

**Análisis multicriterio para el diseño de la planta de tratamiento de agua potable para la Vereda  
el Chocho Corregimiento de Santa Inés, Municipio de Yumbo, Valle del Cauca.**

Diego Fernando Bravo Bustos

Verónica Martínez Bejarano

Universidad Nacional, Abierta y a Distancia – UNAD

Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente – ECAPMA

Programa de Ingeniería Ambiental

Palmira, Colombia

2020

**Análisis multicriterio para el diseño de la planta de tratamiento de agua potable para la Vereda  
el Chocho Corregimiento de Santa Inés, Municipio de Yumbo, Valle del Cauca.**

Diego Fernando Bravo Bustos

Verónica Martínez Bejarano

Proyecto aplicado presentado como opción de grado para optar por el título de  
Ingeniería Ambiental

Director del Proyecto:

Juan Guillermo Popayán-Hernández Ph.D

Universidad Nacional, Abierta y a Distancia – UNAD

Escuela De Ciencias Agrícolas y del Medio Ambiente –ECAPMA

Palmira, Colombia

2020

Nota de aceptación:

---

---

---

---

---

Firma del director:

---

Firma del presidente del jurado:

---

Firma del jurado:

---

Firma del jurado:

Santiago de Cali, 2020

## **Dedicatoria**

En especial quiero dedicar este logro primero que todo a Dios, a la Virgen, a mis Padres y Hermanas que me brindaron un grano de arena tanto económico y de confianza para poder alcanzar esta gran meta como profesional.

En esta etapa tan importante quiero brindar el gran esfuerzo dedicado a este trabajo realizado para cumplir mi gran sueño como Ingeniero Ambiental y dar gracias a las personas que nunca dudaron de mis capacidades, que me apoyaron en todos los momentos brindándome sus consejos, experiencia y valores que me motivaron a ser una persona de bien y dar el mejor resultado de superación.

***Diego Fernando Bravo Bustos.***

Primero a Dios por darme la vida y poder compartir en familia un logro más, a mis padres por su apoyo, amor, comprensión y confianza que me brindaron para poder formarme como persona a mi hija y amigos por hacer que mi vida sea distinta.

A la universidad y catedráticos por depositar su confianza y dedicación para ser una gran profesional.

***Verónica Martínez Bejarano.***

## **Agradecimientos**

Primero que todo agradecerle a Dios, a mi familia y las personas que me brindaron ese gran apoyo y depositaron en mi la confianza para salir adelante y lograr ser un profesional.

Agradecer a la Universidad Nacional, Abierta y a Distancia – UNAD Escuela De Ciencias Agrícolas y del Medio Ambiente –ECAPMA Palmira, Colombia y al director de tesis Msc Juan Guillermo Popayán Hernández, por el apoyo, confianza, conocimiento y consejos que fueron de gran importancia para el desarrollo de la tesis y el crecimiento profesional.

Dar las gracias a todos los docentes que me dieron la oportunidad de brindar todos sus conocimientos profesionales para obtener una educación de calidad y así poder aplicarlo en mi vida laboral.

***Diego Fernando Bravo Bustos.***

Primero a Dios por darme la seguridad y confianza para dedicarle a mis estudios, a mi familia y compañeros me motivan para seguir con mis sueños y anhelos.

Agradecer a la universidad Nacional, abierta y a distancia - UNAD Escuela De Ciencias Agrícolas y del Medio Ambiente –ECAPMA Palmira y al director de tesis Msc Juan Guillermo Popayán Hernández, por su confianza y la dedicación que nos brindó tanto como tutor y director, nos enseñó a ser mejores personas y a ver las cosas desde otro punto de vista ya como profesional.

***Verónica Martínez Bejarano***

## Resumen

El agua desde todos los tiempos ha sido el líquido primordial por excelencia y materia de consumo fundamental para cada individuo. La creciente importancia que tiene la conservación de los recursos naturales hace necesario que el hombre mantenga constante búsqueda de métodos para su cuidado y conservación, proponiendo entonces nuevas alternativas que aseguren la calidad del objeto de estudio: agua potable. Según estudios ambientales, Colombia es uno de los países más ricos del mundo en recursos hídricos, sin embargo, esto es contrario a la disponibilidad de agua potable para el consumo humano. En Colombia sólo un 30% del agua está disponible para los municipios y de ese 30% sólo un 15% es agua potable y de buena calidad. Más del 85% de los municipios de Colombia no tienen disponibilidad adecuada de agua potable y siendo así la calidad del agua un factor importante, ya que bacterias presentes en esta pueden generar diversas enfermedades gastrointestinales en la población. Según la OMS, las enfermedades diarreicas son la segunda mayor causa de muerte de niños menores de cinco años, matando a 760.000 niños cada año. Pudiéndose prevenir mediante el acceso al agua potable y a servicios adecuados de saneamiento e higiene. Por lo anterior el propósito de esta propuesta fue diseñar una Planta de tratamiento de agua potable para la Vereda El Chocho (ubicada en la zona rural de Yumbo, con una probabilidad de precipitación de 19%, una humedad relativa del 76% y vientos de 11 km/h) en el Valle del Cauca usando análisis multicriterio, específicamente la técnica TOPSIS, que es un método de decisión de ordenación para identificar las soluciones de un conjunto finito de alternativas. El principio básico es que la alternativa elegida debe tener la menor distancia a la solución ideal positiva y la mayor distancia a la solución ideal negativa.

La vereda El choco del municipio de Yumbo carece de un sistema de abastecimiento de agua potable que garantice la calidad del líquido y la salud de las personas; la fuente de abastecimiento de agua de esta población en la quebrada Santa Inés, quebrada que sufre algunas afectaciones desde su

nacimiento hasta el punto de captación, como lo son: vertimiento de aguas residuales, pérdida de caudal en temporada seca, pastoreo y de acuerdo a los análisis fisicoquímicos que ha realizado la empresa de servicios públicos de Yumbo ESPY, tiene problemas de turbiedad y mala calidad bacteriológica.

La vereda El Chocho cuentan actualmente con un pequeño sistema de captación, desarenador y conducción que no satisface las necesidades de la comunidad y tampoco entrega agua potable a la luz de la resolución 2115 de 2007, la mayoría de las familias emplean pastas de cloro para realizar el proceso de desinfección del agua y así poderla usar para el consumo diario; esta propuesta de investigación busca proporcionar la alternativa más apropiada de un sistema de tratamiento de agua potable para esta población teniendo en cuenta criterios económicos, logísticos, ambientales y bajo los lineamientos del reglamento técnico de agua y saneamiento básico RAS 2000.

**Palabras claves:** Agua potable; análisis multicriterio; sistema de tratamiento

## **Abstract**

Water from all times has been the quintessential liquid and quintessential consumer material for each individual. The growing importance of the conservation of natural resources makes it necessary for man to keep searching for methods for its care and conservation, proposing then new alternatives that ensure the quality of the object of study: drinking water. According to environmental studies, Colombia is one of the richest countries in the world in water resources, however, this is contrary to the availability of drinking water for human consumption. In Colombia only 30% of the water is available to the municipalities and of that 30% only 15% is drinking water of good quality. More than 85% of the municipalities in Colombia do not have adequate availability of drinking water and thus water quality is an important factor, since bacteria present in it can generate various gastrointestinal diseases in the population. According to the WHO, diarrheal diseases are the second leading cause of death for children under the age of five, killing 760,000 children each year. Being able to prevent it through access to drinking water and adequate sanitation and hygiene services. Therefore, the purpose of this proposal is to design a drinking water treatment plant for the township El Chocho (located in the rural area of Yumbo, with a probability of precipitation of 19%, a relative humidity of 76% and winds of 11 km/h) in Valle del Cauca using multi-criteria analysis, specifically the technique TOPSIS, which is an ordering decision method to identify the solutions of a finite set of alternatives. The basic principle is that the chosen alternative should have the smallest distance to the positive ideal solution and the greatest distance to the negative ideal solution.

The village of El Choco in the municipality of Yumbo lacks a drinking water supply system that guarantees the quality of the liquid and the health of the people; the source of water supply of this population in the Santa Inés creek, a creek that suffers some effects from its source to the point of catchment, such as: discharge of wastewater, loss of flow in dry season, grazing and according to The



physicochemical analysis carried out by the Yumbo ESPY utility company, has turbidity problems and poor bacteriological quality.

The village of El Chocho currently has a small catchment, sand trap and conduction system that does not meet the needs of the community and does not provide drinking water in light of Resolution 2115 of 2007, most families use chlorine pastes to make the process of disinfection of water and thus be able to use it for daily consumption; This research proposal seeks to provide the most appropriate alternative of a drinking water treatment system for this population, taking into account economic, logistical, and environmental criteria and under the guidelines of the technical regulation of water and basic sanitation RAS 2000.

**Key words:** Drinking water; multicriteria analysis; treatment system

## Tabla de Contenido

Introduccion .....	¡Error! Marcador no definido.
1. Objetivos.....	18
1.1. Objetivo general.....	18
1.2. Objetivos específicos.....	18
2. Plantamiento del problema .....	19
3. Justificacion.....	21
4. Marco referencial.....	23
4.1. Marco conceptual.....	23
4.1.1. Ambiente como metaconcepto:.....	23
4.1.2. Análisis multicriterio:.....	27
4.2. Marco teórico .....	28
4.3. Sistemas de tratamiento de agua potable .....	36
4.3.1. Tipos de sistemas de tratamiento y potabilización de agua .....	36
4.3.2. Consideraciones generales del diseño de sistemas de potabilización .....	42
4.3.3. Tratamiento de agua potable en comunidades rurales .....	43
4.3.4. Demanda del recurso hídrico en el Valle del Cauca .....	47
4.3.5. Cobertura de acueducto en zona urbana, Valle del Cauca .....	48
4.3.6. Cobertura de acueducto en zona urbana, Valle del Cauca .....	49
4.4. Marco legal.....	49
4.4.1. Aspectos generales en torno a la legislación ambiental .....	49
4.4.2. Legislación ambiental asociada a los sistemas de potabilización en Colombia .....	50
5. Metodologia .....	54
5.1. Área de estudio.....	54
5.1.1. Uso del suelo y clima en la Vereda El Chocho .....	55
5.1.2. Cuenca Principal de abastecimiento de agua .....	55
5.1.3. Sistema de abastecimiento de agua .....	57
5.1.4. Necesidades prioritarias en la vereda el Chocho .....	58
5.2. Aspectos generales para el diseño de estructuras civiles de potabilización .....	59
5.2.1. Población de diseño.....	59
5.2.2. Cálculo de la Dotación.....	60

5.3.	Caudal de diseño .....	62
5.4.	Diseño metodológico .....	63
5.4.1.	Fase I: Análisis .....	63
5.4.2.	Fase II: Planeación y ejecución.....	64
5.4.3.	Fase III: Evaluación y realimentación.....	65
6.	Resultados y analisis .....	66
6.1.	Tratamiento de la información .....	66
6.2.	Delimitación de Alternativas .....	67
6.3.	Selección del Método .....	67
6.3.1.	Definición de grupo de expertos .....	68
6.4.	Captura de calificación de importancia de los criterios .....	68
6.5.	Matriz de priorización de alternativas.....	69
6.6.	Resultados.....	69
6.7.	Diseño del sistema de potabilización a partir del TOPSIS.....	72
6.7.1.	Cálculo de la población .....	72
6.7.2.	Dotación.....	73
6.7.3.	Caudal de diseño .....	73
6.7.4.	Diseño del tren de tratamiento obtenido a través de TOPSIS .....	74
7.	Conclusiones.....	82
8.	Recomendaciones.....	83
9.	Referencias .....	84
	Anexos.....	90

## **Listado de Figuras**

Figura 1 Bibliometría de TOPSIS.....	33
Figura 2 Diagramas de flujo, plantas de purificación, fuente: (Romero, 2000) .....	40
Figura 3 Plantas de remoción de hierro y magnesio, fuente: (Romero, 2000) .....	41
Figura 4 Área de estudio: zona rural del municipio de Yumbo, El Chocho .....	54

## Lista de Tablas

Tabla 1 Requisitos de Tratamiento .....	37
Tabla 2 Estándares para fuentes de agua cruda, suministro doméstico .....	37
Tabla 3 Criterios de calidad para destinación del recurso para consumo humano y doméstico mg/l Fuente: (Romero, 2000).....	38
Tabla 4 Procesos de purificación de agua.....	39
Tabla 5 Tecnologías de tratamiento de agua disponibles para comunidades rurales.....	45
Tabla 6 Fortalezas y debilidades de tecnologías de potabilización de agua en zonas rurales .....	46
Tabla 7 Leyes en materia ambiental conexas al problema de estudio .....	50
Tabla 8 Decretos en materia ambiental conexas al problema de estudio .....	51
Tabla 9 Resoluciones en materia ambiental conexas al problema de estudio .....	52
Tabla 10 Circulares, estatutos y Normas técnicas aplicables al problema de estudio .....	52
Tabla 11 Aspectos ambientales de la fuente de abastecimiento, Vereda El Chocho.....	57
Tabla 12 Nivel de complejidad del sistema .....	60
Tabla 13 Periodo de diseño.....	60
Tabla 14 Dotación neta máxima .....	61
Tabla 15 Escala de Saaty .....	65
Tabla 16 Criterios de selección.....	67
Tabla 18 Matriz de decisión .....	71
Tabla 19 Matriz Normalizada .....	71
Tabla 20 Matriz Normalizada Ponderada .....	71
Tabla 21 Alternativas seleccionadas: Mejor (A+) peor (A-) .....	71
Tabla 22 Medida de la distancia relativa respecto a la mejor alternativa .....	72
Tabla 23 Medida de la distancia relativa respecto a la peor alternativa .....	72
Tabla 24 Normalización para la mejor y la peor alternativa.....	72
Tabla 25 Selección de la alternativa adecuada para el caso de estudio. ....	72
Tabla 26 Proyección de la población al año 2050 .....	73
Tabla 27 Dotación neta y bruta.....	73
Tabla 28 Caudal de diseño.....	73

## **Listado de Abreviaturas**

BID: Banco Interamericano de Desarrollo

Comité MIRS: Comité de Manejo integral de residuos sólidos

CONPES: Consejo Nacional de Política Económica y Social

DANE: Departamento Administrativo Nacional de Estadística

DAPM: Departamento Administrativo de Planeación Municipal

DNP: Departamento Nacional de Planeación

OPS: Organización Panamericana de la Salud

PPC: Producción per cápita

## **Introducción**

El uso del agua dulce en el mundo es cada vez mayor. La población mundial crece a un ritmo de 80 millones de personas por año y con ello el aumento en la demanda de agua para satisfacer las necesidades humanas básicas, de alimentación, y otras asociadas al estilo de vida y factores culturales (Naciones Unidas, 2015). El uso doméstico ocupa el 4% del total de las extracciones de agua en el mundo. (Tobergte & Curtis, 2013). En Colombia esta cifra es del 3% y supone una posición privilegiada si se tiene en cuenta que ocupa el séptimo lugar como el país con mayor cantidad de agua que escurre por sus territorios y una precipitación media de 3100 mm/año (IDEAM, 2018).

Sin embargo, la calidad del agua óptima para el consumo humano se ha visto afectada principalmente por la contaminación antrópica procedente de los vertimientos de aguas residuales, los desechos líquidos provenientes de la industria y la agricultura, lo cual puede constituir importantes riesgos para la salud de la población, especialmente niños y ancianos y a su vez ser causa de mortalidad y morbilidad de la población. Lo anterior, posiciona a la potabilización del agua como una necesidad primordial para garantizar el acceso al agua potable por parte de la población (IDEAM, 2018).

La potabilización del agua consiste en el sometimiento del líquido a una serie de procesos que la transforman a unas características adecuadas para ser consumida, las cuales a su vez pueden presentar variaciones dependiendo de la fuente hídrica. Estos procesos son principalmente llevados a cabo en plantas o sistemas de tratamiento de agua potable, que disminuyen en gran medida las sustancias contaminantes y eliminan microorganismos que son considerados potencialmente peligrosos (IDEAM, 2018).

La Vereda el Chocho, se encuentra ubicado en el Corregimiento de Santa Inés municipio de Yumbo, Valle del Cauca, y cuenta con una población aproximada de 550 habitantes, de acuerdo con la información suministrada por el sistema público de información de la alcaldía del mismo municipio. El corregimiento se surte del agua de la Quebrada “el Aguacate y Santa Inés” (ESPY, 2014), para satisfacer las actividades domésticas y productivas.

Para la población del corregimiento El Chocho, existe la necesidad de suministrar agua potable en condiciones de calidad y cantidad que satisfagan sus necesidades, siguiendo los lineamientos establecidos en la Resolución 1096 de 2000 "Por la cual se adopta el Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS", la Resolución 2320 de 2009 “por la cual se modifica parcialmente la Resolución número 1096 de 2000 que adopta el Reglamento Técnico para el sector de Agua Potable y Saneamiento Básico –RAS”, El Decreto 1575 de 2007 “Por el cual se establece el Sistema para la Protección y Control de la Calidad del Agua para Consumo Humano” y la Resolución 2115 de 2007 “Por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano”.

Por lo anterior, este documento presenta un diseño del sistema de potabilización de agua para la Vereda el Chocho, en el cual se describen las unidades de trabajo requeridas para tratar el agua y hacerla apta para el consumo humano principalmente. Este diseño se realizó a partir de la consideración de varios trenes de tratamiento, y se procedió a seleccionar el óptimo de acuerdo a las condiciones de la zona, esto mediante la implementación de la técnica TOPSIS de análisis multicriterio para la selección de alternativas difusas de tratamiento de agua con fines de potabilización.



Para tal propósito, en el presente documento se presenta una descripción sucinta de las características contextuales del área de estudio, a partir de lo cual se implementó un análisis multicriterio (AMC) con el método TOPSIS (por sus siglas en inglés *The Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution*), con lo cual se seleccionó la alternativa óptima desde el punto de vista de la sostenibilidad ambiental, técnica y económica. Esta técnica de análisis fue seleccionada debido a la practicidad en términos de la combinación de criterios de distintos aspectos, puesto que a través de TOPSIS se pueden integrar variables de distintas dimensiones físicas, así como criterios abstractos definidos mediante escalas booleanas. Esto representa una ventaja metodológica conceptual que permite establecer diversos criterios en función de las diferentes esferas epistemológicas que definen la sostenibilidad ambiental.

Finalmente, una vez encontrada la mejor alternativa, que goce de viabilidad técnica, económica y ambiental, se procedió a describir detalladamente el diseño de la estructura de acuerdo al RAS 2017.

## **Objetivos**

### **Objetivo general**

Diseñar el sistema tratamiento de agua potable para la Vereda el Chocho, Corregimiento de Santa Inés Municipio de Yumbo, Valle del Cauca usando análisis multicriterio.

### **Objetivos específicos**

- Diagnosticar las dimensiones biofísicas, económicas y socioculturales de la vereda el Chocho.
- Proponer cinco alternativas de diseño viables según los criterios del RAS 2017 para el contexto de la Vereda Chocho.
- Implementar un análisis multicriterio (TOPSIS) para la selección de la alternativa más sostenible para el caso de estudio.
- Diseñar el sistema de tratamiento seleccionado mediante TOPSIS.

## **Planteamiento del Problema**

Los sistemas de abastecimiento son fundamentales para el desarrollo de las sociedades contemporáneas. Estas estructuras de ingeniería demandan la implementación de operaciones unitarias necesarias para garantizar proveer el suministro de agua potable para las comunidades que requieren dicho recurso, para lo cual se evalúa el sistema de tratamiento en función de la eficiencia, los parámetros químicos, físicos y biológicos con los que debe contar el agua tratada al final del tubo (Arena, Cannarozzo, Fortunato, Scolaro, & Mazzola, 2014).

En el contexto colombiano, los sistemas de potabilización se diseñan en función de la remoción de sólidos (disueltos y suspendidos), color, olor y sabor, parametrizados inicialmente en el decreto 1594 de 1984, el cual, en términos generales, condiciona y regula los usos del agua en Colombia (Echeverri, 2017). Sin embargo, existen una serie de contaminantes denominados emergentes, los cuales no son removidos en los sistemas convencionales de tratamiento, lo cual demanda que la eficiencia de los sistemas de tratamiento sea evaluada con otros parámetros más exhaustivos que permitan diagnosticar el óptimo funcionamiento de las operaciones unitarias (Juárez, Pomaa, & Rajal, 2015).

De acuerdo a lo anterior, el presente proyecto tiene como pregunta de investigación:

¿Cuál es la alternativa de tratamiento más sostenible en términos económicos, técnicos, ambientales y sociales aplicable a satisfacer las necesidades de suministro de agua potable en la vereda el Chocho, municipio de Yumbo, Valle del Cauca?

Para ello, la hipótesis planteada es: El análisis multicriterio es una herramienta técnicamente viable que permite seleccionar la alternativa de tratamiento más sostenible para satisfacer las necesidades de agua potable en el área de estudio, esto de forma objetiva y eficiente.

## **Justificación**

En los países en vía de desarrollo como es el caso de Colombia, el abastecimiento de agua potable para las comunidades humanas es crucial para satisfacer las metas del milenio en términos de cobertura y calidad de este recurso natural (Ortega Márquez & Márquez Fernández, 2017). De esta forma, Colombia ha suscrito varios tratados internacionales en materia de alianza y cooperación estratégica para proveer a las ciudades y municipios (Territorio Nacional según la Ley 388/1997) de estructuras de ingeniería que integren las operaciones unitarias necesarias para garantizar las condiciones mínimas que debe gozar el agua destinada para el consumo humano, tal como se legisló inicialmente en el Decreto 1594 de 1984.

En este Decreto, pionero en el contexto nacional en este tema, se consideró que la calidad del agua destinada para consumo humano debe girar en torno a unos umbrales establecidos (según normatividad de la EPA para el contexto estadounidense) en función de parámetros físicos, químicos y microbiológicos que garantice la ausencia de peligro para el consumidor final (Wang et al., 2019).

Sin embargo, estos parámetros resultan insuficientes en la actualidad para evaluar la calidad del agua destinada para el consumo humano, esto debido al reconocimiento de los denominados contaminantes emergentes, los cuales no son removidos en los sistemas de tratamiento de agua potable convencionales y que además no alteran el cumplimiento de la normatividad legal vigente (Juárez et al., 2015). Este hecho cobra especial atención debido a los recientes avances en la comprensión de los efectos en la salud y en la fauna del consumo de agua con presencia de metabolitos surgidos a partir de las actividades agrícolas, farmacéutica y de la presencia de hormonas y metabolitos secundarios en el

agua de medicamentos de uso masivo entre las clases menos favorecidas (Quezada-Quezada et al., 2014).

Es por ello que el presente proyecto posee un amplio carácter interdisciplinar, pues se propone usar herramientas de la ingeniería industrial (TOPSIS) para la selección del tren de tratamiento óptimo para potabilizar el agua de la vereda el Chocho, con la comprensión de lo óptimo desde las ciencias ambientales como aquella alternativa compleja y sostenible en el tiempo (Jayakumar & Janakiraman, 2019), esto en las dimensiones biofísicas, económicas y socioculturales del área de estudio (Buckee et al., 2020).

## **Marco Referencial**

### **Marco conceptual**

En este documento se tratarán tres conceptos fundamentales para abordar la problemática de estudios, los cuales son: ambiente, agua potable y análisis multicriterio. A continuación, se trata cada uno de estos por separado.

### **Ambiente como Meta concepto:**

En primer lugar, el concepto de ambiente es fundamental, entendiéndose como todos los factores que integran la tierra (biótica y abiótica)(Martínez-Alier, Pascual, Vivien, & Zaccai, 2010). La relación del hombre con su entorno va más allá de los factores físicos, químico y biológico, abarca otros factores como lo cultural, económico, político, social, entre otros. El ambiente es un concepto muy amplio que involucra todo lo que nos rodea, siendo su principal característica su constante transformación (González, 2005).

En la década de los setenta, el tema del ambiente se introdujo de interés político por el deterioro del medio natural que fue denominado crisis ambiental, que hace referencia a un fenómeno de origen social que se les atribuye a los comportamientos del ser humano, el crecimiento económico y la civilización industrial, siendo estos aspectos los precursores de los problemas medioambientales. Las catástrofes ambientales como la ocurrida en 1952 en Londres, a causa de alta concentración de smog generó la muerte de cuatro mil víctimas; en 1953 otro suceso que se produjo fue el de los pobladores de la aldea pesquera de Minamata en Japón, que se vieron afectados por residuos de mercurio orgánicos que las fábricas depositaban en cuerpos de agua, que ocasiono la enfermedad conocida como “Minamata” , estos y otros acontecimientos de daño ambiental comienzan a crear

conciencia de cuidado y protección ambiental, otro fenómeno que influyó de la idea de crisis ambiental fueron los primeros escritos de científicos, entre los cuales se destaca la bióloga marina estadounidense Rachel Carson, la primavera silenciosa publicada (publicado en 1962). En su libro denunció el envenenamiento del medio ambiente a causa de pesticidas. Por todos estos episodios en el año de 1972 en Estocolmo, se realizó la Conferencia de Naciones Unidas sobre Medio Ambiente Humano, siendo este un antecedente histórico para la protección del Medio Ambiente a nivel internacional, regional y local (Estenssoro Saavedra, 2007).

El autor Maya (2013), refiere que para comprender los problemas ambientales es fundamental el estudio de la ecología, el concepto de ambiente y ecología han generado confusión por la falta de comprensión, estos dos términos son diferentes, la ecología representa el primer nivel de los estudios ambientales que se encarga de las leyes del ecosistema (flujo energético, niveles tróficos, los ciclos biogeoquímicos y el nicho ecológico). El ambiente es, por tanto, un campo de análisis interdisciplinario que estudia las relaciones entre las dinámicas sociales y los ecosistemas (Sharma et al., 2019).

Actualmente el tema del ambiente es de interés y preocupación por el desequilibrio que se está generando a causa de las actividades humanas, colocando en riesgo la existencia de su permanencia y la de otros seres vivos. Maya (2003), describe “la solución al problema ambiental no consiste en encajar al hombre dentro del ecosistema. No consiste, por tanto, en saber «conservar», sino en aprender a «transformar bien»” (p.20). Por tanto, el ser humano es el responsable directo de los cambios que se están presentando por contaminación (Saavedra Díaz & Perevochtchikova, 2017).



En segundo lugar, esta propuesta aborda el concepto de sostenibilidad, que aparece en el escenario de la política y gestión ambiental por primera vez en la Comisión Brundtland, constituida por la Asamblea General en 1983. Su informe, "Nuestro Futuro Común". Definió el desarrollo sostenible como "un desarrollo que satisfaga las necesidades del presente sin poner en peligro la capacidad de las generaciones futuras para atender sus propias necesidades". (Asamblea General de las Naciones Unidas, s.f.). La cual se fundamenta de tres pilares para alcanzar la sostenibilidad que son lo económico, social y ambiental, estos siempre deben tener un equilibrio sin verse afectado alguno de ellos.

Para impulsar estrategias de desarrollo en los países subdesarrollados, en la década de los 90, por medio de la Secretaria General de las Naciones Unidas se propone la celebración de cumbres para tomar acciones y soluciones a problemáticas de la humanidad a nivel mundial como la pobreza extrema desigualdad de género, por tanto en el año 2000, 193 países miembros de las naciones unidades firmaron los objetivos de Desarrollo del Milenio que se compone de ocho objetivos, que acordaron como meta de cumplimiento para el año 2015. (Ramírez-Villar, 2016)

Los objetivos son los siguientes: 1) Erradicar la pobreza y hambre, 2) Lograr la enseñanza primaria universal, 3) Promover la igualdad entre los géneros y la autonomía de la mujer, 4) Reducir la mortalidad infantil, 5) Mejorar la salud materna, 6) Combatir el VIH/SIDA, el paludismo y otras enfermedades, 7) Garantizar la sostenibilidad ambiental, 8) Fomentar una asociación mundial para el desarrollo

En el año 2015, se realizó la evaluación de los logros de cada objetivo a nivel mundial y a nivel de país, en el objetivo siete, referente a la sostenibilidad ambiental se logró eliminar algunas sustancias agotadoras de la capa de ozono (Ramírez-Villar, 2016).

En Colombia las metas que se lograron al año 2015 en el tema ambiental fue la reforestación de 23.000 hectáreas (ha) que se alcanzó en el año 2009, en años posteriores se recuperó 4.643 (ha) adicionales. De 1990 a 2010 el área de bosque en el país se redujo el 8%. En cuanto a tratamiento de aguas residuales (domesticas e industriales), solo el 35% recibe algún tipo de tratamiento. (Ramírez-Villar, 2016) estos resultados indican que el país tiene un gran reto para cumplir con el objetivo de sostenibilidad (Mullin, Mitchell, Nawaz, & Waters, 2018).

De acuerdo al resultado positivo de los Objetivos del Milenio planteados hasta el año 2015, se planteó una nueva agenda donde se establecieron los objetivos de Desarrollo Sostenible que se aprobaron en el año 2015 con meta de culminación hasta el año 2030, son diecisiete (17) objetivos para lograr el desarrollo sustentable:

1. Fin de la pobreza.
2. Hambre cero.
3. Salud y bienestar
4. Educación de calidad.
5. Igualdad de género.
6. Agua limpia y saneamiento.
7. Energía asequible y no contaminante.
8. Trabajo decente y crecimiento económico.
9. Industria, innovación e infraestructura.
10. Reducción de las desigualdades.
11. Ciudades y comunidades sustentables.
12. Producción y consumo responsable.
13. Acción por el clima.

14. Vida submarina.
15. Vida de ecosistemas terrestres.
16. Paz, justicia e instituciones sólidas.
17. Alianza para lograr los objetivos.

Estos objetivos entraron en vigencia a partir del 1 de enero del año 2016, estos no son de carácter jurídico para los países que firmaron el tratado, son una referencia de manera estructurada y organizada por expertos en el tema, con el fin de que los países vinculados trabajen en la implementación de lineamientos y acciones para lograr un desarrollo sustentable (May, Jackson, Bevanger, & Røskoft, 2019).

### **Análisis multicriterio:**

El análisis multicriterio surge a partir de la denominada Teoría de la Decisión, la cual indaga respecto a la forma en la cual las personas toman decisiones dentro de un conjunto de posibilidades previamente establecidas (Martínez & Escudey, 1997). Dichos estudios tuvieron su origen en la psicología y la economía, fundamentalmente en la necesidad de estas disciplinas por conocer los mecanismos cognitivos involucrados en la toma de decisiones en el contexto de la lógica del consumo (Voogd, 1982).

Sin embargo, en los últimos años, el análisis multicriterio ha tenido distintas aplicaciones, y una de ellas es la toma de decisiones en los contextos físico espaciales (Qureshi, Singh, and Hasan, 2018, p.641-659), inicialmente en la determinación de la ubicación de emplazamientos productivos o estructuras civiles de uso masivo (i.e. rellenos sanitarios, vías, agroecosistemas etc.) (Gómez and Barreto, 2005).

La aplicación de la teoría de decisión en distintos contextos deriva en la necesidad de concebir, implementar y perfeccionar las técnicas o rutinas de toma de decisiones (Witte,1972, p. 156-182), y una de ellas es TOPSIS (por sus siglas en inglés Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution) la cual consiste básicamente en la aplicación de siete pasos o procedimientos secuenciados, cuyo propósito es seleccionar dentro de un conjunto finito de alternativas aquella que guarde equidistancia de los extremos geométricos existentes entre la mejor y la peor alternativa para el problema de decisión planteado (Riesgo and Gallego,2015).

Esta metodología es de fácil procesamiento en los paquetes de office convencionales, y posee la ventaja de integrar en el análisis criterios del orden de lo cualitativo y cuantitativo.

### **Marco teórico**

En el siglo XXI el mundo se enfrenta a una escasez de agua que afecta a todos los continentes (Martínez-Alier, Pascual, Vivien, & Zaccai, 2010). Por lo tanto, existe la preocupación sobre la disponibilidad, pérdida, calidad y la gestión del agua que ocasionan problemas a los habitantes de todos los países. De acuerdo, con el Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2018, afirma que la escasez mundial de agua constituye un problema de enorme trascendencia ya que parece improbable que el ciclo mundial de agua pueda adaptarse a las demandas que se les presentarán en las próximas décadas (Gómez-Gutiérrez et al., 2016)

Sin embargo, la calidad del agua óptima para el consumo humano se ha visto afectada principalmente por la contaminación antrópica procedente de los vertimientos de aguas residuales (Das & Das, 2019), los desechos líquidos provenientes de la industria y la agricultura, lo cual puede constituir importantes riesgos para la salud de la población, y a su vez ser causa de mortalidad y

morbilidad de la población, especialmente niños y ancianos (Wei et al., 2018). Lo anterior, posiciona a la potabilización del agua como una necesidad primordial para garantizar el acceso al agua potable por parte de la población (Hargreaves, Farmani, Ward, & Butler, 2019)

Las plantas de potabilización de agua consisten en el sometimiento del líquido a una serie de procesos que la transforma a unas características adecuadas para ser consumida, las cuales a su vez pueden presentar variaciones dependiendo de la fuente hídrica. La finalidad de estas plantas es suministrar agua en condiciones óptimas tanto de calidad y cantidad para consumo humano (Jiang & Rohendi, 2018).

Las normas vigentes en Colombia de calidad del agua para consumo humano están reguladas por la resolución 2115 de 2007 emitida por el Ministerio de la Protección Social y el decreto 1575/2007, decreto 1594/1984, decreto 3930/2010, que permiten regular, monitorear, prevenir y controlar el uso y la calidad del agua a todas las personas prestadoras que suministren o distribuyan agua para consumo humano (Villanueva, Kogevinas, & Grimalt, 2001).

Por otro lado, la creciente importancia que tiene la conservación de los recursos naturales hace necesario que el hombre mantenga constante búsqueda de métodos para su cuidado y conservación, proponiendo entonces nuevas alternativas que aseguren la calidad del objeto de estudio: agua potable (Picton & Daniels, 1999).

Según el Estudio Nacional del Agua 2014, Colombia ha sido reconocida por su abundante oferta hídrica a nivel mundial, sin embargo, esto es contrario a la disponibilidad de agua potable para el consumo humano (Echeverri, 2017) (Rodríguez-Alvarez, Moraña, Salusso, & Seghezze, 2017). Además, Colombia no logra asegurar agua potable y saneamiento básico para los colombianos, como lo propone el ODS 6. Esto debido a la existencia de brechas entre las zonas urbanas y rurales del país

(Wilmsmeier, 2020). En la zona urbana 97% de personas pueden acceder a suministros de agua potable, mientras que en lo rural solo 74% lo logran, siendo así la calidad del agua un factor importante, para la existencia de la población colombiana (Findeter, 2017).

Por otro lado (Udimal, Jincal, Ayamba, & Mensah Owusu, 2017) “las enfermedades diarreicas son la segunda mayor causa de muerte de niños menores de cinco años, matando a 525.000 niños cada año. Pudiéndose prevenir mediante el acceso al agua potable y a servicios adecuados de saneamiento e higiene”.

En términos generales, los sistemas de potabilización son estructuras de ingeniería que conforman varias operaciones unitarias enfocadas hacia la purificación del agua para hacerla apta para el consumo humano. En este sentido, cada operación unitaria remueve materia orgánica, sedimentos y minerales, lo cual en términos termodinámicos contribuye a aumentar la entropía del sistema de potabilización, razón por la cual el análisis multicriterio podría ser una herramienta útil para seleccionar el tren de tratamiento óptimo desde el punto de vista de sostenibilidad

Por otro lado, el análisis multicriterio surge a partir de la denominada Teoría de la Decisión, la cual indaga respecto a la forma en la cual las personas toman decisiones dentro de un conjunto de posibilidades previamente establecidas (Palczewski & Sałabun, 2019) Dichos estudios tuvieron su origen en la psicología y la economía, fundamentalmente en la necesidad de estas disciplinas por conocer los mecanismos cognitivos involucrados en la toma de decisiones en el contexto de la lógica del consumo (Yadav, Karmakar, Kalbar, & Dikshit, 2019).

En torno al análisis multicriterio, algunas investigaciones como la Garmendia & Gamboa (2012) han empleado técnicas de evaluación multicriterio como la de Condorcet-Kemeny-Young-

Levenglick con el fin de evaluar alternativas para la administración sustentable de recursos naturales en la Reserva de Biosfera Urdaibai, España donde coexisten actividades de turismo, agricultura, pesca, industria, recreación y conservación (Voogd,1982).

En este documento los autores presentan la metodología empleada entre 2007 y 2008 donde reunieron expertos en diferentes áreas temáticas, junto con actores locales, regionales y nacionales. Los autores resaltan que su objetivo al realizar la evaluación multicriterio de forma participativa no es llegar a consensos sino captar los diversos puntos de vista y criterios de los agentes a fin de garantizar la inclusión de sus preferencias sociales y expandir el proceso de aprendizaje social de modo que todos los agentes deberán identificarse con al menos una de las alternativas propuestas (Wolnowska & Konicki, 2019).

Se definieron criterios (Empleo, Ingresos locales, Compatibilidad Socio-ecológica, Costos de Implementación, Perturbación ambiental, Impactos sobre el hábitat y fauna, Reversibilidad e Incertidumbre), establecieron pesos y alternativas para la administración de la zona (El escenario Actual, dos opciones basadas en la sostenibilidad ambiental, social y económica y dos opciones en detrimento de las condiciones ambientales que a largo plazo son insostenibles) (Sousa, Gomes, & Formigo, 2019). Los resultados arrojados mostraron que la política predominante en las últimas décadas (dragado masivo) era la única opción que todos los actores sociales involucrados acordaron que debería ser abandonada y por el contrario las alternativas dirigidas a la sostenibilidad predominaron como primera y segunda opción en el ranking de solución (Voogd,1983).

Para el sector agropecuario Avendaño, Astorga, Acosta & Hernández (2013) proponen un modelo de priorización multicriterio para conocer la estructura de producción agrícola de Baja California en el que integraron un esquema matricial para relacionar y estimar con un único valor las diferentes alternativas; los resultados del estudio pretendían servir de insumo para la asignación de

recursos destinados al fortalecimiento del sector agroalimentario y agropecuario de Baja California. Se definieron las alternativas que correspondieron a 30 productos agrícolas y pecuarios analizando la serie de tiempo entre 1994 y 2008 (Qureshi, Singh and Hasan,2018).

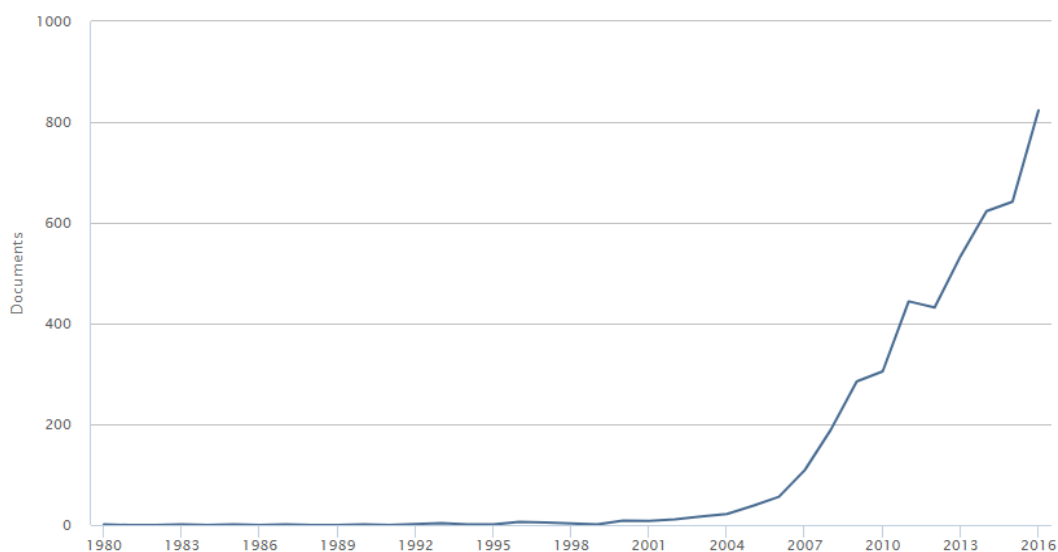
Los criterios definidos fueron: 1. Tamaño de la actividad (tamaño promedio, volumen de producción, empleos generados, lámina de agua por cultivo por hectárea); 2. Crecimiento o dinámica (tasa de crecimiento del volumen de producción, tasa de crecimiento del valor de la producción y tasa de crecimiento en la generación de empleos) y 3. Especialización (Participación de Baja California en la producción nacional, participación de Baja California en el valor de la producción a nivel nacional y porcentaje de la producción estatal exportada).A partir de los criterios y pesos se construyó un índice agregado y sintético a partir del cual se obtuvo que las actividades prioritarias por su desempeño en la interacción de los tres criterios (tamaño, dinámica y especialización) eran: Espárrago, Alfalfa y Trigo, respectivamente, es decir que sobre estos resultados debería basarse una propuesta de asignación de recursos financieros encaminados a fortalecer el sector productivo y maximizar las inversiones realizadas en el sector agroalimentario y agropecuario de la zona de estudio (Qureshi, Singh and Hasan,2017).

Los autores Berumen, Sergio A. y Llamazares Redondo, Francisco (2007) hace referencia a la búsqueda de la eficiencia y la productividad, a través de metodologías para la toma de decisiones en escenarios con diferentes variables. Considera que el método AHP es uno de los que tiene mayor potencial para la identificación y priorización de problemas de diseño, implementación, validación, control y evaluación, para tener competitividad en contextos empresariales e industriales inmersos en la economía global (O'Hara, 2009). Finalmente, apela a que sus grandes ventajas son, por un lado, que no hace falta contar con información cuantitativa y, por otro lado, que la sencillez de su implementación lo hace versátil siguiendo tres pasos fundamentales: primero, sumar los valores de



cada columna de la matriz de comparaciones pareadas; segundo, dividir cada elemento de la matriz entre el total de su columna; y tercero, calcular el promedio de los elementos de cada línea de las prioridades (Gómez and Barreto,2005).

TOPSIS (technique for order performance by similarity to ideal solution)) es una metodología cuyo uso ha sido ampliamente difundido y que va en crecimiento (Ver Figura 1), su primer registro en el metabuscador SCOPUS es de 1980 y para el año 2016 se registraron 823 artículos que mencionaban a la metodología; Las áreas que representan en 88,4% de lo publicado son ingeniería (48,9%) y Ciencias de la computación (39,5%), el país que lidera las publicaciones en la temática es China, seguido de Irán e India.



*Figura 1 Bibliometría de TOPSIS*

Fuente: Bibliométrica de “TOPSIS” en SCOPUS.

Algunos de los usos que se registran para la metodología TOPSIS en el agro son: evaluación de la idoneidad de un terreno para la producción de Alfalfa (Bagherzadeh, Ali y Gholizadeh,2017), Los autores Mahalakshmi, P., Ganesan, K. & Venkatasubramanian, V. Aquacult Int (2012) la usan con

evaluación multiobjetivo para para la identificación de la ubicación óptima para el desarrollo de la una granja acuícola camaronera, Yang, J., Xu, F., Liu, G., Zhang, X., Zhang, T., Zhao, D. (2017) la utilizan para clasificación de tierras cultivables, Holota, T., Holienčinová, M., Kotus, M., Chrastina, J. (2017), para la toma de decisiones en la fabricación de piezas mecánicas usadas en maquinaria agrícola, Ma, C., Yang, Y., Wang, J., Chen, Y., Yang, D. (2017), para selección de ubicación de granjas para la producción de cerdos, Liu, Y., Cui, J., Kong, X., Zeng, C. (2016) en la evaluación de la idoneidad del suelo, para el establecimiento de asentamiento agrícolas, Shi, H., Liu, K., Peng, H., Yao, Y.(2016) para el análisis de factores de beneficio y pérdida en la cadena de suministro de productos frescos A. Nureize & J. Watada (2010) establecen que la medición de la calidad es una tarea importante en la evaluación de productos y juega un papel fundamental en la producción agrícola. La inspección de los racimos implica un examen visual de acuerdo con los estándares de madurez de cultivos, y esta clasificación queda sujeta a conocimiento experto y su interpretación. Por lo tanto, El proceso de inspección de calidad de las frutas debe llevarse a cabo adecuadamente para garantizar que se seleccionan racimos de fruta de alta calidad para la producción.

El juicio humano es subjetivo y hace que la clasificación de la fruta sea inexacta. Crean un modelo en el cual mediante AHP establecen los pesos de los criterios que tienen en cuenta los empleados que realizan la inspección y evalúan las alternativas con TOPSIS y comparan con los resultados obtenidos mediante fuzzy hierarchical evaluation model (FHEM), sin obtener diferencias entre la priorización dada por las metodologías (Seyedmohammadi, Sarmadian, Jafarzadeh, Ghorbani and Shahbazi,2018).

TOPSIS ha sido empleada por Riesgo L., Gallego-Ayala J. (2015) para establecer la sostenibilidad de las granjas de olivos en Andalucía, España, por ser este un cultivo de impacto social

en la región, pues es el que más empleos por hectárea genera y el segundo en importancia económica. El cultivo de Olivo inicialmente no fue intensivo, sin embargo, al generarse políticas gubernamentales que lo incentivaron, el esquema cambio y las granjas con el tiempo se especializaron solo en este cultivo, causando problemas de erosión del suelo, sobre explotación del recurso hídrico, contaminación del agua, reducción de la biodiversidad y deterioro del paisaje.

En este estudio se evaluó la sostenibilidad de las granjas de olivo, en el marco de dos conceptos agricultura sostenible y sostenibilidad económica, para ello se utilizó un modelo híbrido multicriterio para la toma de decisiones (MCDM) que integra el Proceso analítico de jerarquía (AHP) y TOPSIS para clasificar los cultivos de olivos en términos de su rendimiento con respecto a un conjunto de atributos socioeconómicos y ambientales. El objetivo del estudio fue evaluar la sostenibilidad de las granjas de olivos en Andalucía a través de la construcción de indicadores compuestos utilizando un enfoque MCDM (M. R. N. Qureshi, R. K. Singh, and M. A. Hasan,2018).

Qureshi, M.N., Singh, R.K. & Hasan (2017) evalúan prácticas de agricultura sostenible en India para la temporada de baja precipitación, teniendo en cuenta aspectos económicos, sociales y ecológicos, usando la metodología TOPSIS difusa. En India, el sector agrícola contribuye con alrededor del 17,9% del producto interno bruto (PIB) y, por lo tanto, desempeña un papel importante. Entre los aspectos económicos se mencionan: costo de producción, productividad del cultivo, rendimiento, empleo, autosuficiencia y economía de la granja; entre los aspectos sociales: optimización de recursos, calidad de vida, migración de estrato socioeconómico, autosuficiencia alimentaria, conocimiento y competencias; entre los aspectos ecológicos: seguridad ambiental, degradación del suelo, agua y aire, al igual que las emisiones de CO<sub>2</sub>. Se identificaron un total de 12 criterios Un total de doce criterios que cubren aspectos socioeconómicos, del suelo y el agua, las

condiciones ambientales y climáticas, en los que se evaluaron ocho cultivos propios de la temporada seca (Ravi) de la región, (Qureshi, Singh and Hasan 2017).

### **Sistemas de Tratamiento de Agua Potable**

El suministro de agua potable es un tema de alta importancia para la sociedad, la población rural y urbana del país requiere de un suministro constante y de calidad de agua para satisfacer sus necesidades básicas; en este sentido entidades gubernamentales y no gubernamentales se han dado a la tarea de enfrentar esta necesidad y lograr como objetivo fundamental el suministro de agua potable a toda la población para mejorar su calidad de vida (Ortega Márquez & Márquez Fernández, 2017). Esta tarea ha sido compleja y aún se encuentra en el territorio nacional municipios que no cuentan con este servicio; por ejemplo, en el Valle del Cauca el municipio de Candelaria no cuenta con suministro de agua potable y solo reciben agua pocas horas al día, el municipio de Yumbo, aunque cuenta con el servicio de agua potable, algunas zonas del municipio tienen el recurso unas pocas horas, situación que se agrava en temporada seca.

Es indispensable que el gobierno ahonde esfuerzos para satisfacer esta necesidad primordial en todo el país y aún más en la zona Rural donde el abastecimiento del recurso esta para el Valle del Cauca alrededor de 73%.

### **Tipos de Sistemas de Tratamiento y Potabilización de Agua**

Según Romero (2000), la calidad del agua cruda difiere considerablemente del tipo de fuente de abastecimiento, por esta razón en tipo de tratamiento para su potabilización también puede variar considerablemente. La calidad del agua cruda determinará la complejidad del sistema de potabilización. Se han formulado criterios generales de tratamiento de agua cruda, de acuerdo a la calidad de la fuente, los cuales han servido como guía. La siguiente tabla (tabla 1.) muestra las

recomendaciones de la USPHS sobre requisitos de tratamiento en relación con la calidad bacteriológica del agua.

*Tabla 1 Requisitos de Tratamiento*

Grupo	Tipo de tratamiento	Contenido de bacterias coliformes
I	Ninguno	Limitado a aguas subterráneas no sujetas a ningún tipo de contaminación.
II	Cloración	Promedio en cualquier mes 50/100 mL.
III	Completo con filtración rápida en arena y poscloración	Promedio en cualquier mes 5000/100 mL sin exceder este valor en más del 20% de las muestras examinadas en cualquier mes.
IV	Tratamiento adicional: presedimentación y precloración	Promedio en cualquier mes 5000/100 mL pero excediendo este valor en más del 20% de las muestras analizadas en cualquier mes, y sin exceder de 20000/100 mL en más del 5% de las muestras examinadas en cualquier mes.

Fuente: (Romero, 2000)

El comité de control de polución del estado de California ha referenciado estándares de calidad de agua cruda para abastecimiento doméstico (Tabla 2)

*Tabla 2 Estándares para fuentes de agua cruda, suministro doméstico*

PARÁMETRO	FUENTE EXCELENTE Requiere solamente desinfección como tratamiento	FUENTE BUENA Requiere tratamiento usual tal como filtración y desinfección	FUENTE POBRE Requiere tratamiento especial o adicional y desinfección
DBO mg/L			
Promedio mensual	0,75 - 1,5	1,5 - 2,5	>2,5
máximo diario, o muestra	1,0 - 3,0	3,0 - 4,0	>4,0
NMP de coliformes/100 mL			
Promedio mensual	50 - 100	50 - 5000	>5000
máximo diario o muestra	<5% sobre 100	<20% sobre 5000	<5% sobre 20000
OD			
Promedio mg/L	4,0 - 7,5	4,0 - 6,5	4,0
% saturación	>75	> 60	-
pH promedio	6,0 - 8,5	5,0 - 9,0	3,8 - 10,5
Cloruros mg/L máx.	<50	50 - 250	>250
Fluoruros mg/L	<1,5	1,5 - 3,0	>3,0
Fenoles mg/L máx.	0	0,005	>0,005
Color - unidades	0 - 20	20 - 150	>150
Turbiedad, unidades	0 - 10	10 - 250	>250

Fuente: (Romero, 2000)

En Colombia se han establecido criterios de calidad del agua para consumo humano a través del decreto 1594 de 1984, los cuales se muestran en la tabla 3

Tabla 3 Criterios de calidad para destinación del recurso para consumo humano y doméstico mg/l  
Fuente: (Romero, 2000)

PARÁMETRO	Requiere tratamiento convencional: coagulación, floculación, sedimentación, filtración y desinfección	Requiere sólo desinfección
Amoníaco (como N)	1,0	1,0
Arsénico	0,05	0,05
Bario	1,0	1,0
Cadmio	0,01	0,01
Cianuro	0,2	0,2
Cinc	15,0	15,0
Cloruros	250,0	250,0
Cobre	1,0	1,0
Color (unidades)	75	20
Ferroses	0,002	0,002
Cromo hexavalente	0,05	0,05
Difenil policlorados	ND	ND
Mercurio	0,002	0,002
Nitratos (como N)	10,0	10,0
Nitritos (como N)	1,0	1,0
pH (unidades)	5,0 - 9,0	6,5 - 8,5
Plata	0,05	0,05
Plomo	0,05	0,05
Selenio	0,01	0,01
Sulfatos	400,0	400,0
SAAM	0,5	0,5
Turbiedad		10
Coliformes totales NMP/100 mL	20000	1000
Coliformes fecales NMP/100 mL	2000	
ND = No detectable		

En la tabla 4 se resumen los procesos de tratamiento de agua más usados en la actualidad

*Tabla 4 Procesos de purificación de agua*

PROCESO	PROPÓSITO
<b>TRATAMIENTO PRELIMINAR</b>	
Cribado	Remoción de desechos grandes que pueden obstruir o dañar los equipos de la planta.
Pretratamiento químico	Remoción eventual de algas y otros elementos acuáticos que causan sabor, olor y color.
Presedimentación	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, floc en suspensión y la mayoría de los microorganismos.
Adsorción	Remoción de sustancias orgánicas y color.
Estabilización	Prevención de incrustaciones y corrosión.
Fluoruración	Prevención de caries dental.
Desinfección	Exterminio de organismos patógenos.

Fuente: (Romero, 2000)

Para Romero (2000), El agua debe tratarse para que esté libre de cualquier agente patógeno que pueda afectar la salud de la población, en ese sentido la desinfección se torna un proceso importante que garantiza las condiciones microbiológicas del agua. Otro parámetro de control es la turbiedad, la cual de acuerdo a la resolución 2115 de 2007 debe estar por debajo de 2 NTU ; por lo anterior se supondría que dos procesos de tratamiento mínimo deben ser la filtración para reducir la turbiedad y la desinfección para el manejo de agentes patógenos. En las figuras 2 y 3 se presentan algunos diagramas de flujo de sistemas de potabilización de agua.

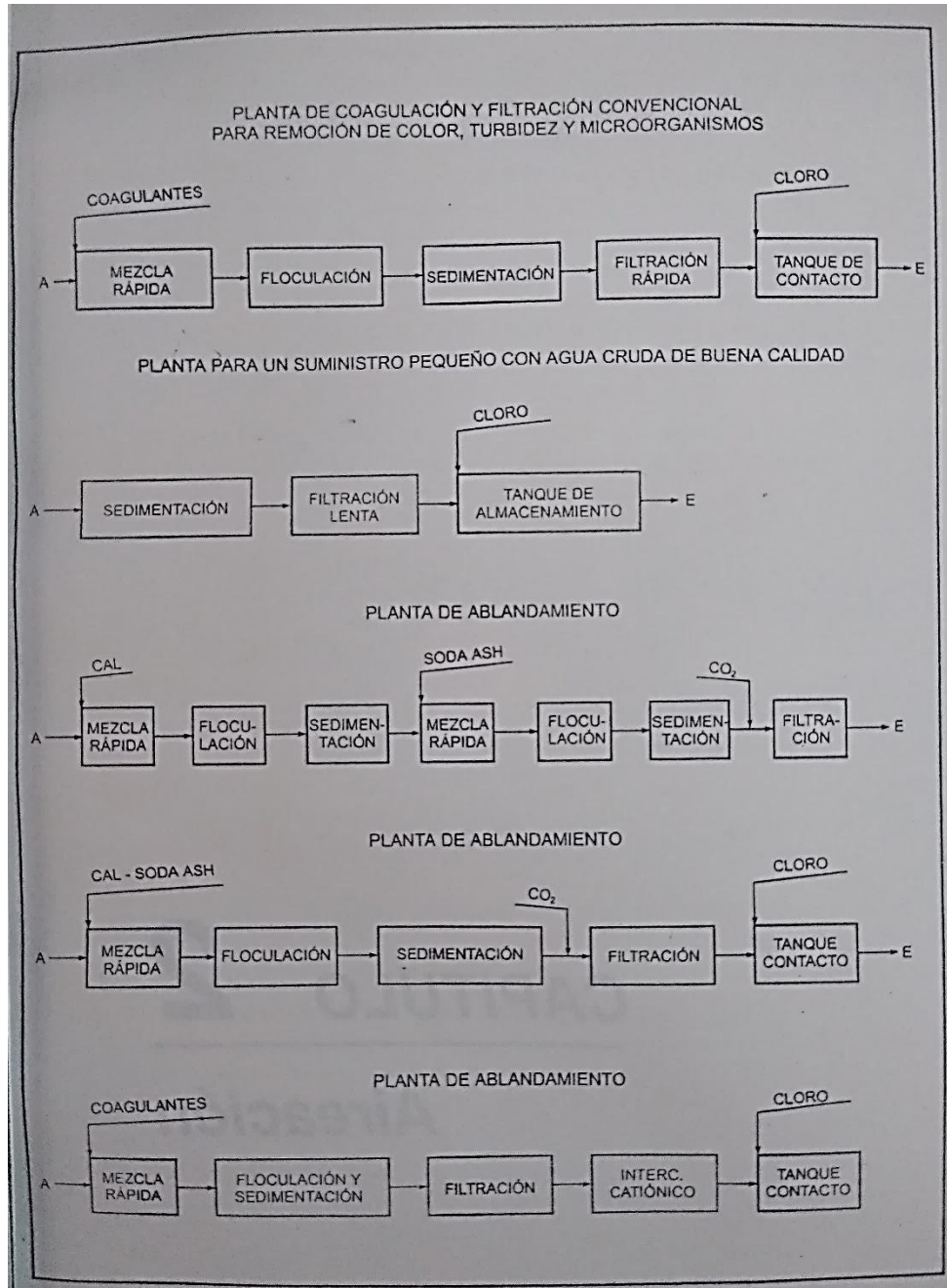


Figura 2 Diagramas de flujo, plantas de purificación, fuente: (Romero, 2000)



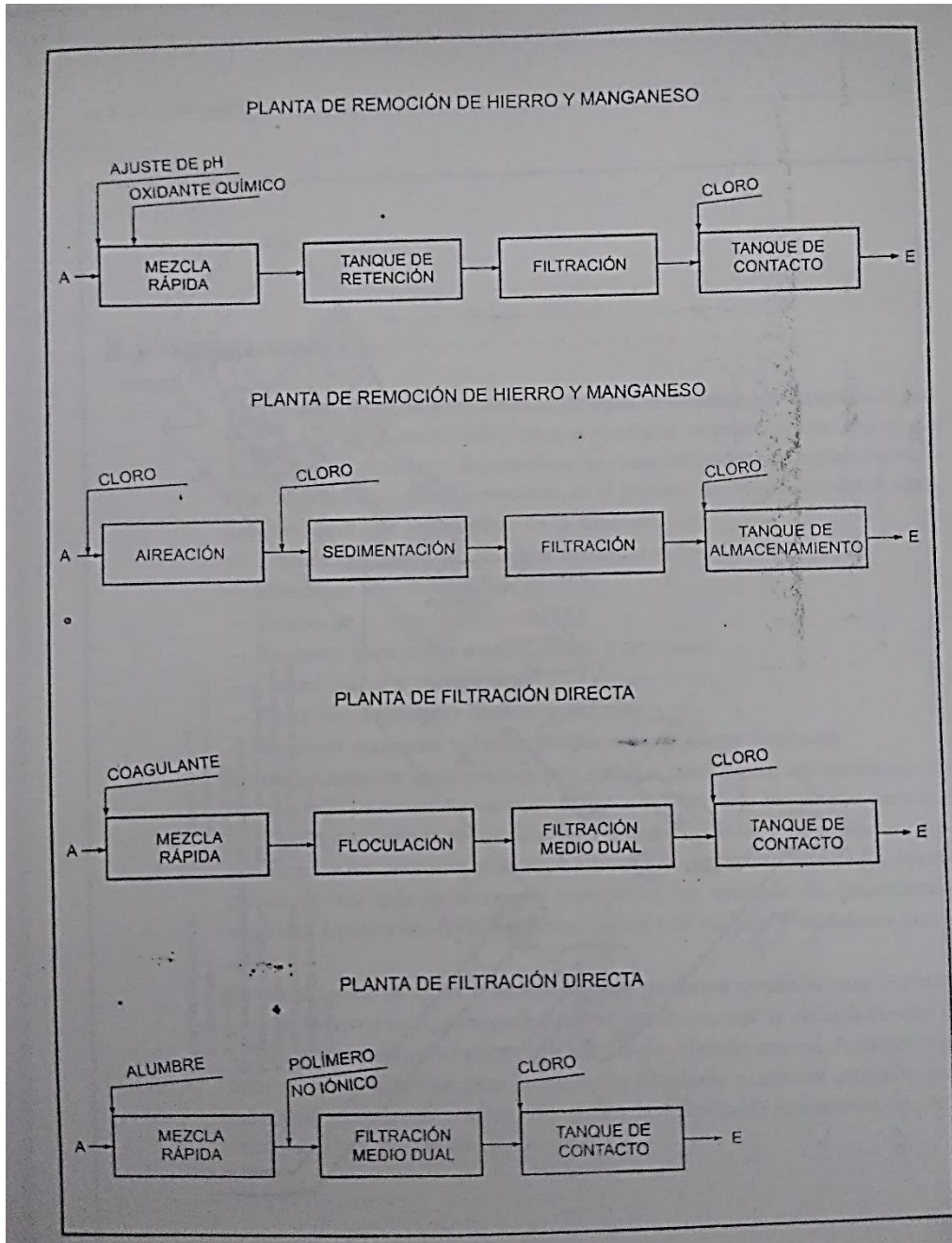


Figura 3 Plantas de remoción de hierro y magnesio, fuente: (Romero, 2000)

## **Consideraciones Generales del Diseño de Sistemas de Potabilización**

Para Romero (2000), El propósito de todo sistema de potabilización es integrar de manera eficaz unidades de tratamiento necesarias para lograr condiciones fisicoquímicas del agua aptas para el consumo humano y sin riesgo a la salud de las poblaciones, todo ello considerando variables de tipo económico y los aspectos sociales de la zona donde se vaya a diseñar y construir el sistema.

El autor Romero (2000), considera importante tener en cuenta los siguientes criterios a la hora del diseño de un sistema de potabilización:

- No existe un problema típico de diseño de una planta de potabilización. En la práctica los proyectos varían desde una pequeña adición a un sistema existente hasta el diseño de un sistema completo.
- El diseñador debe familiarizarse con todas las normas y leyes aplicables al proyecto.
- El tipo de tratamiento depende de la calidad del agua cruda.
- Cuando no existe caracterización fisicoquímica del agua cruda a tratar, se puede tomar de referencia sistemas similares que haya en la zona de diseño.
- La bocatoma debe ser ubicada en una zona que evite al máximo algún tipo de contaminación externa adicional
- EL uso de las recomendaciones y criterios del RAS 2000 es una buena alternativa a la hora de realizar el diseño de un sistema de potabilización.
- Las especificaciones respectivas deben garantizar una construcción económica, pero duradera, teniendo en cuenta que las plantas son usadas por muchos más años que los de su periodo de diseño.

## **Tratamiento de agua potable en comunidades rurales**

Dado que las comunidades rurales se encuentran lejos de los centros poblados, esto hace que de igual manera carezcan de buenos sistemas de tratamiento de agua potable (Pryor, Jacobs, Botes, & Pillay, 1988). Las comunidades rurales no cuentan con el soporte económico para la construcción de sistemas de potabilización a nivel comunitario, estas infraestructuras son construidas o instaladas por entes gubernamentales por lo general, sin la participación activa de la población lo que conlleva a que se presenten problemas de recursos financieros para su operación y mantenimiento, falta de piezas o repuestos, y pocas habilidades técnicas que afectan el sostenimiento en el tiempo de los sistemas (Maryna, Chris, Chris, & Wouter, 2009). A menudo las comunidades rurales emplean tratamiento de materiales suspendidos o flotantes mediante filtros artesanales, en pocas ocasiones emplean proceso de coagulación. En estos casos el funcionamiento y mantenimiento son primordiales y el deterioro o pérdida de los medios filtrantes generan una disminución de la eficiencia del tratamiento; esto sumado a los problemas técnicos y financieros propios de las comunidades rurales afectan en gran manera los procesos de potabilización o en el caso de estas comunidades el proceso de obtener agua segura. También hay una falta de conciencia a los riesgos asociados a la salud la higiene y el manejo de los productos o sistemas de tratamiento. En algunas comunidades después de hacer el retiro manual de materiales flotantes, proceden a realizar proceso de desinfección con pastillas de cloro, esta práctica es muy utilizada en zonas muy apartadas de los centros poblados y que han tomado algo de conciencia sobre la salud de sus hogares. (Sobsey, 2002)

Los enfoques descentralizados del suministro de agua, cubren problemas tanto de calidad como de cantidad e incluyen el uso directo de fuentes de agua alternativas (agua de lluvia o agua subterránea). A pesar de su implementación en algunos países, estas instalaciones y alternativas a menudo tienen un carácter informal y rara vez son aceptadas o apoyadas por los gobiernos locales.

En general, las tecnologías convencionales que se han empleado en las comunidades rurales, se pueden clasificar de la siguiente manera:

- Métodos de tratamiento físico. Filtración convencional, Filtración rápida o filtración lenta de arena.
- Métodos que emplean productos químicos. Coagulación/floculación, cloración y/o adsorción
- Métodos de tratamiento térmico o ligero (ebullición, pasteurización, desinfección solar, desinfección UV y destilación solar).
- Métodos que implican el tratamiento integrado. pequeñas plantas de tratamiento de agua que combinan métodos de tratamiento (Loo, Fane, Krantz, & Lim, 2012) citado en (Gómez, 2017)

La tabla 5 muestra una recopilación de tecnologías de tratamiento de agua potable empleadas en las comunidades rurales, considerando factores como costos, desempeño, mantenimiento, insumos y aceptabilidad social; los sistemas referenciados en la tabla 5 solo consideran el consumo de agua para beber y cocinar.

Luego de evaluar las características principales, de las tecnologías de potabilización de agua en a comunidades rurales, en la siguiente tabla (tabla 6), se describen las fortalezas y debilidades más importantes de cada una de ellas. (Gómez, 2017)

Tabla 5 Tecnologías de tratamiento de agua disponibles para comunidades rurales

Visión general de las tecnologías de tratamiento de agua disponibles para comunidades rurales.								
Sistema de tratamiento de agua	Costo de operación (\$ US)	Desempeño	Facilidad de Uso	Mantenimiento	Sostenibilidad	Insumos requeridos para operación	Aceptabilidad social	Fuente
Agua Hervida con combustible	Depende del precio del combustible	++	+	Depende de la disponibilidad del combustible	-	Combustible	++ tradición	Sobsey, 2002
Desinfección solar	Ninguno	+, cuando la turbiedad es baja	+	Regular	+	Ninguno	-/+	Sobsey, 2002
Desinfección UV con lámparas	10-100	+, cuando la turbiedad es baja	+/requiere entrenamiento	Limpieza, reemplazo anual	-	Electricidad	+	Sobsey, 2002
Cloro libre	1-3	+	+	Regular	-	Ninguno	Problema de sabor	Sobsey, 2002
Filtros lentos	Ninguno	81%-100% Virus -	++	una cada 3 meses	+	Ninguno	+	Kaiser, 2002
Filtros cerámicos	Ninguno	+/virus-	++	Limpieza, reemplazo filtros	+	Ninguno	+	Clasen, 2004
Coagulación, floculación cloración	140-220	+	+/requiere entrenamiento	Regular, consume tiempo	-	Ninguno	Problema de sabor	Sobsey, 2002
Carbón Activado	25-50	+	++	Reemplazo anual	+	Presión	+	WSC, 2007
Microfiltración	12	+/virus-	+/**	Limpieza, reemplazo filtros	-/+	Ninguno	-/+	Lifrestaw, 2008
Ultrafiltración	Ninguno	++	++	Retrolavado	+	Gravedad	+	Lifrestaw, 2008
Osmosis Inversa	80-120	++	++	Requerimiento anual	-	Presión o electricidad	-/+	WSC, 2007

Fuente: (Peter-Varvanets, Zurbrugg, Swartz, Pronk, & Wouter, 2009)

Tabla 6 Fortalezas y debilidades de tecnologías de potabilización de agua en zonas rurales

Principales Tecnologías	Fortalezas	Debilidades	Principales Tecnologías	Fortalezas	Debilidades
Filtro lento	No se requieren productos químicos; fácil de usar; pueden construirse utilizando materiales locales; reducción documentada de protozoos y bacterias; costo único; reducción documentada de los riesgos diarreicos	Eficiencia de la desinfección afectada por la turbidez; tiempo de arranque prolongado (maduración del filtro); bajo rendimiento; requieren mantenimiento regular; mala eliminación de virus; ninguna protección residual; difícil de implementar rápidamente	Desinfección solar	Fácil de usar; esencialmente sin mantenimiento y costo continuo; reducción documentada de las enfermedades diarreicas	Necesidad de la cadena de suministro para botellas de PET; eficacia de la desinfección afectada por muchos factores; largo tiempo de tratamiento; bajo rendimiento; no puede tratar el agua turbia
Filtro presión	Eficaz para reducir la turbidez; alto rendimiento; compacto y fácil de desplegar	Requiere mantenimiento regular; necesita reemplazar los medios filtrantes; propenso a la obstrucción; no es adecuado para el tratamiento de agua de alta turbidez	Desinfección UV	Desinfección rápida; alto rendimiento	No hay protección residual; no puede tratar el agua turbia; costoso; necesidad de reemplazar piezas especializadas
Clarificador	Puede tratar aguas muy turbias; alto rendimiento; elimina los NOM	Larga puesta en marcha; Necesidad de usar productos químicos; necesitan personal especializado para determinar la dosis adecuada de coagulante; problema potencial de eliminación	Filtros cerámicos domésticos	Puede hacerse utilizando materiales disponibles localmente; sencillo; reducción documentada de protozoos y bacterias; la larga vida útil de las CF si no se rompen; mejora visual en el agua tratada	No hay protección residual; lixiviación de algunos metales incluyendo arsénico; bajo rendimiento; propenso a la rotura; requiere mantenimiento regular; calidad variable de las CF producidas; no es eficaz en la eliminación de virus

Principales Tecnologías	Fortalezas	Debilidades	Principales Tecnologías	Fortalezas	Debilidades
Cloración	Proporciona protección residual; barato; reducción documentada de la mayoría de las bacterias, protozoos y virus; mejora documentada de la salud	No hay mejora visible en la calidad del agua; problema potencial del gusto; formación de PAD; eficacia de la desinfección afectada por la turbidez; cryptosporidium no afectado por la cloración; difícil de determinar la dosis adecuada	Membrana de baja presión	Puede desinfectar sin el uso de productos químicos; rendimiento no afectado por la calidad del agua de alimentación; automatización simple potencial; elimina el precursor de la Trihalometanos; compacto y pequeño	Taponamiento, requiere control de la operación, frecuente lavado manual
Combinación coagulación-cloración	Larga vida útil; fácil de transportar; puede usarse para tratar aguas altamente turbias; mejora visible en la calidad del agua; elimina algunos contaminantes químicos (arsénico); elimina los precursores de DBP	Necesidad de la cadena de suministro; múltiples pasos requeridos para el tratamiento; puede no tener suficiente protección residual; problema potencial desechable	Membrana de alta presión	Versátil; bajo consumo de energía para la desalinización; compacto y pequeño	Requiere el almacenaje apropiado de la membrana para el uso intermitente; problema potencial de eliminación de salmuera; extenso tratamiento previo requerido; propenso a fallas operativas debido al uso de piezas de alta presión; tratamiento limitado por la presión osmótica
Adsorción carbón activado	Puede eliminar productos químicos, y sustancias orgánicas	Necesita reemplazo frecuente; no es eficaz para la eliminación microbiana; costoso	Bolsas de filtración RO	Sin necesidad de presión; versátil; menos propensos a la obstrucción / ensuciamiento; sin mantenimiento	Bajo rendimiento; costoso; no produce agua pura sino bebida endulzada; puede ser propenso a crecimiento bacteriano

Fuente: (Gómez, 2017)

### **Demanda del recurso hídrico en el Valle del Cauca**

De acuerdo a la información de CVC (2016), citado en gobernación del valle (2017), el 90% de la población del Valle del Cauca se encuentra ubicada en la cuenca del Río Cauca, la cual dispone del 20% del caudal y representa el 52% del área del departamento. La vertiente del Pacífico con el 10% de la población no utiliza el 80% de los caudales medios anuales que discurren en el Valle del Cauca.

La demanda hídrica está representada por la cantidad de agua requerida para el desarrollo de las diferentes actividades sociales y económicas. En la cuenca del Río Cauca según CVC (2016), citado en gobernación del Valle (2017), hay un total de 8.155 usuarios en lo que corresponde a las fuentes superficiales y el caudal concesionado del agua superficial en las cuencas de la vertiente del río Cauca asciende a 184 m<sup>3</sup>/s, de los cuales el 82% es para el sector agrícola equivalente a 121 m<sup>3</sup>/s y representa el porcentaje más alto de las necesidades hídricas; seguido por el sector de acueducto con el 24%. El sector industrial tiene asignado el 8% (15 m<sup>3</sup>/s) y el sector agropecuario y otros usos 2% (4 m<sup>3</sup>/s). (Gobernación del Valle, 2017).

### **Cobertura de Acueducto en Zona Urbana, Valle del Cauca**

Para realizar el cálculo de las coberturas de los servicios de acueducto y alcantarillado en la zona urbana de los municipios del Valle del Cauca, se tuvo en cuenta la información de suscriptores residenciales urbanos por municipio contenida en el Sistema Único de Información - SUI, dividida entre el número total de predios residenciales urbanos de los municipios, cuya fuente de información en la mayoría de los casos fue el dato de proyección de población del DANE, con base en el censo del 2005, y en muy pocos casos la remisión de información por parte de los municipios.

Para el año 2008 la cobertura promedio ponderada del servicio de acueducto en la zona urbana del departamento del Valle del Cauca fue de 96%, que comparada con el promedio nacional de 94,3% entregado por el censo DANE del 2005 se encuentra un 1,7% por encima del indicador nacional. Esta cobertura promedio para el departamento, si en el cálculo no se considera el municipio de Santiago de Cali (por ser el de mayor tamaño de población) se reduce al 92%. En los cálculos realizados por CINARA, que han considerado la información de los prestadores, se identificó una cobertura del 92,3% para el año 2007, sin incluir el municipio de Cali. Teniendo en cuenta las obras ejecutadas por Vallecaucana de Aguas en la zona urbana se ha logrado incrementar la cobertura en 0,1%, Ver anexo:



Obras ejecutadas y en ejecución. Por lo tanto, la cobertura de acueducto para la zona urbana es de 92,4%. (Gobernación del Valle, 2017).

### **Cobertura de Acueducto en Zona urbana, Valle del Cauca**

La zona rural del departamento del Valle del Cauca tiene una población de 621.133 Hab. habitantes, distribuidos según el antiguo Programa de Abastecimiento de Agua Rural - P.A.A.R., en 1260 localidades. La cobertura de abastecimiento de agua en el sector rural, obtenida en el Departamento del Valle del Cauca, con base en la información recolectada y ajustada del PAP-PDA de Valle del Cauca, es del 72.0%, la cual se tomará como referencia para la estructuración de este documento, variando entre el 100% en Ulloa, Zarzal y Alcalá y el 29% en Buenaventura. Con las obras ejecutadas por el Gestor del PDA se incrementa la cobertura en 1.31%, para una cobertura total de 73,31%. (Gobernación del Valle, 2017)

### **Marco legal**

#### **Aspectos Generales en torno a la Legislación Ambiental**

La Constitución Política de 1991 en su artículo 80, establece que el estado planificará el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales, para garantizar su desarrollo sostenible, su conservación, restauración o sustitución. En su artículo 5, numerales 32 y 33, asigna al Ministerio del Medio Ambiente, hoy Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, la función de promover la formulación de planes de reconversión industrial ligados a la implantación de tecnologías ambientalmente sanas, así como también promover, en coordinación con las entidades competentes y afines, la realización de programas de sustitución de los recursos naturales no renovables, para el desarrollo de tecnologías de generación de energías no contaminantes ni degradantes.

Por medio de la Ley 99 del 93 en el artículo 1, se presentan los principios ambientales de interés para la nación, entre los cuales se destacan el literal 1, que indica que el proceso de desarrollo económico y social del país se orientará según los principios universales y del desarrollo sostenible contenidos en la Declaración de Río de Janeiro de junio de 1992 sobre Medio Ambiente y Desarrollo, y el literal 2, La biodiversidad del país, por ser patrimonio nacional y de interés de la humanidad, deberá ser protegida prioritariamente y aprovechada en forma sostenible.

Colombia por medio de la Ley 164 de 1994, aprueba la convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, los países que asumieron el compromiso de la convención, deben tomar acciones de precaución para prever, prevenir o reducir al mínimo las causas del cambio climático y mitigar sus efectos adversos.

### **Legislación Ambiental Asociada a los Sistemas de Potabilización en Colombia**

La legislación conexas al problema de estudio se muestra explícita en las tablas de la 7 a la 10.

*Tabla 7 Leyes en materia ambiental conexas al problema de estudio*

<b>Normatividad</b>	<b>Año</b>	<b>Descripción</b>
<b>Leyes</b>		
<b>Ley 23</b>	1973	Por el cual se conceden facultades extraordinarias al presidente de la República para expedir el Código de Recursos Naturales y de Protección al Medio Ambiente y se dictan otras disposiciones.
<b>Ley 9</b>	1979	Por la cual se dictan Medidas Sanitarias.

<b>Ley 99</b>	1993	Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA y se dictan otras disposiciones.
<b>Ley 142 de 1994</b>	1994	Por la cual se establece el régimen de los servicios públicos domiciliarios de acueducto, alcantarillado, aseo, energía eléctrica, distribución de gas combustible, telefonía pública básica conmutada y la telefonía local móvil en el sector rural; a las actividades que realicen las personas prestadoras de servicios públicos.
<b>Ley 373</b>	1997	Por la cual se establece el programa para el uso eficiente y ahorro del agua.
<b>Ley 689</b>	2001	Por la cual se modifica parcialmente la Ley 142 de 1994.

*Tabla 8 Decretos en materia ambiental conexas al problema de estudio*

<b>Decretos</b>		
<b>Decreto 2811</b>	1974	Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente
<b>Decreto 1541</b>	1978	Por el cual se reglamenta la Parte III del Libro II del Decreto-Ley 2811 de 1974: "De las aguas no marítimas" y parcialmente la Ley 23 de 1973.
<b>Decreto 1594</b>	1984	Por el cual se establece el Sistema para la Protección y Control de la Calidad del Agua para Consumo humano
<b>Decreto 302</b>	2000	Por el cual se reglamenta la Ley 142 de 1994, en materia de prestación de los servicios públicos domiciliarios de acueducto y alcantarillado.
<b>Decreto 1729</b>	2002	Por el cual se reglamenta la Parte XIII, Título 2, Capítulo III del Decreto-ley 2811 de 1974 sobre cuencas hidrográficas, parcialmente el numeral 12 del artículo 5° de la Ley 99 de 1993 y se dictan otras disposiciones.
<b>Decreto 155</b>	2004	Por el cual se reglamenta el artículo 43 de la Ley 99 de 1993 sobre tasas por utilización de aguas y se adoptan otras disposiciones.
<b>Decreto 1599</b>	2005	Por el cual se establece el Sistema para la Protección y Control de la Calidad del Agua para Consumo humano
<b>Decreto 2323</b>	2006	Por el cual se reglamenta parcialmente la ley 09 de 1979 en relación con la Red Nacional de Laboratorios y se dictan otras disposiciones.

<b>Decreto 1575</b>	2007	Por el cual se establece el Sistema para la Protección y Control de la Calidad del Agua para Consumo Humano
<b>Decreto 3930</b>	2010	Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9ª de 1979, así como el Capítulo II del Título VI -Parte III- Libro II del Decreto-ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos y se dictan otras disposiciones.
<b>Decreto 3050</b>	2013	Por el cual se establecen las condiciones para el trámite de las solicitudes de viabilidad y disponibilidad de los servicios públicos domiciliarios de acueducto y alcantarillado.
<b>Decreto 943</b>	2014	Por el cual se actualiza el Modelo Estándar de Control Interno – MECI

*Tabla 9 Resoluciones en materia ambiental conexas al problema de estudio*

<b>Resoluciones</b>		
<b>Resolución 2145</b>	2005	Por la cual se modifica parcialmente la Resolución 1433 de 2004 sobre Planes de Saneamiento y Manejo de Vertimientos, PSMV.
<b>Resolución 154</b>	2014	Por la cual se adoptan los lineamientos para la formulación de los Planes de Emergencia y Contingencia para el manejo de desastres y emergencias asociados a la prestación de los servicios públicos domiciliarios de acueducto, alcantarillado y aseo y se dictan otras disposiciones.
<b>Resolución 0631</b>	2015	Por la cual se establecen los parámetros y valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones.

*Tabla 10 Circulares, estatutos y Normas técnicas aplicables al problema de estudio*

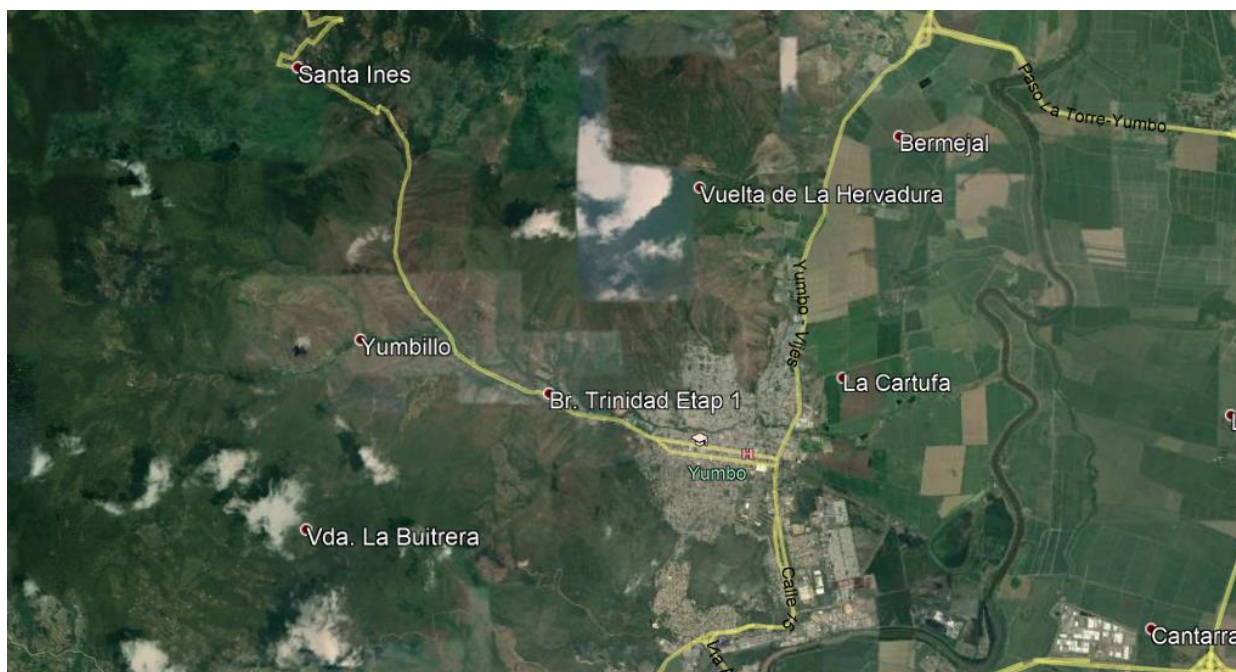
<b>Circulares y Estatutos</b>		
<b>Circular 04</b>	2006	Superintendencia de servicios públicos domiciliarios comisión de regulación de agua potable y saneamiento básico.
<b>Normas Técnicas Colombianas</b>		
<b>Norma técnica colombiana NTC 5767- 10</b>	1995	Técnicas de muestreo de aguas residuales domésticas e industriales.

<b>GTC 31</b>	1996	Describe el método para detectar y determinar el efecto agudo en organismos, ante la presencia de sustancias tóxicas o mezcla de ellas, contenidas en las aguas naturales o residuales y permite obtener el límite o cantidad máxima que pueden soportar los organismos, conocida como concentración letal media
<b>Norma técnica colombiana NTC ISO IEC 1702</b>	2005	Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y de calibración.
<b>Manual técnico del meci</b>	2014	Manual técnico de control estándar de control interno para el estado colombiano Meci 2014.

## Metodología

### Área de Estudio

La Vereda el Choco se encuentra ubicado en el piedemonte de la cordillera occidental, al sur del Municipio de Yumbo, y colinda con los corregimientos de La Paz y Golondrinas los cuales pertenecen al Municipio de Santiago de Cali. Cuenta con una superficie de 363 hectáreas y una población de 350 habitantes. Se caracteriza por poseer un paisaje montañoso el cual es considerado como el principal atractivo turístico y por haber surtido un proceso de poblamiento tardío. Las principales actividades de ocupación de la población son la minería, la extracción de carbón y en menor escala, la producción agrícola en parcelas. Sobre la vertiente occidental, se reportan deterioro de los ecosistemas, debido a los procesos de erosión producidos por los usos inadecuados del suelo. La ubicación del área de estudio se muestra en la Figura 4.



*Figura 4 Área de estudio: zona rural del municipio de Yumbo, El Choco*

El diseño de la planta se inició conociendo la población futura, para ello fue necesario la recolección de los datos demográficos de población disponibles en el portal público de la Alcaldía de Yumbo.

### **Uso del Suelo y Clima en la Vereda El Chocho**

El uso de suelo en la Vereda el Chocho ha sufrido en los últimos años fuertes cambios, en lo relacionado con las áreas destinadas a la protección de cuencas y producción agrícola, debido principalmente al auge de la construcción de casas de veraneo, lo que ha generado conflictos ambientales, principalmente por el deterioro de las áreas de protección de cuencas, por la demanda creciente de agua y el manejo inadecuado de las aguas residuales y residuos sólidos, lo que impacta negativamente el paisaje. Este sector cuenta con condiciones óptimas para el establecimiento de cultivos de hortalizas, aromáticas, café, musáceas, cultivos semestrales, caña panelera, bosque protector productor.

La cuenca donde se encuentra el corregimiento Santa Inés con la vereda el Chocho tiene orientación occidente-oriente, proporcionando una mayor duración de la exposición solar, disponiendo de mayor cantidad de energía lo que incide directamente en el incremento de temperatura y con ello mayor evaporación. La localización geográfica influye en el grado de exposición a corrientes de aire, que varían de acuerdo a la altitud y la latitud.

En la cuenca se localizan las estaciones climatológicas: La Buitrera, con datos de precipitación, evaporación, temperatura, brillo solar y humedad relativa; la estación pluviográfica Santa Inés, donde se mide precipitación y, Yumbillo que es una estación pluviométrica.

### **Cuenca Principal de abastecimiento de agua**

**Localización:** Ubicada en la parte alta, zona central del Municipio. Colinda por el norte con el

corregimiento de Montañitas, por el oriente con la zona nororiental, con los del casco urbano del Municipio. Por el occidente con el Municipio de la Cumbre, corregimiento de Bitaco, por el sur con las zonas sur oriental y sur occidental

**Clima.** Templado, Temperatura promedio 20°C, humedad relativa 80%, vientos moderados y húmedos.

**Precipitación.** Promedio de 1450 mm/año. Las lluvias son de carácter estacionario, vientos moderados y fríos.

**Nivel freático.** Profundo.

**Calidad del suelo.** Suelos de origen volcánico, oscuros, poca retención de humedad, Los suelos de las veredas de Santa Inés. El Chocho, Telecom son suelos jóvenes de alta meteorización de rocas diabásicas.

**Profundidad.** La zona de ladera pendiente cuenta con suelos menores a 1 m, en la zona meteorizada.

**Textura.** Franco arcilloso en su mayoría, con tendencia franca.

**Fertilidad.** La mayor parte de los suelos son de baja fertilidad Los cuales se consideran de mediana fertilidad.

**Pequeños productores:** 30%

**Tenencia de la tierra:** 10%

**Área utilizada promedio:** 50% ocupada principalmente por cultivos perennes en bajo rendimiento.

**Intensificación tecnológica:** 20% Poseen muy pocos equipos y recursos financieros.

**Nivel de ingresos.** 67% reciben menos del mínimo. 20% el mínimo y el 13% más de 2 salarios mínimos.

**Rubros productivos.** El Turismo aporta 20% de los ingresos principalmente en Sta. Inés y



Chocho y Telecom. Actividad pecuaria poco desarrollada, 22% sistema productivo extensivo.

### **Sistema de abastecimiento de agua**

La vereda del Chocho cuenta aproximadamente con 350 habitantes (sin considerar la población flotante) que requieren de un suministro de agua potable para satisfacer sus necesidades diarias; la fuente de abastecimiento de agua para consumo humano es la quebrada Santa Inés, quebrada que sufre algunas afectaciones desde su nacimiento hasta el punto de captación, como lo son: vertimiento de aguas residuales, pérdida de caudal en temporada seca, pastoreo y de acuerdo a los análisis fisicoquímicos que ha realizado la empresa de servicios públicos de Yumbo ESPY, tiene problemas de turbiedad y mala calidad bacteriológica; el caudal asignado por la ESPY para esta vereda es de 0,8 l/s, sin embargo, la captación que hacen actualmente es de 0,4 l/s; algunas características ambientales de la fuente de abastecimiento de muestran en la siguiente tabla.

*Tabla 11 Aspectos ambientales de la fuente de abastecimiento, Vereda El Chocho*

<b>ASPECTOS AMBIENTALES FUENTE DE ABASTECIMIENTO DE AGUA VEREDA EL CHOCHO</b>	
<i>Corregimiento</i>	<i>Santa Inés</i>
<i>Vereda</i>	<i>El chocho</i>
<i>Razón social de la asociación</i>	<i>Asociación comunitaria del servicio de agua el chocho ASOAGUAS CHOCHO</i>
<i>Cuenca</i>	<i>Yumbo</i>
<i>Tipo de sistema de abastecimiento</i>	<i>Gravedad</i>
<i>Topografía</i>	<i>Pendiente mediana</i>
<i>Clima</i>	<i>Templado</i>
<i>Nombre de la (s) Fuente (s)</i>	<i>Quebrada Santa Inés</i>
<i>Estado de la microcuenca</i>	<i>Poca agua</i>
<i>Distancia aprox. de la microcuenca a la localidad (km)</i>	<i>9 kilómetros</i>
<i>Tipo de Fuente</i>	<i>Superficial</i>
<i>Caudal (l/s) otorgado</i>	<i>0.80 L/s</i>
<i>Caudal (l/s) Captado</i>	<i>0.40 L/s</i>
<i>Variación de caudal de la fuente</i>	<i>Si</i>
<i>Periodo</i>	<i>Verano</i>

<i>Variación de calidad de la fuente</i>	<i>Si</i>
<i>Periodo</i>	<i>Invierno</i>
<i>Usos de Suelo</i>	<i>Bosque natural</i>
<i>Tipo de Vegetación de la Microcuenca</i>	<i>Bosque</i>
<i>Propiedad de Terrenos</i>	<i>Municipio y Privados</i>
<i>Margen de la Fuente protegida</i>	<i>No</i>
<i>Indicios de deforestación</i>	<i>Si</i>
<i>Presencia de quemas</i>	<i>No</i>
<i>Presencia de animales (pastoreo)</i>	<i>Si</i>
<i>Presencia de cultivos</i>	<i>No</i>
<i>Fumigación de cultivos</i>	<i>No</i>
<i>Descargas de aguas residuales domesticas</i>	<i>Si</i>
<i>Presencia de explotación minera</i>	<i>No</i>
<i>Existe Control comunitario</i>	<i>No</i>
<i>Problemas de socavación en el cauce</i>	<i>No</i>
<i>Calidad del agua fisicoquímica TURBIEDAD, COLOR APARENTE</i>	<i>Turbiedad</i>
<i>Calidad del agua bacteriológica</i>	<i>Riesgo Mala</i>
<i>Existe plan de manejo de la cuenca</i>	<i>No</i>
<i>Tiene alcantarillado</i>	<i>No</i>
<i>Tiene STAR funciona</i>	<i>No</i>

Fuente: Empresa de Servicios Públicos de Yumbo (ESPY, 2016)

La vereda El Chocho cuentan actualmente con un pequeño sistema de tratamiento primario que consta de una unidad de captación con rejilla, un desarenador y líneas de conducción en tubería flexible; este sistema no satisface las necesidades de la comunidad y tampoco entrega agua potable a la luz de la resolución 2115 de 2007, la mayoría de las familias emplean pastas de cloro para realizar el proceso de desinfección del agua y así poderla usar para el consumo diario. Dentro de las necesidades reportadas por la comunidad frente al abastecimiento de agua están: compra de terrenos para protección de la fuente de abastecimiento, diseño y construcción del sistema de tratamiento de agua potable, aislamiento y reforestación de la quebrada Santa Inés.

### **Necesidades Prioritarias en la Vereda el Chocho**

- La deficiencia en el suministro y tratamiento de agua.
- Renuencia a la adopción tecnologías apropiadas para realizar cultivos en zonas de

ladera, por parte de los productores.

- Incipiente acceso directo a los canales de comercialización.
- Ausencia de estrategias de acopio para la producción resultante.
- Intervención de zonas protectoras y productoras de agua, como consecuencia de la ampliación de la frontera agrícola.
- Vulnerabilidad de las zonas boscosas a los incendios forestales.
- Presencia de intermediarios en la zona, excluyendo a los productores.
- No hay prácticas de renovación de plantas madres en el cultivo de plantas aromáticas

## **Aspectos Generales para el Diseño de Estructuras Civiles de Potabilización**

### **Población de Diseño**

El método geométrico fue la metodología de cálculo seleccionada para el contexto de aplicación, para un nivel de complejidad del sistema bajo, toda vez que representa la dinámica de crecimiento de la Vereda el Chocho, además que el método es aplicable a poblaciones con características potenciales a cubrir las áreas de expansión y con un apreciable desarrollo.

Los cálculos se realizaron a partir de las siguientes fórmulas:

$$Pf = P_{uc} * (1 + r)^{T_f - T_{uc}} \quad \text{Ecuación 1}$$

$$r = \left( \frac{P_{uc}}{P_{ci}} \right)^{1/(T_{uc} - T_{ci})} - 1 \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

**Pf:** población final

**Puc:** población último censo

**R:** tasa de crecimiento de la población

**Tf:** año censo anterior

**Tuc:** año último censo

## Cálculo de la Dotación

A partir de los datos de población, se determinó el nivel de complejidad del sistema, utilizando los criterios descritos en el título A del RAS (2017), tabla 12, como se indica a continuación:

*Tabla 12 Nivel de complejidad del sistema*

Nivel de complejidad	Población en la zona urbana (1) (habitantes)	Capacidad económica de los usuarios (2)
Bajo	< 2500	Baja
Medio	2501 a 12500	Baja
Medio Alto	2501 a 12500	Media
Alto	> 60000	Alta

Fuente: RAS (2017)

Notas: (1) Proyectado al periodo de diseño, incluida la población flotante.

(2) Incluye la capacidad económica de población flotante. Debe ser evaluada según metodología del DNP.

Una vez se definió el nivel de complejidad, se continuó con la determinación del periodo de diseño, el cual resulta necesario para conocer el tiempo en el cual los componentes del sistema permiten atender la demanda proyectada. (Tabla 13)

*Tabla 13 Periodo de diseño*

Nivel de Complejidad del sistema	Período de diseño máximo
Bajo, Medio y Medio alto	25 años
Alto	30 años

En definitiva, para conocer la cantidad de agua requerida por la población de la Vereda el Chocho, se tuvo en cuenta el artículo 67 de la Resolución 2320 de 2009, en donde la dotación neta máxima se seleccionó de acuerdo con el nivel de complejidad y el clima del sitio donde se ubicará la planta de potabilización (Tabla 14):

*Tabla 14 Dotación neta máxima*

<i>Nivel de complejidad del sistema</i>	<i>Dotación neta máxima para poblaciones con Clima Frío o Templado (L/hab.día)</i>	<i>Dotación neta máxima para poblaciones con Clima Cálido (L/hab.día)</i>
Bajo	90	100
Medio	115	125
Medio alto	125	135
Alto	140	150

Adicionalmente, se tuvieron en cuenta dos importantes especificaciones aportadas por la norma de referencia, la primera en la cual se indica que la dotación neta no contempla las pérdidas que pueden ocurrir en el sistema; y la segunda con la clasificación de las poblaciones de la siguiente forma: poblaciones de "Clima Frío o Templado" son aquellas ubicadas a una altura superior a 1.000 msnm y las poblaciones con "Clima Cálido" son aquellas ubicadas a una altura inferior o igual a 1.000 msnm.

Por su parte, la dotación bruta considera para su cálculo el porcentaje de pérdidas que ocurran en el sistema de acueducto, a través de la siguiente ecuación:

$$D_{bruta} = d_{neta} / (1 - \% p) \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

**Dbruta:** dotación bruta

**Dneta:** dotación neta

**%p:** pérdidas técnicas máximas admisibles (en la ecuación anterior no deberá superar el 25%).

### Caudal de diseño

La cantidad de agua que requiere la población de la Vereda el Chocho, en un determinado periodo de tiempo, se calculó teniendo en cuenta el caudal medio diario (Qmd), el caudal máximo diario (QMD), y el caudal máximo horario (QMH), de acuerdo con las siguientes ecuaciones:

- *Caudal medio diario (Qmd)*

$$Q_{md} = \frac{P * D_{bruta}}{86400} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

**Qmd:** caudal medio diario

**D<sub>bruta</sub>:** dotación bruta, dada en metros cúbicos/suscriptor mes.

- *Caudal máximo diario (QMD)*

$$Q_{MD} = Q_{md} * K_1 \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde:

**QMD:** caudal máximo diario

**Qmd:** caudal medio diario

**k<sub>1</sub>:** coeficiente de consumo máximo diario

- *Caudal máximo horario (QMH)*

$$QMH = QMD * K_2 \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde:

**QMH:** caudal máximo diario

**QMD:** caudal máximo diario

$K_2$ : coeficiente de consumo máximo horario (comprendido entre 1.3 y 1.7)

## **Diseño Metodológico**

El enfoque de este estudio de investigación es mixto, en donde se recolectó y usó información cualitativa y cuantitativa, siendo un tipo de investigación descriptiva; por tanto, se presenta la metodología que se empleó en este trabajo que se componen de las siguientes etapas para el logro de los objetivos trazados:

La metodología que se desarrolló consta de tres fases a saber: 1) análisis, 2) Planeación y ejecución, y 3) Evaluación y realimentación (Saavedra Díaz & Perevochtchikova, 2017)

### **Fase I: Análisis.**

En esta fase se realizó la consecución de la información primaria y secundaria asociada al proyecto. Por un lado, la información primaria se obtuvo de los expertos en torno a las diferentes alternativas de potabilización a considerar en el presente proyecto, esto mediante entrevistas por separado a cada profesional. Las entrevistas estuvieron básicamente enfocadas a la delimitación de los criterios que se consideraron a la hora de seleccionar las opciones o alternativas para el contexto de estudio. Las entrevistas fueron dirigidas a profesionales del campo de la ingeniería ambiental, la arquitectura, la administración y la economía, tanto para la selección del criterio, así como en la designación de pesos porcentuales de cada uno (lo cual se define más adelante en la descripción del

método TOPSIS). La información secundaria se obtuvo principalmente en torno a las condiciones biofísicas del área de estudio, esto es en cuanto su topografía, área, clima, acceso a vías principales, estado de las vías, disponibilidad de materia primas, mano de obra etc.

## **Fase II: Planeación y ejecución.**

Una vez se obtuvo la información contextual y las alternativas energéticas definidas, se procedió a implementar un Análisis multicriterio mediante la rutina TOPSIS. Para ello, previamente se definieron los criterios a partir de la opinión de expertos académicos en las cuatro áreas fundamentales (Ingeniería ambiental, administración, economía, arquitectura), con experiencia en el sector de diseño en estructuras de sistemas de potabilización.

Esta técnica de análisis de TOPSIS se seleccionó por la practicidad en cuanto a la ponderación de los criterios de selección, además que requiere de elementos de decisión con categorías semánticas y conceptuales aplicables al contexto de la ingeniería ambiental. Por otro lado, la revisión de la literatura ha demostrado que TOPSIS permite realizar procesos de selección de tecnologías ampliamente aplicables en el contexto latinoamericano (Guillaume & Charnomordic, 2011) .

Teniendo en cuenta lo mencionado por Qureshi, M.N., Singh, R.K. & Hasan y Riesgo L., Gallego-Ayala J., se delimitaron a un total de 3 grupos de criterios (Ambiental, Social y Económico). Posteriormente, se procedió a definir las características de las alternativas.

Posteriormente se realizó la determinación de pesos mediante el Proceso de Análisis Jerárquico (AHP), la cual es una metodología que ha sido ampliamente usada para este fin, permite medir criterios cuantitativos y cualitativos mediante una escala común, que incluye la participación de un



grupo interdisciplinario y verificación mediante un índice de consistencia de las calificaciones otorgadas. Esta metodología se usó para la determinación de pesos de los criterios, previo al uso de TOPSIS. Seguidamente se conformó el grupo de expertos, el cual estaba conformado por un grupo interdisciplinario de mínimo tres personas, entre los cuales se tuvieron miembros del sector académico, tecnológico, económico y administrativo (Osorio and Orejuela, 2008).

Se calificó entre pares de criterios la preferencia relativa o importancia que tiene cada criterio con respecto a otro, mediante el diligenciamiento instrumento de captura, digital o físico dependiendo de la preferencia del experto al cual se le realizó la consulta. La escala de calificación a usar es la propuesta por Saaty (Ver Tabla 15) para el método AHP.

*Tabla 15 Escala de Saaty*

Valor	Definición	Comentario
1	Igual importancia	A y B tienen la misma Importancia
3	Importancia moderada	A es ligeramente más importante que B
5	Importancia grande	A es más importante que B.
7	Importancia muy grande	A es mucho más importante que B
9	Importancia extrema	A es extremadamente más importante que B.

### **Fase III: Evaluación y realimentación.**

El método seleccionando que se utilizó es TOPSIS, un método de decisión multicriterio de ordenación para identificar las soluciones de un conjunto finito de alternativas. El principio básico es que la alternativa elegida debe tener la menor distancia a la solución ideal positiva y la mayor distancia a la solución ideal negativa. Una solución ideal se define como una colección de puntuaciones o valores en todos los atributos considerados en la decisión, pudiendo suceder en algunos casos que tal solución sea inalcanzable.

Una vez seleccionada la alternativa, se procedió a realizar el diseño de las estructuras que conforman el sistema de tratamiento de agua potable, esto siguiendo las especificaciones del RAS 2017, esto con el propósito final de describir detalladamente las especificaciones técnicas de implementación de la alternativa seleccionada para el área de estudio.

### **Resultados y Análisis**

A continuación, se aporta el consolidado de los resultados encontrados por cada fase metodológica abordada en el capítulo anterior.

#### **Tratamiento de la Información**

Los criterios fueron definidos a partir de la opinión de expertos académicos en las cuatro áreas fundamentales (Arquitectónica, Ambiental, Social y Económica), con experiencia en el sector de consultoría ambiental; se revisaron las alternativas energéticas de acuerdo al plan Nacional de Desarrollo en torno a fuentes energéticas no convencionales, a fin de identificar la disponibilidad de información y en ese sentido la viabilidad de los criterios inicialmente planteados.

Teniendo en cuenta lo mencionado por Qureshi, M.N., Singh, R.K. & Hasan (2017) y Riesgo L., Gallego-Ayala J. (2015), se delimitaron a un total de 3 criterios (Ambiental, logístico y Económico), en los cuales están incluidos 12 sub- criterios, que fueron definidos como se presenta a continuación:

*Tabla 16 Criterios de selección*

Tipo de criterio	Criterio	Unidad	Rótulo
Económico	Costos de implementación	Pesos Col	C1
	Costos de operación	Pesos Col	C2
	Periodo de retorno de la inversión	Años	C3
Logístico	Tipo de operación	Escala Automática (1) manual (0)	C4
	Periodicidad del mantenimiento	Meses	C4
	Área	Metros cuadrados	C5
	Vida útil de la alternativa	Años	C6
Ambiental	Sostenibilidad	Escala: Sostenible (2) poco S (1) Insostenible (0)	C7
	Impacto a los ecosistemas	Escala: Impacto bajo (0), moderado (1) alto (2)	C8
	Rendimiento	L/s	C9
	Costo de mantenimiento	Pesos Col	C10
	Beneficios tributarios	%	C11

### **Delimitación de Alternativas**

Inicialmente las alternativas energéticas contempladas para este estudio fueron: Gas natural, energía a partir de biomasa, energía solar, energía eólica y biodigestión. A pesar de ello, la alternativa de biodigestión se retiró de las opciones a considerar debido a las restricciones procedentes de las fuentes de materia prima para alimentar los eventuales biodigestores, aspecto que no se encuentra disponible en el área de estudio pactada.

### **Selección del Método**

La determinación de pesos se realizará mediante el Proceso de Análisis Jerárquico (AHP), la cual es una metodología que ha sido ampliamente usada para este fin (Avendaño Ruiz, Astorga Ceja, & Acosta Martínez, 2013), (N. Qureshi, Karan Singh, & Abul Hasan, 2017), (Berumen & Llamazares Redondo, 2007), permite medir criterios cuantitativos y cualitativos mediante una escala común, que incluye la participación de un grupo interdisciplinario y verificación mediante un índice de

consistencia de las calificaciones otorgadas. Esta metodología es usada para la determinación de pesos de los criterios, previo al uso de TOPSIS (IDEAM, 2018), (Garmendia, 2012), (Naciones Unidas, 1998).

### **Definición de grupo de expertos**

El grupo de expertos estará conformado por un grupo interdisciplinario compuesto por tres personas, cuya función será la de ponderar en términos porcentuales el peso de cada criterio. Esta ponderación se efectuó mediante una reunión participativa en donde los tres expertos deliberaron en función de las alternativas y los criterios mencionados en el numeral 6.1 y la tabla 16 respectivamente. A continuación, se relaciona el nombre y formación de cada experto acompañado por su respectivo CvLAC:

Aspecto económico: Ángel Alberto Triana, profesional en salud ocupacional CvLAC:

[https://scienti.minciencias.gov.co/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod\\_rh=0001630943](https://scienti.minciencias.gov.co/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod_rh=0001630943)

Aspecto Logístico. Reynaldo Aparicio Rengifo, Arquitecto, Magister en Urbanismo. CvLAC:

[http://scienti.colciencias.gov.co:8081/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod\\_rh=0001551904](http://scienti.colciencias.gov.co:8081/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod_rh=0001551904)

Aspecto Ambiental: Juan Guillermo Popayán-Hernández, Ingeniero Ambiental, Magister en Ingeniería Ambiental. Doctorando en Ciencias Ambientales. CvLAC:

[https://scienti.minciencias.gov.co/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod\\_rh=0001387403](https://scienti.minciencias.gov.co/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod_rh=0001387403)

### **Captura de Calificación de Importancia de los Criterios**

Se calificará entre pares de criterios la preferencia relativa o importancia que tiene cada criterio con respecto a otro, mediante el diligenciamiento instrumento de captura, el cual podrá ser digital o físico dependiendo de la preferencia del experto al cual se le realice la consulta. La escala de

calificación a usar es la propuesta por Saaty (Ver Tabla 15) para el método AHP (Delgado and Romero, 2015).

### **Matriz de Priorización de Alternativas**

El método seleccionando que se utilizará es TOPSIS es un método de decisión multicriterio de ordenación para identificar las soluciones de un conjunto finito de alternativas. El principio básico es que la alternativa elegida debe tener la menor distancia a la solución ideal positiva y la mayor distancia a la solución ideal negativa. Una solución ideal se define como una colección de puntuaciones o valores en todos los atributos considerados en la decisión, pudiendo suceder en algunos casos que tal solución sea inalcanzable.

### **Resultados**

De acuerdo a las características del área de estudio, el nivel de complejidad, el periodo de diseño y las consideraciones sociodemográficas, las alternativas propuestas para el diseño del sistema de potabilización son las siguientes:

Alternativa 1 (A1): El tren de tratamiento consistirá en un sistema de captación, un sedimentador, una filtración lenta, cloración mediante pastillas y un sistema de almacenamiento.

Alternativa 2 (A2): El tren de tratamiento consistirá en un sistema de captación, un sistema de mezcla rápida mediante alabes, un tanque de floculación, una filtración rápida y un tanque de contacto, finalmente un sistema de almacenamiento.

Alternativa 3 (A3): El tren de tratamiento consistirá en un sistema de captación, un tanque desarenador, un sistema simultaneo de coagulación-floculación, un sedimentador, un filtro de alta tasa, un sistema de cloración automático y un tanque de almacenamiento.

Alternativa 4: El tren de tratamiento consistirá en un sistema de captación, un filtro, un sedimentador, floculador, desarenador, mezcla rápida para cloración y un tanque de almacenamiento.

Estas alternativas se contrastaron contra una serie de criterios necesarios para el diseño, los cuales se muestran en la tabla 16

*Tabla 16 Criterios de selección*

Tipo de criterio	Criterio	Unidad	Rótulo
Económico	Costos de implementación	Pesos Col	C1
	Costos de operación	Pesos Col	C2
	Periodo de retorno de la inversión	Años	C3
Logístico	Tipo de operación	Escala Automática (1) manual (0)	C4
	Periodicidad del mantenimiento	Meses	C4
	Área	Metros cuadrados	C5
	Vida útil de la alternativa	Años	C6
Ambiental	Sostenibilidad	Escala: Sostenible (2) poco S (1) Insostenible (0)	C7
	Impacto a los ecosistemas	Escala: Impacto bajo (0), moderado (1) alto (2)	C8
	Rendimiento	L/s	C9
	Costo de mantenimiento	Pesos Col	C10
	Beneficios tributarios	%	C11

A continuación, se muestra la matriz de decisión inicial con su respectiva ponderación porcentual y los criterios (ver tabla 18). Los aspectos contemplados en la tabla 18 fueron obtenidos a partir de la entrevista no estructurada a los expertos consultados.

Tabla 17 Matriz de decisión

Pesos (%)	14,00	7,00	11,00	8,00	9,00	1,00	7,00	6,00	16,00	12,00	9,00
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11
A1	9000000	170000	9	4	1	8	1	1	1,3	2000000	3
A2	12000000	500000	8	6	8	5	0	1	1	1000000	4
A3	15200000	190000	4	9	4	17	2	0	2	2000000	25
A4	1900000	120000	6	8	3	6	1	1	1,1	2200000	6

Para tratar los datos, la matriz se normaliza (Tabla 19) y se pondera (Tabla 20). La normalización se realiza de acuerdo a los umbrales de la ley de Taylor, en este caso, elevando al cuadrado el conjunto de datos presentado en la tabla 10.

Tabla 18 Matriz Normalizada

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11
A1	8,1E+13	28900000000	81	16	1	64	1	1	1,69	4E+12	9
A2	1,44E+14	2,5E+11	64	36	64	25	0	1	1	1E+12	16
A3	2,3104E+14	36100000000	16	81	16	289	4	0	4	4E+12	625
A4	3,61E+12	14400000000	36	64	9	36	1	1	1,21	4,84E+12	36
Suma	4,5965E+14	3,294E+11	197	197	90	414	6	3	7,9	1,384E+13	686
Raiz	21439449,6	573933,7941	14,0356688	14,0356688	9,48683298	20,3469899	2,44948974	1,73205081	2,81069386	3720215,05	26,19160171

Con la matriz anterior, se obtienen la matriz normalizada ponderada

Tabla 19 Matriz Normalizada Ponderada

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11
A1	0,4197869	0,296201412	0,64122345	0,2849882	0,10540926	0,39317855	0,40824829	0,57735027	0,46251924	0,53760333	0,114540532
A2	0,55971586	0,871180622	0,5699764	0,4274823	0,84327404	0,24573659	0	0,57735027	0,35578403	0,26880167	0,15272071
A3	0,70897342	0,331048637	0,2849882	0,64122345	0,42163702	0,83550442	0,81649658	0	0,71156807	0,53760333	0,954504435
A4	0,08862168	0,209083349	0,4274823	0,5699764	0,31622777	0,29488391	0,40824829	0,57735027	0,39136244	0,59136366	0,229081064

De la suma de los valores ponderados de la matriz anterior, se obtienen dos alternativas (mostradas en rojo y en verde en la tabla 21), siendo la mayor la mejor alternativa (verde) y la menor la peor alternativa (rojo) en términos de multicriterio y optimización en ingeniería. A partir de ello, se extraen las alternativas mencionadas (tabla 21):

Tabla 20 Alternativas seleccionadas: Mejor (A+) peor (A-)

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	
A1	0,05877017	0,020734099	0,07053458	0,02279906	0,00948683	0,00393179	0,02857738	0,03464102	0,07400308	0,0645124	0,010308648	0,39829904
A2	0,07836022	0,060982644	0,0626974	0,03419858	0,07589466	0,00245737	0	0,03464102	0,05692545	0,0322562	0,013744864	0,45215841
A3	0,09925628	0,023173405	0,0313487	0,05129788	0,03794733	0,00835504	0,05715476	0	0,11385089	0,0645124	0,085905399	0,57280209
A4	0,01240703	0,014635834	0,04702305	0,04559811	0,0284605	0,00294884	0,02857738	0,03464102	0,06261799	0,07096364	0,020617296	0,36849069
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	
A3	0,00822782	0,001451387	0,0077588	0,00182392	0,00085381	3,9318E-05	0,00200042	0,00207846	0,01184049	0,00774149	0,000927778	
A1	0,01097043	0,004268785	0,00689671	0,00273589	0,00683052	2,4574E-05	0	0,00207846	0,00910807	0,00387074	0,001237038	

Una vez esto, se procede a determinar la proximidad relativa del agrupamiento de los datos en función de la mejor y la peor opción, lo cual se muestra en las tablas 22 y 23.

*Tabla 21 Medida de la distancia relativa respecto a la mejor alternativa*

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	suma
A1	0,00255453	0,000371823	0,0039408	0,00043996	7,4529E-05	1,5151E-05	0,00070634	0,00106032	0,00386419	0,00322294	8,80007E-05	0,01633857
A2	0,00491855	0,003543971	0,00301825	0,00104812	0,00563113	5,847E-06	4,0017E-06	0,00106032	0,00203265	0,00060097	0,000164278	0,02202809
A3	0,00828618	0,000471846	0,00055648	0,00244767	0,00137593	6,9151E-05	0,003042	0,00000432	0,01040612	0,00322294	0,007221196	0,03710384
A4	1,7466E-05	0,00017383	0,00154168	0,00191618	0,00076213	8,4653E-06	0,00070634	0,00106032	0,00257835	0,00399704	0,000387677	0,01314948

*Tabla 22 Medida de la distancia relativa respecto a la peor alternativa*

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	suma
A1	0,00228481	0,000271107	0,00404978	0,00040253	7,056E-06	1,5266E-05	0,00081667	0,00106032	0,00421136	0,00367741	8,22941E-05	0,01687861
A2	0,00454138	0,003216462	0,00311372	0,0009899	0,00476986	5,9185E-06	0	0,00106032	0,0022865	0,00104046	0,000156446	0,02118097
A3	0,00779439	0,000357385	0,0005979	0,00235827	0,00096826	6,9397E-05	0,00326667	0,00000432	0,01097106	0,00416185	0,007168731	0,03771822
A4	2,0638E-06	0,000107476	0,00161012	0,00183717	0,00046786	8,5513E-06	0,00081667	0,00106032	0,00286331	0,00503584	0,000375594	0,01418497

A partir de lo anterior se realiza una normalización de las sumatoria de los componentes de cada matriz y finalmente se determina la opción óptima desde el punto de vista del análisis multicriterio en términos de una distancia geométrica (Tabla 24)

*Tabla 23 Normalización para la mejor y la peor alternativa*

A+		Raiz A+	A-		Raiz A-
	A1	0,1278224		A1	0,12991769
	A2	0,14841864		A2	0,14553683
	A3	0,19262356		A3	0,19421179
	A4	0,11467117		A4	0,11910068

*Tabla 24 Selección de la alternativa adecuada para el caso de estudio.*

A1	0,504
A2	0,495
A3	0,502
A4	0,509

## Diseño del Sistema de Potabilización a partir del TOPSIS

### Cálculo de la Población



La población que será atendida se calculó teniendo en cuenta la información de los censos de población y el método geométrico. A partir de la metodología seleccionada se proyectó la población que para el año 2050 que posiblemente estará habitando la Vereda el Chocho y a partir de la cual se realizó el diseño del sistema de tratamiento para abastecerla de agua potable.

*Tabla 25 Proyección de la población al año 2050*

$1/T_{uc}-T_{ci}$	$P_{uc}/P_{ci}$	$r$	año	$T_f-T_{uc}$	$(1+r)$	$P_f$
0,0833	1,4	0,028	2006	1	1,0284	360
			2010	5		403
			2020	15		533
			2030	25		706
			2040	35		934
			2050	45		1236

### **Dotación**

De acuerdo con los criterios metodológicos establecidos, a continuación, se presentan los resultados:

*Tabla 26 Dotación neta y bruta*

<b>DOTACIÓN NETA</b>	100	L*HAB/DIA
<b>POBLACIÓN 2050</b>	1236	
<b>DOTACIÓN BRUTA</b>	133,33	L*HAB/DIA

### **Caudal de diseño**

*Tabla 27 Caudal de diseño*

<b>CAUDAL MEDIO DIARIO (CMD)</b>	1,91
<b>CORRECCIÓN k1</b>	1,3
<b>CMD CORREGIDO</b>	2,48

## Diseño del tren de tratamiento obtenido a través de TOPSIS

### *Desarenador*

Velocidad de sedimentación

$$V_s = \frac{\frac{g}{18} * (\rho_s - \rho_L) * d^2}{\eta}$$

$$V_s = \frac{\frac{980 \text{ cm/s}^2}{18} * (2,65 \text{ g/cm}^3 - 1 \text{ g/cm}^3) * (0,02 \text{ cm})^2}{0,01007 \text{ cm}^2/\text{s}}$$

$$V_s = 3,57 \text{ cm/s}$$

### *Cálculo del número de Reynolds*

$$\text{Re} = \frac{V_s * d}{\eta}$$

$$\text{Re} = \frac{3,57 \text{ cm/s} * 0,02 \text{ cm}}{0,01007 \text{ cm}^2/\text{s}}$$

$$\text{Re} = 7,09$$

El resultado del número de Reynolds es mayor a 1, y como tal no encuentra en régimen laminar (zona de Stokes). De ahí que la velocidad de sedimentación se calculó en el régimen de transición que corresponde a la zona Allen.

### *Caculo de la velocidad de sedimentación en régimen de transición zona de Allen*

$$V_s = 0,22 * \left( \frac{2,65 \text{ g/cm}^3 - 1 \text{ g/cm}^3}{1 \text{ g/cm}^3} * 980 \text{ cm/s}^2 \right)^{\frac{2}{3}} * \left( \frac{0,02 \text{ cm}}{\left( \frac{0,01007 \text{ cm}^2/\text{s}}{1 \text{ g/cm}^3} \right)^{1/3}} \right)$$

$$V_s = 2,81 \text{ cm/s}$$

***Cálculo del número de Reynolds en la zona de Allen***

$$\text{Re} = \frac{V_s * d}{\eta}$$

$$\text{Re} = \frac{2,81 \text{ cm/s} * 0,02 \text{ cm}}{0,01007 \text{ cm}^2/\text{s}}$$

$$\text{Re} = 5,57$$

***Cálculo del tiempo de sedimentación***

$$T_s = \frac{H}{V_s}$$

$$T_s = \frac{1,5 \text{ m}}{0,0281 \text{ m/s}}$$

$$T_s = 53,4 \text{ s}$$

***Cálculo del volumen del desarenador.***

$$V_d = Q_d * t_r$$

$$V_d = 0,0025 \text{ m}^3/\text{s} * 373,8 \text{ seg}$$

$$V_d = 0,93 \text{ m}^3$$

### *Sistema de coagulación*

Para el diseño de la unidad de coagulación mecánica se tiene en cuenta los siguientes parámetros:

- Caudal medio corregido = 2,48 l/s
- Dosis óptima de coagulante = 50 mg/l
- Temperatura del agua = 15° C

Se calcula el tiempo de mezcla rápida:

$$GT = \frac{5,9 \times 10^6}{50^{1,46}} = 19514$$

Adoptamos un gradiente de mezcla rápida de  $1.000 \text{ s}^{-1}$ , por lo tanto, el tiempo de mezcla rápida es de 20 s.

El volumen de la cámara de mezcla rápida es de:

$$V = 0,00248 \times 20 = 0,05 \text{ m}^3$$

Para una cámara cilíndrica las dimensiones son:

$$\frac{\pi D^3}{4} = 0,05$$

Por lo tanto, el diámetro de la turbina (D) es de 0,4 m.

La potencia de la turbina requerida es de:

$$P = 1.000^2 \times 10 \times 1.139 \times 10^{-3} = 11.390W$$

Para una eficiencia del motor del 80%:

$$P = \frac{11.390}{0,8} * 100 = 14.24KW$$

Se adopta un motor de 15 KW

La velocidad de rotación será:

$$N = \frac{14.240}{(6,3 \times 1.000 \times 0,4^5)^{1/3}} = 1,62RPS$$

Las demás dimensiones de la unidad serán:

$$H = D = 0,4 \text{ m}$$

$$W = 0,4/5 = 0,1$$

$$h = d = 0,8$$

$$e = 0,4/10 = 0,04$$

### ***Unidad de floculación***

Para el diseño del floculador hidráulico de flujo vertical se trabaja con:

- Caudal medio corregido = 2,48 l/s
- Tiempo de mezcla lenta = 20 minutos

- Velocidad de descenso entre tabiques = 0,15 m/s
- Gradiente promedio = 40 s<sup>-1</sup>
- $V = 1,01 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
- Altura = 4,2 m
- $C_d = 0,7$

La pérdida total es de:

$$h_T = \frac{40^2 \cdot 1,01 \times 10^{-6} \cdot 20 \cdot 60}{9,81} = 0,198 \text{ m}$$

El número de tabiques es:

$$n = \frac{0,15 \cdot 1200}{4,2} = 43 \text{ tabiques}$$

La pérdida de carga por tabique es:

$$h_f = \frac{0,198}{43} = 0,0046 \text{ m}$$

Para los pasos superiores se tiene:

$$h_2 = 0,3 - 0,0046 = 0,2954m$$

$$\frac{h_2}{h_1} = 0,9846$$

Por tanto,  $\alpha = 0,352$  y  $q = 1,84 \times 0,0352 \times 0,3 = 0,0194 \text{ m}^3/\text{s}$  por m. el ancho es:

$$b = \frac{0,00248}{0,0194} = 0,13m$$

El espaciamiento entre tabiques es:

$$e = \frac{0,00248}{0,13 \times 0,15} = 0,13m$$

El área para los pasos inferiores es:

$$A = \frac{0,00248}{\sqrt{0,7^2 \cdot 2,9,81 \cdot 0,0046}} = 0,012 \text{ m}^2$$

La altura del orificio es:

$$a = \frac{0,012}{0,13} = 0,09$$

El gradiente de velocidad es  $11,6 \text{ s}^{-1}$ .

### ***Sedimentador***

El sedimentador tiene la función principal de proporcionar condiciones de reposo del agua para remover las partículas más densas. Se diseñó un tanque provisto de módulos inclinados de modo que el agua ascienda por las celdas con flujo laminar. Para el diseño del sedimentador se tuvieron en cuenta los siguientes aspectos (RAS, 2017):

- Tiempo de retención: el tiempo de detención esta entre 10 min y 15 min.
- Profundidad: la profundidad del tanque debe estar entre 4 m y 5.5 m.
- Carga superficial: La carga superficial de la unidad debe estar entre  $120$  y  $185 \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{día})$
- Número de Reynolds: El número de Reynolds (Re) debe ser menor a 500, se recomienda un Reynolds menor a 250.
- Módulos en forma de panel: La inclinación de las placas debe ser de  $55^\circ$  a  $60^\circ$ . El espacio entre las placas debe ser de 5 cm.

### ***Filtro de alta tasa***

A través del proceso físico por medio poroso se diseñó la unidad para separar del agua las impurezas suspendidas mediante el paso a través de este medio. Los materiales pueden ser arena o antracita, o lechos mezclados. La profundidad convencional es de 0.6 m a 0.9 m. El principal criterio que se tuvo en cuenta para el diseño del sistema de filtrado fue (RAS, 2000):

- Velocidad de filtración: Este parámetro debe garantizar la eficiencia del proceso.
- Numero de filtros: Para el cálculo del número de filtros (N) se utilizó la fórmula empírica de Morrill y Wallace.



## *Cloración*

Para el sistema de potabilización se determinó la aplicación de Cloro granulado, el cual se aplicara directamente al tanque de almacenamiento.

- Suministro adecuado y permanente de agente desinfectante.
- Control eficiente, continuo y exacto de la dosificación.
- Manejo seguro en todo momento del compuesto y de los equipos utilizados para su aplicación.
- Mezcla completa y continua del cloro con toda el agua que se va a tratar.

En el Anexo 2 se presentan los planos de los diseños realizados.

## **Conclusiones**

El diseño de la Planta de Potabilización en cualquiera de sus escenarios, debe propender por ajustarse a la solución de las principales necesidades que se pueden generar en las diferentes regiones de Colombia, especialmente en las regiones rurales, las cuales tienen las mayores necesidades de atención básica en servicios públicos en el país. Con lo anterior, se busca brindar mejoras en la calidad de vida de las personas y el desarrollo económico de la comunidad.

La Planta de potabilización se diseñó para que el agua tratada cumpla con los parámetros establecidos en el Decreto 1575 de 2007 y la Resolución 2115 de 2007. Adicionalmente, es de aclarar que el diseño presentado debe complementarse para que sea integral, y para ello se requiere la realización de actividades adicionales como: la adquisición de accesorios, equipos, tuberías, entre otros.

A partir del diseño presentado y posterior construcción se logrará reducir el número de personas que todavía utilizan fuentes de agua no aptas para el consumo y mejorar la calidad de vida de las personas de la Vereda el Chocho

La implementación de la Planta de Potabilización y una adecuada operación, permitirá el acceso al agua potable de la población de la Vereda el Chocho, lo cual disminuirá las posibilidades de re aparición de enfermedades y posibles muertes y contribuirá en la reducción del empobrecimiento y oportunidades de trabajo para las personas.

El análisis multicriterio es una herramienta útil que permite a través de rutinas matemáticas relativamente sencillas facilitar la escogencia de una alternativa presente dentro de un conjunto de oportunidades previamente definidas por el investigador. A pesar de ello, existe en el input de las

alternativas definidas, pues el AMC solo permite seleccionar la mejor opción dentro del conjunto predefinido, pero ello no garantiza que la selección sea la que realmente brinde una solución integral al problema conceptual planteado.

La disponibilidad de criterios medibles y definidos dentro de una lógica común facilita el proceso de selección de la alternativa pertinente al problema planteado. A pesar de ello, existe una incertidumbre asociada a la afectación que el criterio puede tener dentro la configuración matemática de las alternativas planteadas, por lo cual surge la necesidad de realizar antes del análisis multicriterio otras alternativas que permitan establecer la correlación del criterio seleccionado versus las alternativas planteadas en la matriz de decisión; dicha metodología bien por podría ser un análisis de componentes principales (PCA), una correlación de Spearman o un escalamiento no multidimensional (nMDS).

### **Recomendaciones**

De otro lado, se considera fundamental realizar capacitaciones dirigidas a los operadores de planta, para el correcto entendimiento y manejo del sistema de tratamiento, además de elaborar los manuales de operación y mantenimiento de la planta.

Se recomienda incorporar criterios de tipo fisicoquímico y biológico para establecer el diseño óptimo en términos de la eficiencia de tratamiento. Este aspecto es un factor limitante, pues en la legislación colombiana se priorizan los aspectos hidráulicos sobre los criterios biológicos para el diseño de los sistemas de tratamiento.

## Referencias

- Arboleda Valencia, J. (2000). *Teoría y Práctica de la Purificación del Agua*, Tercera Edición. ACODAL, Bogotá D.C.
- Arena, C., Cannarozzo, M., Fortunato, A., Scolaro, I., & Mazzola, M. R. (2014). Evaluating infrastructure alternatives for regional water supply systems by model-assisted cost-benefit analysis - A case study from Apulia, Italy. *Procedia Engineering*, 89, 1460–1469. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.11.429>
- Bologa, O., Breaz, R. E., & Racz, S. G. (2018). Using the Analytic Hierarchy Process (AHP) and fuzzy logic to evaluate the possibility of introducing single point incremental forming on industrial scale. *Procedia Computer Science*, 139, 408–416. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.10.262>
- Buckee, C. O., Balsari, S., Chan, J., Crosas, M., Dominici, F., Gasser, U., ... Gabriella, M. (2020). Fuzzy logic for fine-scale soil mapping: A case study in Thailand. *Science (New York, N.Y.)*, 2019(March), 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.ijantimicag.2020.105924>
- Cruz, I., Stahel, A., & Max-Neef, M. (2009). Towards a systemic development approach: Building on the Human-Scale Development paradigm. *Ecological Economics*, 68(7), 2021–2030. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2009.02.004>
- Das, M., & Das, A. (2019). Dynamics of Urbanization and its impact on Urban Ecosystem Services (UESs): A study of a medium size town of West Bengal, Eastern India. *Journal of Urban Management*, 8(3), 420–434. <https://doi.org/10.1016/j.jum.2019.03.002>
- Echeverri, M. J. (2017). Manizales' Water Distribution System -Agua de Manizales S.A. E.S.P. *Procedia Engineering*, 186(6), 36–43. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.03.205>

ESPY, E. d. (2016). DIAGNOSTICO Y APOYO TECNICO DE LA INFRAESTRUCTURA DE ACUEDUCTO Y ALCANTARILLADO EN LAS ZONAS RURALES Y URBANO MARGINALES DEL MUNICIPIO DE YUMBO. Valle del Cauca, Yumbo. Recuperado el 10 de 10 de 2020

Gobernación del Valle, D. c. (12 de Octubre de 2017). Gobernación del valle del Cauca. Obtenido de [http://eva.gov.co/files/FINAL\\_PGEI\\_\\_AJUSTADO\\_Periodo\\_2017-2019\\_6\\_Mz\\_\\_2017.pdf](http://eva.gov.co/files/FINAL_PGEI__AJUSTADO_Periodo_2017-2019_6_Mz__2017.pdf)

Gómez, W. M. (2017). Abastecimiento de agua potable en comunidades rurales del Chocó biogeográfico, aplicación de tecnologías no convencionales. Universidad Nacional De Colombia, Antioquia, Medellín. Recuperado el 12 de Octubre de 2020, de <http://bdigital.unal.edu.co/63114/1/1077432851.2017.pdf>

Gómez-Gutiérrez, A., Miralles, M. J., Corbella, I., García, S., Navarro, S., & Llebaria, X. (2016). La calidad sanitaria del agua de consumo. *Gaceta Sanitaria*, 30, 63–68. <https://doi.org/10.1016/j.gaceta.2016.04.012>

Guillaume, S., & Charnomordic, B. (2011). Learning interpretable fuzzy inference systems with FisPro. *Information Sciences*, 181(20), 4409–4427. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2011.03.025>

Hargreaves, A. J., Farmani, R., Ward, S., & Butler, D. (2019). Modelling the future impacts of urban spatial planning on the viability of alternative water supply. *Water Research*, 162, 200–213. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.06.029>

IDEAM, [IDEAM Colombia]. (2018). Estudio Nacional de Agua 2018. Recuperado: [http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023858/ENA\\_2018.pdf](http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023858/ENA_2018.pdf)

Jayakumar, L., & Janakiraman, S. (2019). A novel need based free channel selection scheme for cooperative CRN using EFAHP-TOPSIS. *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, (xxxx). <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2019.09.005>

- Jiang, Y., & Rohendi, A. (2018). Domestic water supply, residential water use behaviour, and household willingness to pay: The case of Banda Aceh, Indonesia after ten years since the 2004 Indian Ocean Tsunami. *Environmental Science and Policy*, 89(July), 10–22.  
<https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.07.006>
- Juárez, M. M., Pomaa, H. R., & Rajal, V. B. (2015). ¿Cumplir con la legislación nos garantiza consumir agua segura? *Ribagua*, 2(2), 71–79. <https://doi.org/10.1016/j.riba.2015.10.002>
- Loo, S., Fane, A., Krantz, W., & Lim, T. (2012). Emergency water supply: A review of. *Sciencedirect*, 3125-3151.
- Martínez-Alier, J., Pascual, U., Vivien, F. D., & Zaccai, E. (2010). Sustainable de-growth: Mapping the context, criticisms and future prospects of an emergent paradigm. *Ecological Economics*, 69(9), 1741–1747. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2010.04.017>
- Martínez-Alier, J., Pascual, U., Vivien, F. D., & Zaccai, E. (2010). Sustainable de-growth: Mapping
- Maryna, E., Chris, Z., Chris, S., & Wouter, P. (2009). Decentralized systems for potable. *sciencedirect*, 245-265.
- May, R., Jackson, C., Bevanger, K., & Røskaft, E. (2019). Servicescape of the Greater Serengeti-Mara Ecosystem: Visualizing the linkages between land use, biodiversity and the delivery of wildlife-related ecosystem services. *Ecosystem Services*, 40(February), 101025.  
<https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2019.101025>
- Mullin, K., Mitchell, G., Nawaz, N. R., & Waters, R. D. (2018). Natural capital and the poor in England: Towards an environmental justice analysis of ecosystem services in a high income country. *Landscape and Urban Planning*, 176(April), 10–21.  
<https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2018.03.022>
- Naciones Unidas. (2015). Informe de las Naciones Unidas sobre los Recursos Hídricos en el Mundo 2015: Agua para un mundo sostenible., 1–12.

- O'Hara, P. A. (2009). Political economy of climate change, ecological destruction and uneven development. *Ecological Economics*, 69(2), 223–234.  
<https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2009.09.015>
- Ortega Márquez, M., & Márquez Fernández, O. (2017). Percepción social del servicio de agua potable en el municipio de Xalapa, Veracruz. *Revista Mexicana de Opinión Pública*, 23(23), 41.  
<https://doi.org/10.22201/fcpys.24484911e.2017.23.58515>
- Palczewski, K., & Sałabun, W. (2019). The fuzzy TOPSIS applications in the last decade. *Procedia Computer Science*, 159, 2294–2303. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.09.404>
- Peter-Varvanets, M., Zurbrugg, C., Swartz, C., Pronk, & Wouter. (2009). Decentralized systems for potable water and the potential of membrane technology. *Sciencedirect*, 245-265.
- Picton, T., & Daniels, P. L. (1999). Ecological restructuring for sustainable development: Evidence from the Australian economy. *Ecological Economics*, 29(3), 405–425.  
[https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(98\)00068-8](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(98)00068-8)
- Pryor, M., Jacobs, E., Botes, J., & Pillay, V. (1988). A low pressure ultrafiltration membrane system for potable water supply to developing communities in South Africa.
- Quezada-Quezada, José Carlos, Flores-García Ernesto, Quezada-Aguilar Víctor y Bautista-LópezJorge (2014). Diseño e implementación de un sistema de control y monitoreo basado en HMI-PLC para un pozo de agua potable. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 15(1), 41–50.  
[https://doi.org/10.1016/s1405-7743\(15\)30005-6](https://doi.org/10.1016/s1405-7743(15)30005-6)
- Rodriguez-Alvarez, M. S., Moraña, L. B., Salusso, M. M., & Seghezzo, L. (2017). Spatial and seasonal characterization of the drinking water from various sources in a peri-urban town of Salta. *Revista Argentina de Microbiología*, 49(4), 366–376.  
<https://doi.org/10.1016/j.ram.2017.03.006>
- Romero Rojas, J. (1993). Acuípurificación. Escuela Colombiana de Ingeniería, Bogotá D.C.

- Romero, J. R. (2000). *Purificación de Agua*. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Saavedra Díaz, Z. M., & Perevochtchikova, M. (2017). Evaluación ambiental integrada de áreas inscritas en el programa federal de Pago por Servicios Ambientales Hidrológicos. Caso de estudio: Ajusco, México. *Investigaciones Geograficas*, 2017(93), 76–94.  
<https://doi.org/10.14350/rig.56437>
- Sharma, S. K., Baral, H., Laumonier, Y., Okarda, B., Purnomo, H., & Pacheco, P. (2019). Ecosystem services under future oil palm expansion scenarios in West Kalimantan, Indonesia. *Ecosystem Services*, 39(March), 100978. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2019.100978>
- Sobsey, M. (2002). *Managing Water in the Home: Accelerated Health Gains from Improved*. World Health Organization, 47.
- Sousa, P., Gomes, D., & Formigo, N. (2019). Ecosystem services in environmental impact assessment. *Energy Reports*, (xxxx), 22–25. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2019.09.009>
- Tobergte, D. R., & Curtis, S. (2013). Informe del estado del medio ambiente y de los recursos naturales. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699.  
<http://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Udimal, T. B., Jincal, Z., Ayamba, E. C., & Mensah Owusu, S. (2017). China's water situation; the supply of water and the pattern of its usage. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 6(2), 491–500. <https://doi.org/10.1016/j.ijbsbe.2017.10.001>
- Villanueva, C. M., Kogevinas, M., & Grimalt, J. O. (2001). Chlorination of drinking water in Spain and bladder cancer. *Gaceta Sanitaria / S.E.S.P.A.S*, 15(1), 48–53. [https://doi.org/10.1016/S0213-9111\(01\)71517-8](https://doi.org/10.1016/S0213-9111(01)71517-8)
- Wang, J. J., Long, H. Y., Huang, Y. F., Wang, X. L., Cai, B., & Liu, W. (2019). Effects of different irrigation management parameters on cumulative water supply under negative pressure



irrigation. *Agricultural Water Management*, 224(January), 105743.

<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105743>

Wei, F., Costanza, R., Dai, Q., Stoeckl, N., Gu, X., Farber, S., ... Zhang, W. (2018). The Value of Ecosystem Services from Giant Panda Reserves. *Current Biology*, 28(13), 2174-2180.e7.

<https://doi.org/10.1016/j.cub.2018.05.046>

Wilmsmeier, G. (2020). Climate change adaptation and mitigation in ports. In *Maritime Transport and Regional Sustainability*. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-819134-7.00008-3>

Wolnowska, A. E., & Konicki, W. (2019). Multi-criterial analysis of oversize cargo transport through the city, using the AHP method. *Transportation Research Procedia*, 39(2018), 614–623.

<https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.06.063>

Yadav, V., Karmakar, S., Kalbar, P. P., & Dikshit, A. K. (2019). PyTOPS: A Python based tool for TOPSIS. *SoftwareX*, 9, 217–222. <https://doi.org/10.1016/j.softx.2019.02.004>

# Anexos

## Anexo 1. Descripción de las variables ambientales de la zona de estudio

### Clima

La cuenca del río Yumbo, tiene orientación occidente-orientado, proporcionando una mayor duración de la exposición solar, disponiendo de mayor cantidad de energía lo que incide directamente en el incremento de temperatura y con ello mayor evaporación. La localización geográfica influye en el grado de exposición a corrientes de aire, que varían de acuerdo a la altitud y la latitud.

En la cuenca se localizan las estaciones climatológicas: La Buitrera, con datos de precipitación, evaporación, temperatura, brillo solar y humedad relativa; la estación pluviográfica Santa Inés, donde se mide precipitación y, Yumbillo que es una estación pluviométrica.

### *Precipitación.*

En la cordillera Occidental, así como en el resto del territorio nacional, la variación anual de la precipitación está determinada por el desplazamiento de la zona de convergencia intertropical (ZCIT). La precipitación constituye la entrada natural de agua a la cuenca y se considera el elemento básico del clima. La precipitación anual en la cuenca varía alternando dos períodos con niveles altos de precipitación y dos con niveles bajos. El primer período de lluvias altas corresponde a los meses de marzo, abril y mayo; el segundo se presenta en los meses de septiembre, octubre y noviembre. Alternando estos meses se hallan los meses de menor precipitación, los cuales corresponden a enero, febrero, junio, julio, agosto y diciembre. De forma general para la cuenca se tiene que esta presenta un régimen de lluvias medias anuales que oscila entre 972 mm en la parte baja de la cuenca y 1.224 mm en la parte más alta de la misma; se presentan a nivel mensual lluvias máximas de 168 mm en la parte alta y 151 mm en la parte baja y lluvias mínimas de 46 mm en la parte alta y 41 mm en la parte baja.

### ***Evaporación.***

La evaporación media multianual en la parte alta de la cuenca es aproximadamente 1.074 mm/año lo que corresponde a un promedio mensual de 89,5 mm/mes, hacia la parte baja de la cuenca la evaporación es de 1.190 mm/año con un promedio mensual de 99,2 mm/mes.

### ***Temperatura.***

El calentamiento de la atmósfera es el resultado de la acción de la radiación solar sobre la misma atmósfera y sobre la superficie terrestre. La variación de la temperatura está estrechamente relacionada con la latitud y la altitud. Sin embargo, no obedece a gradientes continuos, pues a veces se presentan inversiones térmicas, cuando masas de aire caliente se superponen a masas frías, lo cual ocurre tanto en superficie como en la Tropósfera. En la cuenca la temperatura media en la zona plana corresponde a 24°C, en la zona media la temperatura es aproximadamente de 21°C y en la parte alta la temperatura es de 17°C.

La cuenca hidrográfica del río Yumbo es bañada por diversas corrientes de agua que se convierten junto con el río Cauca y el aporte del acuífero, en la fuente de agua para las necesidades del territorio, el río Yumbo entrega sus aguas al río Cauca a 170 km aguas abajo del embalse de Salvajina. La cuenca posee un patrón de drenaje erosional con un sistema subdendrítico de corrientes superficiales con cauces de orden 5 según clasificación de drenajes de Schumm.

La cuenca está integrada por varias subcuencas de cauces cortos y de poca magnitud, que nacen en las zonas boscosas cuyas quebradas principales vierten sus aguas al río Yumbo.

El río Yumbo se encuentra instrumentado desde el año 1986 por la estación limnigráfica Pasoancho, localizada en el puente conocido como La Planta. El caudal medio mensual (periodo 1986 – 2009) es de 0,22m<sup>3</sup>/s, caudales pequeños lo cual hace que se disponga de poca agua para la satisfacción de las necesidades hídricas en la zona baja de la cuenca<sup>12</sup>.

El caudal mínimo se presenta en el mes de agosto con 0,14 m<sup>3</sup>/s. Por otro lado, el mes con mayor caudal es abril con 0,27 m<sup>3</sup>/s. Sin embargo, se han presentado eventos extremos donde se han registrado caudales de 44 m<sup>3</sup>/s, como el ocurrido en el mes de abril de 199813. En la Figura 4.2 se presenta la variación temporal del caudal medio, máximo y mínimo para el río Yumbo, (el caudal máximo en agosto es de 1,0 m<sup>3</sup>/s, que no se aprecia en la figura por la escala logarítmica).

La curva de duración de caudales permite determinar la probabilidad de permanencia de un caudal durante el año, lo que la convierte en una valiosa herramienta para la distribución de las aguas de un cauce. Para su construcción se grafican en el eje de ordenadas los caudales medios diarios, organizados por su magnitud, contra la frecuencia de ocurrencia del evento en términos de porcentaje del total.

Sobre el cauce principal de la quebrada Santa Inés existe una captación para la vereda El Chocho y para el acueducto de la vereda Santa Inés, la quebrada La Culebra (afluente de Santa Inés) abastece igualmente a Santa Inés y a Puerto Rico y Monte Colombo. La microcuenca de la quebrada Honda abastece a los acueductos de Riberas de Yumbo, Manzanillo y barrio La Trinidad. La quebrada La Buitrera abastece a Cerro Gordo y La Buitrera. El cauce principal del río Yumbillo surte las bocatomas para los acueductos de Alto Dapa, Yumbillo y Salazar y la quebrada La Planta afluente del río Yumbillo surte a los barrios El Pedregal y La Trinidad I y II, la quebrada Sinay (afluente del río Yumbillo) abastece a Alto Dapa, Yumbillo y La Fontana, la quebrada Salazar abastece a la vereda Salazar y a Yumbillo. Sobre el cauce principal del río Yumbo existe una concesión de agua para la Junta de acción comunal del barrio La Trinidad etapa 2 y para el acueducto municipal de Yumbo.

### ***Balance oferta-demanda del recurso hídrico***

La cuenca del río Yumbo presenta déficit de agua en los meses de enero, febrero, junio, julio, agosto, septiembre, octubre y diciembre, ya que el caudal del río no es suficiente para sostener todas las demandas de la cuenca. Los meses de enero, julio y agosto presentan el déficit más alto, porque en estos tres meses aumenta la demanda agrícola de la cuenca. Los excedentes que se presentan en los meses de marzo, abril, mayo y

noviembre son muy bajos, por lo cual se debe recurrir a otras fuentes como el río Cauca y las aguas subterráneas, para suplir las necesidades.

La cuenca se encuentra localizada en una zona muy seca, con lluvias escasas, que afecta directamente los cauces de los ríos y quebradas<sup>15</sup>, teniendo de esta manera, limitaciones para el desarrollo campestre y agrícola con cultivos que requieran sistemas de riego.

### ***Índice de escasez.***

De acuerdo con los estudios realizados por la CVC, La cuenca del río Yumbo presenta déficit de agua en los meses de enero, febrero, junio, julio, agosto, septiembre, octubre y diciembre, ya que el caudal del río no es suficiente para sostener todas las demandas de la cuenca. Por lo tanto, la relación entre la oferta superficial de agua y la demanda, es desequilibrada, arrojando como resultado un índice de escasez de 274% que la clasifican con un déficit alto<sup>16</sup>, situándola en el departamento, en el quinto puesto, siendo sólo superada por la quebrada Obando y los ríos Vijes, El Cerrito y Párraga.

### **Aprovechamiento de Agua**

De acuerdo con el Decreto Ley No. 2811 de 1974, es competencia de la autoridades ambientales, adelantar procesos de reglamentación de corrientes de agua superficial, razón por la cual en el año 2000 la CVC, promulga la Resolución No. DG 486 de noviembre 30, mediante la cual se ordena iniciar el proceso de reglamentación de la fuente denominada río Yumbo y las quebradas Yumbillo, Santa Inés, La Buitrera y La Honda, siendo concluido este proceso en el mes de marzo del año 2003, con la publicación del proyecto de reglamentación<sup>14</sup>.

## **Calidad de Agua**

En el año 2005 la CVC adoptó la aplicación de los índices de calidad, para presentar de forma sencilla la calidad de los diferentes cuerpos de agua, estableciendo un programa de monitoreo con una frecuencia semestral y el análisis de treinta y cinco parámetros de calidad, en diferentes puntos de las principales corrientes superficiales de agua, entre ellas el río Yumbo. Para este río se cuenta con información histórica sistematizada hace diez (10) años en cuatro estaciones de monitoreo. En el Mapa 4.2, se presenta la localización de las estaciones de calidad del agua.

### ***Índice de Calidad del Agua - ICA.***

Este índice mide la calidad del agua para ser destinada al consumo humano. El ICA para el río Yumbo, muestra que, hacia las partes altas de la fuente, el agua se clasifica como de buena calidad, desmejorando hacia la parte baja, dicho comportamiento es atribuible a los asentamientos poblacionales y al aumento de actividad industrial ocasionando incrementos tanto en la demanda de agua como en la generación de vertimientos de aguas residuales.

### **Índice de Contaminación del Agua por Materia Orgánica - ICOMO.**

Para el río Yumbo, la contaminación por materia orgánica es preocupante en el tramo comprendido entre la estación Antes La Trinidad y Antes desembocadura al río Cauca, puesto que aumenta desde baja contaminación hasta niveles de muy alta contaminación, producido por los vertimientos de la cabecera municipal de Yumbo.

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

En el río Yumbo la DQO reportada en las condiciones de invierno y verano, presenta un comportamiento creciente entre estaciones, alcanzando las mayores concentraciones en la estación Antes desembocadura, en donde se presentan valores de 139 mg/l en invierno y 389 mg/l en verano los cuales se encuentran por encima del valor típico presentado en corrientes superficiales no contaminadas (20 mg/l) reportado por la UNESCO (1996). Dicho comportamiento se debe a los vertimientos de origen doméstico e

industrial que recibe el río aguas arriba de dicha estación. Esta situación se hace más crítica en la condición de verano, donde los caudales disminuyen considerablemente afectando la capacidad de dilución del río.

### **Oxígeno Disuelto (OD).**

En general para los dos semestres del año estudiados, los niveles de OD reportados en el sector comprendido entre las estaciones Puente Santa Inés y Antes La Trinidad se encuentran por encima de 5 mg/l, valores que de acuerdo con la UNESCO (1996) protegen la diversidad biológica. Caso contrario ocurre en la estación Antes Desembocadura donde los niveles de OD en el río se encuentran muy por debajo del valor límite recomendado por la UNESCO presentando concentraciones de 2 mg/l en invierno y 0,9 mg/l en verano. Esta situación se asocia con las descargas de aguas residuales domésticas e industriales que recibe el río aguas arriba de dicha estación, provenientes principalmente de la cabecera municipal de Yumbo y las industrias.

### **Sólidos Totales (ST).**

En las condiciones climáticas de invierno y verano, los ST muestran un comportamiento creciente entre estaciones, presentando los niveles más altos en la estación Antes desembocadura, alcanzando valores cercanos a 800 mg/l en la condición de verano. Adicionalmente se observa que el mayor porcentaje de ST en el río Yumbo, está representado por los Sólidos Disueltos (SD), situación que se asocia con la presencia de materia orgánica disuelta en el río proveniente de las descargas de aguas residuales domésticas principalmente de la ciudad de Yumbo y del matadero de dicha ciudad. Esta situación se hace más crítica en verano.

### **Coliformes Totales (CT).**

Los niveles de coliformes totales presentados en el río presentan un comportamiento creciente entre estaciones de monitoreo con valores entre  $7,8 \times 10^3$  y  $2,2 \times 10^8$  NMP/100ml. Presentando las mayores concentraciones en las estaciones Antes La Trinidad y Antes desembocadura las cuales se encuentran

influenciadas por la cabecera municipal del Yumbo y las actividades pecuarias desarrolladas en la zona, las cuales afectan la calidad microbiológica del río.

### **Coliformes Fecales (CF).**

Al igual que los coliformes totales, los coliformes fecales presentan un comportamiento creciente entre estaciones, con valores entre  $1,1 \times 10^3$  y  $1,7 \times 10^8$  NMP/100ml en invierno y  $4,5 \times 10^3$  y  $2 \times 10^8$  NMP/100ml en verano. Estos valores reflejan el alto grado de contaminación microbiológica que presenta en el río, principalmente en el sector comprendido entre las estaciones Antes La Trinidad y Antes desembocadura, en donde el río recibe las descargas de la ciudad, las cuales se caracterizan por presentar importantes contenidos de patógenos y parte de las aguas residuales de origen pecuario, una de las principales actividades desarrolladas en la cuenca.

### **Suelos y Pendientes**

Taxonómicamente los tipos de suelo presentes en la cuenca son: entisoles, vertisoles, inceptisoles, alfisoles y oxisoles.

La cuenca, presenta un 46,8% de su territorio con una pendiente fuertemente quebrada, en la zona alta y media de la cuenca y un 14,8% en pendientes que definen un terreno escarpado. En la zona plana, en terreno apto para el establecimiento de actividades productivas con menos restricciones, se tiene un 17%. En el Mapa 4.7 se presentan las pendientes de la cuenca del río Yumbo.

### **Coberturas y usos del Suelo**

La cobertura y uso del suelo son variables importantes en la planificación de los usos del territorio, su representación cartográfica permite conocer los datos cuantitativos y los cambios que se dan en ellas a través del tiempo. Es fundamental hacer la diferenciación de los términos cobertura y uso del suelo al abordar la clasificación de la vegetación y la elaboración de los mapas<sup>27</sup>.



El término cobertura se refiere a los diferentes elementos que cubren la superficie de la tierra, tales como afloramientos rocosos, vegetación, agua, obras humanas, etc<sup>28</sup>. La cobertura puede derivarse de ambientes naturales, que son producto de la evolución ecológica, como bosques, sabanas, lagunas, entre otras, o a partir de ambientes artificiales creados y manejados por el hombre, como son los cultivos, represas, construcciones<sup>29</sup>.

De esta manera la cobertura es el resultado de la interacción entre el medio natural, en particular la vegetación y el uso del suelo y sus recursos.

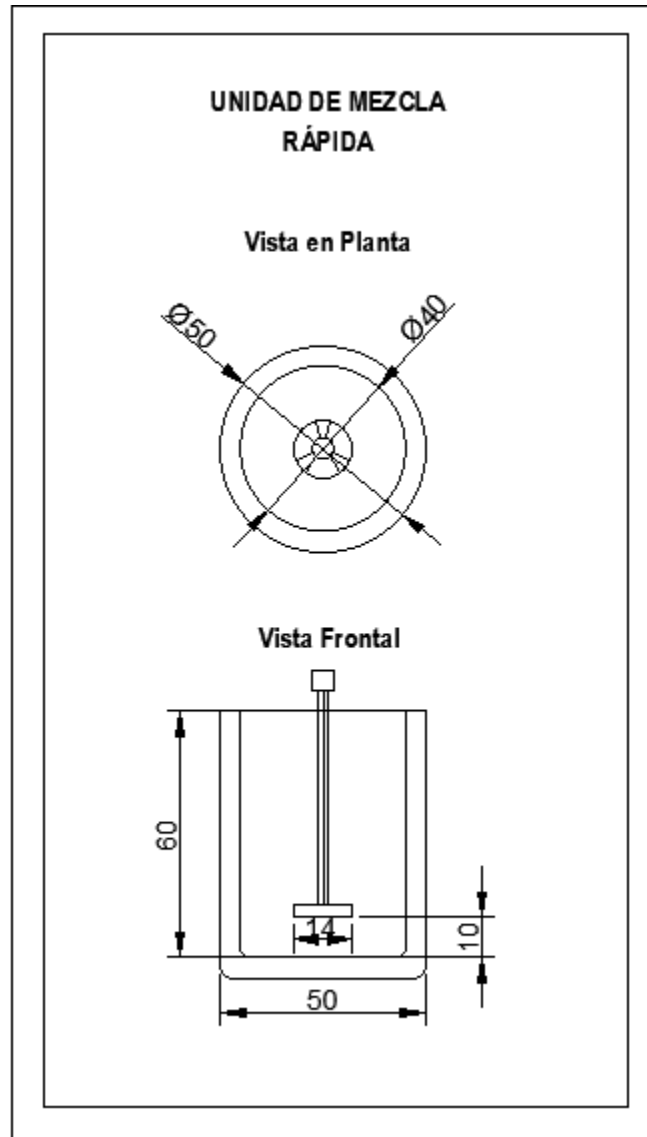
El uso se refiere al empleo que el hombre da a los diferentes tipos de cobertura. Esta puede ser cíclica o permanente y tiene como fin satisfacer necesidades materiales o espirituales.

Los temas de cobertura y uso se pueden abordar como una única cartografía temática. En la cuenca del río Yumbo, la principal cobertura es el pasto natural, ocupando un área de 2.616 ha, lo que equivale al 39,2% del área de área total de la cuenca. Se ubica principalmente en la zona media y parte de la zona alta, en los corregimientos de Santa Inés, Yumbillo, Mulaló y la Buitrera. Le sigue en su orden el bosque natural, con un área de 1.059 ha, es decir el 15,90% del área total de la cuenca. Localizado en la parte alta de la cuenca, en sectores de los corregimientos Yumbillo y Santa Inés principalmente. El área ocupada por rastrojo es de 682 ha, 10,2% del área de la cuenca. Se encuentra en los corregimientos de Yumbillo, Santa Inés, Mulaló, La Buitrera y Dapa

### **Biodiversidad de la Cuenca**

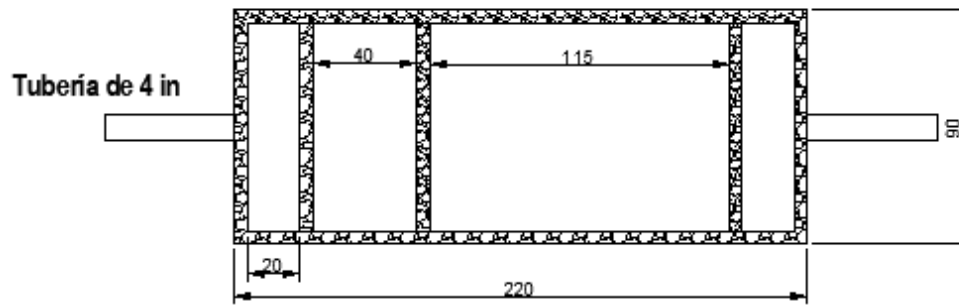
Ecosistemas. En la cuenca del río Yumbo se encuentran dos de los siete ecosistemas presentes en el departamento: El valle geográfico (Bosque seco tropical y humedales) y el bosque subandino.

Anexo 2. Planos con los diseños realizados.

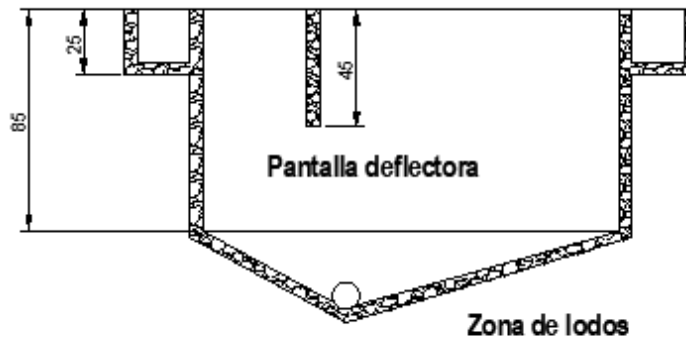


# DESARENADOR

## VISTA EN PLANTA

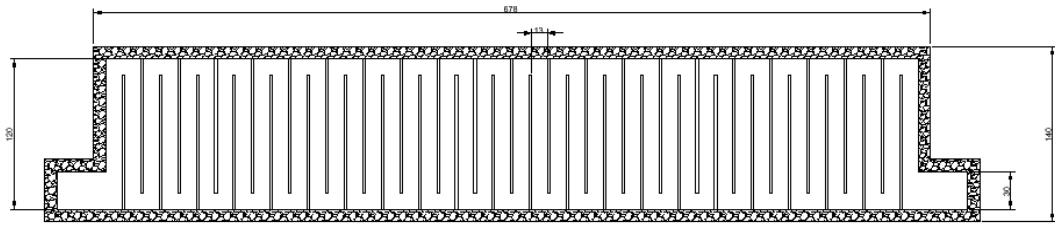


## VISTA EN FRONTAL



# FLOCULADOR

## VISTA EN PLANTA



## VISTA FRONTAL

