones</b> .....	<b>89</b>
<b>11.</b>	<b>Recomendaciones</b> .....	<b>91</b>
<b>12.</b>	<b>Referencias bibliográficas</b> .....	<b>92</b>
<b>Anexos</b>	.....	<b>99</b>

### Índice de Figuras

<b>Figura 1.</b>	Tipos y Propiedades del Agua.....	22
<b>Figura 2.</b>	Diagramas de Flujo de Plantas de Purificación.....	34
<b>Figura 3.</b>	Posible Modelo para Proceso de Análisis Jerárquico AHP.....	37
<b>Figura 4.</b>	Publicación de Artículos sobre STAP de Bajo Costo de Manera Anual.....	40
<b>Figura 5.</b>	Datos Sobre las Fuentes Más Relevantes de Información de Artículos.....	40
<b>Figura 6.</b>	Producción Científica de Artículos por Países a Nivel Mundial.....	41
<b>Figura 7.</b>	Ubicación de la Vereda Pinipay-San Cayetano, Cundinamarca. ....	44

<b>Figura 8.</b> Fuente de Abastecimiento Quebrada "Las petacas".....	45
<b>Figura 9.</b> Condiciones de la Bocatoma Vereda Pinipay - Sector la Carrera.....	46
<b>Figura 10.</b> Tubería Existente Acueducto Vereda Pinipay - Sector La Carrera.....	46
<b>Figura 11.</b> Esquema Bocatoma.....	47
<b>Figura 12.</b> Condiciones Tanque de Almacenamiento Acueducto Vereda Pinipay - Sector la Carrera.....	48
<b>Figura 13.</b> Esquema Tanque de Almacenamiento.....	48
<b>Figura 14.</b> Método de Aforo de Tipo Volumétrico.....	51
<b>Figura 15.</b> Perfil Topográfico de la Línea de Conducción Acueducto - Vereda Pinipay.....	53
<b>Figura 16.</b> Histograma Climático de San Cayetano, Cundinamarca.....	56
<b>Figura 17.</b> Registro Fotográfico Toma de Muestras en Fuente de Abastecimiento.....	58
<b>Figura 18.</b> Registro Fotográfico Toma de Muestras en Tanque de Almacenamiento.....	58
<b>Figura 19.</b> Conservación de Muestras de Fuente de Abastecimiento y Tanque de Almacenamiento.....	59
<b>Figura 20.</b> Pregunta 1- Encuesta a Expertos.....	62
<b>Figura 21.</b> Tabulación - Pregunta 1.....	63
<b>Figura 22.</b> Pregunta 2 - Encuesta a Expertos.....	64
<b>Figura 23.</b> Tabulación - Pregunta 2.....	65
<b>Figura 24.</b> Pregunta 3 - Encuesta a Expertos.....	66
<b>Figura 25.</b> Tabulación - Pregunta 3.....	67
<b>Figura 26.</b> Pregunta 4 - Encuesta a Expertos.....	68
<b>Figura 27.</b> Tabulación - Pregunta 4.....	69
<b>Figura 28.</b> Pregunta 5 - Encuesta a Expertos.....	70
<b>Figura 29.</b> Tabulación - Pregunta 5.....	71
<b>Figura 30.</b> Pregunta 6 - Encuesta a Expertos.....	72
<b>Figura 31.</b> Tabulación - Pregunta 6.....	73
<b>Figura 32.</b> Pregunta 7 - Encuesta a Expertos.....	74
<b>Figura 33.</b> Tabulación - Pregunta 7.....	75
<b>Figura 34.</b> Pregunta 8 - Encuesta a Expertos.....	76
<b>Figura 35.</b> Tabulación - Pregunta 8.....	77
<b>Figura 36.</b> Pregunta 9 - Encuesta a Expertos.....	78

<b>Figura 37.</b> Tabulación - Pregunta 9. ....	79
<b>Figura 38.</b> Datos Encuesta Según Criterios y Escala de Evaluación. ....	80
<b>Figura 39.</b> Tabulación Datos Encuesta Según Criterios y Escala de Evaluación. ....	80
<b>Figura 40.</b> Matriz de Evaluación de Criterios. ....	81
<b>Figura 41.</b> Matriz Normalizada. ....	82
<b>Figura 42.</b> Relación de Consistencia. ....	82

### Índice de Tablas

<b>Tabla 1.</b> Variables de Estudio. ....	22
<b>Tabla 2.</b> Tipos de Color de Agua Cruda. ....	24
<b>Tabla 3.</b> Tipos de Olor de Agua Cruda. ....	25
<b>Tabla 4.</b> Puntajes de Riesgo IRCA. ....	26
<b>Tabla 5.</b> Clasificación del Nivel de Riesgo IRCA. ....	30
<b>Tabla 6.</b> Requisitos de Tratamiento. ....	31
<b>Tabla 7.</b> Procesos de Purificación de agua. ....	32
<b>Tabla 8.</b> Dimensiones del Acueducto Actual. ....	45
<b>Tabla 9.</b> Dotación Neta Máxima. ....	50
<b>Tabla 10.</b> Datos Método de Aforo Volumétrico. ....	51
<b>Tabla 11.</b> Coordenadas Acueducto Actual. ....	53
<b>Tabla 12.</b> Unidades de Suelo de San Cayetano, Cundinamarca. ....	54
<b>Tabla 13.</b> Clasificación Climática de San Cayetano, Cundinamarca. ....	56
<b>Tabla 14.</b> Resultados Análisis Físicoquímico. ....	59
<b>Tabla 15.</b> Análisis Puntajes de Riesgo IRCA. ....	60
<b>Tabla 16.</b> Escala de Comparación de Criterios. ....	81
<b>Tabla 17.</b> Características Cámara de Aforo Diseño PTAP. ....	83
<b>Tabla 18.</b> Características Floculador - Sedimentador Diseño de PTAP. ....	84
<b>Tabla 19.</b> Características filtración diseño de PTAP. ....	85
<b>Tabla 20.</b> Características Sistema Dosificador a Gravedad Diseño de PTAP. ....	86

## Índice de Ecuaciones

<b>Ecuación 1.</b> IRCA por Muestra.....	29
<b>Ecuación 2.</b> IRCA Mensual. ....	29
<b>Ecuación 3.</b> Tasa de Crecimiento.....	49
<b>Ecuación 4.</b> Proyección de Población. ....	49
<b>Ecuación 5.</b> Dotación Bruta. ....	50
<b>Ecuación 6.</b> Caudal Medio Diario.....	50
<b>Ecuación 7.</b> Cálculo del Caudal. ....	52

## **Agradecimientos**

*Primeramente, doy gracias a Dios y a la vida por permitirme culminar esta etapa profesional, a mis padres por su apoyo incondicional y por creer en mí, a mi amiga y compañera de tesis por permitirnos crecer en el ámbito profesional y personal, a nuestro director de tesis por orientarnos para poder cumplir hoy con este objetivo y a todas las personas que de una u otra manera hicieron posible este logro.*

*(Sidney Yulissa Gómez Alarcón)*

*Me es indispensable dar gracias a Dios y a mis padres quienes, a pesar de tantas dificultades, me permitieron llegar a esta etapa de mi vida, son ellos y su infinito apoyo por quienes puedo decir que cada esfuerzo valió la pena. Agradecida eternamente con mi amiga Sidney por siempre motivarnos a continuar y por su infinito compromiso. Finalmente, a mi respetado tutor de tesis Didier Sierra quien, a partir de su conocimiento fue participe importante para la culminación de este proyecto.*

*(Leidy Esmeralda Espinosa Vargas)*

## 1. Resumen

En Colombia y en gran parte del mundo la población de los sectores rurales no tiene acceso a servicios de agua potable de manera segura, teniendo en cuenta datos suministrados por el Instituto Nacional de la Salud (INS) en Colombia un 71.6% de las muertes son provocadas por enfermedades hídricas, sin embargo, muchos municipios de este país no cuentan con la implementación de sistemas de tratamiento de agua potable debido a que se requiere de grandes recursos económicos para su funcionamiento, tal es el caso del Municipio de San Cayetano Cundinamarca, Vereda Pinipay.

La finalidad del estudio se basa en realizar un análisis de alternativas sostenibles para la implementación de sistemas de agua potable en la Vereda Pinipay. La metodología aplicada en el desarrollo de este estudio comprende de cuatro fases, a partir de los cuales se realizará un diagnóstico de la zona, caracterización del agua, análisis de las alternativas de potabilización de agua por medio del uso de procesos de Análisis Jerárquicos (AHP) y un diseño conceptual de una planta de tratamiento para esta vereda.

**Palabras Clave:** Tratamiento de Agua, Agua Potable, Análisis de Tratamiento, Desarrollo Rural.

## 2. Abstract

In Colombia and in much of the world, the population of rural areas does not have access to safe drinking water services, taking into account data provided by the National Institute of Health (INS) in Colombia 71.6% of deaths are caused by water diseases, however, many municipalities in this country do not have the implementation of drinking water treatment systems because it requires large financial resources for its operation, such is the case of the Municipality of San Cayetano Cundinamarca, Vereda Pinipay.

The purpose of the study is based on an analysis of sustainable alternatives for the implementation of drinking water systems in the Vereda Pinipay. The methodology applied in the development of this study comprises four phases, from which a diagnosis of the area, water characterization, analysis of water purification alternatives through the use of Hierarchical Analysis Processes (AHP) and a conceptual design of a treatment plant for this village will be carried out.

**Key words:** Water Treatment, Drinking Water, Treatment Analysis, Rural Development.

### 3. Introducción

El agua es un recurso vital, esencial para las necesidades humanas, agrícolas e industriales, sin embargo, aunque en el mundo el agua ocupa el 70% de la superficie terrestre, sólo una mínima parte de ella es agua dulce, según (Fekete, 2013) 1100 millones de personas no cuentan con acceso a agua potable y 2400 millones de personas no cuentan con un sistema de saneamiento adecuado, provocando que 2 millones de personas mueran anualmente, entre las cuales los más afectados son niños entre 1 a 5 años. Además, aproximadamente 900 millones de personas sufren por la escasez de agua debido a su bajo nivel de pobreza y al aumento de población. La Organización de las Naciones Unidas (ONU), en relación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), en especial el N°6 (Agua Limpia y Saneamiento), pretende lograr para el año 2030 el acceso de manera equitativa a nivel mundial de agua potable y saneamiento básico (UNICEF, n.d.).

Colombia ocupa el sexto lugar con mayor disponibilidad de agua en el mundo y el primero en disponibilidad de agua por Km<sup>2</sup>, no obstante, la distribución de tal agua no se realiza de manera homogénea debido al constante crecimiento demográfico del país y al excesivo consumo de agua en el sector agrícola, energético y ganadero que conforma el 76.6% del uso doméstico del agua. Cabe resaltar que, en Colombia, gran parte del agua también es destinada al sector minero, especialmente a la extracción del oro provocando contaminación del recurso hídrico, dejando a su paso afectaciones graves a la población y a los ecosistemas (Prakash Khedun et al., 2014).

El departamento de Cundinamarca cuenta con 116 municipios, en donde el 91% de las fuentes de agua son de origen superficial, tal como es el caso del municipio de San Cayetano, Cundinamarca, Vereda Pinipay-Sector La Carrera (Gobernación de Cundinamarca, 2020). La vereda cuenta con la existencia de un sistema de acueducto artesanal que posee únicamente bocatoma y tanque de almacenamiento, proveniente de procesos de gobernanza del municipio, no

obstante, dicho sistema no cuenta con un respectivo Tratamiento de Agua Potable (TAP), que garantice a la población agua apta para su consumo. El Plan de Ordenamiento Territorial POT de la Alcaldía Municipal de San Cayetano, Cundinamarca, se tiene previsto desarrollar proyectos de ampliación y legalización de los sistemas colectivos de abastecimiento de agua potable para el área rural y la implementación de Sistemas de Tratamiento de Agua Potable para áreas urbanas, sin embargo, la falta de recursos monetarios ha retrasado la ejecución de los mismos, no obstante, la limitación de estos recursos implican exponer a la población a posibles enfermedades a futuro por consecuencia de la falta de tratamiento del agua que consumen (Gobernación de Cundinamarca, 2020).

El presente trabajo de investigación, plantea la búsqueda de alternativas de sistemas de tratamiento de agua potable de bajo costo, por medio de una toma de decisiones a partir de la metodología AHP (Analytic Hierarchy Process). El proyecto se realizará a partir de cuatro fases, donde se llevará a cabo un diagnóstico de la zona, se realiza una respectiva caracterización del agua que consume la población, para posteriormente realizar una selección de alternativas de potabilización de agua de bajo costo y finalmente realizar un diseño conceptual del sistema de tratamiento de agua que se adecue a las necesidades de la Vereda Pinipay.

#### 4. Antecedentes

Por medio de los recursos electrónicos de la biblioteca de la Universidad Antonio Nariño y las bases de datos Scopus y ScienceDirect, se realizó la búsqueda de artículos y review basados en las siguientes palabras clave: Drinking Water, Water Treatment y Low Cost Drinking Water Treatment Systems, tomando resultados recientes entre los años 2022-2015 y áreas temáticas de ingeniería y ciencia medioambiental.

Posteriormente, se elaboró el análisis de diversos métodos y propuestas que se han planteado a través de los años por diferentes investigadores acerca de cómo purificar, remover impurezas y potabilizar el agua, con el objetivo de implementar mecanismos de bajo costo que garanticen el suministro de agua apta para el consumo humano a las poblaciones.

Dentro de los métodos de purificación de agua se encuentra la desinfección solar SODIS, el cual es un tratamiento de agua potable usado en países tropicales y subtropicales que no cuentan con suficientes ingresos monetarios, en una investigación realizada por Juvakoski et al., (2022) se analizó si este proceso funciona satisfactoriamente en climas más fríos. Para obtener resultados, se realizaron experimentos en el clima húmedo de Finlandia usando agua contaminada con heces silvestres, la cual se puso a exposición de la radiación solar a diferentes temperaturas, demostrando que este método es eficiente para la desinfección y desactivación de bacterias de coliformes y enterococos.

La implementación de sistemas de potabilización domésticos en países como Uganda, ha resultado ser de gran utilidad para la mejora de la calidad de agua de abastecimiento. Según, Ibrahim et al., (2022), Uganda es un país en donde el agua está contaminada por organismos patógenos, originados por malas condiciones sanitarias, además de estar contaminada con metales tales como: plomo, hierro y cadmio, exponiendo gravemente a la población a enfermedades

crónicas. La xilema vegetal de pino, hace parte de las alternativas, que, dado a su bajo costo, facilidad de uso y efectividad, permite a la población liberar el agua de impurezas, gracias a su mecanismo de filtración que propicia el manejo de contaminantes suspendidos y químicos presentes, aumentando notoriamente los índices permisibles de agua para consumo humano.

Según Chidya et al., (2021), en la Universidad de Mzuzu, Malawi, se desarrolló un prototipo con elementos comunes, que tiene como objetivo tratar el agua por medio de desinfección solar, su funcionalidad y eficiencia se determinaron por medio de muestras obtenidas del agua presente en zonas rurales, las cuales, por medio del prototipo, se expusieron las muestras a luz solar intensa. El estudio se realizó por medio de análisis térmicos y parámetros microbiológicos del agua, obteniendo resultados positivos en la disminución de la descontaminación de algunos pozos presentes en la zona.

Los filtros de cartucho suponen una excelente propuesta de bajo costo para tratar el agua, según Afkhami et al., (2021), los filtros de cartucho permiten eliminar la turbidez y son capaces de filtrar el agua en un único paso, sin que haya la necesidad de implementar proceso de floculación y coagulación, por lo que de esta manera, se contribuye a la disminución de costos de operación y mantenimiento del sistema de tratamiento, sin embargo este método es funcional para tratar pequeños volúmenes de agua.

Cambios constantes en la calidad del agua cruda debido a factores como el cambio climático y el uso del suelo, generaron la necesidad de realizar una reestructuración de la PTAP de la población de Bayas, Ecuador, debido a que su funcionamiento por filtración lenta estaba presentando inconsistencias en su funcionamiento y por ende incrementos en los costos de mantenimiento, disminución de caudal de agua potable y baja calidad de agua, debido a que por fenómenos hidrológicos y climáticos, el agua cruda empezó a presentar altos niveles de turbidez

y color, lo cual generaba taponamiento de arena en los filtros. Según García et al., (2021) la restructuración de una PTAP debe ser: fácil de instalar, operar y mantener, bajos costos de inversión, operación y mantenimiento y eficacia en la purificación de agua. Basado en ello, se realizó el cambio del sistema de la PTAP antigua a una PTAP convencional basada en coagulación, floculación, sedimentación, filtración rápida y desinfección. Siendo, la filtración rápida, el aporte y la mejora y calidad del agua potable de consumo de la población debido a su capacidad de tratar agua con altos contenidos de turbidez y color.

Tanzania, hace parte de los países que padecen escasas de agua potable y de las enfermedades hídricas originadas por el consumo no regulado de agua insalubre, según Marobhe et al., (2021), la notable contaminación de las fuentes superficiales de abastecimiento de la población, tales como ríos, pequeñas presas, estanques y pozos tradicionales, han impulsado la necesidad de optar por el uso de alternativas tradicionales para reducir los niveles de turbidez y presencia de bacterias residuales presentes en el agua. El uso de las semillas en polvo de Moringa han resultado ser un excelente coagulante para reducir turbidez, debido a sus propiedades de purificación de agua, así como la aplicación de desinfección solar (SODIS) ha confirmado ser bastante eficiente en la reducción de organismos patógenos.

Según estudios realizados en el pueblo de Machhrai Khurd, Punjab, India, por Ravindra et al., (2020), en donde se evaluó la percepción de la población respecto al uso de tratamiento de agua por osmosis inversa, se obtuvo resultados positivos, dada la eficiencia que demostró la implementación de tal metodología en la reducción de sales y minerales presentes en el agua de consumo de la población. Los resultados de la investigación, muestran satisfacción en cuanto a la reducción de problemas de salud y el consumo de agua potable seguro. Como investigación de nuevas tecnologías para el tratamiento de agua, (Gwenzi et al., 2017) plantea el uso de biocarbón

como una solución práctica para eliminar diversos contaminantes en soluciones acuosas, el uso del mismo ha demostrado resultados significativos en comparación con otros métodos como filtración de arena, ebullición, desinfección solar y cloración; se reconoce que el biocarbón es un tipo de absorbente renovable y de bajo costo debido a que esta echo a partir de biomateriales asequibles para poblaciones con bajos recursos, los biocarbón eliminan contaminantes químicos, biológicos y físicos y además permite mantener las condiciones organolépticas del agua. Las tecnologías solares representan una alternativa para el tratamiento de agua potable, de acuerdo con (Martín-Sómer et al., 2021) el uso de colectores parabólicos compuestos (CPC) ha tomado fuerza en las últimas décadas, sin embargo la fabricación de estos son bastante altos y son difícilmente asequibles para comunidades con bajos recursos, dicho esto se planteó el diseño de CPC de bajo costo a través de colectores solares (PTC) por medio de la impresión 3D de la estructura y el uso de materiales reflectantes reciclados, de esta forma se tiene una menor inversión y así puede ser utilizada por todo el mundo.

Según (Wu et al., 2022), el uso de tecnologías para el suministro de agua, las cuales cuenten con un sistema de operación simple, costo asequible y con baja adición de productos químicos son indispensables para el aseguramiento de limpia y segura para la población. En un pueblo de la montaña de China, se investigó la funcionalidad de un proceso de ultrafiltración directa de control automático, utilizando agua micro contaminada, el cual resultó demostrar un gran potencial en el tratamiento de agua de zonas rurales, siendo capaz de cumplir con el estándar chino de agua potable, funcionando por un periodo de 2.5 años sin la necesidad de pretratamiento ni limpieza química. Una prueba de estudio realizada en comunidades de Oaxaca (México), para evaluar la eficiencia de una tecnología híbrida fotovoltaica-fotoquímica (SolWat), para satisfacer la necesidad de agua potable y electricidad en las poblaciones de México que carecen de dichos

servicios, arrojó resultados positivos, en donde según (Pichel et al., 2020), su efectividad fue probada por primera vez en condiciones climáticas naturales y con uso de las fuentes de agua disponibles, obteniendo como resultados la inactivación completa de *E. coli* y coliformes totales tras 3 h de exposición solar y una efectiva obtención de electricidad.

En países como Etiopía en donde la población vive bajo condiciones de pobreza extrema, se ha optado por la purificación de agua, por medio de mecanismos de bajo costo, como lo es la utilización de plantas como la *Moringa*, *Jatropha curcas*, también conocida como piñón de tempate o jatrofa y goma guar o guaran, debido a que la implementación de sistemas de purificación convencionales requiere de inversión económica. Los extractos de plantas para la purificación de agua, según (Abatneh et al., 2014) se han utilizado durante muchos siglos siendo efectivas para la reducción de turbidez y *E. Coli*.

De acuerdo con (Guo et al., 2021) el uso de nanofiltración (NF) es considerado como un método para el tratamiento de agua potable, en fuentes de agua de tipo superficial, de tipo subterráneo, reutilización de agua, tratamiento de agua salobre y puntos de aplicación; a partir de la nanofiltración se logra eliminar patógenos, materia orgánica del agua así como la eliminación de subproductos de cloración, sustancias de perfluoroalquilo y arsénico, con el fin de lograr esto se debe contar con un diseño adecuado de NF, con el fin de mejorar la separación de los contaminantes mencionados anteriormente. Además, se ha implementado el uso de la membrada de nanofiltración (NFM), de acuerdo con (Wang et al., 2020) esta es una membrana semipermeable eficaz para el tratamiento óptimo del agua potable, donde se planteó realizar una membrana estable de nanofiltración de poliamida a base de celulosa (NF-PDA-RCM) que contara con una estructura de tres capas para realizar el tratamiento de agua, mediante el proceso de conexión por enlace químico en conjunto con la estrategia de polimerización interfacial.

Las nanopartículas de plata, según (Mangala Praveena et al., 2015), se han convertido en un nuevo mecanismo de bajo costo, bastante útil para la purificación de agua, en combinación con otros materiales económicos y funcionales tales como la cerámica polimérica, poliuretano, residuos agrícolas y fibra, los cuales han demostrado ser suficientemente útiles para la eliminación de bacterias como E.Coli, además de conservarse los niveles máximos permisibles en concentración de plata en los efluentes de agua. Los materiales comúnmente involucrados en la incorporación de nanopartículas de plata para el tratamiento de bacterias son la cerámica, la celulosa y la tela de algodón, considerándose de bajo costo dado su abundante suministro.

## 5. Objetivos

### 5.1.General

Determinar la viabilidad de un Sistema de Tratamiento de Agua Potable (STAP) de bajo costo para la población de la Vereda Pinipay - Sector La Carrera municipio San Cayetano, Cundinamarca.

### 5.2.Específicos

- ✓ Generar un estado del conocimiento sobre las posibles alternativas de Sistemas de Tratamiento de Agua Potable (STAP) para la Vereda Pinipay - Sector La Carrera municipio San Cayetano, Cundinamarca.
- ✓ Realizar un diagnóstico de la zona, para la identificación del estado del agua de la Vereda Pinipay - Sector La Carrera municipio San Cayetano, Cundinamarca.
- ✓ Caracterizar el agua de abastecimiento de la población de la Vereda Pinipay - Sector La Carrera municipio San Cayetano, Cundinamarca.
- ✓ Seleccionar las alternativas de los diferentes Sistemas de Tratamiento de Agua Potable (STAP) y generar un diseño conceptual de una (STAP) para la Vereda Pinipay - Sector La Carrera municipio San Cayetano, Cundinamarca.

## **6. Justificación**

El agua potable, como recurso fundamental e indispensable para el desarrollo de la población mundial, hace parte de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), tratados por la Organización de las Naciones Unidas (ONU), principalmente el objetivo N°6: Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos, en donde se busca asegurar acceso mundial, equitativo y asequible a agua potable para el año 2030. Según datos de la ONU, el acceso a agua potable es tan crítico que 3 de cada 10 personas carecen de acceso a servicios de agua potable seguros (Unidas, 2030).

El consumo de agua potable gestionada de manera segura, es un factor crucial en la búsqueda de garantizar una vida sana y de calidad, según el Estudio Nacional de Agua (ENA) 2018, las afectaciones a la salud por la deficiencia en la calidad del agua, no solo se debe a aspectos genéticos o acceso deficiente a servicios de salud, sino también a aspectos sociales, en donde la desigualdad al acceso a agua potable es un determinante clave que, de igual manera, genera desigualdad en términos de salud, propiciando el incremento de la morbilidad en niños con edades menores a 5 años, y riesgos de salud en etapas de maternidad (IDEAM, 2019).

La baja calidad del agua que se consume en la vereda Pinipay ha ocasionado enfermedades diarreicas agudas (EDA) a los pobladores, por lo que según el POT del municipio de San Cayetano (2020), se han tenido que realizar estudios fisicoquímicos a las principales fuentes de captación de la población en años anteriores, los cuales establecen que se encuentran fuera de los parámetros permisibles para consumo humano según la Resolución 2115 de 2007, incrementando en gran medida la necesidad de la implementación de Sistemas de Tratamiento de Agua Potable (STAP).

## 7. Marco Teórico

Para fines del desarrollo de la presente investigación se plantean las variables de estudio mostradas en la Tabla 1, las cuales se tendrán en cuenta para la construcción del marco teórico, con el fin de conocer cada uno de los componentes que implican la implementación de un Sistema de Tratamiento de Agua Potable (STAP).

**Tabla 1.**

*Variables de Estudio.*

Disciplina	Ingeniería civil
Línea de estudio	Toma de decisiones tratamiento de agua
Variable de Análisis	Tratamiento de Agua

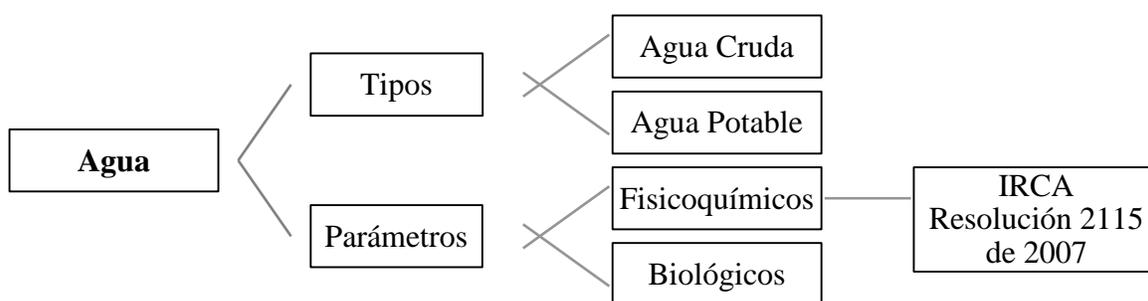
Tomado de: (Elaboración Propia, 2022).

### 7.1. Tipos de Agua

De acuerdo con el enfoque dado en la Monografía - Proyecto Aplicado es relevante tener en cuenta los conceptos mencionados en la Figura 1, estos permitirán abarcar de manera completa las características a tener en cuenta para el proceso de tratamiento de agua potable.

**Figura 1.**

*Tipos y Propiedades del Agua.*



Tomado de: (Elaboración Propia, 2022).

Para efectos de comprender de manera más clara los diferentes tipos y propiedades del agua, se describen las definiciones mostradas a continuación:

- **Agua cruda.** Es el de agua que no ha recibido ningún tipo de tipo de tratamiento, estas se encuentran en reservas naturales y en fuentes tanto de aguas superficiales como de aguas subterráneas (Oh et al., 2014).
- **Agua Potable.** El agua potable, mejor definida como el agua apta para consumo humano, es esencial para para la salud humana, el desarrollo económico y social y se reconoce como el requisito más básico para mantener los medios de vida independientemente de la nacionalidad, religión, color, riqueza o credo (Zhang et al., 2022).
- **Parámetros Físicoquímicos.** Los parámetros fisicoquímicos del agua son usados generalmente para determinar la potabilidad del agua, se miden características como pH, Conductividad eléctrica, Solidos disueltos totales, temperatura entre otros (Hernández-Mendoza et al., 2022).

## 7.2.Purificación del Agua

La purificación del agua es uno de los problemas más comunes en la actualidad, este es el conjunto de procesos y operaciones que se le deben hacer al agua cruda, con el cual se pretende modificar las características químicas, físicas y microbiológicas, para que esta sea óptima para el consumo humano, según la Resolución 2115 de 2007. En el 2015, tres de cada diez personas no tenían acceso a agua potable (2100 millones) y seis de cada diez (4500 millones) no contaban con instalaciones de saneamiento gestionadas de forma segura, para este mismo año, el 65% de la población de América Latina y el Caribe contaba con el acceso a servicios hídricos gestionados de manera segura, donde solo el 22% de esta población tenía servicios de saneamiento de forma segura, la mayoría de la población que no tenían acceso a estos servicios se localizan en zonas periurbanas, sin embargo, las áreas con menor cobertura se localizan en los sectores rurales (ONU, 2015).

Por dicha razón, la Organización de las Naciones Unidas plantea garantizar a través de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) la disponibilidad y la gestión sostenible de agua limpia y saneamiento básico para toda la población que se ve privada de este derecho (ONU, 2015).

De la misma manera el continuo desarrollo de la economía social, ha generado una creciente demanda de los recursos hídricos, donde muchos de estos no pueden ser usados de manera directa, por ende, se ha generado una contradicción entre la demanda de agua de las personas y la demanda que existe de la misma, para ello se plantean nuevas estrategias que permitan hacer uso racional de estos recursos hídricos, teniendo en cuenta los diferentes procesos y tratamientos a los que estos deben ser sometidos para su consumo seguro (Xu et al., 2022).

### 7.3. Parámetros de Calidad del Agua

#### 7.3.1. *Parámetros Organolépticos*

Los parámetros organolépticos son aquellos que se logran identificar, generalmente en campo, los cuales son captados fácilmente por medio de percepciones sensoriales. Entre dichos parámetros se encuentra el color, olor, turbidez y el aspecto de la muestra.

El color del agua comúnmente está asociado a las sustancias suspendidas que contiene, sin embargo, para un análisis en campo, el color de la muestra cruda es comparado con el de agua destilada, lo que permite deducir un color predominante que facilita su análisis y evaluación, ver Tabla 2.

**Tabla 2.**

Tipos de Color de Agua Cruda.

<b>Tipos de Color de Agua Cruda</b>	
<b>Tipo de Color</b>	<b>Tipo de Agua</b>
Incoloro	Típico de aguas frescas y dulces
Grisáceo	Típico de aguas residuales domésticas
Amarillo Sin Turbidez	Típico de aguas subterráneas, de estuarios y de pantanos
Amarillo Turbio	Típico de aguas corrientosas y/o cargadas de limos y arcillas
Amarillo Verdoso	Típico de humedales y aguas ricas en fitoplancton
Cafés u Oscuras	Típico de aguas con altos contenidos de lixiviados, materia orgánica

Tomado de: (Romero, 2006).

Además del color, el olor es un parámetro que de igual manera puede ser descrito cualitativamente para determinar la calidad del agua, en términos característicos existen ciertos aromas que definen subjetivamente su origen, ver Tabla 3.

**Tabla 3.**

Tipos de Olor de Agua Cruda.

<b>Tipos de Olor de Agua Cruda</b>	
<b>Tipo de Olor</b>	<b>Tipo de Agua</b>
Inodoro	Típico de aguas dulces y frescas
Olor Metálico	Típico de aguas subterráneas
Olor a Sulfuro	Típico de agua residual doméstica, materia orgánica y de sistemas anaerobios
Olor Vegetal	Típico de aguas poco profundas, de humedales y estuarios
Olor Picrico	Típico de lixiviados y aguas procedentes de PTAR
Olor a Pescado	Típico de aguas oceánicas y de cultivos piscícolas

Tomado de: (Romero, 2006).

#### **7.4. Índice de Riesgo de Calidad del Agua para Consumo Humano IRCA**

De acuerdo con el Informe Nacional de Calidad del agua para el Consumo Humano (INCA), el IRCA es un indicador que determina la calidad de agua para consumo humano en Colombia, basado en los resultados obtenidos de las características microbiológicas y fisicoquímicas, se determina el puntaje de riesgo al que se encuentra expuesta la muestra de agua analizada, siguiendo con los lineamientos de la Resolución 2115 de 2007, ver Tabla 4.

**Tabla 4.***Puntajes de Riesgo IRCA.*

<b>Parámetro</b>	<b>Valor Max. Admisible</b>	<b>Puntaje de riesgo</b>
Color aparente	15 UPC*	6
Turbiedad	2 UNT**	15
PH	6.5 a 9	1.5
Cloro	0.2 a 2.0 mg/litro	15***
Alcalinidad total	200 mg/litro	1
Calcio	60 mg/litro	1
Fosfatos	0.5 mg/litro	1
Manganeso	36 mg/litro	1
Molibdeno	0.07 mg/litro	1
Magnesio	0.1 mg/litro	1
Zinc	3 mg/litro	1
Dureza Total	300 mg/litro	1
Sulfatos	250 mg/litro	1
Hierro total	0.3 mg/litro	1.5
Cloruros	250 mg/litro	1
Nitratos	10 mg/litro	1
Nitritos	0.1 mg/litro	3
Aluminio	0.2 mg/litro	3
Fluoruros	1.0 mg/litro	1
Carbono Orgánico Total	5.0 mg/litro	3
Coliformes	0 UFC ****/100 cm <sup>3</sup>	15
Escherichia Coli	0 UFC ****/100 cm <sup>3</sup>	25
<b>TOTAL:</b>		<b>100</b>
<hr/>		
*Unidades Platino Cobalto		
**Unidad Nefelometría de Turbidez		
***Cloro residual libre		
****Unidad de Formación de Colonias		

Tomado de: Resolución 2115 de 2007.

El valor del IRCA es cero puntos, cuando este cumple con los valores aceptables para cada uno de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos y cien puntos es el más alto riesgo cuando no cumple con ninguno de los parámetros, según la Resolución 2115 de 2007.

Entre los parámetros que se clasifican en el IRCA con un puntaje máximo permitido igual a cero (0), se encuentran los Coliformes, siendo una bacteria que se clasifica por ser uno de los contaminantes de los afluentes de agua más graves por su afectación directa a la salud, por lo cual,

se es indispensable su total eliminación y limitación de las fuentes de agua de abastecimiento de las comunidades (Mahmoud et al., 2022). La Organización Mundial de la Salud (OMS), estableció el término "agua potable gestionada de manera segura", con el cual determina aspectos indispensables respecto a la calidad del agua para consumo humano, planteando que esta debe estar totalmente libre de E-Coli o Coliformes (Shamsollahi et al., 2019). El pH es un componente fisicoquímico fundamental para la caracterización de una muestra de agua, posee un rango entre 6.5 y 8.5, en donde al ser menor de 6.5 impide la producción de minerales y vitaminas en el cuerpo humano y al ser superior de 8.5, genera que el agua posea un sabor salado, dando paso a la ocurrencia de trastornos en la piel e irritación de los ojos para quien la consume (Gupta et al., 2017).

La demanda biológica de oxígeno (DBO), hace referencia a la cantidad de compuestos orgánicos presentes en el agua y a la masa de oxígeno agotado por litro, en donde a mayor cantidad de DBO en una fuente de agua, mayor será la contaminación de la misma. Por otro lado, la demanda química de oxígeno (DQO), se refiere a la masa de oxígeno disuelto demandada por los organismos biológicos aeróbicos en el cuerpo de agua para degradar la materia orgánica presente en el agua (Faisal et al., 2020). La turbidez, también es un medio importante que se usa para evaluar la calidad del agua, dado que su alto contenido en las fuentes de agua para consumo y uso humano, indica el crecimiento de organismos patógenos que generan a su paso, graves implicaciones en la salud de las personas (Putra et al., 2022). *Escherichia coli* o E-Coli es una bacteria gastrointestinal de humanos y animales de sangre caliente, que, al ser consumida por medio del agua, genera graves afectaciones a la salud, debido a su potencial para producir toxinas que producen diarrea enterohemorrágica e insuficiencia renal, morbilidad y mortalidad grave en humanos y animales (Makhado et al., 2022).

La dureza total del agua se debe a la humedad y el dióxido de carbono que reacciona con los iones de calcio y magnesio presentes en la superficie terrestre, su valor máximo aceptable para consumo humano corresponde al 300 mg/L. Existen dos tipos de dureza: dureza temporal, la cual se puede reducir por medio de ebullición y la dureza permanente, la cual requiere de un tratamiento riguroso (Hailu et al., 2019). La contaminación de las fuentes hídricas, y en particular de los nitratos, es uno de las problemáticas que han desencadenado un amplio riesgo tanto en la salud humana como en los ecosistemas, las fuentes más contaminadas por los nitratos en sistemas de agua dulce son provocados por desechos humanos, industriales y animales, la Organización Nacional de la Salud (ONS) ha dispuesto indicaciones sobre acerca de las concentraciones adecuadas de nitritos y nitratos en el agua para consumo humano, debido a que una sobredosis de estos componentes generan a corto plazo efectos negativos en la salud como metahemoglobinemia y efectos en la tiroides (Picetti et al., 2022). El hierro, hace parte de los metales pesados, cuya presencia puede atribuirse a la mezcla de rocas y minerales, drenaje ácido de minas, lixiviados de vertederos, aguas residuales o desechos industriales, su incidencia en fuentes de agua, representa una amenaza tóxica para la salud humana, en donde su consumo en cantidades mayores a 0,3 mg/L, puede causar malestar estomacal, úlceras, retraso mental, daño hepático y/o cerebral (Dey et al., 2022).

### **7.5. Cálculo del Índice de Calidad de Agua para Consumo Humano (IRCA)**

El reporte y la estimación del IRCA se realiza por muestra y de manera mensual, este se determina teniendo en cuenta los datos de la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, para el cálculo del IRCA por muestra, este debe realizarse por medio de una media ponderada donde se le asignan pesos a cada una de las características fisicoquímicas y microbiológicas del agua, ver Ecuación 1.

**Ecuación 1.***IRCA por Muestra.*

$$\text{IRCA (\%)} = \frac{\sum \text{Puntajes de riesgo asignado a las características no aceptables}}{\sum \text{Puntajes de riesgo asignados a todas las características analizadas}} \times 100$$

El cálculo del IRCA mensual se realiza para cada prestador, ver Ecuación 2.

**Ecuación 2.***IRCA Mensual.*

$$\text{IRCA (\%)} = \frac{\sum \text{de los IRCAS obtenidos en cada muestra realizada en el mes}}{\text{Número total de muestras realizadas en el mes}} \times 100$$

**7.6. Clasificación del Nivel de Riesgo en Salud Según el IRCA por Muestra y Mensual**

De acuerdo con los resultados del cálculo del IRCA, se determina el nivel de riesgo del agua para el consumo humano, permitiendo generar alertas tempranas, alertas sobre riesgos, eventos o situaciones de emergencia para la salud y acciones preventivas dirigidas a los prestadores, autoridades sanitarias y órganos de control, sobre qué hacer dependiendo la clasificación de nivel de riesgo, basados en la Resolución 2115 de 2007, ver la Tabla 5.

**Tabla 5.***Clasificación del Nivel de Riesgo IRCA.*

<b>Clasificación IRCA %</b>	<b>Nivel de Riesgo</b>	<b>IRCA por muestra</b> (Notificaciones que adelantará la autoridad sanitaria de manera inmediata)	<b>IRCA mensual</b> (Acciones para mejora de la Calidad)
80.1 – 100	Inviabile Sanitariamente	Informar a la persona prestadora, al COVE alcalde, Gobernador, SSPD, Minsalud, INS, Minvivienda, Contraloría General y Procuraduría General.	Agua no apta para consumo humano, gestión directa de acuerdo con su competencia de la persona prestadora, alcaldes, gobernadores y entidades del orden nacional
35.1 – 80	Alto	Informar a la persona prestadora, COVE, alcalde, Gobernador y a la SSPD.	Agua no apta para consumo humano, gestión directa de acuerdo con su competencia de la persona prestadora y de los alcaldes y gobernadores respectivos
14.1 – 35	Medio	Informar a la persona prestadora, COVE, alcalde y Gobernador.	Agua no apta para consumo humano, gestión directa de la persona prestadora.
5.1 – 14	Bajo	Informar a la persona prestadora y al COVE.	Agua no apta para consumo humano, susceptible de mejoramiento
0 – 5	Sin Riesgo	Continuar el control y la vigilancia.	Agua apta para consumo humano. Continuar la vigilancia.

Tomado de: Resolución 2115 de 2007.

**7.7.Plantas de Tratamiento de Agua Potable (PTAP)**

Las plantas de tratamiento de agua permiten asegurar la calidad y la seguridad del agua potable que consume una población (Dronjak et al., 2022). El tipo de planta de tratamiento requerida para generar agua potable depende de la calidad del agua cruda y del uso al que va a ser destinado el abastecimiento. El diseño de una planta de tratamiento eficaz y de bajo costo necesita de un estudio detallado de ingeniería, enfocado principalmente en la calidad del agua de la fuente y en la selección adecuada de los procesos y de las operaciones necesarias para brindar un servicio en óptimas condiciones funcionales y económicas. Debido a que no existe un tipo específico de

planta de purificación de agua, se deben llevar a cabo algunos estudios de trazabilidad, para ello se han planteado algunas variables de tratamiento de agua cruda, teniendo en cuenta en qué condiciones de calidad de agua se encuentra la fuente de abastecimiento, para ello como referencia se tiene en cuenta las recomendaciones del USPHS, ver Tabla 6, (Romero, 2006).

**Tabla 6.**

*Requisitos de Tratamiento.*

<b>Tipo de tratamiento</b>	<b>Contenido de Bacterias Coliformes</b>
Ninguno	Solo en aguas subterráneas que no contienen ningún tipo de contaminante
Cloración	Promedio en cualquier mes 50/100 MI
Completo con filtración rápida en arena y pos-cloración	Promedio en cualquier mes 5.000/100 mL, sin exceder este valor en más del 20% de las muestras examinadas en cualquier mes.
Tratamiento adicional pre-sedimentación y pre-cloración	Promedio en cualquier mes 5.000/100 mL. Pero excediendo este valor en más del 20% de las muestras analizadas en cualquier mes, y sin exceder de 20.000/mL en más del 5% de las muestras examinadas en cualquier mes.

Tomado de: (Romero, 2006).

La Tabla 7, indica los tipos de tratamiento que se deben tener en cuenta en un sistema de tratamiento de agua potable STAP, considerando el contenido de bacterias coliformes para cada de ellos (Romero, 2006).

**Tabla 7.***Procesos de Purificación de agua.*

<b>Proceso</b>	<b>Propósito</b>
<b>Tratamiento Preliminar</b>	
Cribado	Remoción de desechos grandes que pueden obstruir o dañar los equipos de la planta.
Pre-tratamiento químico	Remoción eventual de algas y otros elementos acuáticos que causan sabor, olor y color.
Pre-sedimentación	Remoción de grava, arena, limo y otros materiales sedimentables.
Aforo	Medida del agua cruda por tratar.
<b>Tratamiento Principal</b>	
Aireación	Remoción de olores y gases disueltos; adición de oxígeno para mejorar sabor.
Coagulación/floculación	Conversión de sólidos no sedimentables en sólidos sedimentables.
Sedimentación	Remoción de sólidos sedimentables.
Ablandamiento	Remoción de dureza.
Filtración	Remoción de sólidos finos, floculador en suspensión y la mayor parte de los microorganismos.
Adsorción	Remoción de sustancias orgánicas y color.
Estabilización	Prevención de incrustaciones y corrosión.
Desinfección	Exterminio de organismos patógenos.

Tomado de: (Romero, 2006).

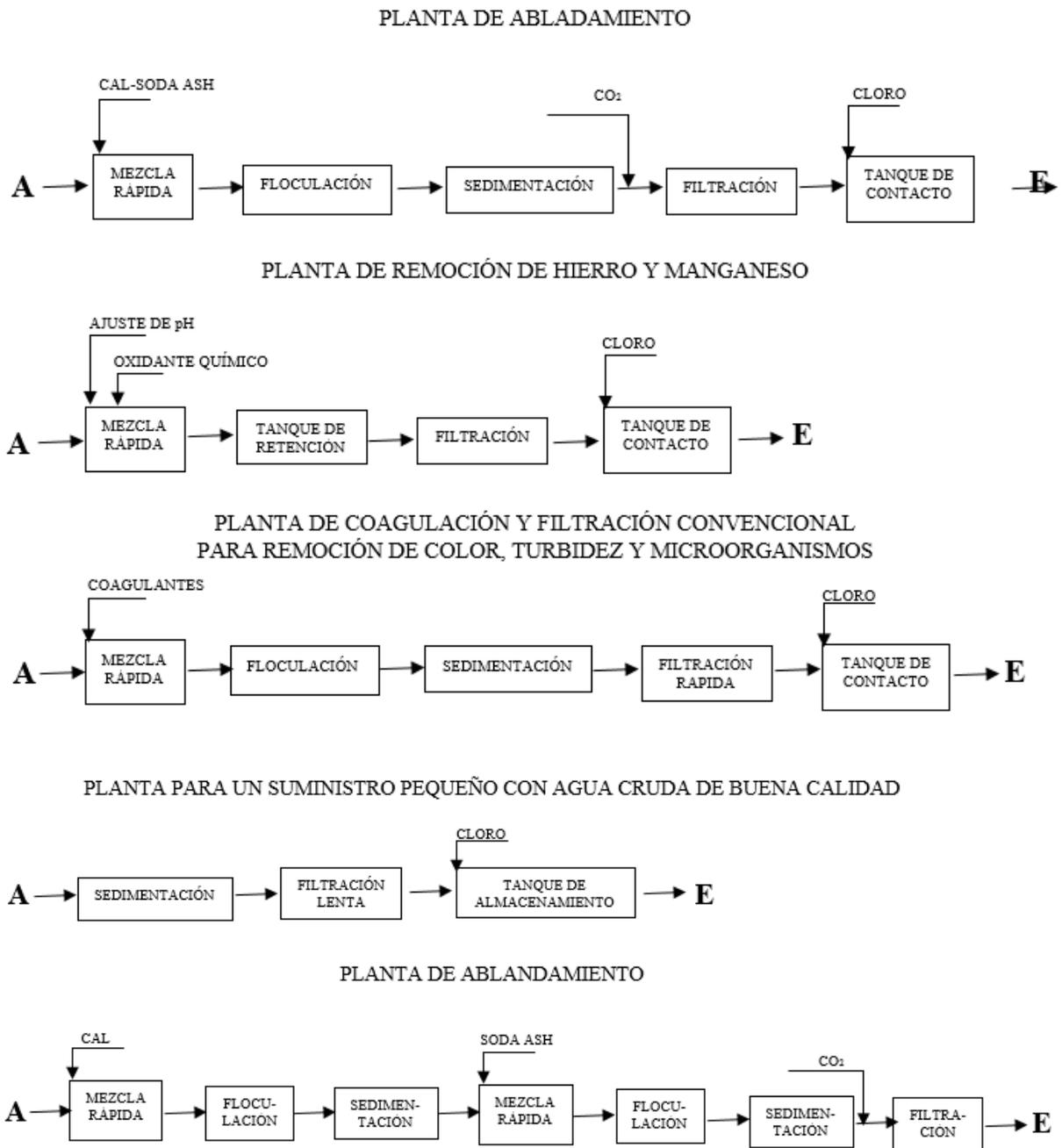
La coagulación es el proceso principal para la eliminación de la materia orgánica natural, este componente es considerado como uno de los subproductos de la desinfección para la generación de agua potable, el parámetro usado para optimizar este proceso es la turbidez (Suquet et al., 2021). El proceso de sedimentación-coagulación son una unidad operacional esencial para el tratamiento de agua potable, debido a que este no requiere de una configuración adicional y mayor facilidad en cuanto a la producción del mismo a mayor escala, la implementación de este proceso representa un enfoque rentable y eficiente para la eliminación de nano materiales presentes en el agua (Shi et al., 2022). El proceso de coagulación y floculación es utilizado generalmente para eliminar la turbidez, el color, las algas y otros tipos de microorganismos que se encuentran presentes en las fuentes de aguas superficiales, los parámetros que afectan el proceso de coagulación se deben a la intensidad de la mezcla y al tiempo de detención, los problemas más

frecuentes en el desarrollo de la coagulación son la sobredosificación, la mezcla de energía insuficiente y la obstrucción de los inyectores o difusores (Ebsa & Dibaba, 2022). El procedimiento de desinfección del agua potable se ha considerado como un proceso de tratamiento primordial desde comienzos del siglo XX, debido a que por medio de este se ha logrado reducir la repercusión de enfermedades generadas por la calidad del agua, tales como el cólera, la fiebre tifoidea y la disentería amebiana (Hu et al., 2018), el objetivo principal de la cloración es reducir la proliferación de microorganismos nocivos presentes en el agua, sin embargo durante este proceso se desarrollan subproductos de desinfección que son tienen efectos adversos en la salud humana debido a la reacción de este con la materia orgánica natural y el cloro (Stefán et al., 2019).

Los componentes de un sistema de tratamiento de agua se caracterizan por contar con procesos de coagulación, sedimentación, filtrado de arena y desinfección, sin embargo, estos difícilmente pueden generar agua potable de forma efectiva debido a que pueden haber presencia de contaminación microbológica (Chang et al., 2022). Entre la diversidad de diseños de plantas de tratamiento encontramos las siguientes, ver Figura 2, las cuales hacen parte del análisis de alternativas del tratamiento de agua potable.

Figura 2.

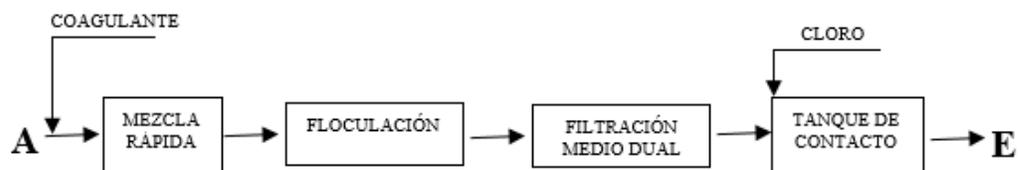
Diagramas de Flujo de Plantas de Purificación.



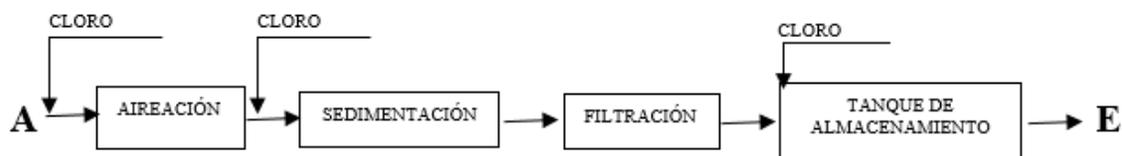
## PLANTA DE ABLANDAMIENTO



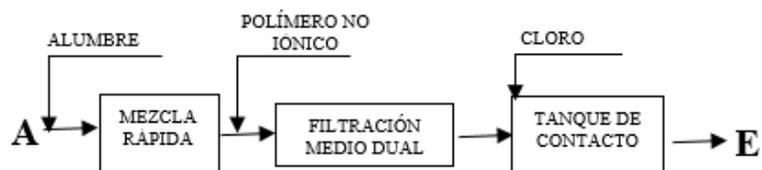
## PLANTA DE FILTRACIÓN DIRECTA



## PLANTA DE REMOCIÓN DE HIERRO Y MANGANESO



## PLANTA DE FILTRACIÓN DIRECTA



Tomado de: (Romero, 2006).

## 8. Diseño Metodológico

El presente proyecto, se desarrollará de acuerdo con las siguientes cinco etapas, con las cuales se pretende dar cumplimiento a los objetivos planteados.

**ETAPA 1:** Generación de un estado de conocimiento respecto a los diferentes tipos de plantas de tratamiento de agua potable a bajo costo.

- Realizar una recopilación de información acerca de sistemas de potabilización de agua de bajo costo.

**ETAPA 2:** Diagnóstico de la Zona.

- Identificación de las condiciones actuales del río y del sistema de acueducto existente.
- Identificación de las condiciones topográficas.
- Recolección de información de las características hidrológicas, climatológicas y meteorológicas de la zona.
- Recopilación de información sobre las características principales del suelo, tales como la geología y geomorfología del mismo.

**ETAPA 3:** Caracterización de las Muestras de Agua

- Diseñar un formato para el registro de datos de los parámetros y características a evaluar en el ensayo de laboratorio.
- Determinar un protocolo para la cadena de custodia de las muestras.
- Realizar una recolección de muestras, máximo dos, en puntos específicos tales como en la quebrada y en el tanque de almacenamiento de la Vereda Pinipay.
- Realizar un análisis de las muestras recolectadas con el fin de obtener resultados fisicoquímicos y microbiológicos de la calidad del agua de la Vereda Pinipay basados bajo

los estándares normativos de la Resolución 2115 de 2007.

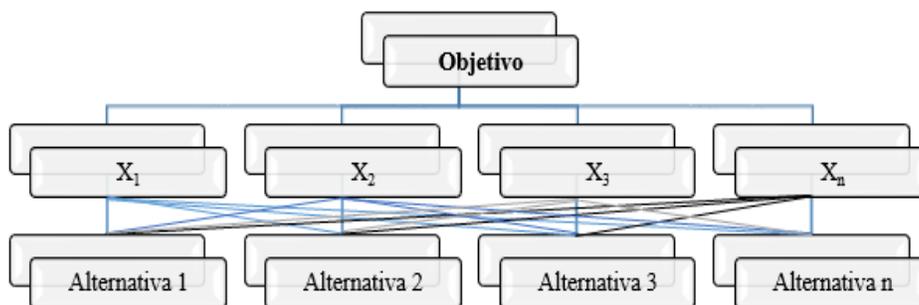
- Recopilación de los datos recolectados para análisis posteriores.

**ETAPA 4:** Identificación de Alternativas para el Tratamiento de Agua Potable en la Vereda Pinipay-Sector la carrera.

- Determinar los criterios que se evaluarán respecto a los resultados fisicoquímicos obtenidos en el muestreo elaborado en la Etapa 2.
- Delimitar los criterios de evaluación del método de análisis jerárquico AHP, de manera que se permita la clasificación y selección de las alternativas estudiadas en la revisión bibliográfica planteada anteriormente.
- Hacer uso del proceso de análisis jerárquico AHP, ver Figura 3, por el cual se evaluarán los criterios de las alternativas seleccionadas, facilitando la toma de decisiones y la obtención de un resultado objetivo y fiable, mencionado lo anterior se realizará la construcción del árbol de jerarquía, la escala de comparación entre cada una de las alternativas y la generación de resultados.

**Figura 3.**

*Posible Modelo para Proceso de Análisis Jerárquico AHP.*



Tomado de: Elaboración propia, basados en datos de (Savitri et al., 2022).

**ETAPA 5: Diseño Conceptual de la Planta de Tratamiento de Agua Potable**

- A partir de los resultados obtenidos por medio del proceso de análisis jerárquico AHP, se conceptualizará el diseño del tipo de sistema de tratamiento de agua potable más apropiado para la Vereda-Pinipay, teniendo en cuenta los procesos de purificación de agua idóneos para el consumo de esta población.

## **9. Análisis y Resultados Obtenidos**

### **9.1. Generación Estado del Conocimiento de Tipos de PTAP.**

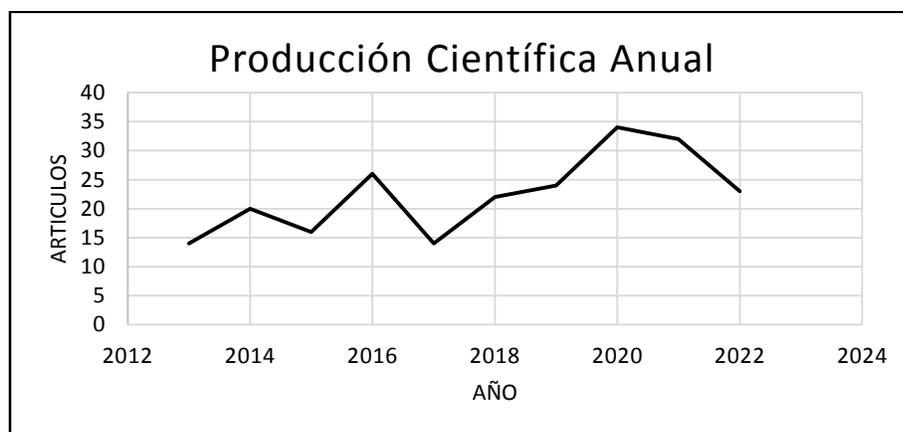
El estado de conocimiento se realizó haciendo uso de un análisis bibliométrico, que tiene como finalidad completar la revisión bibliográfica sobre Sistemas de Tratamiento de agua potable a bajo costo para implementar en zonas rurales, a partir de la selección de artículos científicos y review , que se encontraban disponibles en la base de datos de Scopus, por medio del cual se analizaron 225 documentos, evaluados para un intervalo entre los años 2013 al 2022.

Dicho esto, se implementó el uso de estadísticas representativas y técnicas de visualización de datos y resultados presentados a partir de la aplicación RStudio, se llevó a cabo la implementación del algoritmo de paquetes “bibliometrix”, donde se determinó la tasa de crecimiento anual de 5.67, la media de citas por documentos de 3.93 y el número de referencias, adicionalmente se aplicó el nuevo interfaz gráfico denominado Biblioshiny, el cual permite determinar el análisis para entender de manera visual el crecimiento científico a nivel local y mundial sobre este tema en específico.

La Figura 4, nos muestra que para el año 2022 se publicaron mayor cantidad de artículos sobre Sistemas de Tratamiento de Agua Potable de bajo costo en zonas rurales, sin embargo, observando la trazabilidad de los años correspondientes de la búsqueda se identifica como a través del transcurso del tiempo se ha incrementado la necesidad de plantear soluciones o alternativas ante esta problemática que pone en riesgo a la población que consume agua no tratada.

**Figura 4.**

*Publicación de Artículos sobre STAP de Bajo Costo de Manera Anual.*

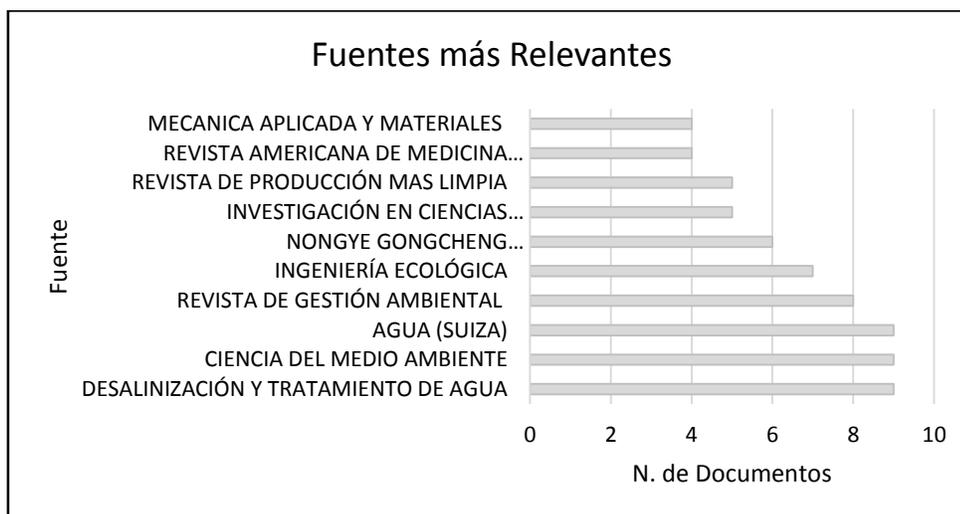


Tomado de: Elaboración Propia, base de datos Scopus (2022).

De acuerdo con los datos presentados en la Figura 5, sobre las diferentes líneas temáticas de investigación observamos que los mentores de investigación para el periodo de 2013-2022, se destacan la línea de desalinización y tratamiento de agua, ciencia del medio ambiente y agua (Suiza), referente a la mayor publicación de documentos sobre Sistemas de Tratamiento de Agua Potable (STAP) y además representan la fuente con mayor impacto local.

**Figura 5.**

*Datos Sobre las Fuentes Más Relevantes de Información de Artículos.*

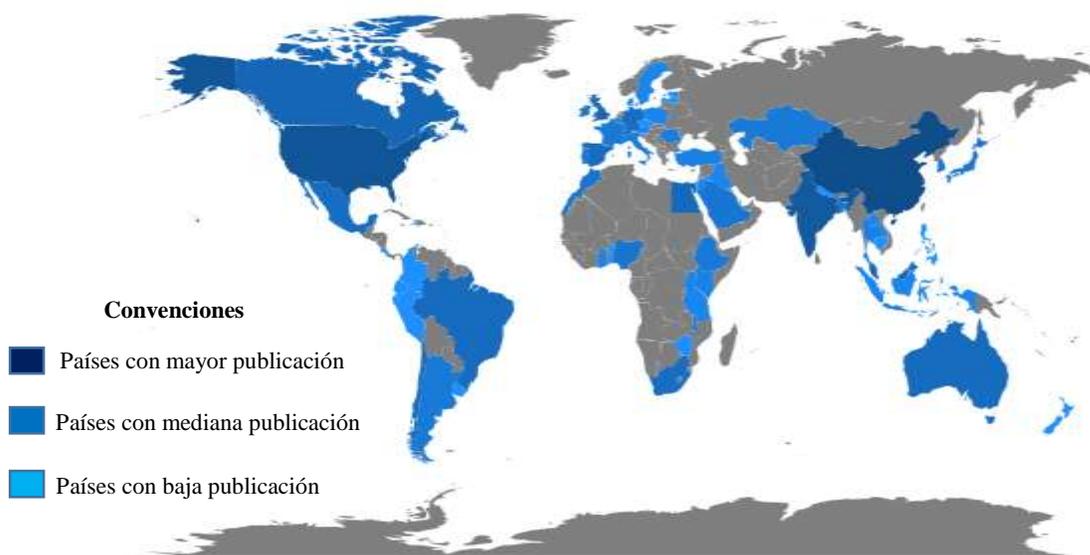


Tomado de: Elaboración Propia, base de datos Scopus (2022).

Teniendo en cuenta la Figura 6, se observa los países con mayor creación y publicación de artículos con temática referente a Sistemas de Tratamiento de Agua Potable STAP, en donde China, Estados Unidos e India son los países que lideran las líneas de investigación con mayor frecuencia de publicación de artículos para los periodos de estudio 2013-2022, es relevante mencionar que en Colombia solo se realizó una investigación sobre esta temática, por lo que resulta relevante poder aportar mayor información, a partir de esto lograr contribuir con el cumplimiento del Objetivo de Desarrollo Sostenible “Agua Limpia y Saneamiento Básico para toda la población para el 2030”.

**Figura 6.**

*Producción Científica de Artículos por Países a Nivel Mundial.*



Tomado de: Base de datos Scopus.

Finalmente, con la información presentada se destacan los siguientes artículos: La condición de seguridad en el consumo de agua se ha visto expuesta debido al aumento de la población y a la demanda del mismo, los principales afectados por no contar con tratamiento de agua son las pequeñas comunidades rurales de países en desarrollo que no cuentan con suficientes

recursos económicos para implementarlos, según (Huang et al., 2018) para encontrar alternativas de solución de bajo costo ante esta problemática se estudia la minimización de E. coli haciendo uso de un disco cerámico recubierto con ZnO, puesto que para la fabricación de dichos filtros solo se necesita el uso de arcilla, biomasa y agua, lo cual lo hace accesible para este tipo población, luego de realizar los respectivos ensayos se determinó que la característica que permitió la eliminación de la E. Coli en el agua se debió al tamaño de poro de los filtros diseñados y a la actividad antibacteriana fotocatalica de nano ZnO.

Se realiza el estudio del diseño de diferentes filtros para agua de bajo costo, los cuales tienen como fin realizar la purificación para una pequeña cantidad de agua, de acuerdo con (Hussain & Al-Fatlawi, 2020) se usaron materias primas asequibles y sin efectos con el medio ambiente, estos son la arcilla de caolín y fibras de yute, por medio de estos filtros se pretendía determinar la eficacia de los filtros mencionados para eliminar la presencia de parámetros químicos como la dureza total, alcalinidad, sulfatos, magnesio, entre otros, por dicha razón se diseñaron 3 filtros con diferentes porcentajes de concentración de cada uno de los materiales ya mencionados, donde se obtuvo una disminución parcial de estos parámetros químicos en el agua, este sistema puede ser usado para el tratamiento de agua domestica contaminada en zonas rurales y también donde se consume agua directamente de una fuente sin ningún tipo de tratamiento.

El desarrollo de fotocatalizadores para tratar agua en zonas rurales se han presentado ampliamente en la literatura, en conjunto con la desinfección solar (SODIS), las cuales han permitido la eliminación de varios agentes contaminantes, teniendo en cuenta a (Porley et al., 2020) menciona que el uso de fotocatalizadores se ven limitados a diversos ensayos donde no se tienen en cuenta condiciones reales, por dicha razón plantearon pruebas bajo la luz solar en fuentes de agua de sectores rurales de la India, con el fin de poder verificar resultados de pruebas anteriores

frente a la elaboración de un foto catalizador nuevo, a partir de esto se determinó que el uso de la desinfección solar (SODIS) puede mejorarse considerablemente con la aplicación de un foto catalizador a base de material de titanio.

## **9.2.Diagnóstico Zonal de la Vereda Pinipay - San Cayetano, Cundinamarca**

### **9.2.1. Ubicación de la Zona**

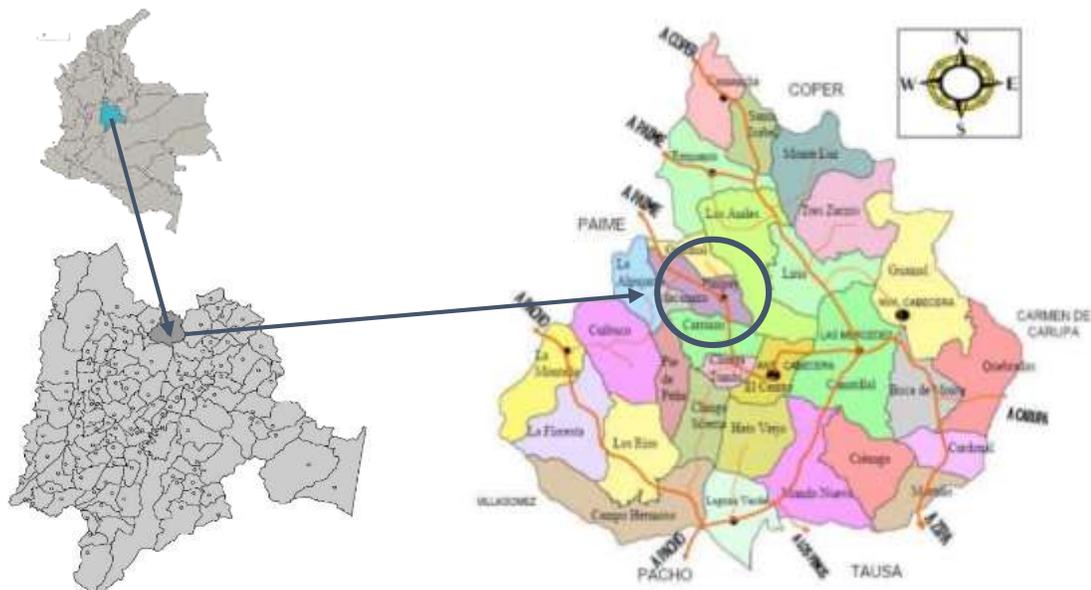
La vereda Pinipay está ubicada en el Municipio de San Cayetano situado al norte del departamento de Cundinamarca, ver Figura 7, este se encuentra localizado sobre los cerros de la Cordillera Oriental de Colombia, aproximadamente a una distancia de 164 km de la ciudad de Bogotá, en el interior de la provincia de Rionegro, predominado por contar con una amplia área de Sector Rural.

La provincia de Rionegro, está ubicado al noroccidente del departamento, conformado por 8 municipios que cuentan con características similares a las de San Cayetano y con otros niveles de desarrollo, estos son: Pacho como cabecera provincial, El Peñón, La Palma, Paime, Topaipí, Villagómez, Yacopí y San Cayetano.

La economía de San Cayetano se caracteriza por comercializar productos e insumos agropecuarios, como el café, la papa, la leche, ganadería, entre otros. Este municipio hace uso de servicios del Municipio de Pacho y Zipaquirá, sin embargo, no existen relaciones compartidas debido a la falta de infraestructura vial optima que logre unir a esta provincia y a los altos niveles de pobreza de muchos de estos municipios, actualmente se encuentran dentro de los 10 municipios del departamento con más altos índices de necesidades básicas insatisfechas – N.B.I.

**Figura 7.**

*Ubicación de la Vereda Pinipay-San Cayetano, Cundinamarca.*



Tomado de: Mapoteca del Municipio de San Cayetano Cundinamarca (2022).

### **9.2.2. Condiciones de la Quebrada y Estructura de Acueducto Existente.**

A través de una visita realizada en el lugar de captación de agua del municipio San Cayetano Cundinamarca Vereda Pinipay – Sector la Carrera, se permitió determinar características técnicas y visuales del río denominado “Las Petacas”, del cual se abastece la población de la vereda, donde se evidencia que está quebrada desemboca aproximadamente a 300 metros antes de la ubicación de la bocatoma en un bosque ubicado en la finca llamada “El Diamante” ver

**Figura 8**, está quebrada sigue su recorrido hasta el punto de encontrarse con la quebrada denominada “La chapa” aproximadamente a 4000 metros desde su nacimiento.

**Figura 8.**

*Fuente de Abastecimiento Quebrada "Las petacas".*



Tomado de: (Elaboración propia, 2022).

Adicionalmente, se realizó un recorrido por la línea de conducción del acueducto, en donde también se determinaron dimensiones, características y estado de la bocatoma, tanque de almacenamiento y tubería existente, donde se reconoció lo siguiente:

**Tabla 8.**

*Dimensiones del Acueducto Actual.*

<b>Dimensiones Volumen total, Volumen Efectivo</b>					
	Longitud (m)	Ancho (m)	Alto (m)	Volumen Total (m <sup>3</sup> )	Volumen Efectivo (m <sup>3</sup> )
<b>Rio "Las Petacas"</b>	4000	-	-	-	-
<b>Bocatoma</b>	3,90	3,32	0,77	-	-

<b>Tanque de Almacenamiento</b>	4,60	4,60	2,00	42.32	36.784
---------------------------------	------	------	------	-------	--------

Tomado de: (Elaboración propia, 2022).

La bocatoma del acueducto existente del municipio San Cayetano Cundinamarca Vereda Pinipay – Sector la Carrera, fue diseñada hace más de 25 años, está construida a partir de elevaciones, solados, atraques y bases en concreto con resistencia de 3500 PSI y acero de refuerzo con las dimensiones señaladas en la Tabla 8, la bocatoma está compuesta por dos aletas abiertas con inclinación de un 2% y una caja de salida con una longitud de 0.90 m, ancho de 0.90 m y una profundidad de 0.80 m, ver Figura 9.

**Figura 9.**

*Condiciones de la Bocatoma Vereda Pinipay - Sector la Carrera.*



Tomado de: (Elaboración propia, 2022).

En los inicios de este acueducto el sistema de conducción de agua estaba hecha por manguera, sin embargo, hace más de 15 años se cambió este sistema a uso de tubería PVC de 2” de alta presión, ver Figura 10.

**Figura 10.**

*Tubería Existente Acueducto Vereda Pinipay - Sector La Carrera.*

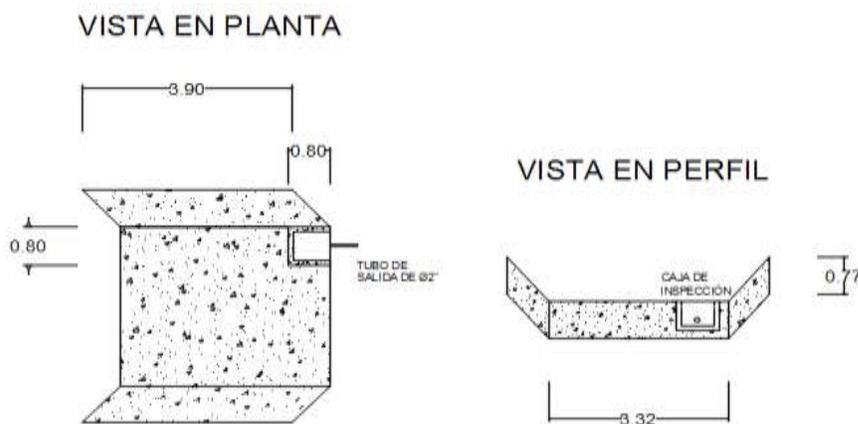


Tomado de: (Elaboración propia, 2022).

En el siguiente esquema se muestra con más claridad la forma y componentes de la bocatoma, ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

**Figura 11.**

*Esquema Bocatoma.*



Tomado de: (Elaboración propia, 2022).

Finalmente se reconocen las características del Tanque de Almacenamiento el cual se encuentra construido hace más de 25 años y diseñado a partir elevaciones, solados, atraques y bases en concreto con resistencia de 3500 PSI y acero de refuerzo, además este se encuentra impermeabilizado y enchapado todas sus paredes con las dimensiones mencionadas en la Tabla 8, ver Figura 12.

**Figura 12.**

*Condiciones Tanque de Almacenamiento Acueducto Vereda Pinipay - Sector la Carrera.*

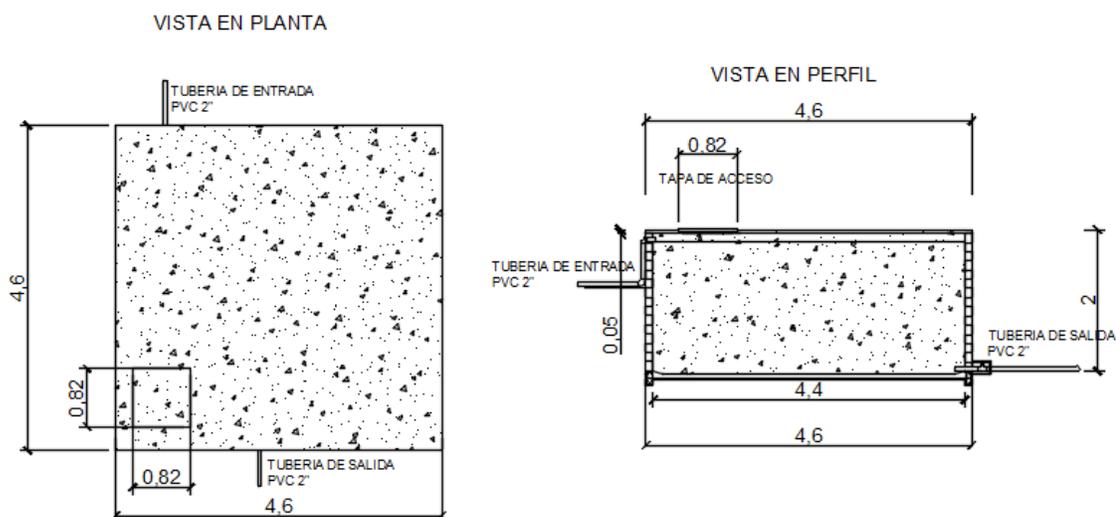


Tomado de: (Elaboración propia, 2022).

En el siguiente esquema se muestra con más claridad la forma y componentes del tanque de almacenamiento, ver Figura 13.

**Figura 13.**

Esquema Tanque de Almacenamiento.



Tomado de: (Elaboración propia, 2022).

En búsqueda de determinar si el caudal que abastece la población es suficiente o insuficiente se realizó el cálculo del caudal de diseño y se comparó con el caudal actual del acueducto, el cual fue tomado por medio del método de aforo volumétrico.

### 9.2.3. Caudal de Diseño

Basado en los datos del censo de los años 2022 y 2018, tomados de la base de datos abiertos del SISBEN de Cundinamarca y del DANE respectivamente, y en relación al índice de crecimiento demográfico, se calculó el caudal de diseño para una población proyectada a 25 años, según la Resolución 0330 de 2017, Por la cual se adopta el Reglamento Técnico para el Sector Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS, se obtuvo lo siguiente:

Censo Poblacional Vereda Pinipay 2022:	371 habitantes
Censo Poblacional Vereda Pinipay 2018:	365 habitantes

En primera instancia se calculó la tasa de crecimiento (k) de acuerdo al cambio de población respecto a los años por medio de la Ecuación 3.

#### Ecuación 3.

*Tasa de Crecimiento.*

$$k = \frac{\Delta \text{Población}}{\Delta \text{Tiempo}} = \frac{371 - 365}{2022 - 2018} = \frac{3\text{hab}}{\text{año}}$$

Por medio del cálculo anterior se obtiene un crecimiento de población de 3 habitantes por año, a partir de ello se procede a calcular la población proyectada a 25 años, es decir al año 2047, para ello usamos la Ecuación 4.

#### Ecuación 4.

*Proyección de Población.*

$$C_{2047} = 331\text{hab} + 3 \frac{\text{hab}}{\text{año}} (2047 - 2022) = 446\text{hab}$$

Obteniendo que para el año 2047, la Vereda Pinipay contará con 446 habitantes.

Posteriormente, se procede a calcular la dotación bruta, en relación a la dotación neta, basada en los datos de la Tabla 9, en donde de acuerdo a los m.s.n.m de la vereda Pinipay, la dotación neta máxima corresponde a 130 L/Hab x día.

### Tabla 9.

*Dotación Neta Máxima.*

Nivel Promedio Sobre el Nivel del Mar de la Zona Atendida	Dotación Neta Máxima (L / Hab x Día)
>2000 m.s.n.m	120
1000-2000 m.s.n.m	130
<1000 m.s.n.m	140

Tomado de: Resolución 0330 de 2017.

Seguidamente se procede a calcular la dotación bruta por medio de la Ecuación 5.

### Ecuación 5.

*Dotación Bruta.*

$$D_{bruta} = \frac{D_{neta}}{1 - \%P} = \frac{130 \text{ L}}{1 - 25\%} = \frac{130 \text{ L}}{\text{Habxdía}} = \mathbf{173,33L/Habxdía}$$

En el desarrollo del cálculo de la dotación bruta, se utilizó el porcentaje de pérdidas técnicas máximas para diseño, que según la Resolución 0330 de 2017, corresponde al 25%.

Finalmente, con el dato obtenido anteriormente, se calcula el caudal de diseño o caudal medio diario por medio de la Ecuación 6, el cual nos indicará cuantos L/s son requeridos para satisfacer a la población de la vereda Pinipay hasta el año 2047.

### Ecuación 6.

*Caudal Medio Diario.*

$$Q_{mD} = \frac{D_{bruta} \times Poblacion \text{ Proyectada } (C_{2047})}{86400} = \frac{\frac{173,33L}{\text{Hab}} * \text{ día} * 446\text{Hab}}{86400} = \mathbf{0,895L/s}$$

#### 9.2.4. Caudal Actual del Acueducto

Debido a que se desconocía el Caudal con el cual opera el acueducto, se realiza un método de aforo de tipo Volumétrico, el cual consiste en medir el tiempo que se demora en llenar un recipiente de volumen conocido (Manual de Medición de Caudales, n.d.).

Por ende, se utilizó una caneca de 23 litros y un tubo PVC de 2" de 13 metros de longitud, ver Figura 14.

#### Figura 14.

Método de Aforo de Tipo Volumétrico.



Tomado de: (Elaboración propia, 2022).

Se tomó tres veces el tiempo que tardaba en llenarse la caneca obteniendo los resultados mostrados en la Tabla 10.

#### Tabla 10.

Datos Método de Aforo Volumétrico.

N°	Dato
Tiempo 1	10.09 seg.
Tiempo 2	11.85 seg.
Tiempo 3	12.24 seg.
Promedio	11.39 seg.

Tomado de: (Elaboración propia, 2022).

Considerando la Ecuación 7:

**Ecuación 7.**

*Cálculo del Caudal.*

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

Donde:

Q: Caudal; V: Volumen; T: Tiempo.

Teniendo en cuenta los datos de la Tabla 10, y el volumen de la caneca, aplicamos la Ecuación 7, para calcular el caudal obteniendo el siguiente resultado:

$$Q = \frac{V}{T} = \frac{23 L}{11.39 seg} = 2.02 L/seg$$

Para determinar el Caudal Existente del acueducto se realizó (1) primera medida del método de aforo en época de Invierno y una (2) medida en época de Verano con el fin de poder determinar la variación del flujo de agua en ambas temporadas, de acuerdo con el cálculo del Caudal de Diseño y el Método de aforo realizado en la Vereda Pinipay – Sector la Carrera se determina que el caudal con el cual opera el acueducto de este sector es mayor, por ende, esta comunidad cuenta con una amplia capacidad de agua que no es tratada.

**9.2.5. Identificación de Condiciones Topográficas.**

San Cayetano, está conformado por sistemas montañosos que van de los 3.500 a los 1.200 m.s.n.m. a partir de datos tomados en campo, respecto a la altura de la zona y las longitudes entre las estructuras del acueducto existente, se creó el perfil topográfico desde la fuente de captación, río “Las Petacas” y del sistema de acueducto de la vereda, donde se ilustra una distancia entre bocatoma - tanque de almacenamiento como sistema de acueducto de 1250 m y una distancia del

tanque de almacenamiento a la primera acometida de 490 m, ver Figura 15. También, se tomaron las coordenadas de las principales estructuras del acueducto, ver Tabla 11.

**Tabla 11.**

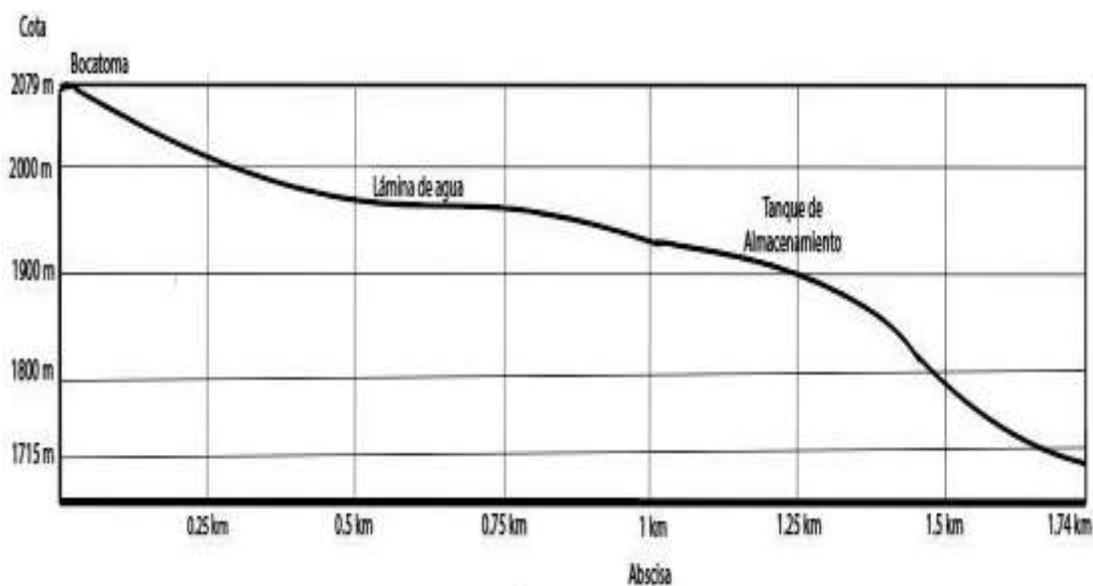
*Coordenadas Acueducto Actual.*

<b>Bocatoma</b>	5°19'49.53" N	74°04'59.32" O
<b>Tanque de Almacenamiento</b>	5°20'14.03"N	74°05'29.94" O
<b>Primer Acometida</b>	5°20'24.14" N	74°05'41.61" O

Tomado de: (Elaboración propia, 2022).

**Figura 15.**

*Perfil Topográfico de la Línea de Conducción Acueducto - Vereda Pinipay.*



Tomado de: (Elaboración propia, 2022).

Para las condiciones topográficas de este sector se determinó una inclinación máxima de 0.5 % y una inclinación promedio de 0.3%, por lo cual, se puede concluir que la zona cuenta con una superficie inclinada lo que, permite el funcionamiento de la línea de conducción por sistema de gravedad, en términos constructivos resulta bastante óptimo.

### 9.2.6. Geología y Geomorfología.

El Municipio de San Cayetano Cundinamarca es caracterizado principalmente por estar ubicado en una zona montañosa, donde se llevan a cabo actividades agrícolas como la producción de café y la actividad ganadera de manera extensiva con bajas aplicaciones técnicas que implican el cultivo de pasto en grandes extensiones de tierra.

Geológicamente, San Cayetano se encuentra dentro del denominado terreno supra-cretácico, conformado por rocas sedimentarias de edad cretácea al reciente. El terreno del municipio, posee diversos procesos desestabilizantes, debido a: grandes pendientes, alto contenido de sedimentos fino-granulares, fuertes factores climáticos y erosivos, alta deforestación para uso agrícola y ganadero y procesos tectónicos, los cuales dan paso a la generación de diferentes emergencias y desastres, tales como deslizamientos relacionados con los fenómenos climatológicos, como incendios forestales, además de emergencias como remoción en masa, derrumbes y pérdida de bancada, ver Tabla 12.

**Tabla 12.**

*Unidades de Suelo de San Cayetano, Cundinamarca.*

<b>Piso Climático Zona de Vida</b>	<b>Paisaje</b>	<b>Tipo de Relieve</b>
Cálido Húmedo Bh-T	Montaña	Ladera Estructural
Medio Muy Húmedo Bmh-PM	Montaña	Ladera Coluvial
Medio Muy Húmedo Bmh-PM	Montaña	Ladera Estructural
Medio Muy Húmedo Bmh-PM	Montaña	Ladera Estructural
Medio Muy Húmedo Bmh-PM	Montaña	Ladera Estructural
Frio Muy Húmedo Bmh-MB	Montaña	Ladera Estructural
Frio Muy Húmedo Bmh-MB	Montaña	Ladera Estructural
Frio Muy Húmedo Bmh-MB	Montaña	Ladera Estructural
Frio Muy Húmedo Bmh-MB	Montaña	Ladera Coluvial
Muy Frio Húmedo Bmh-M	Montaña	Ladera Estructural

Tomado de: (Gobernación de Cundinamarca, 2020).

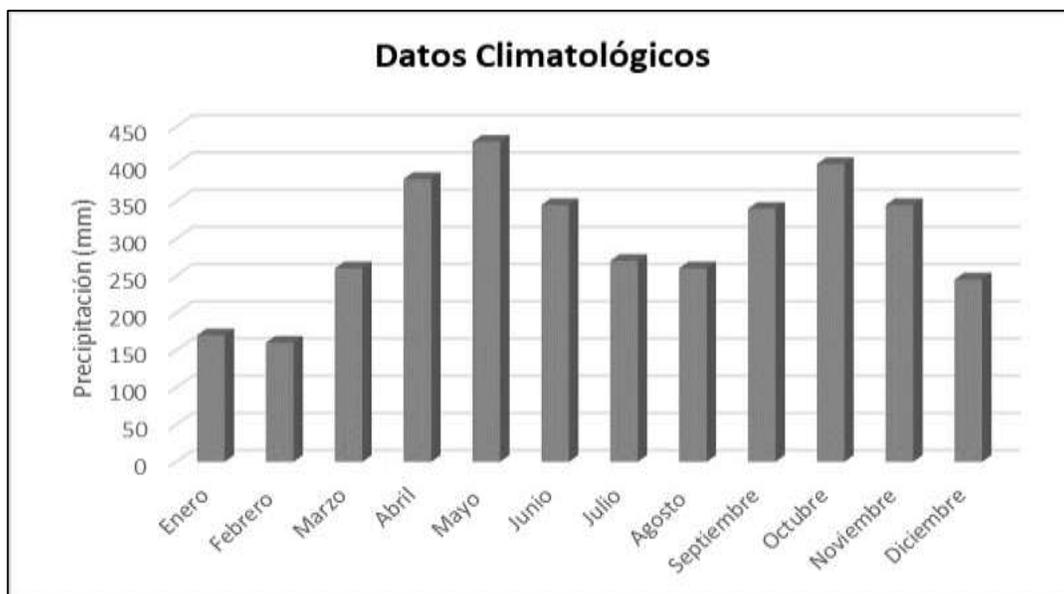
### **9.2.7. Características Hidrológicas, Climatológicas y Meteorológicas.**

A partir de las condiciones geológicas y topográficas del municipio de San Cayetano, que configuran pisos térmicos desde templado a páramo, y de la mano de condiciones atmosféricas como precipitación, brillo solar y viento, se determinaron las regiones climáticas y de vida del municipio de San Cayetano, en base a la clasificación climática y coberturas vegetales, ver Tabla 13. En función de ello, y de datos tomados de las estaciones hidrometeorológicas situadas en la zona, se obtuvieron las siguientes regiones climáticas: Bosque muy húmedo Montano (bmh-M), Bosque muy húmedo Montano Bajo (bmh-MB), Bosque Muy Húmedo Premontano (bmh-PM) y Bosque húmedo Premontano (bh-PM). (Gobernación de Cundinamarca, 2020).

El Municipio de San Cayetano - Cundinamarca cuenta con (1) estación climática ordinaria denominada por el código 23125070 la cual se encuentra actualmente suspendida desde el 11 de diciembre del 2008, por lo cual basados en los datos de las estaciones mas cercanas del municipio, tales como la del Municipio de Pacho 23065120 estado activo y el Municipio de Paima 23120240 estado activo, por ende, se usó una base de datos de la nasa donde se logro obtener los resultados mostrados en la Figura 16.

**Figura 16.**

*Histograma Climático de San Cayetano, Cundinamarca.*



Tomado de: (Elaboración propia, 2022).

En la Figura 16, se representan los datos climatológicos respecto al nivel de precipitación anual del municipio de San Cayetano, en donde es notable la presencia dos picos máximos, el primero comprende los meses entre abril y junio y el segundo, comprende los meses entre septiembre y noviembre, con una recesión en temporada de verano desde diciembre a febrero y en mitad de año entre julio y agosto.

**Tabla 13.**

*Clasificación Climática de San Cayetano, Cundinamarca.*

Altitud (m.s.n.m)	Precipitación(mm)	T °C	Nombre	Región Climática	Clima	Símbolo Temático
3800-3500	<1000	<10	Alto Andino	Fría y Seca	Muy Frio	MFH
3500-2800		10-16		Fría y Húmeda	Frío	FMH
2800-2500	2000-1000	16-18	Andino	Templado Húmedo	Medio Muy Húmedo	MMH

2500-2300		18-24			Medio Húmedo	MH
2300-1200	2000-2500	>24	Sub Andino	Templado Seco	Cálido Húmedo	CH

Tomado de: (Gobernación de Cundinamarca, 2020).

Dentro de las principales fuentes de abastecimiento del municipio de San Cayetano se encuentran las siguientes: Quebrada El Espejo en la cuenca del Río El Salto en el área de páramo, la cual será la fuente de captación del nuevo casco urbano y de las veredas Boca de Monte, Guamal, Cardonal; nacimiento El Vergel en la vereda Pie de Peña, Quebrada Mirto en la vereda Monte Luz, Quebrada Gaitán en la vereda Los Andes, Quebrada Negra en la vereda La Montaña, Quebrada Negra en la vereda Canutillal, nacimiento La Montaña en la vereda Guadual, Quebrada El Brasil, nacimiento Ojalí y nacimiento La Hacienda en la vereda Pinipay y nacimiento Pañadas en la vereda Santa Isabel (Gobernación de Cundinamarca, 2020).

### **9.3. Caracterización del Agua de Abastecimiento de la Aoblación de la Vereda Pinipay**

Para la caracterización del agua de consumo de la población de la Vereda Pinipay, San Cayetano, se elaboró una toma de muestras en la fuente de abastecimiento y en el tanque de almacenamiento. Como metodología, en la fuente de abastecimiento, se tomó una (1) muestra compuesta, la cual fue captada con una frecuencia de 1/4 de hora y un periodo de cinco (5) horas, en el tanque de almacenamiento, se tomaron seis (6) muestras puntuales. Se tomaron (3) muestras de agua con el fin de poder determinar la confiabilidad de los resultados y poder desarrollar el correspondiente análisis, ver

**Figura 17 y**

Figura 18.

**Figura 17.**

*Registro Fotográfico Toma de Muestras en Fuente de Abastecimiento.*



Tomado de: (Elaboración propia, 2022).

**Figura 18.**

*Registro Fotográfico Toma de Muestras en Tanque de Almacenamiento.*



Tomado de: (Elaboración propia, 2022).

El muestreo se realizó el día 18 de septiembre de 2022, manteniéndose refrigeradas y con adición de preservantes que conservaran las propiedades físico-químicas de las muestras, hasta llegar a su punto de almacenamiento y conservación para seguidamente realizar los respectivos ensayos y análisis, ver Figura 19.

**Figura 19.**

*Conservación de Muestras de Fuente de Abastecimiento y Tanque de Almacenamiento.*



Tomado de: (Elaboración propia, 2022).

Los parámetros analizados fueron: Coliformes, Color, Conductividad, DBO, DQO, Dureza Total, E-Coli, Hierro, Mesofilos, NH<sub>3</sub>, Nitratos, Nitritos, OD, pH, Sólidos Suspendedos Totales, Temperatura y Turbidez, obteniéndose los siguientes resultados, que seguidamente fueron comparados con los máximos permitidos según la Res. 2115 de 2007, para el caso de las muestras -tomadas de la fuente de abastecimiento y con el IRCA las muestras tomadas en el tanque de almacenamiento, ver Tabla 14.

**Tabla 14.**

*Resultados Análisis Físicoquímico.*

Parámetro	Fte Abaste.	Res. 2115 de 2007	¿Cumple? (Sí/No)	Tanque Almace	IRCA	¿Cumple? (Sí/No)
Coliformes (UFC/100cm <sup>3</sup> )	32	0	No	93	0	No

Color (UPC)	67	15	No	11	15	Sí
Conductividad (μS/cm)	236	1000	Sí	200	-	-
DBO	<20.6	0	No	N/A	-	-
DQO (mg/L)	14	0	No	-	-	-
Dureza Total(mgCaCO3/L)	9,7	300	Sí	8,65	300	Sí
E-Coli (UFC/100cm3)	102,1	0	No	125,1	0	No
Hierro (mg/L)	0,43	0,3	No	0,32	0,3	Sí
NH3	-	-	-	65,98	-	-
Nitratos (mg/L)	0,04	10	Sí	N/A	10	-
Nitritos (mg/L)	0,014	0,1	Sí	0,012	0,1	Sí
O2	42	-	-	47	-	-
PH	6,99	6.5 a 9.0	Sí	7,77	6.5 a 9.0	Sí
Solidos S. Totales (mg/L)	136	-	-	100	-	-
Temperatura (°C)	8,5	-	-	8	-	-
Turbiedad (UNT)	7,1	2	No	11,91	2	No

Tomado de: (Elaboración propia, 2022).

Seguidamente, basados en los puntajes de riesgo del IRCA, se procedió a asignar puntajes a cada uno de los parámetros según su cumplimiento o incumplimiento, tal como se observa en la Tabla 15. Partiendo de ello, se calculó el %IRCA para determinar la clasificación del nivel de riesgo.

**Tabla 15.**

*Análisis Puntajes de Riesgo IRCA.*

Parámetro	Tanque Almace.	IRCA	Puntaje IRCA Características NO aceptables	Puntaje IRCA Características Analizadas
Coliformes (UFC/100cm3)	93	0	15	15
Color Aparente (UPC)	11	15	0	6
Dureza Total (mgCaCO3/L)	8,65	300	0	1
E-Coli (UFC/100cm3)	125,1	0	25	25
Hierro (mg/L)	0,32	0,30	1,5	1,5
Nitritos (mg/L)	0,012	0,10	0	3
PH	7,77	6.5 a 9.0	0	1,5
Turbiedad (UNT)	11,91	2	15	15
<b>TOTAL</b>			<b>56,5</b>	<b>68</b>

Tomado de: (Elaboración propia, 2022).

$$IRCA(\%) = \frac{\sum \text{Puntajes de Riesgo Asignado a las Características No Aceptables}}{\sum \text{Puntajes de Riesgo Asignados a Todas las Características Analizadas}} * 100$$

$$IRCA(\%) = \frac{56,5}{68} * 100 = \mathbf{83,1\%}$$

El resultado anterior, representa el porcentaje de riesgo en la salud, en el que se encuentra el agua que consume la población de la vereda Pinipay representando, según la Tabla 5, una clasificación Inviabile Sanitariamente, encontrándose en un rango entre el 80.1 – 100%, catalogándose en un agua no apta para consumo humano.

#### **9.4. Identificación de Alternativas para el Tratamiento de Agua de la Vereda Pinipay**

Para la selección y determinación del STAP más adecuado para la población de la vereda Pinipay, San Cayetano, se realizó una encuesta a expertos para la cual, se formularon nueve (9) preguntas cerradas donde se les proporciono la información correspondiente respecto a los parámetros fisicoquímicos encontrados en las muestras de agua y los diferentes tipos de alternativas de STAP. Se determinó una escala de respuesta en donde uno (1) corresponde a la variable sin importancia, dos (2) corresponde a la variable de poca importancia, tres (3) corresponde a la variable moderadamente importante, cuatro (4) corresponde a la variable importante y por último cinco (5) corresponde a la variable muy importante. Cada uno de los encuestados respondió y aportó a partir de su conocimiento, las preguntas mostradas a continuación; es importante mencionar que la encuesta fue respondida por un ingeniero y magister en hidráulica, un ingeniero civil y un ingeniero químico.

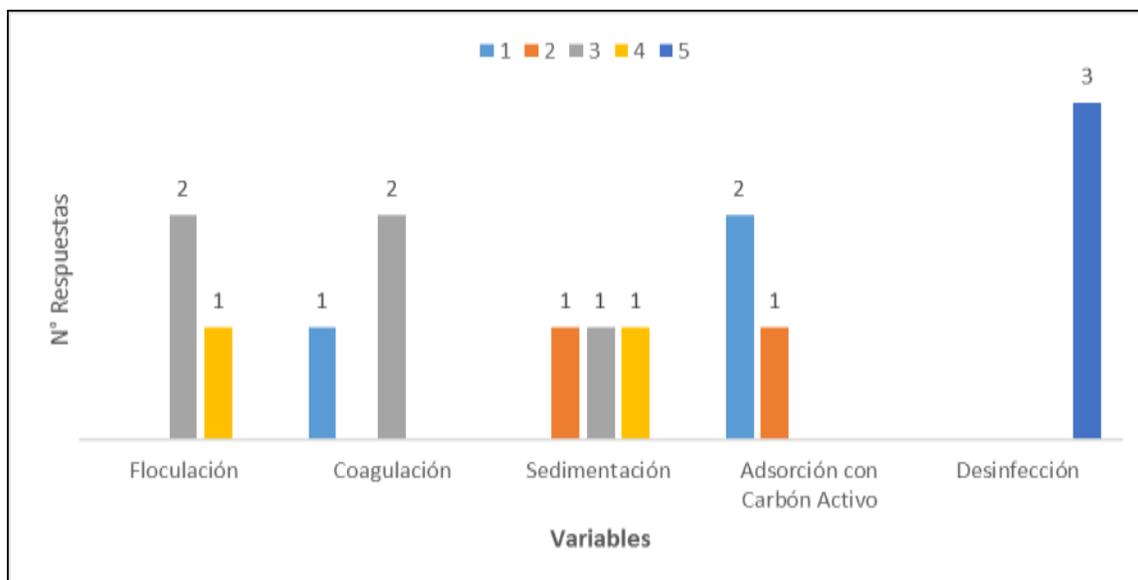
**Figura 20.***Pregunta 1- Encuesta a Expertos*

**Pregunta 1.**  
De acuerdo a su criterio clasifique de 1 a 5 (sin repetir el valor) ¿Cuál de los siguientes procedimientos considera indispensable para potabilizar el agua captada de una fuente de agua superficial, teniendo en cuenta que el Sistema de Tratamiento de Agua Potable sea a bajo costo?  
Tenga en cuenta que en la escala 1 es menos indispensable y 5 muy indispensable.

	1	2	3	4	5
Floculación	<input type="checkbox"/>				
Coagulación	<input type="checkbox"/>				
Sedimentación	<input type="checkbox"/>				
Adsorción con Carbón Activo	<input type="checkbox"/>				
Desinfección	<input type="checkbox"/>				

Tomado de: (Elaboración propia, 2022).

A partir de las respuestas obtenidas de la pregunta mostrada en **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se obtuvo la siguiente tabulación de datos:

**Figura 21.***Tabulación - Pregunta 1.*

Tomado de: (Elaboración propia, 2022).

De la Figura 21, se puede identificar que la variable de “desinfección” corresponde al mayor número de votaciones con un valor de escala cinco (5) es decir “muy indispensable”, siendo de esta manera según los expertos, el procedimiento de desinfección el más indispensable para el tratamiento de agua superficial, teniendo en cuenta la implementación de un STAP de bajo costo.

**Figura 22.***Pregunta 2 - Encuesta a Expertos.*

**Pregunta 2.** \*

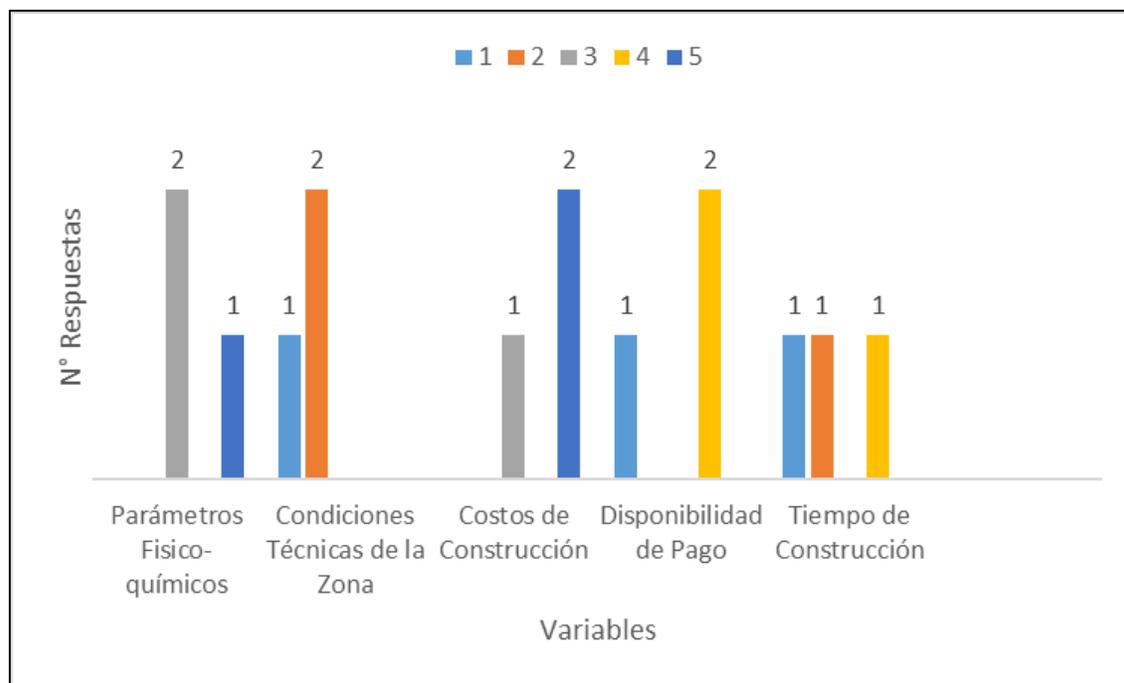
De acuerdo a su criterio clasifique de 1 a 5 (sin repetir el valor) ¿Cuál de las siguientes variables es más importante en la construcción de un Sistema de Tratamiento de Agua Potable a Bajo Costo?

Tenga en cuenta que en la escala 1 es menos importante y 5 más importante.

	1	2	3	4	5
Parámetros Físico-químicos	<input type="radio"/>				
Condiciones Técnicas de la Zona	<input type="radio"/>				
Costos de Construcción	<input type="radio"/>				
Disponibilidad de Pago	<input type="radio"/>				
Tiempo de Construcción	<input type="radio"/>				

Tomado de: (Elaboración propia, 2022).

A partir de las respuestas obtenidas de la pregunta mostrada en Figura 22, se obtuvo la siguiente tabulación de datos:

**Figura 23.***Tabulación - Pregunta 2.*

Tomado de: (Elaboración propia, 2022).

De la Figura 23, se puede identificar que la variable de “costos de construcción” corresponde al mayor número de votaciones con un valor de escala cinco (5) es decir “muy importante”, siendo de esta manera según los expertos, la variable de costos de construcción la más importante para la implementación de un STAP de bajo costo.

**Figura 24.***Pregunta 3 - Encuesta a Expertos.*

**Pregunta 3.** \*

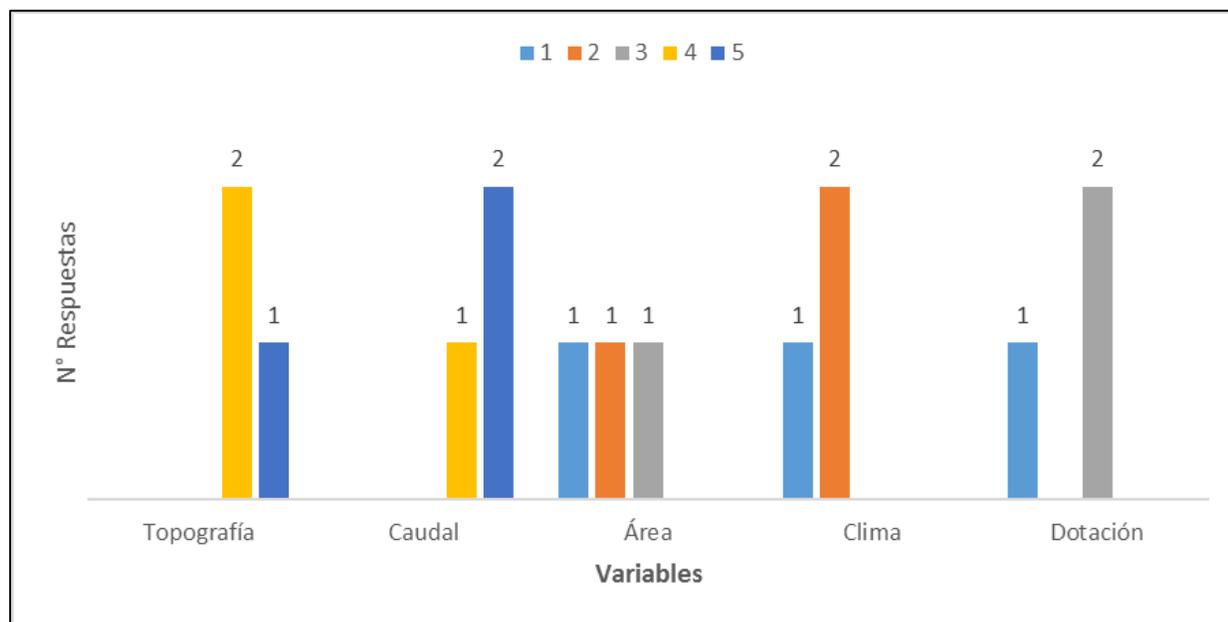
De acuerdo a su criterio clasifique de 1 a 5 (sin repetir el valor) ¿Cuál de las siguientes variables de Condiciones Técnicas es más importante en la ejecución de un Sistema de Tratamiento de Agua Potable a Bajo Costo?

Tenga en cuenta que en la escala 1 es menos importante y 5 más importante.

	1	2	3	4	5
Topografía	<input type="checkbox"/>				
Caudal	<input type="checkbox"/>				
Área	<input type="checkbox"/>				
Clima	<input type="checkbox"/>				
Dotación	<input type="checkbox"/>				

Tomado de: (Elaboración propia, 2022).

A partir de las respuestas obtenidas de la pregunta mostrada en la Figura 24, se obtuvo la siguiente tabulación de datos:

**Figura 25.***Tabulación - Pregunta 3*

Tomado de: (Elaboración propia, 2022).

De la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se puede identificar que la variable de “caudal” corresponde al mayor número de votaciones con un valor de escala cinco (5) es decir “muy importante”, siendo de esta manera según los expertos, la variable de condiciones técnicas más importante para la implementación de un STAP de bajo costo.

**Figura 26.***Pregunta 4 - Encuesta a Expertos.*

**Pregunta 4.** \*

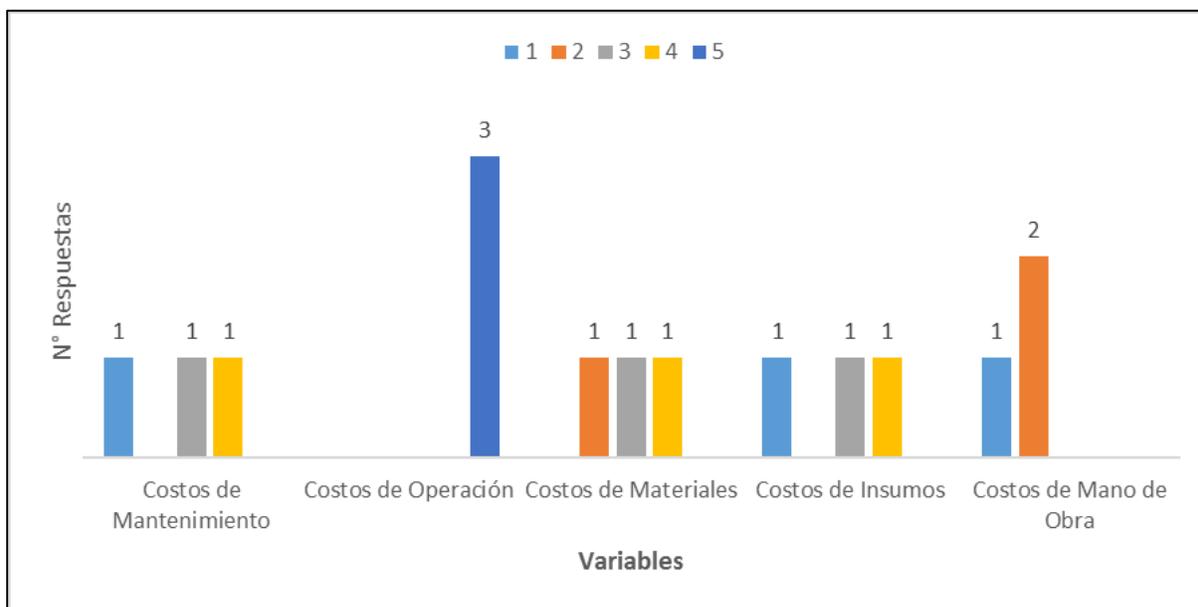
De acuerdo a su criterio clasifique de 1 a 5 (sin repetir el valor) ¿Cuál de las siguientes variables de Costos es más importante en la construcción de un Sistema de Tratamiento de Agua Potable a Bajo Costo?

Tenga en cuenta que en la escala 1 es menos importante y 5 más importante.

	1	2	3	4	5
Costos de Mantenimiento	<input type="checkbox"/>				
Costos de Operación	<input type="checkbox"/>				
Costos de Materiales	<input type="checkbox"/>				
Costos de Insumos	<input type="checkbox"/>				
Costos de Mano de Obra	<input type="checkbox"/>				

Tomado de: (Elaboración propia, 2022).

A partir de las respuestas obtenidas de la pregunta mostrada en la Figura 26, se obtuvo la siguiente tabulación de datos:

**Figura 27.***Tabulación - Pregunta 4.*

Tomado de: (Elaboración propia, 2022).

De la Figura 27, se puede identificar que la variable de “costos de operación” corresponde al mayor número de votaciones con un valor de escala cinco (5) es decir “muy importante”, siendo de esta manera según los expertos, la variable de costos más importante para la implementación de un STAP de bajo costo.

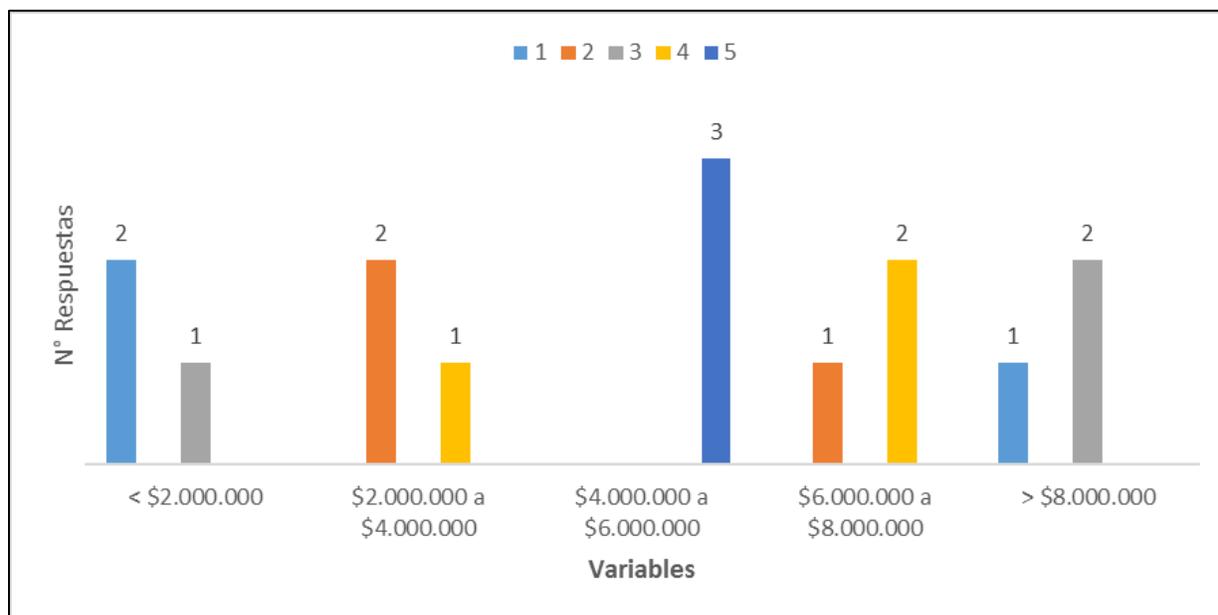
**Figura 28.***Pregunta 5 - Encuesta a Expertos.*

**Pregunta 5.**  
De acuerdo a su criterio clasifique de 1 a 5 (sin repetir el valor) ¿Cuál de los siguientes presupuestos considera adecuado para la operación de una Planta de Tratamiento de Bajo Costo, teniendo en cuenta que la fuente es de tipo superficial y cuenta con los siguientes parámetros físico-químicos DBO, DQO, Turbidez, pH, hierro, Sólidos suspendidos Totales y Color?  
Tenga en cuenta que en la escala 1 es menos adecuado y 5 más adecuado.

	1	2	3	4	5
< \$2.000.000	<input type="radio"/>				
\$2.000.000 a \$4.000.000	<input type="radio"/>				
\$4.000.000 a \$6.000.000	<input type="radio"/>				
\$6.000.000 a \$8.000.000	<input type="radio"/>				
> \$8.000.000	<input type="radio"/>				

Tomado de: (Elaboración propia, 2022).

A partir de las respuestas obtenidas de la pregunta mostrada en la Figura 28, se obtuvo la siguiente tabulación de datos:

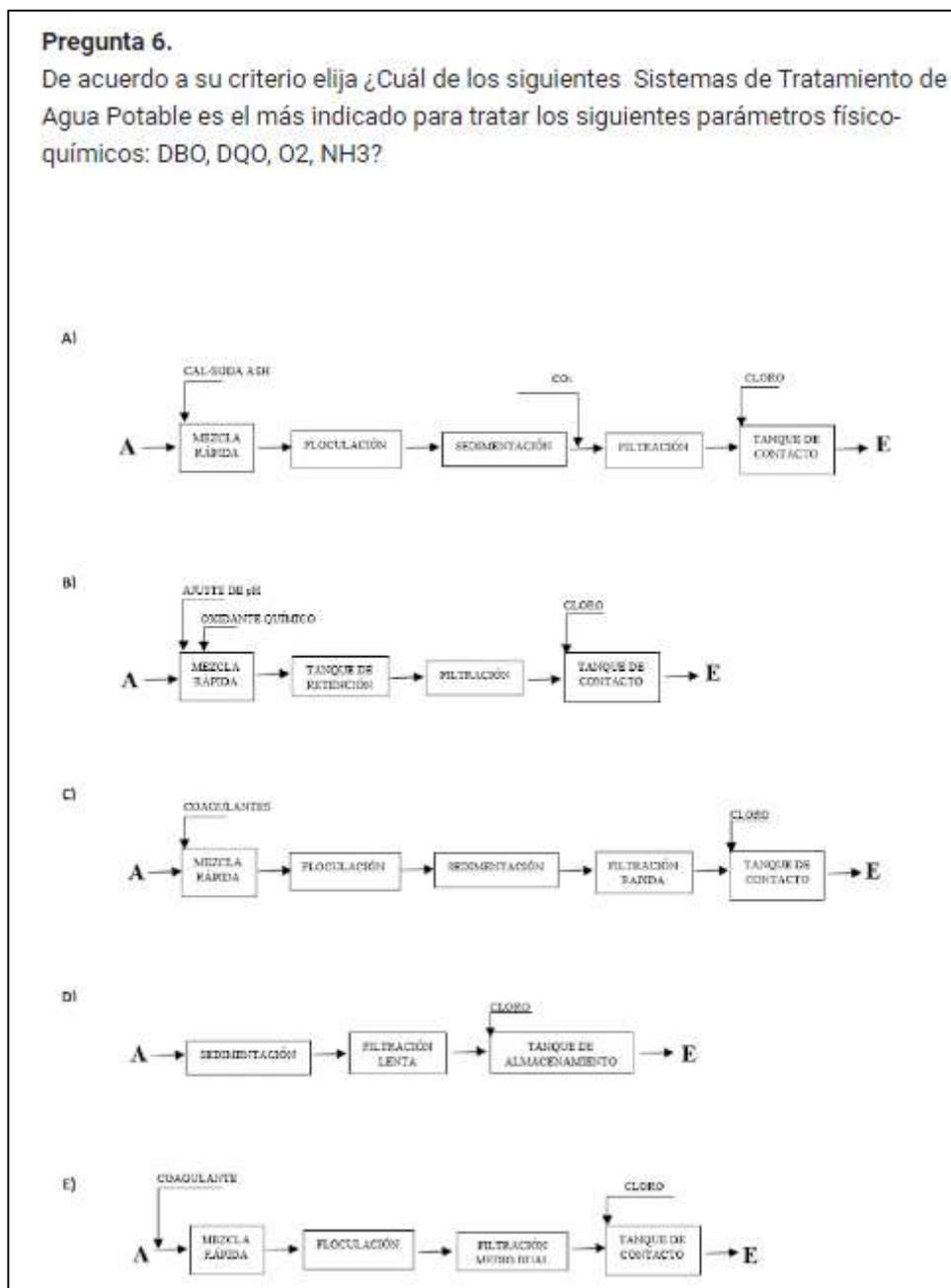
**Figura 29.***Tabulación - Pregunta 5.*

Tomado de: (Elaboración propia, 2022).

De la Figura 29, se puede identificar que la variable de “\$4.000.000 a \$6.000.000” corresponde al mayor número de votaciones con un valor de escala cinco (5) es decir “más adecuado”, siendo de esta manera según los expertos, la variable de presupuesto más adecuada para la implementación de un STAP de bajo costo.

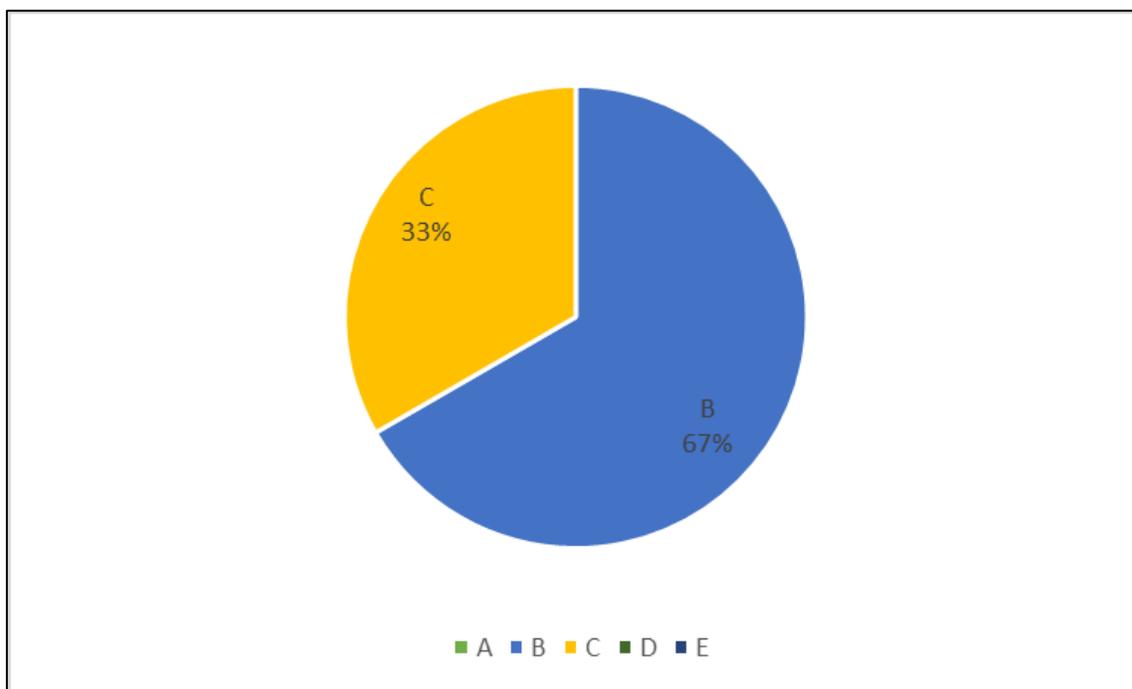
**Figura 30.**

*Pregunta 6 - Encuesta a Expertos.*



Tomado de: (Elaboración propia, 2022).

A partir de las respuestas obtenidas de la pregunta mostrada en la Figura 30, se obtuvo la siguiente tabulación de datos:

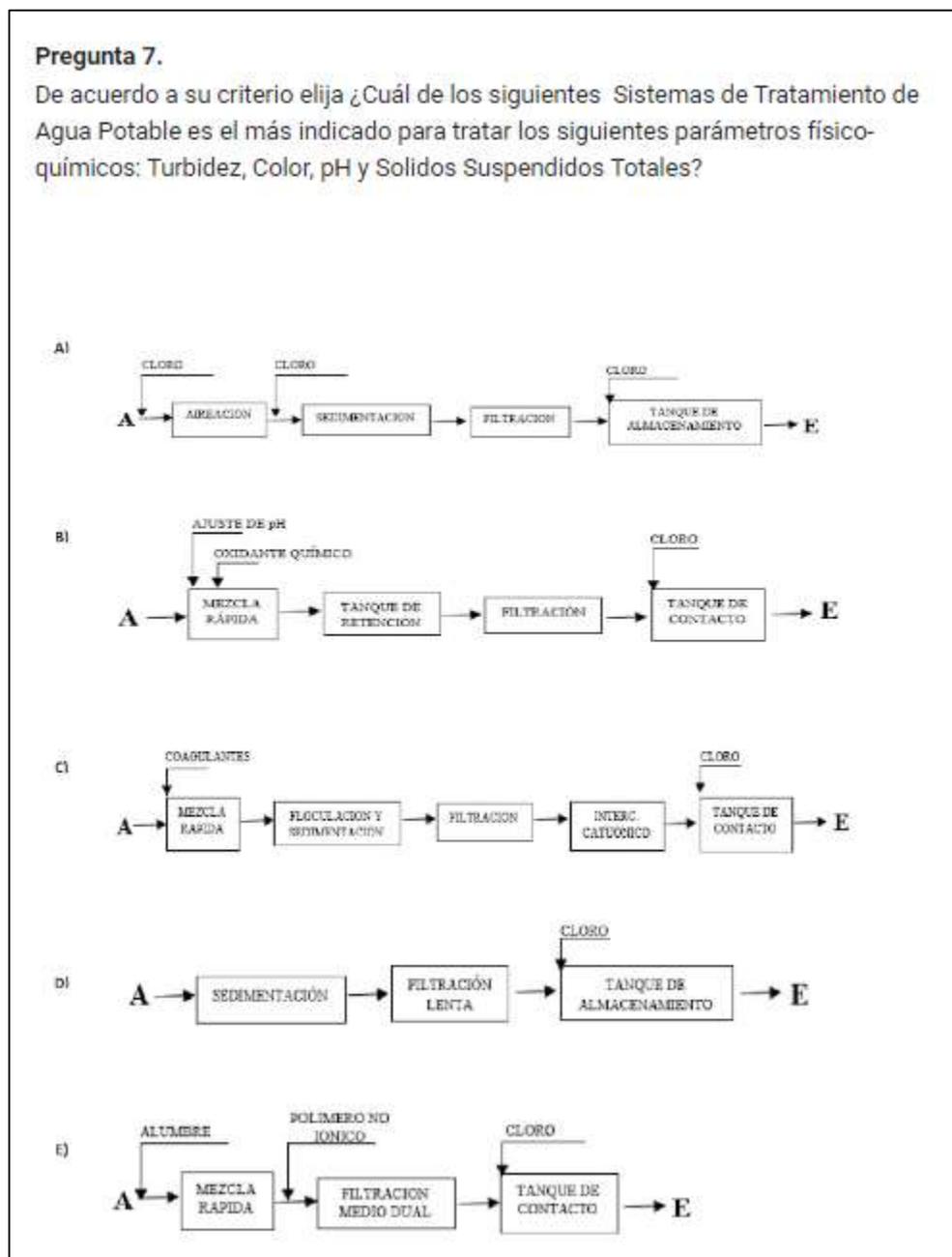
**Figura 31.***Tabulación - Pregunta 6.*

Tomado de: (Elaboración propia, 2022).

De la Figura 31, se puede identificar que el tipo de STAP de la opción “C” corresponde según los expertos, al más apropiado para tratar parámetros tales como DBO, DQO, O<sub>2</sub> Y NH<sub>3</sub>.

Figura 32.

Pregunta 7 - Encuesta a Expertos.

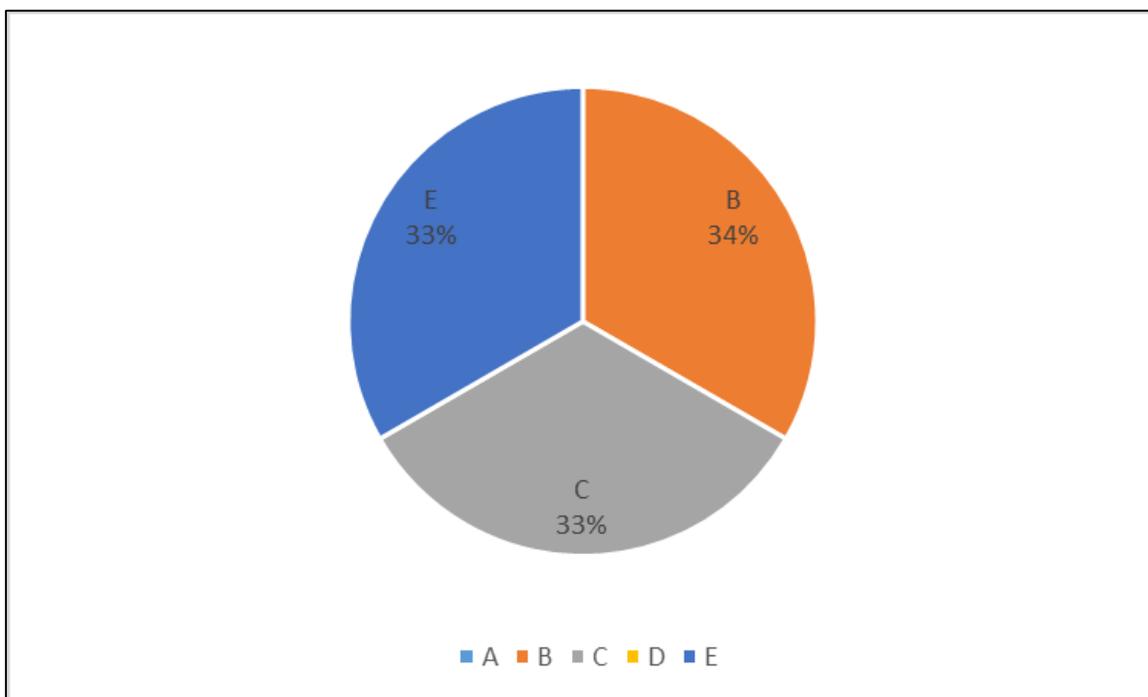


Tomado de: (Elaboración propia, 2022).

A partir de las respuestas obtenidas de la pregunta mostrada en la Figura 32, se obtuvo la siguiente tabulación de datos:

**Figura 33.**

*Tabulación - Pregunta 7.*



Tomado de: (Elaboración propia, 2022).

De la Figura 33, se puede identificar que no se obtuvo una opción preferida por los expertos, lo cual podría indicar la factibilidad y funcionalidad de los STAP de las opciones “B, C y E”, para tratar parámetros fisicoquímicos tales como: turbidez, color, pH y sólidos suspendidos totales.

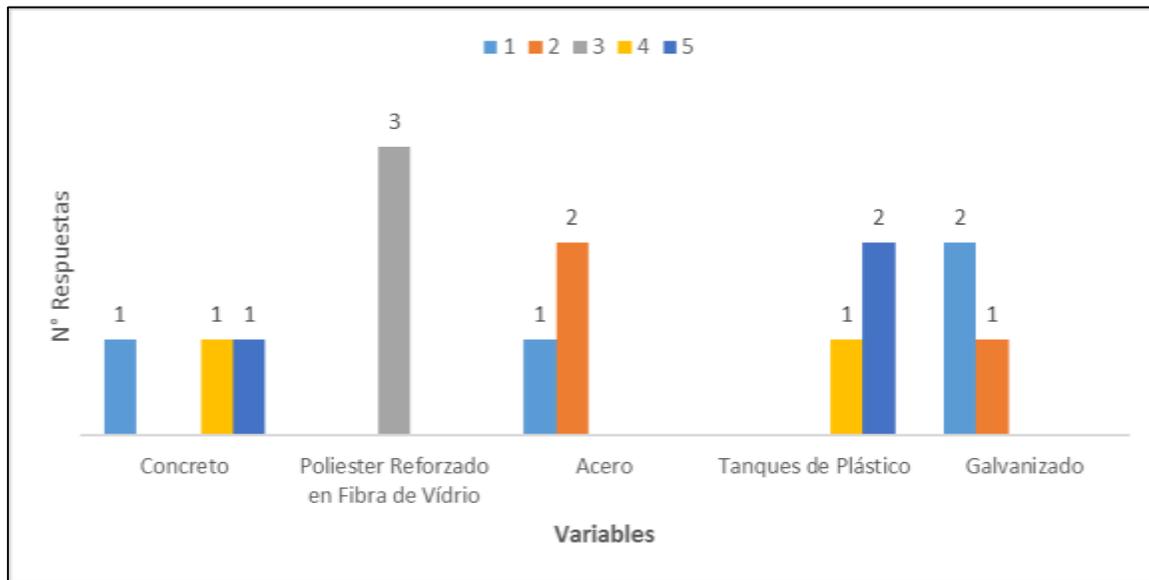
**Figura 34.***Pregunta 8 - Encuesta a Expertos.*

**Pregunta 8.**  
De acuerdo a su criterio clasifique de 1 a 5 (sin repetir el valor) ¿Cuál de los siguientes tipos de material considera adecuado para la operación de una Planta de Tratamiento de Bajo Costo?  
Tenga en cuenta que en la escala 1 es menos adecuado y 5 más adecuado.

	1	2	3	4	5
Concreto	<input type="radio"/>				
Poliester Reforzado en Fibra de Vidrio	<input type="radio"/>				
Acero	<input type="radio"/>				
Tanques de plástico	<input type="radio"/>				
Galvanizado	<input type="radio"/>				

Tomado de: (Elaboración propia, 2022).

A partir de las respuestas obtenidas de la pregunta mostrada en la Figura 34, se obtuvo la siguiente tabulación de datos:

**Figura 35.***Tabulación - Pregunta 8.*

Tomado de: (Elaboración propia, 2022).

De la Figura 35, se puede identificar que la variable de “Tanques de Plástico” corresponde al mayor número de votaciones con un valor de escala cinco (5) es decir “más adecuado”, siendo de esta manera según los expertos, la variable de tipo de material más adecuada para la implementación de un STAP de bajo costo.

**Figura 36.***Pregunta 9 - Encuesta a Expertos.*

**Pregunta 9.**  
De acuerdo a su criterio clasifique de 1 a 5 (sin repetir el valor) ¿Cuál de los siguientes precios esta dispuesto a pagar por metro cubico de agua tratada teniendo en cuenta el tipo de material elegido con mayor importancia en la pregunta anterior, para Planta de Tratamiento de Bajo Costo?  
Tenga en cuenta que en la escala 1 es menos adecuado y 5 más adecuado.

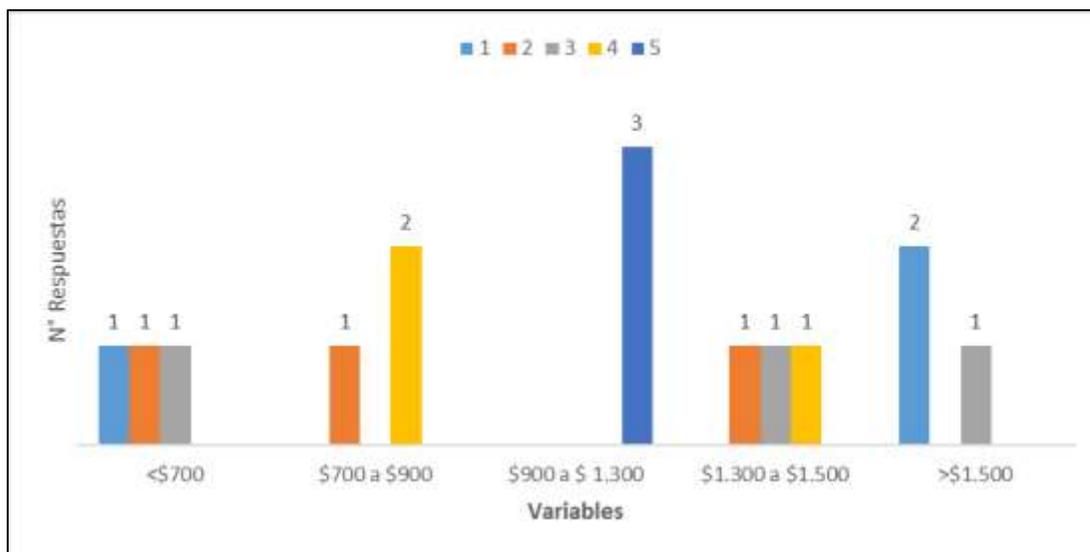
	1	2	3	4	5
<\$700	<input type="radio"/>				
\$700 a \$900	<input type="radio"/>				
\$900 a \$1.300	<input type="radio"/>				
\$1.300 a \$1.500	<input type="radio"/>				
>\$1.500	<input type="radio"/>				

Tomado de: (Elaboración propia, 2022).

A partir de las respuestas obtenidas de la pregunta mostrada en la Figura 36, se obtuvo la siguiente tabulación de datos:

**Figura 37.**

*Tabulación - Pregunta 9.*



Tomado de: (Elaboración propia, 2022).

De la Figura 37, se puede identificar que la variable de “\$900 a \$1.300” corresponde al mayor número de votaciones con un valor de escala cinco (5) es decir “más adecuado”, siendo de esta manera según los expertos, la variable de costo de m<sup>3</sup> de agua más adecuada para la implementación de un STAP de bajo costo.

#### **9.4.1. Construcción de Herramienta de Análisis Jerárquico (AHP)**

A partir de los resultados obtenidos en la encuesta realizada a expertos, se procede a realizar la construcción de la herramienta de proceso de análisis jerárquico, esta herramienta se realiza a partir de los cinco (5) componentes de evaluación para determinar el sistema de tratamiento de agua potable apropiado para la comunidad de la vereda Pinipay, San Cayetano.

**Figura 38.**

*Datos Encuesta Según Criterios y Escala de Evaluación.*

ENCUESTA A EXPERTOS					
VALOR ESCALA	5	4	3	2	1
COMPONENTES DE EVALUACION	MUY IMPORTANTE	IMPORTANTE	MODERADAMENTE IMPORTANTE	DE POCA IMPORTANCIA	SIN IMPORTANCIA
PARÁMETROS FISICO-QUÍMICOS	1		2		
CONDICIONES TECNICAS DE LA ZONA				2	1
COSTOS DE CONSTRUCCIÓN	2		1		
DISPONIBILIDAD DE PAGO		2			1
TIEMPO DE CONSTRUCCIÓN		1		1	1

Tomado de: (Elaboración propia, 2022).

En la Figura 38, se muestran los cinco componentes a evaluar y la escala de evaluación que fue asignada también, se muestra la cantidad de respuestas obtenida para cada parámetro según el nivel de importancia determinada por los expertos.

**Figura 39.**

*Tabulación Datos Encuesta Según Criterios y Escala de Evaluación.*

COMPONENTES DE EVALUACION	TABULACIÓN					TOTAL
PARÁMETROS FISICO-QUÍMICOS	5,00	0,00	6,00	0,00	0,00	11,00
CONDICIONES TECNICAS DE LA ZONA	0,00	0,00	0,00	4,00	1,00	5,00
COSTOS DE CONSTRUCCIÓN	10,00	0,00	3,00	0,00	0,00	13,00
DISPONIBILIDAD DE PAGO	0,00	8,00	0,00	0,00	1,00	9,00
TIEMPO DE CONSTRUCCIÓN	0,00	4,00	0,00	2,00	1,00	7,00

Tomado de: (Elaboración propia, 2022).

Como se muestra en la Figura 39, se realiza la tabulación de los datos obtenidos por la cantidad de respuestas obtenidas, en donde se obtiene el peso de importancia de cada uno de los componentes.

A continuación, basados en la escala fundamental de comparación de criterios de Saaty, ver Tabla 16, se realiza la matriz de comparación de criterios mostrada en la Figura 40.

**Tabla 16.***Escala de Comparación de Criterios.*

Número de Puntos	Descripción
<b>1</b>	Los criterios son igualmente importantes.
<b>3</b>	El primer criterio es un poco más importante que el otro.
<b>5</b>	El primer criterio es mucho más importante que el otro.
<b>7</b>	El primer criterio es significativamente más importante que el otro.
<b>8</b>	El primer criterio es absolutamente más importante que el otro.

Nota: Los valores 2, 4, 6, 8 se pueden utilizar para una resolución más precisa de la importancia de los pares de criterios.

Tomado de: (Kudláč et al., 2017).

**Figura 40.***Matriz de Evaluación de Criterios.*

MATRIZ DE COMPARACION DE CRITERIOS					
	PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS	CONDICIONES TÉCNICAS DE LA ZONA	COSTOS DE CONSTRUCCIÓN	DISPONIBILIDAD DE PAGO	TIEMPO DE CONSTRUCCIÓN
PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS	1	3	0,20	0,33	5
CONDICIONES TÉCNICAS DE LA ZONA	0,33	1	0,14	0,33	3
COSTOS DE CONSTRUCCIÓN	5	7	1	3	9
DISPONIBILIDAD DE PAGO	3	3	0,33	1	7
TIEMPO DE CONSTRUCCIÓN	0,20	0,33	0,11	0,14	1
<b>TOTAL</b>	<b>9,53</b>	<b>14,33</b>	<b>1,79</b>	<b>4,81</b>	<b>25,00</b>

Tomado de: (Elaboración propia, 2022).

Hecha la matriz, se continua a realizar la matriz normalizada, ver Figura 41, la cual nos permitirá definir cuál de los componentes es el más relevante para determinar el tipo de alternativa de STAP, que cumpla con satisfacer las necesidades de la población y posea como base los parámetros técnicos definidos a partir de las respuestas de los expertos.

**Figura 41.***Matriz Normalizada.*

	MATRIZ NORMALIZADA					PONDERACIÓN
<b>PARÁMETROS FISICO-QUÍMICOS</b>	0,10	0,21	0,11	0,07	0,20	 <b>0,14</b>
<b>CONDICIONES TECNICAS DE LA ZONA</b>	0,03	0,07	0,08	0,07	0,12	 <b>0,07</b>
<b>COSTOS DE CONSTRUCCIÓN</b>	0,52	0,49	0,56	0,62	0,36	 <b>0,51</b>
<b>DISPONIBILIDAD DE PAGO</b>	0,31	0,21	0,19	0,21	0,28	 <b>0,24</b>
<b>TIEMPO DE CONSTRUCCIÓN</b>	0,02	0,02	0,06	0,03	0,04	 <b>0,04</b>
<b>TOTAL</b>						

Tomado de: (Elaboración propia, 2022).

Para verificar que la información obtenida de la matriz normalizada sea veraz se realiza el cálculo de la relación de consistencia, el cual para la metodología AHP, no debe ser mayor al 0,1, tal como se muestra en la Figura 42, de ser así, se puede deducir que el proceso de análisis jerárquico fue realizado satisfactoriamente.

**Figura 42.***Relación de Consistencia.*

<b>MATRIZCOMPxP</b>			
0,72	<b>INDICE DE CONSISTENCIA</b>		
0,38	0,1		
2,77	<b>CONSISTENCIA ALEATORIA</b>		
1,30	1,2		
0,18	<b>RELACION DE CONSISTENCIA</b>		
<b>5,34</b>	<b>0,07</b>		

Tomado de: (Elaboración propia, 2022).

## 9.5. Diseño Conceptual de la Planta de Tratamiento de Agua Potable.

Basados en los resultados obtenidos con el modelo de Análisis Jerárquico (AHP) o herramienta multicriterio, se propone el diseño de una planta de tratamiento de agua potable PURIPAK-2, tipo semicompacta, la cual se caracteriza por ser una unidad pre-ensamblada de fábrica reduciendo tiempos de instalación, áreas requeridas en sitio, costos en obras y sencillas de operar.

### 9.5.1. Bases del Diseño

<b>Caudal de Diseño</b>	1.00 l/s
<b>Fuente Agua Cruda</b>	Superficial

La planta de Tratamiento de agua potable diseñada para la población de la Vereda Pinipay Municipio de San Cayetano Cundinamarca se compone del siguiente sistema:

- Cámara de aforo y mezcla rápida
- Floculador – Sedimentador de funcionamiento hidráulico
- Filtro retro lavado hidráulico manual.
- Sistema de dosificación de químicos tipo hidráulico
- Kits para medir cloro y pH
- Productos químicos para la puesta en marcha

### 9.5.2. Cámara de Aforo

Se diseñará una (1) cámara de medición con vertedero triangular y reglilla para aforar el caudal de entrada a la PTAP, además, a partir de esta se permita la mezcla y homogeneización del floculante y el alcalinizame, teniendo en cuenta las características mostradas en la Tabla 17:

**Tabla 17.**

*Características Cámara de Aforo Diseño PTAP.*

<b>Cantidad</b>	1 und.
-----------------	--------

<b>Largo</b>	0.80 metros
<b>Ancho</b>	0.40 metros
<b>Alto</b>	0.40 metros
<b>Vertedero</b>	Triangular 30°
<b>Medición</b>	Reglilla aforada
<b>Ø entrada</b>	63 mm
<b>Ø salida</b>	90 mm
<b>Material</b>	Colempaques

Tomado de: (Elaboración propia, 2022).

### 9.5.3. Floculador - Sedimentador

Para llevar a cabo el proceso de floculación y sedimentación se diseña una unidad compacta cilíndrica externa con sus correspondientes compartimientos. Dotado de un sistema de agitación de productos químicos hidráulico, floculador de flujo ascendente (tanque interno de forma tronco cónica) y sedimentador de alta tasa con flujo laminar; el sistema de drenaje de lodos del sedimentador será de forma manual a través de válvulas, teniendo en cuenta las características mostradas en la Tabla 18.

**Tabla 18.**

*Características Floculador - Sedimentador Diseño de PTAP.*

<b>Caudal</b>	1.00 l/s
<b>Cantidad</b>	1 Und.
<b>Diámetro</b>	1.30 metros
<b>Altura total</b>	2.40 metros
<b>Material</b>	Colempaques

#### COMPARTIMIENTO DE FLOCULADOR

<b>Alto</b>	2.40 metros
<b>Ø entrada</b>	90 mm
<b>Ø salida</b>	Salida Laminar rebose
<b>Tipo de agitación</b>	Hidráulica con vórtice
<b>Tipo de Flujo</b>	Ascendente
<b>Volumen</b>	1.60 m <sup>3</sup>
<b>Tiempo de retención</b>	27 min.

#### COMPARTIMIENTO DE SEDIMENTADOR

<b>Diámetro externo</b>	1.30 metros
-------------------------	-------------

<b>Área interno</b>	0.60 m <sup>2</sup>
<b>Alto</b>	2.30 metros
<b>Ø entrada</b>	Rebose Laminar
<b>Ø salida</b>	90 mm
<b>Tipo de sedimentación</b>	Alta tasa
<b>Tipo de flujo</b>	Laminar
<b>Volumen</b>	1.44 m <sup>3</sup>
<b>Tiempo de retención</b>	24 min.
<b>Carga Superficial</b>	144 m <sup>3</sup> /día/m <sup>2</sup>

Tomado de: (Elaboración propia, 2022)

#### 9.5.4. Filtro

Luego del proceso de floculación y sedimentación en el agua se procede al pulimiento del agua por medio de un filtro con lechos de grava, arena y antracita; con lavado manual de las características mostradas en la Tabla 19.

**Tabla 19.**

*Características filtración diseño de PTAP.*

<b>Diámetro</b>	1 metro
<b>Altura total</b>	3.70 metros
<b>Altura filtro</b>	3 metros
<b>Ø entrada</b>	90 mm
<b>Ø salida</b>	90 mm
<b>Altura lecho filtrante</b>	0.80 metros
<b>Medio filtrante</b>	Grava, arena y antracita
<b>Tipo de filtración</b>	Medía
<b>Carrera de filtración</b>	122 m <sup>3</sup> /día/m <sup>2</sup>
<b>Tipo de flujo</b>	Ascendente
<b>Tipo de lavado</b>	Hidráulico manual
<b>Volumen agua de lavado</b>	1.44 m <sup>3</sup>
<b>Material</b>	Colempaques

Tomado de: (Elaboración propia, 2022)

#### 9.5.5. Sistema de Dosificación de Químicos a Gravedad

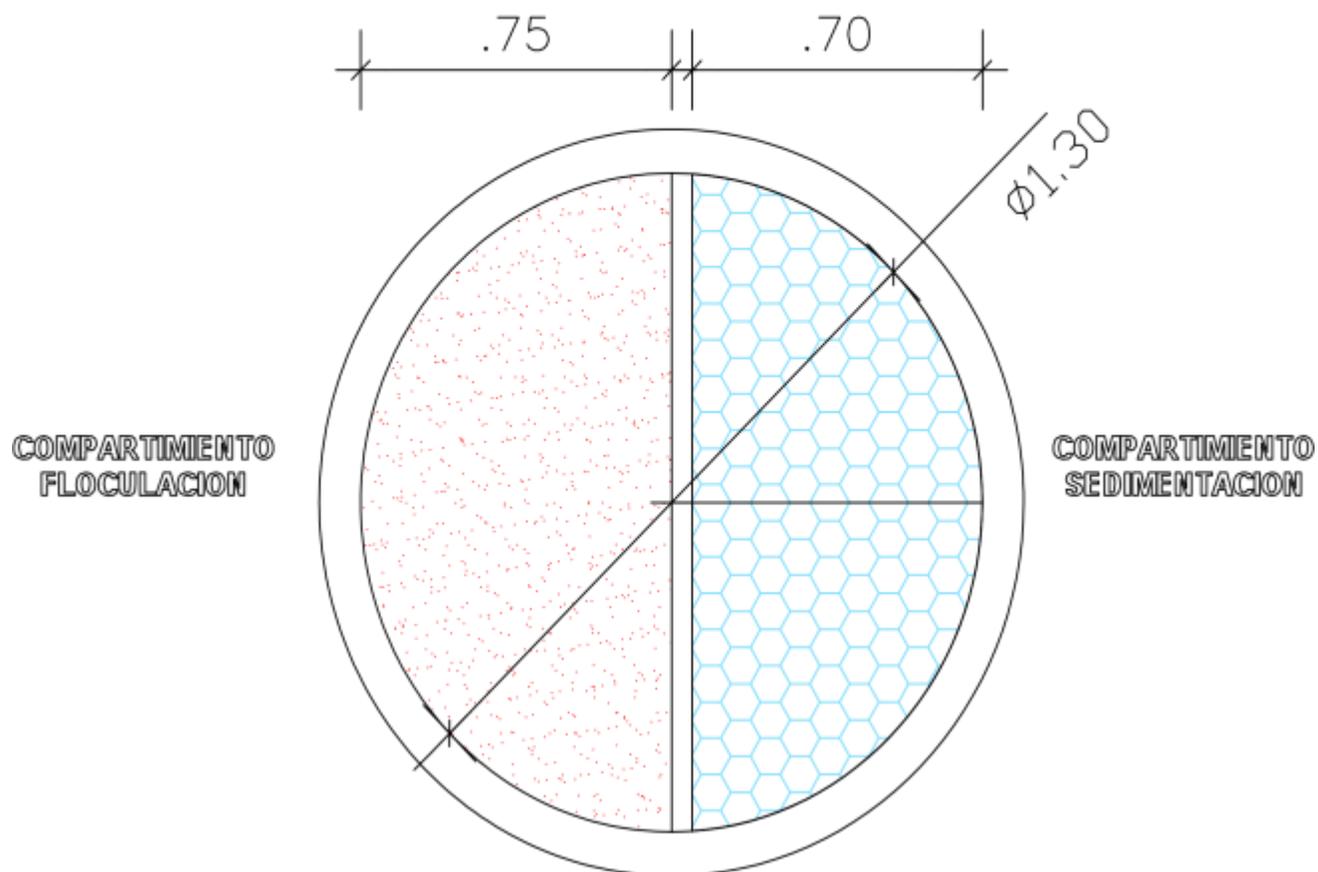
Teniendo en cuenta que el lugar destinado para la instalación de la PTAP no cuenta con un punto eléctrico se opta por el siguiente sistema a gravedad, ver Tabla 20.

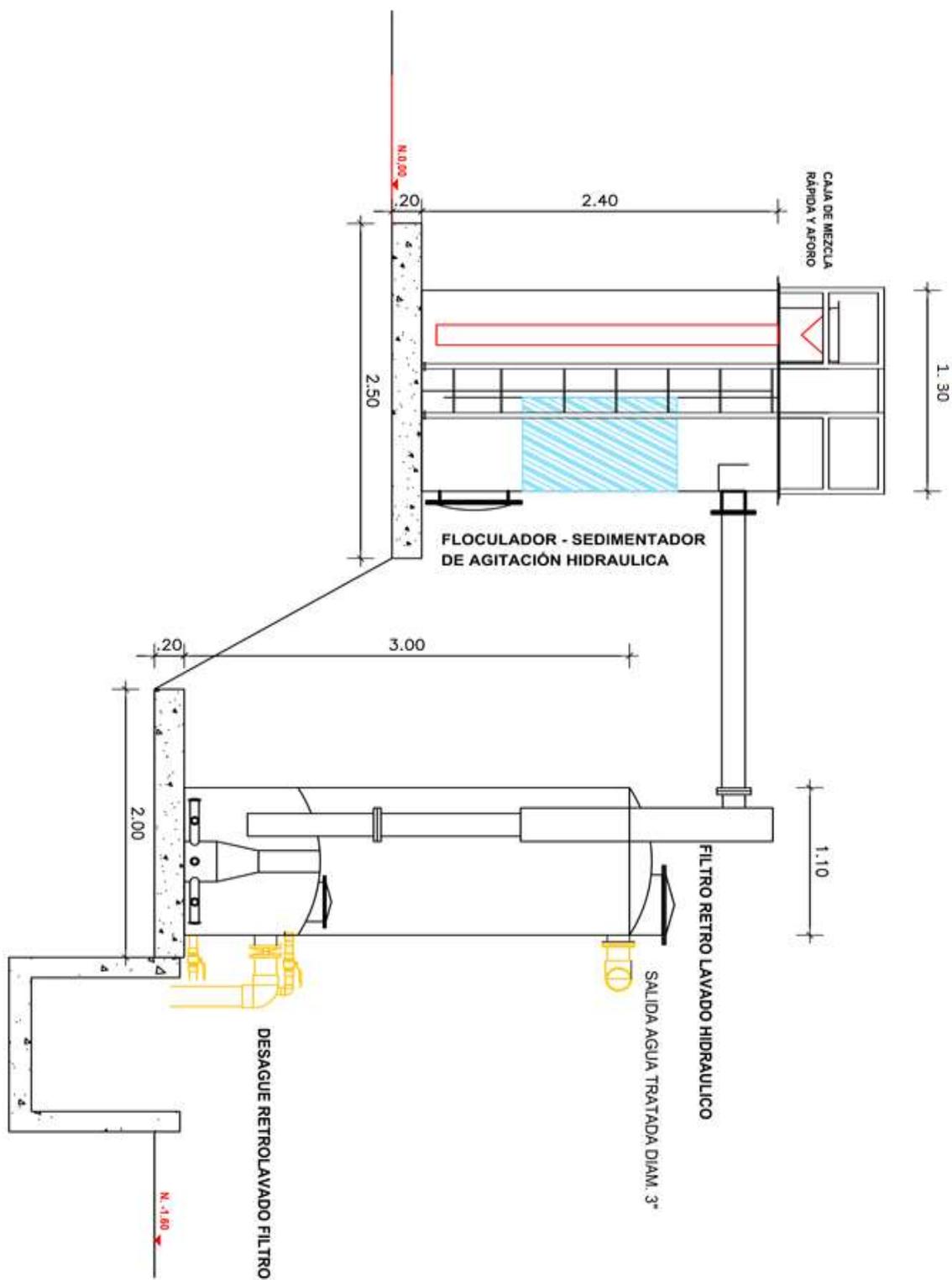
**Tabla 20.***Características Sistema Dosificador a Gravedad Diseño de PTAP.*

<b>Unidades</b>	3 (para coagulante, alcalinizante y desinfectante)
<b>Material</b>	Poliéster reforzado con fibra de vidrio
<b>Volumen</b>	37.5 litros
<b>Geometría</b>	Rectangular
<b>Ancho</b>	0.25 metros
<b>Largo</b>	0.50 metros
<b>Altura</b>	0.30 metros
<b>Entrada</b>	Manguera plástica de 3/8"
<b>Salida</b>	Manguera plástica de 3/8"
<b>Tapa</b>	Plana y removible (sin atornillar)
<b>Tanques dilución</b>	3 tanques plásticos 250 litros

Tomado de: (Elaboración propia, 2022).

VISTA SUPERIOR INTERNA  
TANQUE  
FLOCULADOR - SEDIMENTADOR





## 10. Conclusiones

A partir de la información obtenida en la búsqueda de Sistemas de Tratamiento de Agua Potable implementados en diversos lugares del mundo, se pudo contextualizar los factores que juegan un papel importante en el tratamiento de agua por medio de metodologías de bajo costo en zonas rurales, en donde se destacó la desinfección solar, PTAP compactas, filtros a base de elementos naturales, entre otros.

De acuerdo a la información obtenida en la realización del diagnóstico de la zona, se logró determinar que las condiciones del terreno de la Vereda Pinipay, son favorables para el diseño y la construcción de un Sistema de Tratamiento de Agua Potable que permita mejorar las condiciones de vida de la población de dicha vereda. Además, a partir de estos resultados, se pudo evaluar las condiciones del sistema de acueducto actual y por consiguiente obtener el caudal medio diario que demanda la vereda Pinipay.

Por medio de los análisis fisicoquímicos realizados en el agua de consumo de la Vereda Pinipay, se logró identificar la alta presencia de parámetros tales como: E-Coli, Colifomes y turbidez, los cuales sobrepasan los niveles permisibles que se rigen en la Resolución 2115 de 2017 y un alto puntaje de riesgo, catalogando el agua de la vereda en nivel inviable sanitariamente, según el IRCA.

El uso de la metodología AHP, nos permitió identificar, con ayuda de las respuestas obtenidas en la encuesta realizada a expertos, que el parámetro más relevante para realizar la implementación de un STAP de bajo costo son los costos de construcción, por lo cual se definió que la alternativa que mejor se acopla a las necesidades de la población de la vereda Pinipay, deberá ser elaborada con materiales económicos pero funcionales, además de que se deberá contar con disponibilidad de pago, para poder cubrir los costos de operación y poder implementar un

respectivo proceso efectivo para la desinfección y tratamiento del agua que consume actualmente la población en cuestión.

Teniendo como base principal los resultados de la aplicación de la herramienta multicriterio AHP, se logró determinar finalmente un sistema de tratamiento de agua potable de tipo semi-compacta diseñada a partir de un caudal de 1 L/s teniendo en cuenta la demanda adicional requerida para el correcto funcionamiento de cada uno de los procesos de tratamiento, además de determinar un diseño que se ajustara de manera óptima a las necesidades primordiales de la comunidad de la Vereda Pinipay teniendo como prioridad que esta sea asequible para dicha población.

## **11. Recomendaciones**

Para futuras investigaciones sobre Sistemas de Tratamiento de Agua Potable, se recomienda realizar un análisis de precios unitarios (APU) detallado, el cual, permita realizar una proyección, en cuanto a los costos de materiales más económicos y eficientes para el proceso de construcción de una Planta de tratamiento de bajo costo.

## 12. Referencias bibliográficas

- Afkhami, a., marotta, m., dixon, d., ternal, n. G., montoya-jaramillo, l. J., hincapie, m., galeano, l., fernandez-ibanez, p., & dunlop, p. S. M. (2021). Assessment of low-cost cartridge filters for implementation in household drinking water treatment systems. *Journal of water process engineering*, 39, 101710. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101710>
- Chidya, r. C. G., munthali, a. K., chitedze, i., & chitawo, m. L. (2021). Design and efficacy of solar disinfection system for improved rural household water treatment. *Journal of sustainable development of energy, water and environment systems*, 9(4). <https://doi.org/10.13044/j.sdewes.d8.0369>
- Fekete, b. M. (2013). State of the world's water resources. *Climate vulnerability: understanding and addressing threats to essential resources*, 5, 11–23. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-384703-4.00506-2>
- García-ávila, f., avilés-añazco, a., sánchez-cordero, e., valdiviezo-gonzáles, l., & ordoñez, m. D. T. (2021). The challenge of improving the efficiency of drinking water treatment systems in rural areas facing changes in the raw water quality. *South african journal of chemical engineering*, 37, 141–149. <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2021.05.010>
- Gobernacion de cundinamarca, c. (2020). *Plan de ordenamiento territorial del municipio de san cayetano documento resumen*.
- Juvakoski, a., singhal, g., manzano, m. A., moriñigo, m. Á., vahala, r., & levchuk, i. (2022). Solar disinfection – an appropriate water treatment method to inactivate faecal bacteria in cold climates. *Science of the total environment*, 827, 154086. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154086>
- Prakash khedun, c., sanchez flores, r., rughoonundun, h., & kaiser, r. A. (2014). World water

- supply and use: challenges for the future. *Encyclopedia of agriculture and food systems*, 450–465. <https://doi.org/10.1016/b978-0-444-52512-3.00083-8>
- Romero, j. (2006). *Purificación del agua* (2nd ed.). Escuela colombiana de ingeniería.
- Sierra, c. (2011). *Calidad del agua evaluación y diagnóstico*. Ediciones de la u.
- Abatneh, Y., Sahu, O., & Yimer, S. (2014). Purification of drinking water by low cost method in Ethiopia. *Applied Water Science* 2014 4:4, 4(4), 357-362. <https://doi.org/10.1007/S13201-013-0151-9>
- Chang, H., Zhu, Y., Yu, H., Qu, F., Zhou, Z., Li, X., Yang, Y., Tang, X., & Liang, H. (2022). Long-term operation of ultrafiltration membrane in full-scale drinking water treatment plants in China: Characteristics of membrane performance. *Desalination*, 543, 116122. <https://doi.org/10.1016/J.DESAL.2022.116122>
- Dey, S., Kotaru, N. S. A., Veerendra, G. T. N., & Sambangi, A. (2022). The removal of iron from synthetic water by the applications of plants leaf biosorbents. *Cleaner Engineering and Technology*, 9, 100530. <https://doi.org/10.1016/J.CLET.2022.100530>
- Dronjak, L., Exposito, N., Rovira, J., Florencio, K., Emiliano, P., Corzo, B., Schuhmacher, M., Valero, F., & Sierra, J. (2022). Screening of microplastics in water and sludge lines of a drinking water treatment plant in Catalonia, Spain. *Water Research*, 225, 119185. <https://doi.org/10.1016/J.WATRES.2022.119185>
- Ebsa, D. G., & Dibaba, W. T. (2022). Assessment of drinking water treatment and disinfection by-products. *South African Journal of Chemical Engineering*, 41, 85-92. <https://doi.org/10.1016/J.SAJCE.2022.05.003>
- Faisal, G. H., Jaeel, A. J., & Al-Gasham, T. S. (2020). BOD and COD reduction using porous concrete pavements. *Case Studies in Construction Materials*, 13, e00396.

<https://doi.org/10.1016/J.CSCM.2020.E00396>

Guo, H., Li, X., Yang, W., Yao, Z., Mei, Y., Peng, L. E., Yang, Z., Shao, S., & Tang, C. Y. (2021).

Nanofiltration for drinking water treatment: a review. *Frontiers of Chemical Science and Engineering 2021 16:5, 16(5)*, 681-698. <https://doi.org/10.1007/S11705-021-2103-5>

Gupta, N., Pandey, P., & Hussain, J. (2017). Effect of physicochemical and biological parameters

on the quality of river water of Narmada, Madhya Pradesh, India. *Water Science, 31(1)*, 11-23. <https://doi.org/10.1016/J.WSJ.2017.03.002>

Gwenzi, W., Chaukura, N., Noubactep, C., & Mukome, F. N. D. (2017). Biochar-based water

treatment systems as a potential low-cost and sustainable technology for clean water provision. *Journal of Environmental Management, 197*, 732-749. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2017.03.087>

Hailu, Y., Tilahun, E., Brhane, A., Resky, H., & Sahu, O. (2019). Ion exchanges process for

calcium, magnesium and total hardness from ground water with natural zeolite. *Groundwater for Sustainable Development, 8*, 457-467. <https://doi.org/10.1016/J.GSD.2019.01.009>

Hernández-Mendoza, H., Piña Leyte-Vidal, J. J., Romero-Guzmán, E. T., Rios-Lugo, M. J., &

Medellín-Castillo, N. A. (2022). Relationship of thorium, uranium isotopes and uranium isotopic ratios with physicochemical parameters in cenote water from the Yucatán Peninsula. *Applied Radiation and Isotopes, 190*, 110470. <https://doi.org/10.1016/J.APRADISO.2022.110470>

Hu, J., Chu, W., Sui, M., Xu, B., Gao, N., & Ding, S. (2018). Comparison of drinking water

treatment processes combinations for the minimization of subsequent disinfection by-products formation during chlorination and chloramination. *Chemical Engineering Journal, 335*, 352-361. <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2017.10.144>

- Huang, J., Huang, G., An, C., He, Y., Yao, Y., Zhang, P., & Shen, J. (2018). Performance of ceramic disk filter coated with nano ZnO for removing *Escherichia coli* from water in small rural and remote communities of developing regions. *Environmental Pollution*, 238, 52-62. <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2018.03.008>
- Hussain, T. S., & Al-Fatlawi, A. H. (2020). Remove Chemical Contaminants from Potable Water by Household Water Treatment System. *Civil Engineering Journal*, 6(8), 1534-1546. <https://doi.org/10.28991/CEJ-2020-03091565>
- Ibrahim, N., Edri, L., Bellizzi, A., Kozlovsky, C., Wiley, M., Jacobitz, F. G., Fuller, M. G., Macdonald, K., Bolender, J. P., Ndaruhutse, G. R., & Lester, Y. (2022). Plant-based point-of-use water filtration: A simple solution for potable water in developing countries. *Groundwater for Sustainable Development*, 18. <https://doi.org/10.1016/J.GSD.2022.100802>
- IDEAM. (2019). Estudio Nacional del Agua 2018 (ENA 2018). En *Marzo de 2019*. [http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023858/ENA\\_2018.pdf](http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023858/ENA_2018.pdf)
- Kudláč, Š., Štefancová, V., & Majerčák, J. (2017). Using the Saaty Method and the FMEA Method for Evaluation of Constraints in Logistics Chain. *Procedia Engineering*, 187, 749-755. <https://doi.org/10.1016/J.PROENG.2017.04.433>
- Mahmoud, M. E., Shoaib, S. M. A., Salam, M. A., & Elsayed, S. M. (2022). Efficient and fast removal of total and fecal coliform, BOD, COD and ammonia from raw water by microwave heating technique. *Groundwater for Sustainable Development*, 19, 100847. <https://doi.org/10.1016/J.GSD.2022.100847>
- Makhado, U. G., Foka, F. E. T., Tchatchouang, C. D. K., Ateba, C. N., & Manganyi, M. C. (2022). Detection of virulence gene of Shiga toxin-producing *Escherichia coli* (STEC) strains from animals with diarrhoea and water samples in the North-West Province, South Africa. *Gene*

*Reports*, 27, 101617. <https://doi.org/10.1016/J.GENREP.2022.101617>

Mangala Praveena, S., Ahmad, •, & Aris, Z. (2015). Application of Low-Cost Materials Coated with Silver Nanoparticle as Water Filter in Escherichia coli Removal. *Water Quality, Exposure and Health* 2015 7:4, 7(4), 617-625. <https://doi.org/10.1007/S12403-015-0167-5>

Marobhe, N. J., Sabai, S. M., Jotham, N., Shadrack, M., & Sabai, M. (2021). *Treatment of drinking water for rural households using Moringa seed and solar disinfection*. <https://doi.org/10.2166/washdev.2021.253>

Martín-Sómer, M., Moreno-SanSegundo, J., Álvarez-Fernández, C., van Grieken, R., & Marugán, J. (2021). High-performance low-cost solar collectors for water treatment fabricated with recycled materials, open-source hardware and 3d-printing technologies. *Science of The Total Environment*, 784, 147119. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2021.147119>

Oh, S., Cho, Y., & Yun, R. (2014). Raw-water source heat pump for a vertical water treatment building. *Energy and Buildings*, 68(PARTA), 321-328. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2013.09.011>

Picetti, R., Deeney, M., Pastorino, S., Miller, M. R., Shah, A., Leon, D. A., Dangour, A. D., & Green, R. (2022). Nitrate and nitrite contamination in drinking water and cancer risk: A systematic review with meta-analysis. *Environmental Research*, 210, 112988. <https://doi.org/10.1016/J.ENVRES.2022.112988>

Pichel, N., Vivar, M., Fuentes, M., & Eugenio-Cruz, K. (2020). Study of a hybrid photovoltaic-photochemical technology for meeting the needs of safe drinking water and electricity in developing countries: First field trial in rural Mexico. *Journal of Water Process Engineering*, 33, 101056. <https://doi.org/10.1016/J.JWPE.2019.101056>

Porley, V., Chatzisyneon, E., Meikap, B. C., Ghosal, S., & Robertson, N. (2020). Field testing of

- low-cost titania-based photocatalysts for enhanced solar disinfection (SODIS) in rural India. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 6(3), 809-816. <https://doi.org/10.1039/C9EW01023H>
- Putra, B. T. W., Rocelline, L. A., & Syahputra, W. N. H. (2022). Embedded system in handheld water turbidity meter for smallholders. *Microprocessors and Microsystems*, 93, 104603. <https://doi.org/10.1016/J.MICPRO.2022.104603>
- Ravindra, K., Sarwa, A., Nidhi Bhatnagar, ., Kaur, R., & Mor, S. (2020). *Public perception about community reverse osmosis-treated water, its acceptability, and barriers in choice of safe drinking water*. 22, 5819-5831. <https://doi.org/10.1007/s10668-019-00452-y>
- Shamsollahi, H. R., Ghoochani, M., Sadeghi, K., Jaafari, J., Masinaei, M., Sillanpää, M., Yousefi, M., Mirtalb, S. T., & Alimohammadi, M. (2019). Evaluation of the physical and chemical characteristics of water on the removal efficiency of rotavirus in drinking water treatment plants and change in induced health risk. *Process Safety and Environmental Protection*, 130, 6-13. <https://doi.org/10.1016/J.PSEP.2019.07.014>
- Shi, Z., Yu, S., Nan, J., & Xiao, Q. (2022). The effect of multivalent anions on removal of Titanium dioxide nanoparticles from drinking water sources by coagulation-sedimentation processes: Efficacy and mechanisms. *Separation and Purification Technology*, 298, 121667. <https://doi.org/10.1016/J.SEPPUR.2022.121667>
- Stefán, D., Erdélyi, N., Izsák, B., Zárny, G., & Vargha, M. (2019). Formation of chlorination by-products in drinking water treatment plants using breakpoint chlorination. *Microchemical Journal*, 149, 104008. <https://doi.org/10.1016/J.MICROC.2019.104008>
- Suquet, J., Godo-Pla, L., Valentí, M., Ferràndez, L., Verdaguer, M., Poch, M., Martín, M. J., & Monclús, H. (2021). Assessing the effect of catchment characteristics to enhanced

- coagulation in drinking water treatment: RSM models and sensitivity analysis. *Science of The Total Environment*, 799, 149398. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2021.149398>
- Unidas, N. (2030). *La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe*. [www.cepal.org/es/suscripciones](http://www.cepal.org/es/suscripciones)
- Wang, D., Yuan, H., Chen, Y., Ni, Y., Huang, L., Mondal, A. K., Lin, S., Huang, F., & Zhang, H. (2020). A cellulose-based nanofiltration membrane with a stable three-layer structure for the treatment of drinking water. *Cellulose*, 27(14), 8237-8253. <https://doi.org/10.1007/S10570-020-03325-0/FIGURES/11>
- Wu, S., Lu, C., Ma, B., Liu, R., Hu, C., Ulbricht, M., & Qu, J. (2022). Long-term direct ultrafiltration without chemical cleaning for purification of micro-polluted water in rural regions: Feasibility and application prospects. *Chemical Engineering Journal*, 443, 136531. <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2022.136531>
- Xu, N., Wang, W., Zhu, Z., Hu, C., & Liu, B. (2022). Recent developments in photocatalytic water treatment technology with MXene material: A review. *Chemical Engineering Journal Advances*, 12, 100418. <https://doi.org/10.1016/J.CEJA.2022.100418>
- Zhang, Y., Deng, J., Qin, B., Zhu, G., Zhang, Y., Jeppesen, E., & Tong, Y. (2022). Importance and vulnerability of lakes and reservoirs supporting drinking water in China. *Fundamental Research*. <https://doi.org/10.1016/J.FMRE.2022.01.035>.

## Anexos



La Universidad Católica de Manizales en representación  
del comité organizador

CERTIFICA QUE:

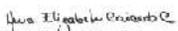
**GÓMEZ, SIDNEY**  
1192713755

Participó como Ponente de la Ponencia:  
*Método de Selección de Sistemas de potabilización de bajo costo en zonas rurales*

En el  
*2<sup>do</sup> Encuentro internacional de Investigación en Emprendimiento Rural*

Realizado a través de la plataforma Zoom,  
los días 14 y 15 de septiembre de 2022

Udado en Manizales (Columbian) el 31 de octubre de 2022

  
Mgta. Hna. María Elizabeth Calcedo Calcedo O.P.  
Rectora  
Universidad Católica de Manizales

  
Mgta. Catalina Triana Navas  
Secretaria General  
Universidad Católica de Manizales



La Universidad Católica de Manizales en representación  
del comité organizador

CERTIFICA QUE:

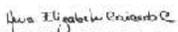
**GÓMEZ, SIDNEY**  
1192713755

Participó como Ponente de la Ponencia:  
*Método de Selección de Sistemas de potabilización de bajo costo en zonas rurales*

En el  
*2<sup>do</sup> Encuentro internacional de Investigación en Emprendimiento Rural*

Realizado a través de la plataforma Zoom,  
los días 14 y 15 de septiembre de 2022

Udado en Manizales (Columbian) el 31 de octubre de 2022

  
Mgta. Hna. María Elizabeth Calcedo Calcedo O.P.  
Rectora  
Universidad Católica de Manizales

  
Mgta. Catalina Triana Navas  
Secretaria General  
Universidad Católica de Manizales

