

**PROYECTO DE GRADO
INFORME FINAL DEL PROYECTO DE GRADO**

CHRISTIAN ANDRÉS COLÓN MOSQUERA

**PROPUESTA DE MODELO Y DISEÑO DE UNA PLANTA COMPACTA DE
TRATAMIENTO
DE AGUA POTABLE DE BAJO COSTO PARA LA URBANIZACIÓN LA VICTORIA
TERCERA ETAPA, CORREGIMIENTO DE EL CARMELO, MUNICIPIO DE
CANDELARIA, VALLE DEL CAUCA.**

JOHN JAIRO PORRAS
ASESOR

**UNIVERSIDAD EAN
FACULTAD DE INGENIERÍA
GRUPO No. 4 – SEMESTRE 1
BOGOTÁ D.C
MAYO 2025**

CONTENIDO

CONTENIDO	2
RESUMEN	3
SUMMARY	4
INTRODUCCIÓN	6
OBJETIVOS DEL PROYECTO	9
General.....	9
Específicos.....	9
DEFINICIÓN PROBLEMA	10
Preguntas de Investigación	12
JUSTIFICACIÓN	13
ANÁLISIS DEL REQUERIMIENTO	19
Intención del Producto.....	19
Parámetros del diseño	19
Requerimientos técnicos.....	20
Requerimientos operativos.....	20
Requerimientos logísticos	21
Requerimientos sociales	21
Estimación de Características de Diseño.....	21
Potencia y Consumo Energético	21
Eficiencia y Rendimiento	22
Costo y accesibilidad	22
MARCO TEÓRICO	23
ANÁLISIS DE RESTRICCIONES	34
METODOLOGÍA PARA LA SELECCIÓN Y DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN	45
ANÁLISIS DE COSTOS	54
ESQUEMA GENERAL DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO	62
• Prototipo del Clarificador o Reactor de Manto de lodos.....	63
• Prototipo de los filtros automáticos por diferencial de presión	64
PLANO ISOMETRICO GENERAL DE LA PLANTA	65
PLANO – VISTA DE PLANTA GENERAL	66
PLANO CORTES Y PERFILES	66
PLANTA INFERIOR CONEXIONES HIDRÁULICAS – FILTROS Y CLARIFICADORES	67
PERFIL HIDRÁULICO – CAJAS DE RETROLAVADO	68
CONCLUSIÓN	69
BIBLIOGRAFIA	73

RESUMEN

En la actualidad, el acceso al agua potable constituye un derecho inherente a la dignidad humana. Sin embargo, en Colombia, particularmente en comunidades afectadas por el estrés hídrico, marginadas y zonas rurales, este recurso sigue siendo inalcanzable para un gran número de individuos. En el presente documento se expone el modelado y el diseño de una planta de tratamiento de agua potable compacta de bajo coste, como solución viable para garantizar el suministro de agua potable en la urbanización La Victoria, tercera etapa, corregimiento de El Carmelo, municipio de Candelaria, Valle del Cauca. Estas plantas, caracterizadas por su accesibilidad económica y construcción simplificada, facilitan su implementación en áreas de difícil acceso o con limitaciones hídricas. El diseño propuesto presenta ventajas significativas, entre ellas, su tamaño compacto facilita su instalación y operación, y permite un manejo sencillo sin necesidad de personal altamente calificado, lo que lo convierte en una opción viable y sostenible a mediano y largo plazo.

El propósito del planteamiento de este modelo de plantas es presentar soluciones a problemas específicos asociados con la falta de infraestructura, los altos costos de los sistemas de tratamiento de agua potable convencionales y las limitaciones de acceso a comunidades como las de la urbanización La Victoria tercera etapa.

Se pretende que con la implementación de este sistema aporte una mejora significativa en la calidad de vida y la salud pública en comunidades que tienen dificultades para el acceso de agua potable, disminuyendo la incidencia de

enfermedades y promoviendo su desarrollo social, económico y sostenible, además de mejorar condiciones de salubridad.

Palabras Clave: Tratamiento de agua, agua potable, planta compacta, salubridad, bajo costo, diseño modular, sostenibilidad, filtración lenta en arena, desinfección solar, membranas de ultrafiltración, reactor de manto de lodos, sistema contenerizado, eficiencia energética, parámetros de diseño, comunidades marginales, análisis de costos.

SUMMARY

Currently, access to drinking water is an inherent right to human dignity. However, in Colombia, particularly in communities affected by water stress, marginalized communities, and rural areas, this resource remains unaffordable for a large number of individuals. This document presents the modeling and design of a low-cost, compact drinking water treatment plant as a viable solution to guarantee the supply of drinking water in the third phase of the La Victoria urbanization, District of El Carmelo, Candelaria municipality, Valle del Cauca. These plants, characterized by their economic accessibility and simplified construction, facilitate their implementation in areas with difficult access or water constraints. The proposed design presents significant advantages, including its compact size, which facilitates its installation and operation, and allows for simple handling without the need for highly qualified personnel, making it a viable and sustainable option in the medium and long term.

The purpose of this model plant approach is to present solutions to specific problems associated with the lack of infrastructure, the high costs of conventional

drinking water treatment systems and the limitations of access to communities such as those in the third stage of the La Victoria urbanization.

The implementation of this system is expected to contribute to a significant improvement in the quality of life and public health in communities that have difficulties in accessing drinking water, reducing the incidence of diseases and promoting their social, economic and sustainable development, in addition to improving sanitation conditions.

Key words: Water treatment, drinking water, compact plant, sanitary conditions, low-cost, modular design, sustainability, slow sand filtration, solar disinfection, ultrafiltration membranes, sludge blanket reactors, containerized system, energy efficiency, design parameters, marginalized communities, cost analysis.

INTRODUCCIÓN

El acceso al agua potable en la actualidad es un desafío global. Según la Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico (CRA), con sus cifras más recientes publicadas en el 2024, se evidencia que aproximadamente el 29% de la población colombiana no cuenta con el servicio de agua potable, esto hace referencia a que alrededor de 13.8 millones de usuarios no cuentan con este servicio vital, lo que representa un riesgo significativo para la salud y bienestar de las personas. La CRA reveló que en el país hay 207 cabeceras municipales con riesgo de desabastecimiento en periodo de sequía y 254 en periodos de lluvia. Los departamentos con mayores desafíos en cuanto al acceso al servicio de acueducto son San Andrés y Providencia, Guainía, Chocó, Amazonas y Putumayo.

Es importante resaltar que entre las zonas urbanas y rurales existe una gran brecha, cuando se trata del acceso a agua potable, mientras que en las ciudades se ha logrado una cobertura significativa, En las zonas rurales o de difícil acceso la situación es crítica. En un informe presentado por la agencia de noticias de la Universidad Nacional se reporta que existe un 25% de desigualdad para el acceso a agua potable entre estas zonas.

En gran medida esto se debe a que las zonas rurales en su mayoría cuentan con limitaciones geográficas, económicas y de movilidad, lo que genera que sean lugares de difícil acceso donde la infraestructura tradicional no puede llegar, y en gran parte a un abandono significativo de las entidades gubernamentales, que conlleva a otro problema importante que se deriva de la dificultad para acceder a agua potable, y estas

son las diferentes enfermedades que se transmiten por consumo de aguas contenidas, lo que se convierte en un problema de salubridad.

Según cifras entregadas por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) para el año 2019, 6.6 de cada 100.000 niños fallecieron por consecuencias derivadas de enfermedades diarreicas agudas, y 13.3 de cada 100.000 niños fallecieron por infecciones agudas respiratorias, estas enfermedades se asocian al consumo de agua contaminadas y falta de prácticas de higiene.

En respuesta a esta problemática, se han planteado diferentes posibles soluciones tales como: tanques de sedimentación, filtros de microfiltración, de nanotecnología, una lámpara UV para desinfectar, entre otros que, aunque presentan una efectividad significativa en cuanto remoción de turbidez y desinfección adecuada, no terminan de solucionar el problema, pero son avances importantes en el proceso.

A pesar de los esfuerzos de diferentes entidades y organizaciones para poder cerrar la brecha que existe en Colombia entre las zonas rurales y urbana, se continúan presentando desafíos importantes, por lo que este trabajo presenta desde el área de la ingeniería industrial y el tratamiento de agua potable, el diseño de una planta compacta y modular de bajo costo como solución viable y posible para la comunidad de la urbanización La Victoria tercera etapa, quienes tienen acceso limitado al recurso hídrico.

Para poder hacer una contextualización de esta problemática, se tuvieron en cuenta diferentes estudios realizados por varias entidades u organizaciones, con

relación al acceso de agua potable, los efectos de consumir agua no tratada para la salud pública y las posibles soluciones existentes para abordar esta problemática.

Teniendo en cuenta lo anterior, la investigación se plantea responder la siguiente pregunta: ¿Cómo diseñar y modelar una planta compacta de tratamiento de agua potable de bajo costo, adaptada al contexto y a las condiciones de la urbanización La Victoria, tercera etapa, en el corregimiento de El Carmelo, municipio de Candelaria, Valle del Cauca, que garantice su eficiencia, sostenibilidad y facilidad de operación?

En este documento se presentará la estructura de la investigación en varias partes. Primero, se presenta el contexto y justificación e importancia del estudio. Luego, se detallan los objetivos del proyecto y el marco teórico que sustenta la investigación a realizar. Finalmente, se aborda el diseño y modelado de la planta propuesta, incluyendo sus características técnicas y operativas.

OBJETIVOS DEL PROYECTO

General

Proponer el diseño y modelo de una planta de tratamiento de agua potable compacta, contenerizada y de bajo costo, que sirva para abastecer la urbanización La Victoria, tercera etapa, en el corregimiento de El Carmelo, municipio de Candelaria, Valle del Cauca, cumpliendo con las normatividades locales vigentes y con un enfoque sostenible.

Específicos

1. Diseñar un sistema de tratamiento compacto, contenerizado y de bajo costo, que incorpore las operaciones unitarias necesarias para garantizar la calidad del agua conforme a las normativas y estándares de calidad vigentes.
2. Desarrollar los planos detallados para la construcción e implementación de la planta compacta de tratamiento de agua potable, adaptados a las condiciones de accesibilidad y recursos limitados de la urbanización La Victoria, tercera etapa.
3. Establecer parámetros de diseño que garanticen la eficiencia operativa y la sostenibilidad del sistema en diferentes entornos.

DEFINICIÓN PROBLEMA

La urbanización La Victoria, tercera etapa, ubicada en el corregimiento de El Carmelo, municipio de Candelaria, departamento del Valle del Cauca, enfrenta desafíos significativos en el suministro de agua potable especialmente durante temporadas de sequía, dado que la zona no dispone de fuentes superficiales y que por su condición topográfica no es viable implementar un acueducto por gravedad, por lo cual se debe pensar en soluciones de ingeniería como la extracción de agua de un pozo profundo.

Según informes del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, este municipio es uno de los afectados por el desabastecimiento de agua, debido a su dificultad para acceder al recurso hídrico por medio de las fuentes superficiales.

Las condiciones geográficas y climáticas, sumadas a la falta de infraestructura adecuada, dificultan el acceso continuo y seguro al agua potable para sus habitantes.

El acceso al agua potable constituye un derecho humano fundamental, reconocido oficialmente por la Asamblea General de las Naciones Unidas en 2010 (ONU, 2010). Sin embargo, según datos del Programa Conjunto OMS/UNICEF de Monitoreo del Abastecimiento de Agua y del Saneamiento, aproximadamente 2.000 millones de personas en el mundo carecen de acceso a servicios de agua potable gestionados de forma segura, afectando desproporcionadamente a las poblaciones rurales y remotas (OMS & UNICEF, 2021).

En América Latina y el Caribe, a pesar de avances significativos, persisten marcadas desigualdades en el acceso a agua potable. De acuerdo con la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL, 2022), mientras que el 97% de la

población urbana tiene acceso a servicios básicos de agua potable, esta cifra desciende al 76% en zonas rurales, evidenciando una brecha considerable entre áreas urbanas y rurales. Esta disparidad se acentúa aún más en comunidades geográficamente aisladas o afectadas por conflictos sociopolíticos.

Las limitaciones para implementar sistemas convencionales de tratamiento de agua en estas regiones son múltiples. Según un estudio realizado por el Banco Interamericano de Desarrollo (BID, 2021), los principales obstáculos incluyen: altos costos de inversión inicial, complejidad operativa, requerimientos de personal especializado para su mantenimiento y dificultades logísticas para su instalación en zonas de difícil acceso. Carrasco-Mantilla (2016) señala que los sistemas convencionales pueden costar entre US\$300 y US\$500 por persona beneficiada, cifras prohibitivas para comunidades con recursos limitados. La carencia de agua potable tiene consecuencias graves para la salud pública.

La Organización Panamericana de la Salud estima que las enfermedades relacionadas con el agua contaminada causan aproximadamente 485.000 muertes por diarrea cada año a nivel mundial, afectando principalmente a niños menores de cinco años y adultos mayores (OPS, 2021). Prüss-Ustün et al. (2019) determinaron que más del 58% de los casos de diarrea en países en desarrollo están directamente relacionados con la falta de acceso a agua segura, saneamiento e higiene adecuados.

Ante este panorama, existe una necesidad urgente de desarrollar soluciones innovadoras y accesibles que superen las barreras técnicas, económicas y logísticas que enfrentan las comunidades marginadas. Como señalan Peter-Varbanets et al.

(2017), las tecnologías descentralizadas y modulares representan una alternativa viable para abordar estas brechas, permitiendo implementaciones más rápidas, económicas y adaptadas a contextos específicos.

Este proyecto propone el diseño de una planta compacta de tratamiento de agua potable que sea modular, de bajo costo, sostenible y fácil de transportar e instalar, dirigida específicamente a la urbanización La Victoria, ubicada en el corregimiento de El Carmelo, municipio de Candelaria, departamento del Valle del Cauca, quienes tienen un acceso limitado al recurso hídrico. La solución planteada busca cumplir con los parámetros de calidad establecidos por la normatividad colombiana vigente, así como los estándares de la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2022) para agua potable, mientras se mantiene accesible para gobiernos locales con presupuestos restringidos.

De acuerdo con Sobsey et al. (2023), las soluciones descentralizadas pueden reducir hasta en un 70% los costos de implementación en comparación con sistemas convencionales, además de requerir menos personal especializado para su operación.

El potencial impacto de estas tecnologías va más allá de la salud pública, contribuyendo a la reducción de desigualdades y al desarrollo socioeconómico de las comunidades beneficiadas (PNUD, 2021).

Preguntas de Investigación

¿Qué tecnologías u operaciones de tratamiento de agua, combinadas de manera eficiente, pueden integrarse en un sistema compacto y contenerizado, y a su vez ser financieramente rentable, cumpliendo con los estándares de calidad del agua establecidos por las normatividades vigentes?

¿Cómo se pueden adaptar los planos de diseño de una planta compacta de tratamiento de agua potable, contemplando las condiciones de acceso geográfico y recursos limitados, sin comprometer la calidad del agua ni la operatividad del sistema, para la urbanización La Victoria, tercera etapa, corregimiento de El Carmelo, municipio de Candelaria, Valle del Cauca?

¿Qué parámetros de diseño son cruciales para garantizar la operatividad, la eficiencia energética y la sostenibilidad de la planta de tratamiento de agua en condiciones locales específicas, y cómo pueden ajustarse para asegurar su funcionalidad a mediano y largo plazo?

¿Cómo diseñar y modelar una planta compacta de tratamiento de agua potable de bajo costo que garantice su eficiencia, sostenibilidad y facilidad de operación en comunidades con acceso limitado al agua en Colombia?

JUSTIFICACIÓN

La creciente necesidad global de agua potable segura y accesible es un desafío apremiante en el siglo XXI. A nivel mundial, una porción considerable de la población carece de acceso a fuentes de agua potable gestionadas de forma segura (Ehalt Macedo et al., 2022; UNICEF & WHO, 2021; WHO, 2019, 2022, 2023). Esta realidad subraya la urgencia de desarrollar e implementar soluciones efectivas para el tratamiento del agua. La situación se ve agravada por factores como el cambio climático, el crecimiento demográfico sostenido y la urbanización acelerada, que intensifican la escasez de agua y deterioran la calidad de las fuentes disponibles (Jones et al., 2023; Epic CleanTec, n.d.). Ante este panorama, se vuelve imperativo

explorar y promover tecnologías de tratamiento de agua que sean eficientes, adaptables y sostenibles.

Históricamente, los sistemas de tratamiento de agua potable se han basado en enfoques convencionales, caracterizados por procesos de múltiples etapas como la coagulación (adición de químicos para aglomerar partículas), la floculación (mezcla suave para formar partículas más grandes), la sedimentación (separación de los flóculos por gravedad), la filtración (paso del agua a través de filtros para remover partículas restantes) y la desinfección (eliminación de microorganismos patógenos mediante químicos o luz UV) (AWWA, 2006; Kneya, 2010; Safe Water for Texans, 2017; U.S. EPA, 2000; VMS Consultants, n.d.). Estos sistemas se implementan comúnmente en plantas centralizadas de gran escala para el suministro de agua a ciudades y grandes poblaciones (U.S. EPA, 2000).

En contraste, los sistemas de tratamiento compactos representan una alternativa innovadora. A menudo se presentan como unidades modulares y prefabricadas, diseñadas para atender las necesidades de comunidades más pequeñas, aplicaciones descentralizadas o situaciones de emergencia (Aquafrisch, n.d.; Crystal Quest Water Filters, n.d.; Ehalt Macedo et al., 2022; Innova Acqua, 2025; MITA Water Technologies, n.d.; Nyfdecolombia, n.d.; US Water Systems, n.d.; Universidad Nacional Federico Villarreal, 2023; Varón Escudero, 2018). Estos sistemas pueden incorporar procesos convencionales a una escala reducida o emplear tecnologías avanzadas para lograr un tratamiento eficiente en un espacio limitado.

La creciente importancia de soluciones innovadoras y eficientes para el tratamiento del agua radica en las limitaciones inherentes a los sistemas centralizados tradicionales. Estos últimos pueden resultar costosos en términos de inversión inicial y operación, además de requerir un alto consumo de energía y extensas redes de infraestructura, lo que los hace inadecuados para todos los contextos (Epic CleanTec, n.d.; Organica Water, 2019; U.S. EPA, 2000; VMS Consultants, n.d.). En este sentido, existe una necesidad cada vez mayor de soluciones descentralizadas, sostenibles y rentables, especialmente para comunidades pequeñas y áreas remotas (Aquafrisch, n.d.; Crystal Quest Water Filters, n.d.; Ehalt Macedo et al., 2022; Innova Acqua, 2025; MITA Water Technologies, n.d.; SUEZ, n.d.; US Water Systems, n.d.; Universidad Nacional Federico Villarreal, 2023; Varón Escudero, 2018; World Bank, 2012).

Los sistemas convencionales de tratamiento de agua potable presentan tanto ventajas como desventajas. Entre sus ventajas, destaca su capacidad para manejar grandes volúmenes de agua y lograr altos niveles de eficiencia en la remoción de una amplia gama de contaminantes, garantizando el cumplimiento de los estándares de calidad del agua potable (VMS Consultants, n.d.). Además, estos sistemas se basan en principios bien comprendidos y cuentan con marcos regulatorios establecidos (Safe Water for Texans, 2017). Sin embargo, las desventajas de los sistemas convencionales incluyen la necesidad de una inversión de capital significativa para la construcción de las plantas, la demanda de grandes extensiones de terreno para su instalación, un alto consumo de energía para la operación de los equipos y la necesidad de personal técnico especializado para su operación y mantenimiento (Organica Water, 2019; U.S. EPA, 2000; VMS Consultants, n.d.; World Bank, 2012). Adicionalmente, la

infraestructura requerida para transportar el agua cruda a las plantas centralizadas y distribuir el agua tratada a los consumidores puede ser extensa y costosa (Epic CleanTec, n.d.).

En cuanto a datos cuantitativos específicos sobre la eficiencia, costos, espacio y caudal tratado en sistemas convencionales de tratamiento de agua potable, la información directa en los fragmentos proporcionados es limitada. No obstante, al considerar sistemas de tratamiento de aguas residuales convencionales, se observa que a menudo requieren mayores extensiones de terreno en comparación con sistemas compactos basados en biorreactores de membrana (MBR) (Sigma DAF Clarifiers, n.d.a). Un estudio comparativo de costos entre un sistema convencional de tratamiento de aguas residuales y un sistema de ultrafiltración (UF) arrojó un costo total promedio de \$0.0496/m³ para el sistema convencional (Rodríguez-García et al., 2011). En términos de eficiencia de tratamiento, las plantas de tratamiento de agua potable convencionales demostraron una eliminación completa de Giardia y Cryptosporidium en un estudio (El-Sayed et al., 2023), lo que establece un punto de referencia para la capacidad de estos sistemas para remover patógenos. Si bien estos datos se refieren principalmente al tratamiento de aguas residuales, sugieren que los sistemas convencionales, aunque pueden tener costos operativos considerables y requerir grandes espacios, son capaces de alcanzar una alta eficiencia en la eliminación de contaminantes.

Los sistemas compactos de tratamiento de agua potable abarcan una variedad de tecnologías diseñadas para purificar el agua de manera eficiente en un espacio

reducido. Entre los diferentes tipos de sistemas compactos, destacan las plantas empaquetadas, los sistemas de filtración por membrana y los reactores fotocatalíticos.

Las plantas empaquetadas son unidades preensambladas y modulares que integran diversos procesos de tratamiento en un diseño compacto. Estas plantas están diseñadas para facilitar la instalación y operación, a menudo con controles automatizados y una mínima necesidad de construcción en el sitio (Innova Acqua, 2025; MITA Water Technologies, n.d.; VMS Consultants, n.d.; Water Online, 2006). Son especialmente adecuadas para comunidades pequeñas e instalaciones temporales.

Los sistemas de filtración por membrana, como la ultrafiltración (UF), la nanofiltración (NF) y la ósmosis inversa (RO), utilizan membranas semipermeables para separar los contaminantes del agua según su tamaño y carga. Estos sistemas ofrecen una alta eficiencia de remoción en un espacio relativamente pequeño (Aquafirsch, n.d.; Crystal Quest Water Filters, n.d.; Innova Acqua, 2025; Kinetico, n.d.; MITA Water Technologies, n.d.; NEWater, n.d.a; Nyfdecolombia, n.d.a; Sigma DAF Clarifiers, n.d.a, n.d.b; SUEZ, n.d.; US Water Systems, n.d.a). Los sistemas de ósmosis inversa compactos, por ejemplo, pueden eliminar una amplia gama de contaminantes, incluyendo metales pesados y microorganismos (Crystal Quest Water Filters, n.d.; US Water Systems, n.d.; WECO Filters, n.d.), mientras que la ultrafiltración es efectiva contra bacterias y algunos virus (NEWater, n.d.a; Sigma DAF Clarifiers, n.d.a; US Water Systems, n.d.a).

Los reactores fotocatalíticos compactos representan un enfoque innovador para la degradación de contaminantes orgánicos. Estos sistemas utilizan materiales

fotocatalíticos, como el TiO_2 , y fuentes de luz (por ejemplo, LEDs) para generar especies reactivas que descomponen los contaminantes a través de la oxidación (Assadi et al., 2024; Elmansba et al., 2021a, 2021b). Los reactores compactos pueden mejorar la eficiencia al aumentar la superficie del catalizador expuesta a la luz (Assadi et al., 2024; Elmansba et al., 2021a, 2021b) y pueden ser rentables (Assadi et al., 2024).

El tratamiento del agua potable es un proceso esencial para la salud pública, y la elección entre sistemas convencionales y compactos depende de las necesidades específicas de cada contexto. Mientras que los sistemas convencionales son adecuados para grandes poblaciones urbanas, los sistemas compactos ofrecen ventajas significativas en términos de tamaño, costo inicial, eficiencia para contaminantes específicos, simplicidad operativa y adecuación para el tratamiento descentralizado.

En el caso específico del Valle del Cauca, la problemática de la calidad del agua en las zonas rurales, evidenciada por los altos índices de riesgo y la inviabilidad sanitaria de muchos acueductos, justifica la exploración de soluciones alternativas a las infraestructuras convencionales. Los sistemas de tratamiento de agua potable compactos, especialmente aquellos basados en tecnologías como los biorreactores de membrana, presentan un potencial considerable para abordar estos desafíos, proporcionando agua segura, confiable y asequible a las comunidades rurales.

ANÁLISIS DEL REQUERIMIENTO

Intención del Producto

Presentar sobre planos el diseño y modelo de una planta compacta de tratamiento de agua potable, enfocada en garantizar el suministro de agua potable y segura para la urbanización La Victoria, tercera etapa, corregimiento de El Carmelo, municipio de Candelaria, Valle del Cauca, quienes cuentan con escasos de infraestructura y limitación por fuentes superficiales. La intención principal es desarrollar un sistema eficiente, sostenible, de bajo costo y accesible que permita reducir la incidencia de enfermedades relacionadas con el consumo de agua no apta.

Con el desarrollo se busca beneficiar a:

- Urbanización La Victoria, tercera etapa.
- Centros educativos y de salud.

El desarrollo del proyecto busca no solo proporcionar una solución técnica eficiente, sino también fomentar la educación sobre el uso responsable del agua y la importancia de las condiciones salubres en comunidades beneficiarias. Asimismo, se priorizará el uso de materiales económicos y de fácil acceso para garantizar la réplica del sistema.

Parámetros del diseño

Para garantizar que el diseño cumple con los requisitos establecidos y se ajusta a las necesidades del proyecto, se deben verificar los siguientes parámetros clave, asegurando que cada uno contribuya al desempeño óptimo, la viabilidad técnica y la sostenibilidad de la solución propuesta.

Requerimientos técnicos

- Capacidad de tratamiento, en este caso se propone sistemas de tratamiento de 50 lps (litros por segundo) o 180 m³/h, tomando como caudal de dotación neta 140 l/hab/día (Ras,2000) y una población a atender de 20.000 habitantes.
- Tecnología de tratamiento, todas las plantas de tratamiento serán manufacturadas bajo la determinación de las tecnologías de tipo “TECNIFLOC” con reactores de manto de lodos y de tipo “BIOBOX” de forma contenerizada. El cambio de tecnología será homologado en el caso de que la calidad del agua cruda a tratar así lo requiera.
- Mantenimiento, las plantas de tratamiento deben conservar una infraestructura solida y robusta, pero a su vez, deben permitir que los mantenimientos locativos y de infraestructura sean de fácil ejecución.
- Cumplimiento normativo, todas las plantas de tratamiento deben cumplir como mínimo con los parámetros de calidad de la resolución 2115 del 2007 y los requerimientos y lineamientos técnicos establecidos en el RAS.
- Eficiencia del sistema, todas las plantas deben ser capaz de tratar agua con calidad apta para consumo humano.
- Consumo energético, se optará por sistemas de tratamiento con bombas y motores eficientes, además de contar con operaciones unitarias funcionales por gravedad, con lo cual se reduce el uso de equipos electromecánicos.

Requerimientos operativos

- Facilidad de operación.
- Durabilidad.

- Sostenibilidad.
- Autonomía del sistema.

Todas las plantas de tratamiento se entregan a cero metros, llave en mano o con límite de batería, es decir, no se realizará procesos de captación ni tramites que correspondan a los mismos.

Requerimientos logísticos

- Transporte e instalación.
- Disponibilidad de materiales.
- Red de soporte.

Requerimientos sociales

- Impacto en la comunidad.
- Aceptación de la comunidad.
- Capacitación.

Estimación de Características de Diseño

Para prever el desempeño del sistema y su viabilidad, es importante analizar algunas de sus características clave. Esta etapa permite anticipar posibles limitaciones y realizar ajustes antes de la implementación.

Potencia y Consumo Energético

- Identificación de los componentes que requieren energía.
- Considerar opciones para reducir el consumo eléctrico.
- Análisis del consumo energético y costos operativos del sistema.

- Análisis de fuentes alternativas de energía en caso de zonas sin acceso a la red eléctrica.

Eficiencia y Rendimiento

- Estimación de la cantidad de agua tratada.
- Facilidad de mantenimiento y su impacto en la continuidad del servicio.
- Eficiencia del sistema basado en modelos matemáticos y simulaciones.
- Comparación con otros sistemas existentes para determinar mejoras o innovaciones.

Costo y accesibilidad

- Apoyo de programas gubernamentales como “Agua es vida”.
- Evaluación de financiamiento.

MARCO TEÓRICO

El acceso al agua potable sigue siendo un desafío crítico en las zonas rurales y urbanas vulnerables de Colombia, donde las limitaciones económicas, geográficas y técnicas dificultan la implementación de la infraestructura tradicional de tratamiento de agua. Las plantas compactas de tratamiento de agua potable de bajo costo ofrecen una solución efectiva y accesible para estas comunidades. Este informe profundiza en las tecnologías de tratamiento específicas adecuadas para estos sistemas, detalla la normativa colombiana vigente, incorpora estudios de caso relevantes en América Latina, analiza la sostenibilidad integral, explora modelos de gestión comunitaria y presenta los principios básicos del Análisis del Ciclo de Vida (ACV). Los hallazgos destacan la idoneidad de la filtración lenta en arena, la desinfección solar y con tabletas de cloro, y la adsorción con materiales locales. Se enfatiza la importancia del Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS 2000) de Colombia. Los estudios de caso exitosos, como los modelos CENAGRAP en Ecuador y SISAR en Brasil, proporcionan lecciones valiosas sobre la gestión comunitaria y la sostenibilidad. Se recomienda un enfoque integral que priorice tecnologías de bajo costo y mantenimiento, la participación activa de la comunidad y la consideración de la sostenibilidad en todas sus dimensiones para mejorar el acceso al agua potable en las zonas vulnerables de Colombia.

1. Contexto de las Necesidades de Tratamiento de Agua en Zonas Rurales y Urbanas Vulnerables de Colombia

En Colombia, a pesar de los avances en la cobertura de agua potable, persisten grandes desigualdades en el acceso a este recurso vital, especialmente en zonas

rurales y urbanas de alta vulnerabilidad socioeconómica (Water for the World: Constructing a Slow Sand Filter (n.d.). *Technical Note No. RWS. 3.C.3*). Millones de personas se ven privadas del acceso a agua potable segura debido a la falta de infraestructura adecuada y a las limitaciones económicas de las comunidades y los entes territoriales (Ras, 2000) Esta situación tiene graves consecuencias para la salud pública, contribuye a la propagación de enfermedades transmitidas por el agua y limita las oportunidades de desarrollo social y económico en estas poblaciones (Hind Pharma, 2020).

Las plantas de tratamiento de agua potable compactas y de bajo costo se presentan como una alternativa viable y sostenible para abordar los desafíos del acceso al agua en las zonas vulnerables de Colombia. Su diseño modular y tamaño reducido facilitan su transporte e instalación en sitios remotos o de difícil acceso, sin requerir grandes inversiones en infraestructura. Además, su bajo consumo energético y fácil mantenimiento las hacen apropiadas para comunidades con recursos limitados y sin acceso constante a redes eléctricas o personal altamente especializado. La implementación de estas soluciones tecnológicas puede mejorar significativamente la calidad de vida de las poblaciones vulnerables, reducir la incidencia de enfermedades relacionadas con el agua y promover un desarrollo más equitativo y sostenible en el país.

2. Antecedentes y Normativas en el Tratamiento de Agua

El marco regulatorio para el diseño y operación de plantas de tratamiento de agua potable se basa en regulaciones internacionales y nacionales. La OMS (2011)

establece parámetros básicos para la calidad del agua potable, mientras que organizaciones como USEPA (2019) y ASCE (2018) brindan pautas específicas para la infraestructura de tratamiento y drenaje urbano. En el contexto colombiano, la normatividad local debe tenerse en cuenta para asegurar la viabilidad del proyecto.

Estudios anteriores han demostrado que el desarrollo de plantas de fabricación compactas ha tenido un impacto positivo en varias regiones. Por ejemplo, la Water Environment Federation (WEF, 2019) documenta cómo el uso de tecnologías modulares ha permitido mejorar el acceso al agua limpia en áreas con infraestructura limitada.

2.1 Títulos y Artículos Relevantes del RAS 2000

El Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS 2000), adoptado mediante la Resolución 1096 de 2000, establece los requisitos técnicos para el diseño, construcción y operación de sistemas de tratamiento de agua potable en Colombia. Los títulos relacionados con la calidad del agua para consumo humano (Decreto 475 de 1998 y resoluciones posteriores), los criterios de diseño para plantas de tratamiento, y los requisitos para acueductos rurales y urbanos son particularmente relevantes para el diseño de plantas compactas de bajo costo en zonas vulnerables. Es fundamental que los diseños cumplan con los parámetros de calidad del agua tratada y los criterios técnicos establecidos en el RAS 2000 para garantizar la viabilidad y sostenibilidad de los proyectos.

2.2 Comparativa entre los Estándares del RAS 2000 y las Directrices de la OMS

Tanto el RAS 2000 como las Directrices para la Calidad del Agua Potable de la Organización Mundial de la Salud (OMS) establecen parámetros para garantizar la seguridad del agua para el consumo humano. Si bien ambos marcos comparten objetivos comunes en cuanto a la protección de la salud pública, pueden existir diferencias en los valores límite recomendados para ciertos parámetros microbiológicos (como *E. coli* y coliformes totales), fisicoquímicos (como turbidez) y el cloro residual (Park, S., Gokhale, S., & Colinco, K. (2017). Es importante considerar ambos conjuntos de directrices al diseñar sistemas de tratamiento de bajo costo para asegurar el cumplimiento de la normativa local y alcanzar los estándares internacionales de calidad del agua.

3. Enfoques de Sostenibilidad

La eficiencia energética y la sostenibilidad ambiental deben tenerse en cuenta al diseñar sistemas de tratamiento de agua. La Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (USEPA, 2019) enfatiza la importancia de soluciones descentralizadas y sostenibles para las comunidades con acceso limitado a los servicios de agua tradicionales.

Además, el cambio climático es un factor determinante en la disponibilidad y calidad del agua, por lo que es necesario incorporar en el diseño de las instalaciones estrategias de adaptación a las condiciones climáticas cambiantes (IPCC, 2013). Esto incluye la implementación de sistemas de energía renovable, la optimización del

consumo de reactivos químicos y la recuperación de subproductos para reducir el impacto ambiental.

3.1 Sostenibilidad Económica a Largo Plazo

La sostenibilidad económica de las plantas compactas de tratamiento de agua en Colombia depende de la viabilidad financiera a largo plazo, considerando los costos de inversión inicial, operación, mantenimiento y la capacidad de las comunidades para cubrir estos gastos. Es crucial establecer tarifas justas y mecanismos de recaudación eficientes, así como explorar fuentes de financiamiento externas y modelos de gestión que permitan la autosostenibilidad de los sistemas a nivel local (Machado, A. V. M., dos Santos, J. A. N., Alves, L. M. C., & da S. Quindeler, N. (2019). La selección de tecnologías de bajo costo operativo y mantenimiento, como la FLA y la desinfección solar, contribuye significativamente a la sostenibilidad económica.

3.2 Sostenibilidad Social: Aceptación y Participación Comunitaria

La aceptación y participación activa de la comunidad son fundamentales para el éxito y la sostenibilidad de cualquier proyecto de tratamiento de agua (Machado, A. V. M., dos Santos, J. A. N., Alves, L. M. C., & da S. Quindeler, N. (2019). Esto implica involucrar a los usuarios en la toma de decisiones, capacitar a personal local para la operación y el mantenimiento de las plantas (Kamruzzaman, A. K. M., Said, I., & Osman, O. (2013), y asegurar que los sistemas respondan a las necesidades y preferencias de la comunidad (Fluence Corporation. (n.d.). *Rural Water and Wastewater Treatment*. Modelos de gestión comunitaria exitosos se basan en la

apropiación del proyecto por parte de los beneficiarios, lo que garantiza su compromiso y colaboración a largo plazo.

3.3 Sostenibilidad Ambiental: Consideraciones Ambientales y Uso de Energías Renovables

La sostenibilidad ambiental implica minimizar el impacto negativo de las plantas de tratamiento en el entorno. Esto incluye la gestión adecuada de los residuos generados por el tratamiento (por ejemplo, lodos de filtros) y la eficiencia energética de los sistemas. Se debe explorar el potencial de utilizar fuentes de energía renovable, como la energía solar, para reducir la dependencia de la red eléctrica y disminuir la huella de carbono de las plantas. La implementación de prácticas de conservación del agua y la protección de las fuentes hídricas también son aspectos clave de la sostenibilidad ambiental.

3.4 Modelos de Gestión y Operación Comunitaria

Existen diversos modelos para la gestión y operación de plantas de tratamiento de agua a nivel comunitario en zonas rurales y urbanas vulnerables. Estos modelos varían desde la autogestión completa por parte de la comunidad hasta la cogestión con el apoyo de entidades gubernamentales u organizaciones no gubernamentales (ONG). Los factores clave para el éxito incluyen una estructura organizativa clara, la definición de roles y responsabilidades, la capacitación de operadores locales, mecanismos transparentes para la toma de decisiones y la sostenibilidad financiera a través de contribuciones de los usuarios o subsidios (Fluence Corporation. (n.d.). *Rural Water and Wastewater Treatment*.

4. Tecnologías Compactas y Alternativas de tratamiento

Dentro del proceso de selección de tecnología que recomienda realizar el RAS se deben analizar diferentes alternativas viables de sistemas de potabilización de agua conocidas en el país en cuanto a funcionalidad, operación y mantenimiento y eficiencia.

La selección de las tecnologías viables para las diferentes clases de agua (aguas subterráneas con altos contenidos de minerales y aguas superficiales con alto contenido de materia orgánica) descartan de plano las tecnologías convencionales construidas en concreto, tales como los sistemas de tratamiento del tipo coagulación-floculación-sedimentación-filtración rápida y los sistemas biológicos de tratamiento del tipo filtración en múltiples etapas, por sus altos costos de construcción, operación y mantenimiento que requieren, dado el caudal a operar.

4.1 Filtración Lenta en Arena

4.1.1 Principios de la Filtración Lenta en Arena:

La filtración lenta en arena (FLA) es un método de tratamiento de agua probado y eficaz, especialmente adecuado para comunidades rurales debido a su bajo costo operativo y mantenimiento sencillo. Este proceso utiliza un lecho de arena para filtrar el agua lentamente, eliminando turbidez y microorganismos patógenos a través de una combinación de procesos físicos, biológicos y químicos. La capa biológica que se forma en la superficie de la arena, conocida como "schmutzdecke", juega un papel crucial en la eliminación de contaminantes.

4.1.2 Consideraciones de Diseño para Sistemas Compactos:

Los filtros lentos en arena pueden diseñarse de forma compacta utilizando materiales locales como hormigón, ladrillo o ferrocemento. Se han desarrollado diseños innovadores que utilizan contenedores más pequeños, como cubos de plástico o bidones, demostrando la viabilidad de sistemas FLA a nivel familiar o para pequeñas comunidades. La clave está en asegurar una profundidad adecuada del lecho de arena (mínimo 0.7 m) y un tamaño efectivo del grano de arena entre 0.15 y 0.35 mm.

4.1.3 Simplicidad Operacional y Rentabilidad:

La FLA se caracteriza por su simplicidad de operación y mantenimiento, con bajos requerimientos de energía y sin necesidad de productos químicos. Los sistemas pueden operar por gravedad, eliminando costos de bombeo. La limpieza del filtro se realiza manualmente removiendo la capa superior de arena, lo que puede ser gestionado por la propia comunidad con una capacitación básica.

4.1.4 Limitaciones y Pretratamiento de Bajo Costo:

La FLA es más efectiva con agua de baja turbidez (idealmente <10 NTU). Para aguas con mayor turbidez, se pueden implementar métodos de pretratamiento de bajo costo como la sedimentación o la filtración gruesa con grava (filtros de grava de flujo ascendente u horizontal). Estos prefiltros ayudan a reducir la carga de sólidos suspendidos, mejorando el rendimiento y la vida útil del filtro lento en arena.

4.2 Sistemas de Desinfección Simplificados

4.2.1 Desinfección Solar (SODIS):

La desinfección solar (SODIS) es un método sencillo y económico que utiliza la radiación ultravioleta (UV-A) del sol para inactivar microorganismos patógenos en el

agua. El agua se coloca en botellas de plástico PET transparentes y se expone a la luz solar directa durante varias horas. SODIS es eficaz contra bacterias, virus y protozoos, y es especialmente adecuado para el tratamiento a nivel doméstico en regiones soleadas de Colombia. La eficacia depende de la intensidad solar, la turbidez del agua y la calidad de las botellas.

4.2.2 Uso de Tabletas de Cloro:

Las tabletas de cloro, generalmente de dicloroisocianurato de sodio (NaDCC), son una forma práctica y asequible de desinfectar el agua potable, especialmente en zonas rurales. La dosis requerida varía según la claridad del agua, pero generalmente se recomienda una tableta para tratar unos pocos litros. Las tabletas de cloro son efectivas contra la mayoría de las bacterias y virus, aunque pueden ser menos eficaces contra algunos protozoos. Es importante seguir las instrucciones del fabricante y permitir un tiempo de contacto adecuado antes de consumir el agua.

4.3 Membranas de Filtración de Bajo Costo

La microfiltración (MF) y la ultrafiltración (UF) son tecnologías de membrana que pueden integrarse en sistemas compactos para eliminar bacterias y protozoos. Si bien pueden requerir una inversión inicial mayor que la FLA o la desinfección solar, los avances tecnológicos están generando opciones de bajo costo y menor consumo energético (Biobox, n.d). Es crucial seleccionar sistemas que sean fáciles de operar y mantener en contextos de bajos recursos.

4.4 Procesos de Adsorción con Materiales Locales

Se puede investigar el uso de materiales disponibles localmente en Colombia, como residuos agrícolas (cáscaras de arroz, café, etc.) o arcillas, como bioadsorbentes para la remoción de contaminantes específicos del agua (National Drinking Water Clearinghouse. (n.d.). *Slow Sand Filtration* [Fact sheet]). Estos materiales podrían utilizarse en filtros modificados o como un paso adicional en el tratamiento, ofreciendo una solución sostenible y de bajo costo.

5. Análisis del Ciclo de Vida (ACV) y Recomendaciones:

Un Análisis del Ciclo de Vida (ACV) aplicado a plantas de tratamiento compactas permite evaluar los impactos ambientales asociados a todas las etapas de su existencia, desde la extracción de materiales hasta su disposición final. Esto incluye la consideración de la energía consumida, los materiales utilizados, las emisiones generadas y los residuos producidos. Aunque un ACV detallado puede ser complejo, incluso una introducción a sus principios puede enriquecer la comprensión de la sostenibilidad integral de las plantas compactas y ayudar a identificar oportunidades para minimizar su impacto ambiental.

La implementación de plantas compactas de tratamiento de agua potable de bajo costo representa una estrategia prometedora para mejorar el acceso al agua segura en las zonas rurales y urbanas vulnerables de Colombia. Tecnologías como la filtración lenta en arena y la desinfección solar ofrecen soluciones sencillas, eficaces y de bajo costo operativo. El cumplimiento del RAS 2000 es fundamental, y las experiencias exitosas en América Latina, como CENAGRAP y SISAR, proporcionan valiosas lecciones sobre la gestión comunitaria y la sostenibilidad. Un enfoque integral

que considere la sostenibilidad económica, social y ambiental, junto con modelos de gestión comunitaria participativos, es esencial para garantizar el éxito a largo plazo de estas iniciativas.

Para las entidades gubernamentales, organizaciones no gubernamentales y comunidades interesadas en mejorar el acceso al agua potable en las zonas vulnerables de Colombia, se recomienda:

- **Fomentar la implementación de tecnologías apropiadas:** Priorizar tecnologías de tratamiento de agua que sean de bajo costo, fáciles de operar y mantener, y que se adapten a las condiciones locales, como la filtración lenta en arena y la desinfección solar.
- **Garantizar el cumplimiento normativo:** Asegurar que todos los proyectos de tratamiento de agua cumplan con los requisitos establecidos en el RAS 2000 y otras normativas colombianas relevantes.
- **Promover la participación y gestión comunitaria:** Involucrar activamente a las comunidades en todas las etapas de los proyectos, desde la planificación hasta la operación y el mantenimiento, y fortalecer sus capacidades para la gestión sostenible de los sistemas.
- **Facilitar el acceso a financiamiento:** Explorar diferentes fuentes de financiamiento y establecer mecanismos que permitan a las comunidades cubrir los costos operativos y de mantenimiento de las plantas a largo plazo.

- **Brindar apoyo técnico y capacitación:** Proporcionar asistencia técnica y programas de capacitación a las comunidades para asegurar la correcta operación y mantenimiento de las plantas de tratamiento.
- **Realizar estudios de viabilidad y pilotos:** Antes de la implementación a gran escala, llevar a cabo estudios de viabilidad técnica, económica y social, así como proyectos piloto, para evaluar la idoneidad de las diferentes tecnologías y modelos de gestión en contextos específicos.
- **Considerar la sostenibilidad integral:** Adoptar un enfoque de sostenibilidad que abarque las dimensiones económica, social y ambiental en la planificación y ejecución de los proyectos.
- **Realizar un análisis del ciclo de vida básico:** Evaluar los posibles impactos ambientales de las plantas de tratamiento a lo largo de su ciclo de vida para identificar oportunidades de mejora y minimizar su huella ambiental.

ANÁLISIS DE RESTRICCIONES

5.1 Regulaciones ambientales a nivel Colombia

El marco regulatorio colombiano establece una serie de normas y directrices para asegurar la calidad del agua destinada al consumo humano y para regular las actividades que puedan tener un impacto sobre el medio ambiente. La construcción y operación de una planta de tratamiento de agua potable compacta debe enmarcarse dentro de estas regulaciones.

- **Decreto 1575 de 2007:** Este decreto establece el sistema para la protección y control de la calidad del agua para consumo humano, con el objetivo de monitorear, prevenir y controlar los riesgos para la salud causados por su consumo. Su alcance abarca la regulación del tratamiento del agua, definiendo los requisitos que deben cumplir las plantas de tratamiento para asegurar que el agua tratada sea segura. El decreto también establece las responsabilidades de las personas prestadoras del servicio de agua potable, así como de las entidades encargadas del control y vigilancia de la calidad del agua, como las autoridades locales de salud y ambientales. El Artículo 2 define una "Planta de tratamiento o de potabilización" como el conjunto de obras, equipos y materiales necesarios para llevar a cabo los procesos que permitan el cumplimiento de las normas de calidad del agua potable. El Artículo 9 requiere que las personas prestadoras laven y desinfecten los tanques de almacenamiento de agua tratada por lo menos dos veces al año. Para la expedición o renovación de concesiones de agua para consumo humano, el Artículo 28 exige que el interesado obtenga una autorización sanitaria favorable antes de acudir a la autoridad ambiental competente. Finalmente, el Artículo 33 manda que todo sistema de suministro de agua cuente con un sistema de alarma en la entrada de la planta de tratamiento para detectar posibles contaminaciones tóxicas. Estas disposiciones establecen requerimientos fundamentales que el proyecto debe cumplir para garantizar la seguridad y calidad del agua potable.
- **Resolución 2115 de 2007:** Esta resolución detalla los criterios específicos de calidad que debe cumplir el agua para consumo humano. Establece requisitos

fisicoquímicos, como los límites para el pH, la turbidez, el cloro libre y contaminantes como metales pesados y nitratos, así como requisitos microbiológicos, definiendo los límites para la presencia de microorganismos patógenos. La resolución también especifica los procedimientos para llevar a cabo las pruebas y controles necesarios para asegurar el cumplimiento de estos criterios de calidad, incluyendo la frecuencia de las pruebas y los métodos analíticos aprobados. Estos criterios representan los estándares de calidad que la planta de tratamiento compacta deberá alcanzar de manera consistente.

- **Decreto 1076 de 2015:** Este decreto compila diversas normas ambientales existentes en Colombia, incluyendo aquellas relacionadas con la gestión del agua. Consolida las regulaciones sobre la protección de fuentes hídricas, el tratamiento de aguas residuales y la gestión de efluentes en un solo documento, facilitando su aplicación y comprensión. Este decreto mejora la coordinación entre diferentes regulaciones y autoridades, promoviendo un enfoque más coherente en la gestión del recurso hídrico. Su implementación tiene un impacto significativo en la gestión de los recursos hídricos, facilitando la adopción de prácticas sostenibles y eficientes en las plantas de tratamiento y en la protección de las fuentes de agua.
- **Ley 142 de 1994:** Esta ley establece el régimen de los servicios públicos domiciliarios en Colombia, incluyendo el suministro de agua potable. Su objetivo principal es asegurar que estos servicios sean eficientes, universales y de calidad. En el contexto del tratamiento de agua potable, la ley busca garantizar que el agua suministrada sea segura y accesible para todos los ciudadanos,

protegiendo así la salud pública y promoviendo la equidad en el acceso a los servicios. La ley impone varias responsabilidades a los prestadores de servicios de agua potable, incluyendo la implementación de tecnologías adecuadas y la realización de pruebas periódicas para asegurar que el agua tratada cumpla con los estándares de calidad establecidos por la normatividad vigente. También exige que los prestadores gestionen de manera eficiente los recursos y las infraestructuras para garantizar la sostenibilidad del servicio a largo plazo, incluyendo la optimización de los procesos de tratamiento y la inversión en mantenimiento y modernización de las instalaciones.

- **Ley 9 de 1979 (Código Sanitario Nacional):** Esta ley dicta medidas para el control sanitario de los usos del agua, manejo de residuos sólidos y disposición de excretas. Establece normas generales para la protección del medio ambiente y la preservación, restauración y mejora de las condiciones sanitarias en relación con la salud humana. En cuanto al agua, regula la toma de aguas, las condiciones de los lugares cercanos a la toma, los canales o tuberías de conducción, las plantas de potabilización y los tanques de almacenamiento. También aborda la descarga de residuos en las aguas, la prohibición de utilizar las aguas como sitio de disposición final de residuos sólidos y las condiciones para los sistemas de alcantarillado y disposición de excretas.
- **Decreto 3930 de 2010:** Este decreto reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9ª de 1979, así como el Capítulo II del Título VI del Decreto-ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos. Establece las disposiciones relacionadas con los usos del recurso hídrico, el Ordenamiento del Recurso

Hídrico y los vertimientos al recurso hídrico, al suelo y a los alcantarillados. El decreto define términos importantes como vertimiento puntual y no puntual, y establece criterios mínimos para el Ordenamiento del Recurso Hídrico. También regula los usos del agua para diferentes fines, como consumo humano, preservación de flora y fauna, pesca, recreación e industrial. El Capítulo VI se dedica a los vertimientos, estableciendo prohibiciones en ciertas áreas y regulando las actividades que pueden generar vertimientos.

5.2 Impactos ambientales por los procesos de tratamiento

La selección de los procesos de tratamiento para la planta de agua potable compacta tendrá implicaciones ambientales que deben ser consideradas y mitigadas. El uso de coagulantes, cloro y agentes alcalinizantes, así como la gestión de los lodos generados, son aspectos clave en este análisis.

- **Coagulantes:** En el tratamiento de aguas, los coagulantes se utilizan para facilitar la eliminación de partículas suspendidas y coloidales, responsables de la turbidez del agua. Se pueden utilizar coagulantes inorgánicos, como sales de aluminio y hierro, y coagulantes orgánicos, como polímeros. Los coagulantes inorgánicos suelen ser efectivos en aguas con altos niveles de turbidez, pero pueden requerir ajustes de pH y generar un mayor volumen de lodos. Los coagulantes orgánicos pueden ser efectivos en un rango de pH más amplio y producir menos lodos. También existen coagulantes naturales, biodegradables y de bajo impacto ambiental, como los de base vegetal o almidón. El uso de coagulantes, tanto orgánicos como inorgánicos, puede tener efectos negativos si

no se utilizan las dosis adecuadas y si no se gestionan correctamente los residuos generados. La elección del coagulante debe considerar su efectividad, el costo y el impacto ambiental, especialmente en lo referente a la cantidad y características de los lodos producidos.

- **Cloro:** El cloro es un desinfectante comúnmente utilizado en el tratamiento de agua potable debido a su eficacia para eliminar microorganismos patógenos. Sin embargo, su uso también presenta riesgos ambientales y para la salud. El cloro gaseoso es altamente irritante y reactivo, pudiendo formar compuestos peligrosos al reaccionar con otras sustancias. En el agua, el cloro puede reaccionar con materia orgánica para formar subproductos de la desinfección (DBPs), como los trihalometanos (THMs), que son potencialmente dañinos para la salud. Las regulaciones establecen límites para la concentración de cloro residual en el agua potable). Existen métodos de desinfección alternativos al cloro, como el dióxido de cloro, las cloraminas, el ozono y la radiación ultravioleta (UV), cada uno con sus propias ventajas y desventajas en términos de eficacia, formación de subproductos, costo y residual en el sistema de distribución. La elección del método de desinfección deberá equilibrar la eficacia en la eliminación de patógenos con la minimización de los riesgos para la salud y el medio ambiente.
- **Agentes Alcalinizantes:** Los agentes alcalinizantes, como la soda cáustica, la cal o la soda, se utilizan en el tratamiento de agua para ajustar el pH, lo cual es importante para optimizar los procesos de coagulación y desinfección, así como para prevenir la corrosión en las tuberías de distribución. Un pH inadecuado

puede afectar la eficiencia de la floculación, la sedimentación y la filtración, y también puede influir en la formación de subproductos de la desinfección. Si los agentes alcalinizantes no se dosifican y controlan adecuadamente, pueden tener impactos ambientales negativos, como la alteración del pH de los cuerpos de agua receptores si los vertimientos no se neutralizan correctamente. Las regulaciones de calidad del agua potable establecen rangos de pH aceptables (típicamente entre 6.5 y 8.5). Por lo tanto, el uso de agentes alcalinizantes debe ser cuidadosamente gestionado para asegurar que el agua tratada cumpla con estos límites y para evitar efectos adversos en el medio ambiente.

- **Gestión de Lodos:** La generación de lodos es un subproducto inevitable del proceso de tratamiento de agua potable, resultante de la eliminación de sólidos suspendidos y coloidales mediante coagulación, floculación y sedimentación. La gestión adecuada de estos lodos es fundamental para evitar impactos ambientales negativos. En Colombia, el **Decreto 1287 de 2014** establece los criterios para el uso de los biosólidos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales, pero no aplica a los lodos que tengan características de peligrosidad. El decreto clasifica los biosólidos en Categoría A y B según sus características químicas (metales) y microbiológicas, estableciendo valores máximos permisibles para cada categoría. Existen restricciones para la aplicación de biosólidos de Categoría B en suelos, incluyendo limitaciones en el tiempo de aplicación en relación con el crecimiento y cosecha de cultivos, el pastoreo de animales y el acceso a áreas forestales, así como prohibiciones en áreas sensibles como playas, humedales y cerca de

fuentes de agua para consumo humano o animal. El decreto también establece requisitos para reducir la capacidad de fermentación, la atracción de vectores y la presencia de patógenos en los biosólidos. Los biosólidos que no sean objeto de uso deben ser dispuestos cumpliendo con la normatividad vigente, incluyendo la posibilidad de disposición final en rellenos sanitarios si cumplen con las condiciones para su manipulación. El **Decreto 3930 de 2010** regula los vertimientos al recurso hídrico, al suelo y a los alcantarillados, lo cual podría ser relevante para la gestión de la fase líquida de los lodos. La **Resolución 0631 de 2015** dicta los límites máximos permisibles de contaminantes en vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales y alcantarillados públicos, lo cual aplicaría a cualquier efluente líquido proveniente del tratamiento de lodos. A pesar de estas regulaciones, existen desafíos y debilidades en el marco normativo colombiano para la disposición final de lodos residuales, incluyendo la falta de un seguimiento y control estricto por parte de las autoridades ambientales en algunos casos. Por lo tanto, la gestión de lodos generados por la planta de tratamiento compacta deberá cumplir rigurosamente con la normativa vigente para evitar impactos ambientales negativos y potenciales sanciones.

5.3 Restricciones por viabilidad económica

El contexto económico actual de Colombia es un factor crucial que influirá en la viabilidad financiera del proyecto.

- Durante el año 2024, la economía colombiana ha mostrado signos de recuperación, con un crecimiento del PIB del 1.6% hasta septiembre. Sin

embargo, el país aún enfrenta desafíos como una inflación relativamente alta (5.4% anual a finales de octubre de 2024, aunque en descenso) y la necesidad de llevar a cabo reformas estructurales para mejorar el potencial de crecimiento a largo plazo. La tasa de interés de política monetaria del Banco de la República se mantuvo en 9.5% en enero de 2025.

- Las perspectivas económicas para 2025 apuntan a un crecimiento del PIB de alrededor del 2.8-2.9% y a una convergencia gradual de la inflación hacia la meta del 3% para finales de año.
- Este contexto económico presenta tanto oportunidades como desafíos para el proyecto. La recuperación económica podría facilitar la inversión, pero las tasas de interés relativamente altas podrían aumentar los costos de financiamiento. La inflación, aunque en descenso, aún podría impactar los precios de los materiales de construcción y los gastos operativos. Las proyecciones de mejora para 2025 ofrecen una perspectiva más favorable para la sostenibilidad financiera a largo plazo del proyecto.

5.4 Restricciones Legales y Regulatorias

- **Permisos de Construcción**

La construcción de la planta probablemente requerirá una licencia ambiental (licencia ambiental) si se considera que puede generar impactos ambientales significativos, según lo establecido en el **Decreto 1076 de 2015**. La autoridad competente para otorgar esta licencia puede ser la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA) o la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca, para el

caso de este proyecto. Para proyectos que atiendan a poblaciones iguales o superiores a 200,000 habitantes, la ANLA es la autoridad competente. El proceso de licenciamiento ambiental puede implicar la presentación de un Diagnóstico Ambiental de Alternativas (DAA) y un Estudio de Impacto Ambiental (EIA). Además de la licencia ambiental, se requerirá un permiso de uso del suelo (permiso de uso del suelo) del departamento de planeación, que asegure la compatibilidad del proyecto con el Plan de Ordenamiento Territorial (POT) vigente.

- **Permisos de Operación**

Para la operación de la planta de tratamiento, se necesitarán permisos sanitarios y autorizaciones de las autoridades de salud, específicamente de la Secretaría de Salud Municipal (en referencia al Decreto 1575 y la Resolución 2115), para garantizar que el agua tratada cumpla consistentemente con los estándares de calidad para el consumo humano. También es probable que se requiera una autorización sanitaria favorable ("autorización sanitaria favorable") de la autoridad de salud departamental como requisito previo para obtener o renovar las concesiones de agua para consumo humano de la autoridad ambiental.

- **Permisos de Vertimiento**

El vertimiento de aguas residuales tratadas de la planta (incluyendo posibles vertimientos del tratamiento de lodos) requerirá la obtención de un permiso de vertimiento (permiso de vertimiento) de la autoridad ambiental competente, de acuerdo con el **Decreto 3930 de 2010** y la **Resolución 0631 de 2015**. Existen prohibiciones estrictas sobre la descarga de aguas residuales en ciertas áreas sensibles como

fuentes de agua y acuíferos. La solicitud de un permiso de vertimiento exigirá la caracterización detallada del vertimiento, información técnica sobre el sistema de tratamiento y datos sobre el cuerpo de agua receptor.

METODOLOGÍA PARA LA SELECCIÓN Y DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN

La planta de tratamiento de agua potable compacta se distingue por una serie de características únicas que la posicionan como una solución innovadora y más eficiente que las opciones actualmente disponibles en el mercado. En primer lugar, la planta tiene una capacidad de salida de agua de 30 litros por segundo (lps), lo que equivale a una producción de 2592 metros cúbicos de agua potable por día. Esto nos permite satisfacer las necesidades de la urbanización La Victoria, tercera etapa, quienes necesiten de esta innovadora solución, brindando un suministro continuo de agua tratada y purificada. La planta, además, opera con un consumo energético reducido de 430W, lo que asegura una eficiencia energética considerable, minimizando el impacto ambiental y los costos operativos a largo plazo.

En términos de dimensiones, la planta de tratamiento propuesta ha sido diseñada para ser compacta y modular, lo que facilita su integración en una variedad de entornos, desde áreas rurales hasta zonas urbanas, sin comprometer el espacio disponible. Las medidas exactas de la planta son personalizables según las necesidades específicas de cada instalación, asegurando que pueda adaptarse a diferentes condiciones geográficas y urbanísticas sin necesidad de modificaciones costosas o complicadas. Esta adaptabilidad es un elemento clave en la propuesta de valor, ya que responde a la demanda de soluciones versátiles y eficientes en el contexto de comunidades con distintas características y haciéndola muy acorde a la solución requerida por la urbanización La Victoria, tercera etapa.

El periodo de diseño es parte fundamental de todo proyecto de ingeniería, con respecto a la construcción de plantas de tratamiento, de acuerdo con la Resolución

0330 de 2017, el Período de Diseño para cualquier tipo de proyecto es de 25 años, como lo indica el artículo 40: *“Para todos los componentes de los sistemas de acueducto, alcantarillado y aseo, se adopta como periodo de diseño 25 años”*.

Para determinar la dotación neta, el Artículo 43 de la Resolución 0330 de 2017 expresa la posibilidad de establecer el dato respecto a los consumos históricos del sistema de acueducto existente y que a falta de esta información se puede adoptar la siguiente dotación neta máxima:

ALTURA PROMEDIO SOBRE EL NIVEL DEL MAR DE LA ZONA ATENDIDA	DOTACIÓN NETA MÁXIMA (L/Hab*Día)
>2000 m.s.n.m.	120
1000 – 2000 m.s.n.m.	130
<1000 m.s.n.m.	140

Por lo tanto, y dado que no existe historial de consumos históricos para el acueducto del proyecto de la urbanización La Victoria, tercera etapa y que esta población se encuentra a una altitud media de 960 m.s.n.m., la dotación adoptada actual y futura para utilizarse en el proyecto del sistema de tratamiento de agua potable es de 140 L / hab. x día.

Para definir la dotación bruta correspondiente al diseño de cada uno de los componentes que conforman un sistema de acueducto, se calcula conforme a la ecuación dada en el Artículo 44 de la Resolución 0330 de 2017:

$$D_{bruta} = D_{neta} / (1 - \%p)$$

Donde:

- Dbruta: Dotación bruta

- Dneta: Dotación neta máxima = 140 L/Hab*Día
- %p: Porcentaje de pérdidas

La Resolución 0330 permite hasta un máximo de 25% de pérdidas técnicas y estas se relacionan con las condiciones en las que va a operar el sistema de acueducto (captación, conducción, planta de tratamiento y redes de distribución). Para el caso, se trata de un sistema nuevo de bombeo y distribución, con un caudal constante y una planta de tratamiento con pérdidas de agua definidas referidas a las que se requieren para los lavados de los filtros y los periódicos desagües de los clarificadores, por lo que se puede afirmar que las pérdidas no alcanzan a ser más del 10% de la dotación neta. Sin embargo, y para compensar posibles construcciones adicionales comerciales, industriales e institucionales a establecerse en el proyecto, se asume un porcentaje de pérdidas igual a 20,5%, entonces:

$$D_{bruta} = \frac{140}{1 - 0.205} = 176 \frac{L}{Hab} * día$$

Por lo tanto, la dotación bruta a utilizarse para el cálculo de los caudales del acueducto es igual a 176 L / hab. x día.

Con respecto al caudal de diseño y de acuerdo con el Artículo 99 de la Resolución 0330 de 2017, el caudal de diseño para satisfacer la demanda del sistema de tratamiento debe ser igual al caudal máximo diario (CMD) para los usuarios del proyecto en el tiempo del período de diseño establecido a 25 años, mencionado anteriormente.

El CMD se basa en el cálculo del caudal medio diario (cmd) multiplicado por un factor de mayoración (K1) que se encuentra definido en el Artículo 47 de la Resolución 0330, en la cual se normatiza que este debe ser máximo 1,20 para poblaciones mayores a 12.500 habitantes.

El caudal medio diario (cmd) está dada por la siguiente ecuación:

$$cmd = P \times Dbruta / 86400$$

Donde:

- cmd: Caudal medio diario
- P: Población = 20.000 habitantes
- Dbruta: Dotación bruta máxima = 180 L/Hab/Día

$$cmd = 20000 \times \frac{180}{86400} = 42 lps$$

Por lo tanto, el caudal medio diario será igual a 42 L/s y el Caudal de Diseño (CMD) de la planta de tratamiento será entonces $42 \times 1,20 = 50 \text{ L/s}$.

Dentro del proceso de selección de tecnología que recomienda realizar la norma RAS se deben analizar diferentes alternativas viables de sistemas de potabilización de agua conocidas en el país en cuanto a funcionalidad, operación y mantenimiento y eficiencia.

El objetivo general es suministrar un sistema de tratamiento fisicoquímico (sobre planos) que permita el cumplimiento de los parámetros establecidos en el decreto 1575 de 2007, mediante un diseño eficiente y con bajos costos de operación y

mantenimiento, con el fin de mejorar la rentabilidad de la empresa y ofrecer a los usuarios agua de excelente calidad.

La selección de las tecnologías viables para esta clase de agua (aguas subterráneas con altos contenidos de minerales) descartan de plano las tecnologías convencionales construidas en concreto, tales como los sistemas de tratamiento del tipo coagulación-floculación-sedimentación-filtración rápida y los sistemas biológicos de tratamiento del tipo filtración en múltiples etapas, por sus altos costos de construcción, operación y mantenimiento que requieren, dado el caudal a operar.

Por lo tanto, básicamente las tecnologías de tratamiento se reducen a escoger plantas de tratamiento, disponibles en el mercado, que sean capaces de tratar aguas subterráneas con sus características típicas de altos contenidos de minerales, fosfatos, dureza entre otros, pero que a veces llegan a ser inversiones muy altas en CAPEX y OPEX.

Todas las plantas del mercado se comercializan con la combinación de operaciones unitarias de tratamiento, tales como: sistemas de oxidación iniciales por aireación o cloración, entre otros, coagulación y floculación por contacto con diferentes productos químicos, sedimentación de alta tasa con diferentes formas geométricas de los tanques, sistemas de osmosis, electrólisis, tanques de suavización para remover dureza y filtros de arena, antracita y carbón activado.

para el pulimento final, todos con diferentes presentaciones y colocados en serie o paralelos. El último proceso es la desinfección, que se puede aplicar mediante

diferentes tecnologías tales como luz ultravioleta, ozonificación y cloro líquido o gaseoso entre otros.

Por otra parte, la selección de cualquiera de las tecnologías unitarias de tratamiento a implementar debe lograr un 100% de eficiencia y eficacia del tratamiento, al mínimo costo de construcción, operación y mantenimiento de estas. Lógicamente, estos procesos unitarios van de la mano con el tipo de agua a tratar. Influye también la utilización de tecnologías que sean modernas y sencillas de operar (minimizando mano de obra especializada y el consumo energético) y que no requieran de repuestos costosos y/o difíciles de conseguir. Otra variable que considerar es la posibilidad de construir la planta de forma modular, lo que permite ir actualizando el sistema a medida que crece la población usuaria.

Finalmente, tras un análisis detallado y la selección de diversas tecnologías unitarias de tratamiento, se determinó la implementación de un sistema prefabricado que incorpora un clarificador central de flujo laminar de alta eficiencia, complementado con un proceso de filtración fina en dirección descendente mediante lechos duales compuestos por arena y antracita. Para este propósito, se empleará la planta de tratamiento modelo "TECNIFLOC". Adicionalmente, se contempla la inclusión de procesos de pre-oxidación mediante una columna de desaireación, así como etapas de coagulación y floculación.

Esta tecnología, considerando las características particulares del agua subterránea, incorpora un sistema de clarificación dentro de un tanque de geometría cónica, donde la mayor parte de los lodos es eliminada por medio de sedimentación.

Asimismo, permite la eliminación de fosfatos mediante la formación de compuestos insolubles a través de la precipitación de sales de aluminio o hierro. Se trata de una planta versátil que asegura la obtención de agua con altos estándares de calidad.

Una vez finalizado el proceso de clarificación, se plantea la incorporación de un sistema de filtración automática compuesto por medios duales de antracita y arena, cuyo propósito es eliminar las partículas coloidales que pudieran no haber sido retenidas en la etapa anterior. La implementación del clarificador previamente descrito permite extender los ciclos de filtración y reducir significativamente las pérdidas de agua asociadas a los procesos de retrolavado.

Uno de los aspectos más relevantes de la propuesta es el precio competitivo. La intención es brindar toda la capacidad de producción y calidad por un único precio de venta, lo que simplifica los costos para el usuario final y facilita la toma de decisiones. Este modelo de precios transparente es una ventaja considerable frente a otras alternativas en el mercado, que a menudo presentan costos adicionales por mantenimiento, recambios de piezas o consumo de energía. La planta de tratamiento propuesta, al contrario, proporciona un coste de operación predecible y accesible, lo que resulta especialmente atractivo para las comunidades que buscan una solución económica a largo plazo.

Al comparar nuestra planta con las soluciones existentes en el mercado, se pueden destacar varias ventajas competitivas. A diferencia de otros sistemas, que suelen ser más grandes, costosos y menos eficientes en términos de consumo

energético, nuestra planta combina alta capacidad de producción, bajo consumo eléctrico, y un diseño compacto y adaptable.

La alternativa seleccionada corresponde a una planta que integra las ventajas de un sistema convencional con un diseño completamente hidráulico, operado por gravedad. Esta configuración contempla cuatro (2) líneas de tratamiento dispuestas en paralelo, cada una diseñada para un caudal nominal de 25 L/s. Cada línea incluye un tanque cónico destinado a la clarificación del agua previamente floculada, seguido de cuatro (4) filtros de flujo descendente. El sistema no requiere válvulas de control ni de operación, ya que su funcionamiento es completamente automatizado, incluyendo los ciclos de retrolavado, los cuales se activan por diferencial de presión en función de la calidad del agua de entrada. La infraestructura se construye en tanques cilíndricos fabricados en acero al carbón.

En resumen, nuestra planta representa una mejora significativa frente a las opciones actuales disponibles en el mercado, no solo por su capacidad de producción y eficiencia energética, sino también por su precio accesible y su tecnología de purificación avanzada. Estas características hacen que nuestra solución sea ideal para comunidades como la urbanización La Victoria, tercera etapa, que necesitan un acceso continuo al agua potable de calidad, pero que no pueden permitirse los costos elevados o las soluciones complejas que a menudo se encuentran en el mercado. La metodología empleada en el diseño y selección de esta planta tiene como objetivo satisfacer las necesidades específicas de la urbanización La Victoria, tercera etapa, corregimiento de El Carmelo, municipio de Candelaria, departamento del Valle del

Cauca, mejorando su calidad de vida a través de una solución accesible, confiable y tecnológicamente avanzada.

ANÁLISIS DE COSTOS

La propuesta actual de análisis de costos organiza el proyecto en dos categorías principales: costos de operación y costos de inversión. Los costos de operación se dividirán en costos variables directos, costos fijos y gastos generales (overhead), mientras que la inversión inicial se detallará en costos de capital directos, costos indirectos y capital de trabajo. El enfoque metodológico se fundamentará en la Estructura de Desglose del Trabajo (WBS), lo que permitirá realizar una estimación ascendente (bottom-up) para cada unidad de tratamiento, de acuerdo con los modelos de la EPA (US EPA).

Metodología de estimación de costos

1. **Desglose de tareas (WBS):** Se divide el proyecto en paquetes de trabajo (pre-oxidación, coagulación-floculación, clarificación, filtración, dosificación química, retrolavado) y se asigna un costo unitario a cada uno (2014). *Cost curves for construction and O&M for water treatment processes*. Recuperado de [US EPA](#).
2. **Obtención de costos unitarios:** Se consultarán las curvas de costo de construcción y O&M para procesos de tratamiento de agua de la EPA [nepis.epa.gov](#) y de sus reportes de costos (Volumen 1 y Volumen 2) (2007). *Cost reports (Volume 1 y Volume 2)*. Recuperado de [nepis.epa.gov](#).
3. **Aplicación de factores locales:** Ajuste de costos según condiciones de obra en Valle del Cauca, incluyendo flete, logística y mano de obra regional.

4. **Incorporación de contingencias:** Se añade un porcentaje (5–10 %) para cubrir imprevistos y variaciones de precio en mercado (2010). *Contingency percentages for unforeseen circumstances*. Recuperado de mavmatrix.uta.edu.

Costos de operación

1. Costos directos variables

Los **costos directos variables** son aquellos que varían en función del volumen tratado y están asociados con insumos y mano de obra directa (2024). *Costos directos variables*. Recuperado de ProjectManagement.com (2020). *Reactivos químicos y costos asociados*. Recuperado de Vista Projects:

- **Reactivos químicos:** coagulantes (sales de aluminio o hierro), floculantes, cloro para precloración y desinfección.
- **Energía eléctrica:** bombeo y automatización de válvulas diferenciales.
- **Agua de retrolavado:** pérdida de agua y su costo de reposición.
- **Mantenimiento menor:** repuestos de bombas peristálticas y actuadores.

2. Costos fijos

Los **costos fijos** permanecen constantes independientemente del caudal operativo (2024). *Costos fijos*. Recuperado de ProjectManagement.com:

- **Servicios públicos fijos:** alumbrado, vigilancia, comunicaciones.
- **Impuestos y seguros:** predial, riesgos laborales.
- **Arriendos y rentas:** uso de suelo y caseta de bombeo.

3. Gastos generales (overhead)

Los **gastos generales** cubren funciones de soporte y administración del proyecto

(2023). *Gastos generales (overhead)*. Recuperado de [simpliaxis.com](https://www.simpliaxis.com):

- **Administración y gerencia de proyecto.**
- **Publicidad y relaciones comunitarias.**
- **Servicios de apoyo:** disposición de residuos, seguridad industrial.

Costos de inversión

1. Costos directos de capital

Se trata de la compra e instalación de activos fijos necesarios para la planta (2025).

Costos directos de capital. Recuperado de [Investopedia](https://www.investopedia.com):

- **Equipos principales:** unidades TECNIFLOC (clarificadores laminares), filtros de lecho dual arena-antracita, tanques cónicos de acero al carbón.
- **Obra civil y cimentaciones:** bases, canales de flujo y muros de contención.
- **Instalaciones electromecánicas:** tuberías, válvulas, paneles de control, bombas peristálticas.
- **Automatización:** sensores de diferencial de presión y sistema SCADA.

2. Costos indirectos

Son gastos vinculados al proceso de puesta en marcha, pero no directamente

atribuibles a un solo equipo (2024). *Costos indirectos*. Recuperado de

[ProjectManagement.com](https://www.projectmanagement.com):

- **Permisos y licencias ambientales:** licencia ambiental y de uso de suelo requerida por la ANLA y las autoridades regionales (2005). *Permisos y licencias ambientales*. Recuperado de sswm.info (2017). *Permisos y licencias ambientales*. Recuperado de Agencia Nacional de Minería.
- **Gestión de trámites:** consultoría para EIA, estudios de suelos, socialización con la comunidad.
- **Contingencias e imprevistos:** generalmente entre 5 % y 10 % del monto de capital directo.

Aun que para el presupuesto de construcción de la planta de tratamiento se tiene en cuenta toda lo concerniente a los tramites y permisos de carácter legal, se aclara que la propuesta al ser una solución a cero metros y llave en mano, el valor por estos servicios profesionales no cuenta como un rubro al final del ejercicio, simplemente se contempla como un análisis informativo.

3. Capital de trabajo

Dinero necesario para iniciar la operación antes de recibir ingresos (2022).

Capital de trabajo. Recuperado de netsuite.com (2025). *Inventario inicial de reactivos*.

Recuperado de Investopedia:

- **Inventario inicial de reactivos:** stock de coagulantes, floculantes y cloro para los primeros meses.
- **Nómina temprana:** pago de fontanero y supervisor de planta durante el periodo inicial de puesta en marcha.

- **Gastos operativos preliminares:** contratos de servicio, consumibles y materiales menores.

Costos de inversión inicial

COSTOS DIRECTOS DE CAPITAL			
CONCEPTO	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	COSTO
Equipos TECNIFLOC (clarificadores Paneles lamelares)	Suministro e instalación de paneles de sedimentación rápida en polietileno de reúso	2 UND	\$10.000.000
Filtros de lecho dual (arena + antracita)	Filtración lenta – 8 filtros 4 por cada clarificador – Incluye tanques en AC	8 UND	\$80.000.000
Tanques cónicos de acero al carbón	Reactores de manto de lodos - Clarificación	2 UND	\$50.000.000
Obra civil y cimentaciones	Bases, canales, muros	1 UND	\$35.000.000
Instalaciones electromecánicas	Tuberías AC SCH40, válvulas, bombas peristálticas	1 UND	\$20.000.000
TOTAL, COSTOS DIRECTOS Construcción de la planta de tratamiento			\$195.000.000

COSTOS INDIRECTOS		
CONCEPTO	DESCRIPCIÓN	COSTO
Permisos y licencias ambientales y de suelo	ANLA, CVC y Municipio de Candelaria	\$30.000.000
Consultoría	(EIA, estudios de suelos, trámites) – Incluye socialización comunitaria	\$20.000.000

Contingencias	(10% del total de costos directos)	\$19.500.000
TOTAL, COSTOS INDIRECTOS		\$69.500.000

CAPITAL DE TRABAJO		
CONCEPTO	DESCRIPCIÓN	COSTO
Inventario inicial de reactivos químicos	Coagulantes, floculantes, gas cloro	\$20.000.000
Nómina inicial (fontanero, supervisor)	Arranque y puesta en marcha del sistema de tratamiento – 2 meses	\$10.000.000
Gastos operativos preliminares	Consumibles y contratos de servicio	\$10.000.000
TOTAL, CAPITAL DE TRABAJO		\$40.000.000

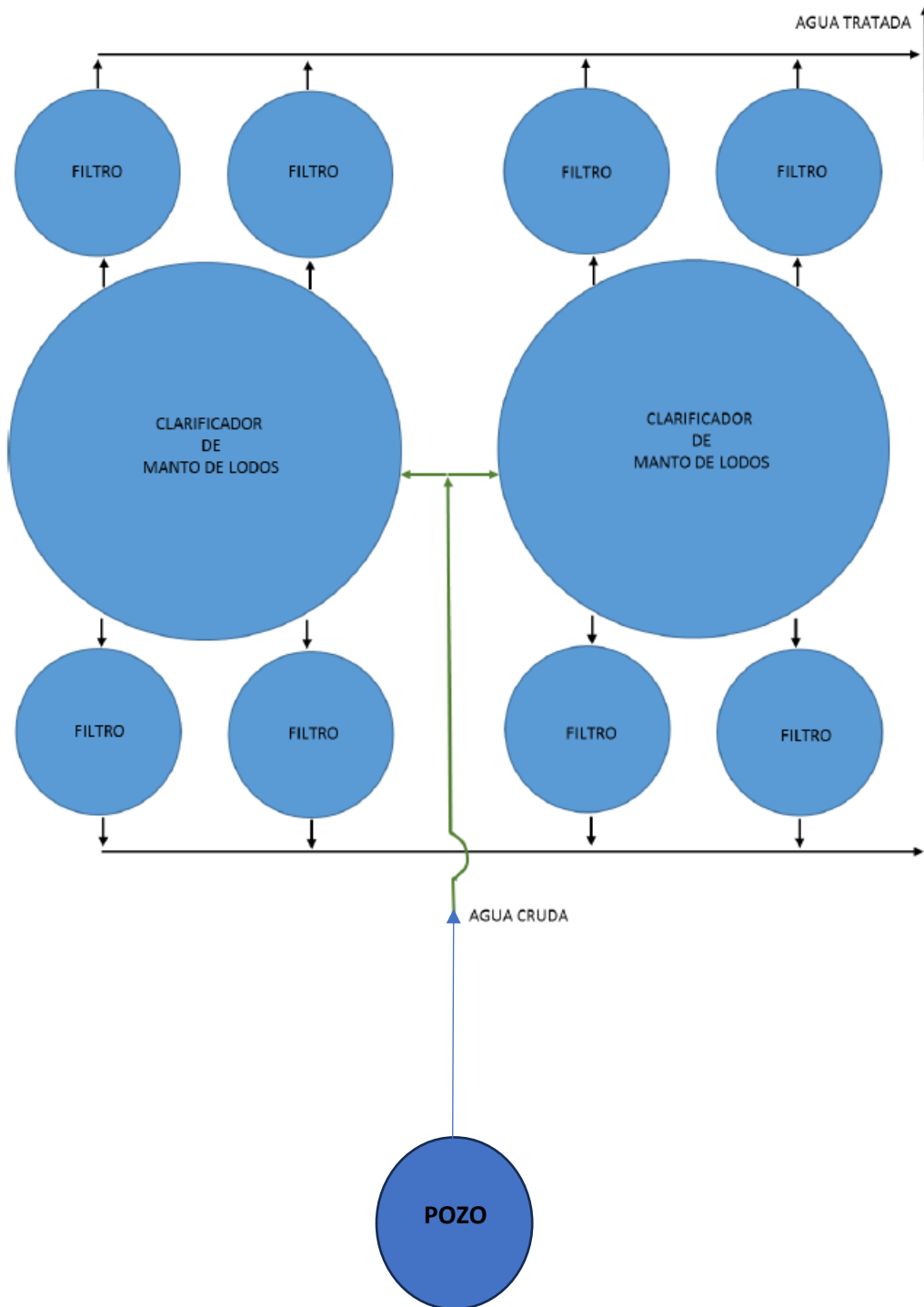
Al final de este ejercicio presupuestario tenemos que para el diseño, modelado, construcción y puesta en marcha de la planta de tratamiento de agua potable para la urbanización La Victoria, tercera etapa, el municipio de Candelaria tendría que hacer una inversión de **\$254.500.000 COP**, teniendo en cuenta que este valor cuenta únicamente: costos directos (construcción de la planta) = **\$195.000.000**; imprevistos del 10% correspondiente al valor total anteriormente mencionado, es decir = **\$19.500.000**; y por último, el costo del capital de trabajo, correspondiente al arranque del sistema = **\$40.000.000**; todos estos valores son en moneda legal colombiana y antes de IVA. No se incluye dentro de este presupuesto los costos indirectos relacionados con: “Permisos y licencias ambientales y de suelo” y “servicios de consultoría”, ya que se entiende que el municipio realizará este ejercicio y que la solución brindada es a cero metros y llave en mano.


Para que la solución de ingeniería presentado a la comunidad de la urbanización La Victoria, tercera etapa, se una solución que se sostenga a través del tiempo, a continuación, se presenta el análisis de los costos de operación anuales:

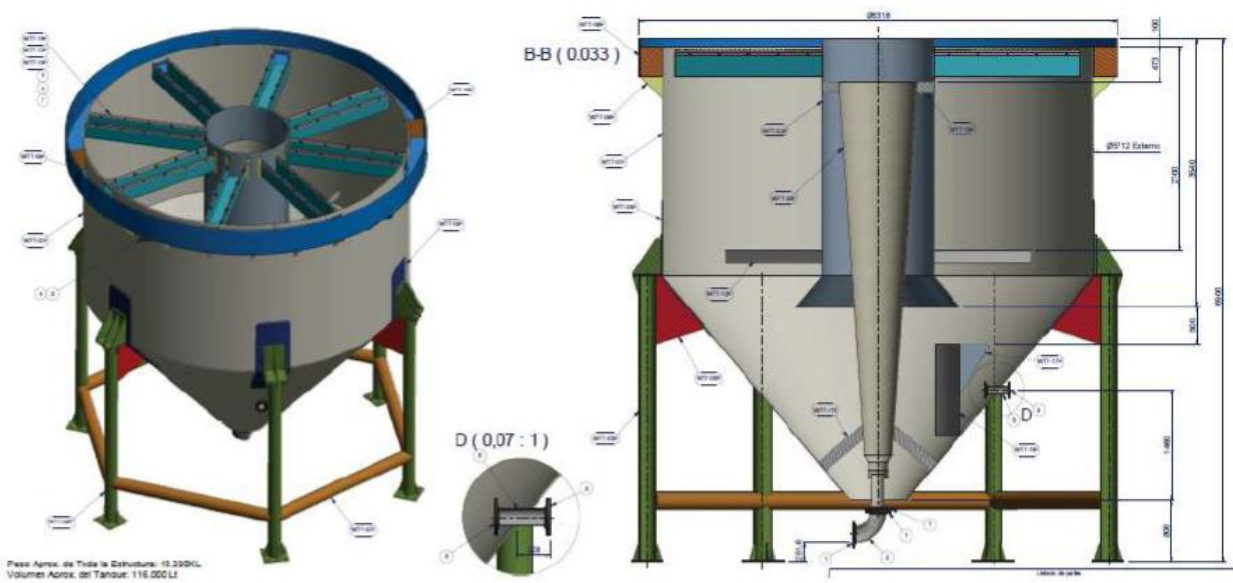
COSTOS DE OPERACIÓN ANUAL		
CONCEPTO	DESCRIPCIÓN	COSTO
1.1 – Costos Directos Variables		
Reactivos químicos	Coagulantes, floculantes y gas cloro	\$120.000.000
Energía eléctrica	Bombeo y sistema de control	\$70.000.000
Agua de retrolavado	Reposición de volumen ya que se realiza con agua previamente tratada	\$10.000.000
Mantenimiento menor	Repuestos de bombas y actuadores	\$20.000.000
SUBTOTAL 1.1		\$220.000.000
1.2 – Costos Fijos		
Servicios públicos	Alumbrado, comunicaciones, aseo	\$20.000.000
Impuestos y seguros	Predial, equipos y maquinaria	\$25.000.000
Mano de obra	Fontanero u operador PTAP (SMMLV con prestaciones: \$2.429.326/mes/operador) – 1 operador / turno – 3 turnos	\$87.455.736
SUBTOTAL 1.2		\$132.455.736
1.3 – Gastos Generales (Overhead)		
Administración y gerencia	Coordinación (salario/mes = \$6.398.250)	\$76.779.000
	supervisión (salario/mes = \$4.976.417)	\$59.717.004

Publicidad y relaciones comunitarias	Divulgación y reuniones	\$15.000.000
Servicios de apoyo	Seguridad industrial, disposición de residuos	\$35.000.000
SUBTOTAL 1.3		\$186.496.004
TOTAL, OPERACIÓN ANAUL		\$538.951.740

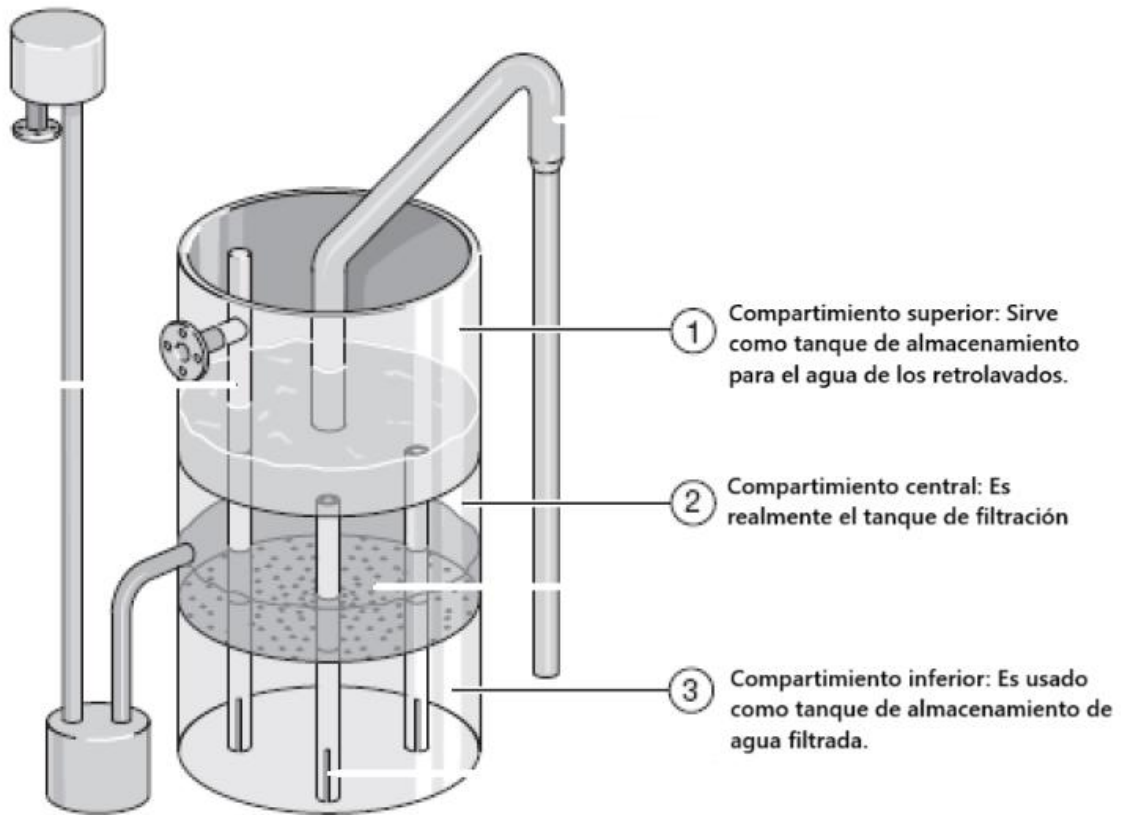
ESQUEMA GENERAL DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO



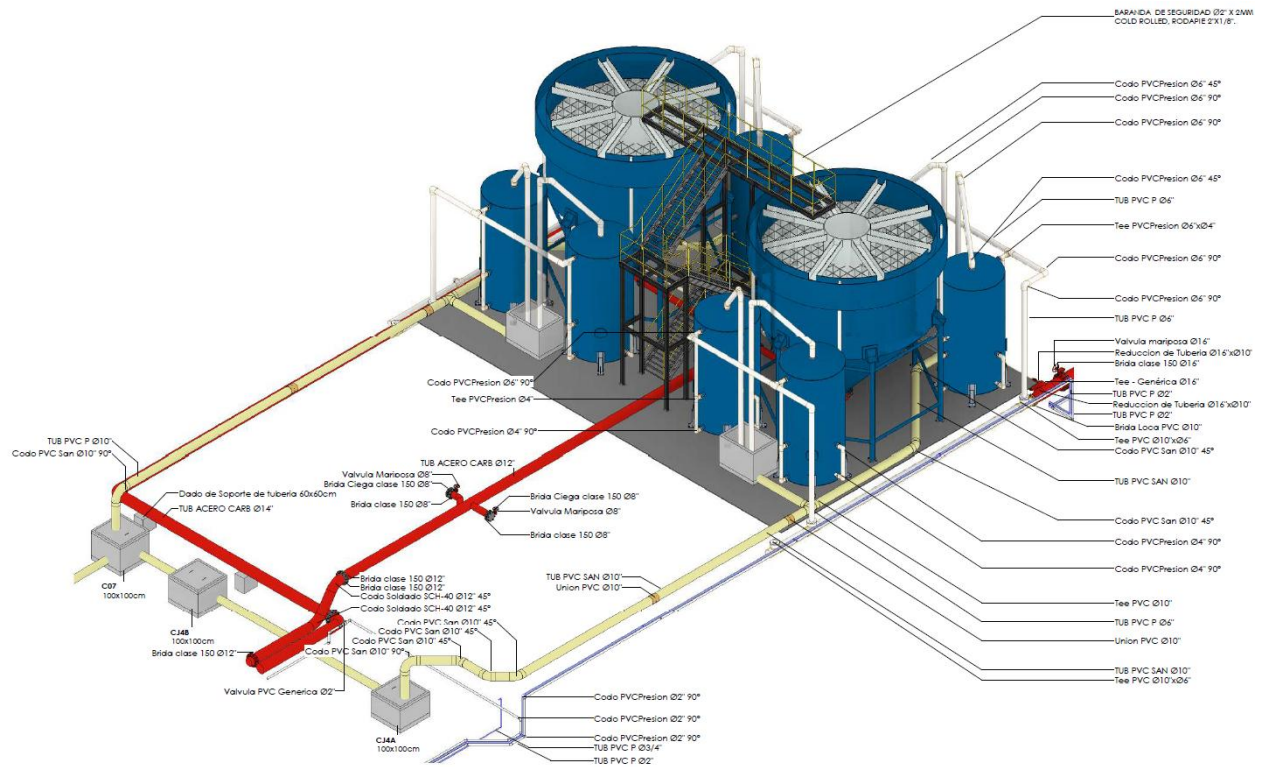
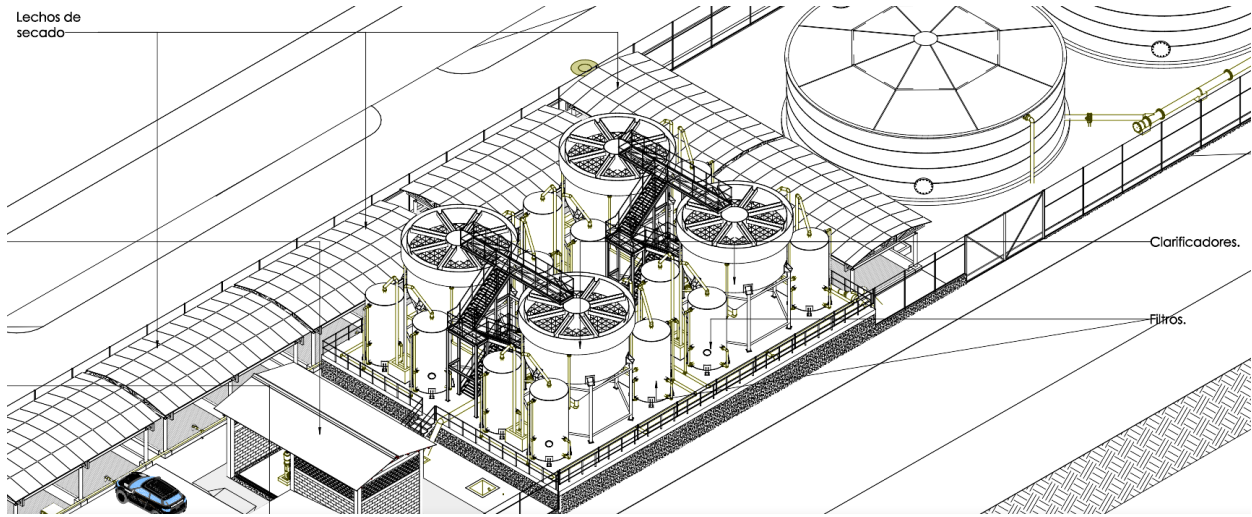
 **Prototipo del Clarificador o Reactor de Manto de lodos**



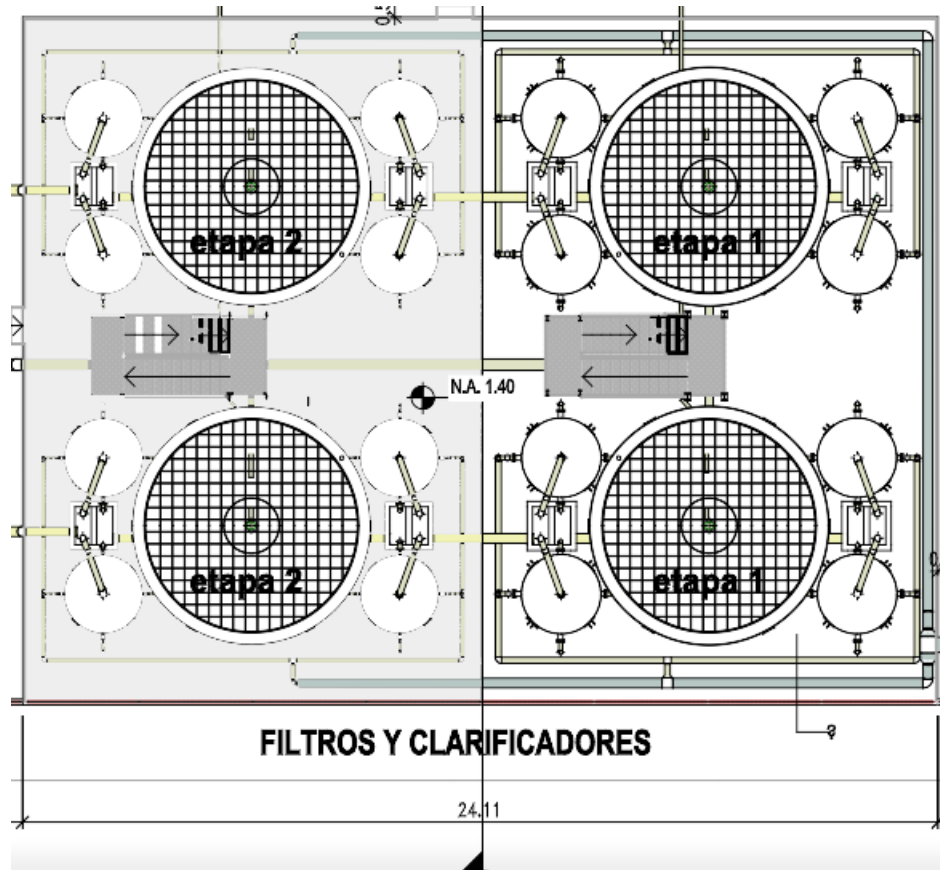
 **Prototipo de los filtros automáticos por diferencial de presión**



PLANO ISOMETRICO GENERAL DE LA PLANTA



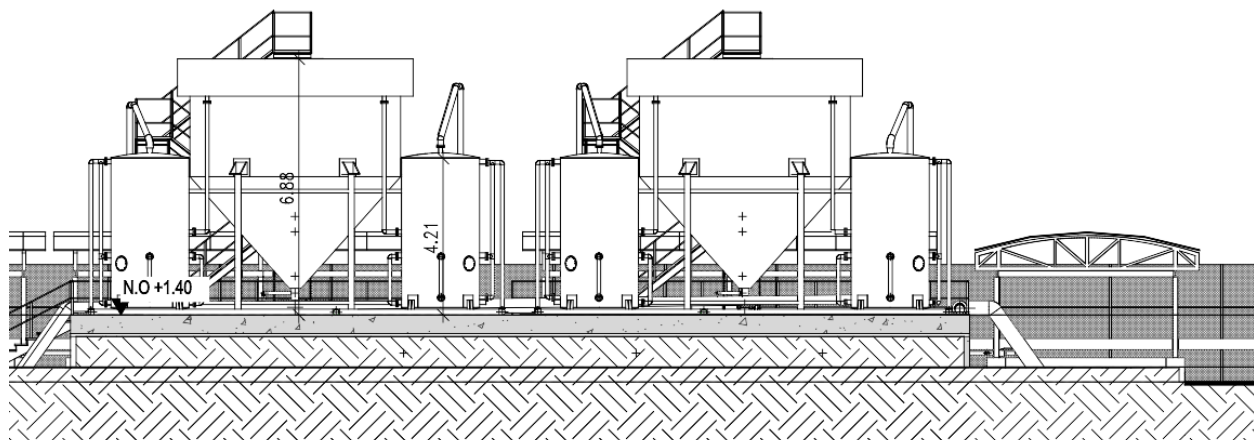
PLANO – VISTA DE PLANTA GENERAL



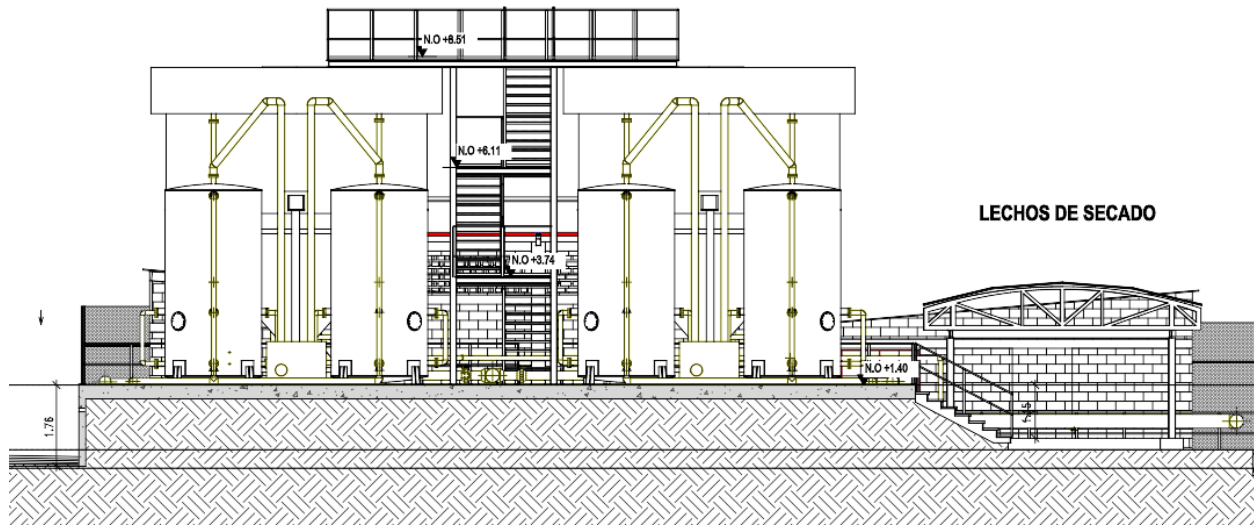
PLANO CORTES Y PERFILES

FILTROS Y CLARIFICADORES

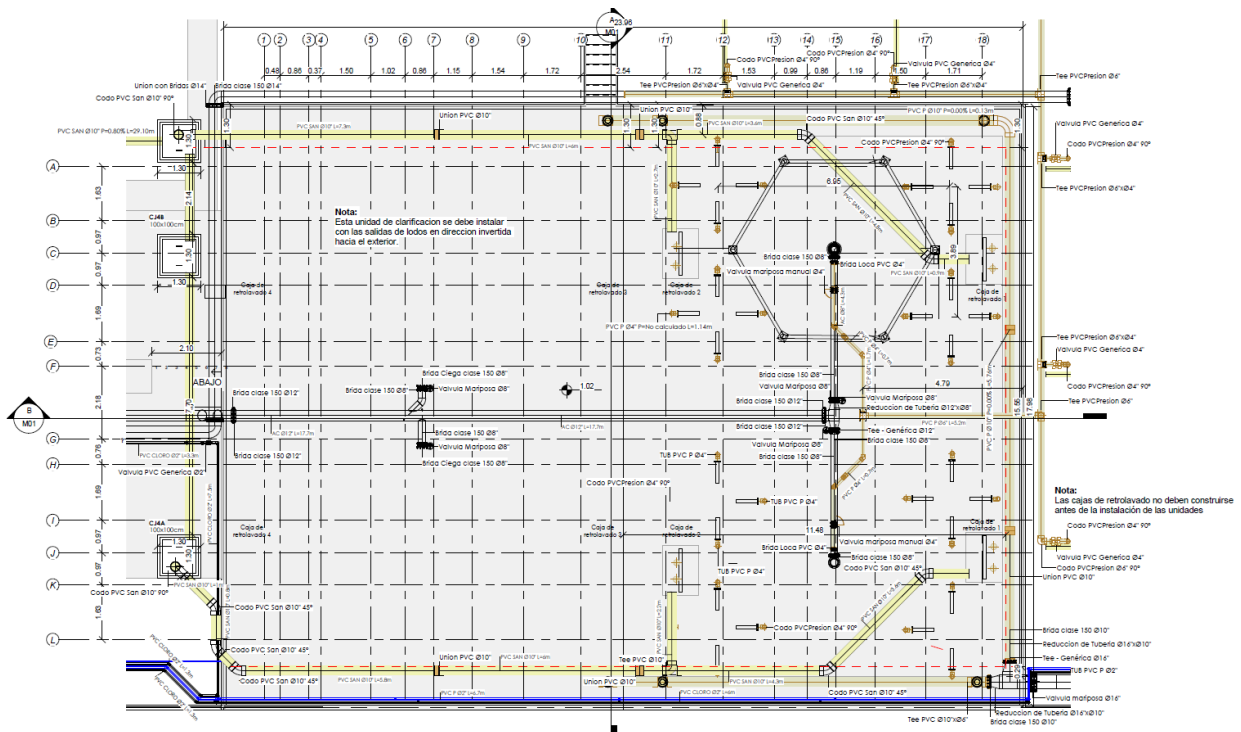
LECHOS DE SECADO



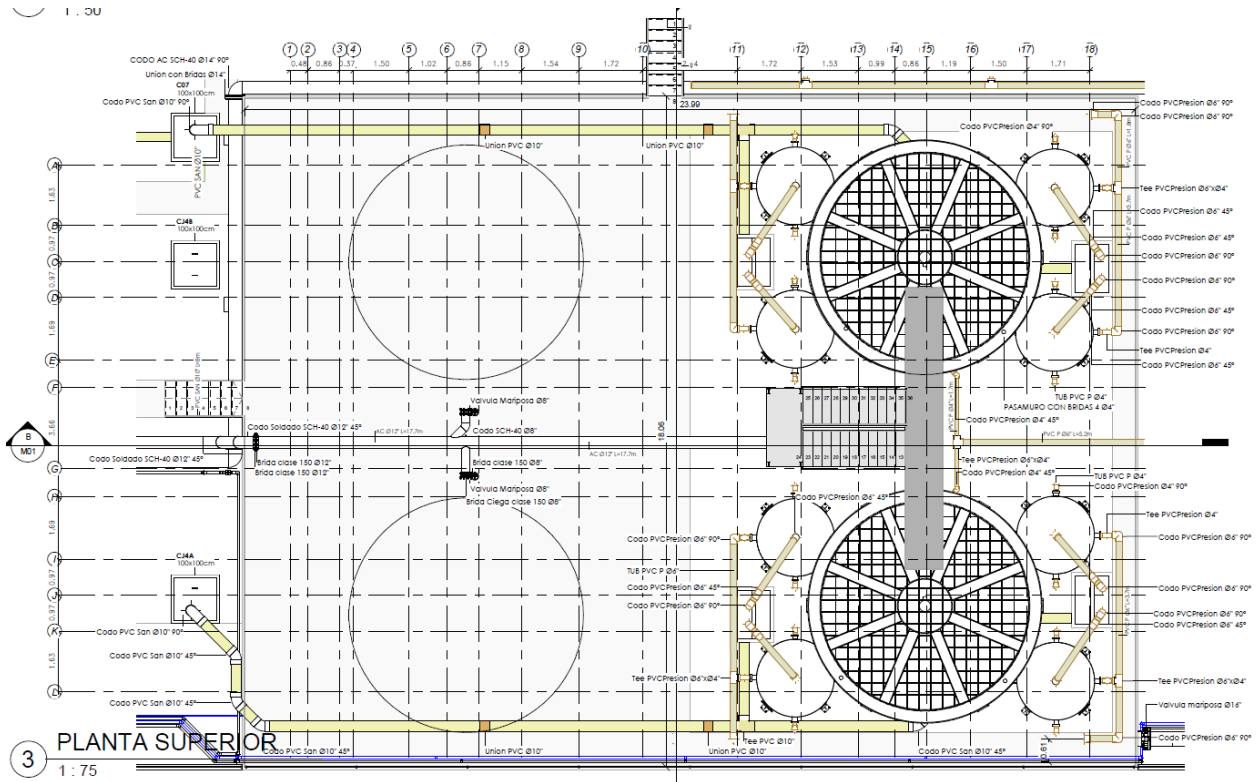
FILTROS Y CLARIFICADORES



PLANTA INFERIOR CONEXIONES HIDRÁULICAS – FILTROS Y CLARIFICADORES



PERFIL HIDRÁULICO – CAJAS DE RETROLAVADO



CONCLUSIÓN

1. Síntesis de resultados

A lo largo del proyecto se desarrollaron y evaluaron todos los procesos unitarios necesarios para el tratamiento de 50 L/s de agua subterránea en la urbanización La Victoria, tercera etapa. Mediante un modelo modular “TECNIFLOC” se integró pre-oxidación (desaireación), coagulación-floculación, clarificación laminar en tanque cónico y filtración dual (antracita + arena), complementados con dosificación automatizada de químicos y retrolavados activados por diferencial de presión. El análisis de costos, basado en la Estructura de Desglose del Trabajo (WBS) y curvas de la EPA ajustadas a condiciones locales, arrojó una inversión inicial aproximada de **\$254.500.000 COP** y costos de operación anual de **\$538.951.740 COP**, lo que permite proyectar un costo de servicio competitivo y sostenible.

2. Aspectos novedosos

Diseño completamente hidráulico y por gravedad, elimina el número de válvulas de control y reduce el consumo energético al mínimo (solo 430 W nominales).

Clarificador laminar de alta eficiencia en geometría cónica, que extiende ciclos de filtración y minimiza pérdidas de agua en retrolavado.

Automatización de tipo SCADA integrada con sensores de diferencial de presión, que ejecuta retrolavados y dosificaciones sin intervención constante de personal.

Uso de sistemas contenerizados y modulares, facilita transporte e instalación en zonas de difícil acceso.

3. Grado de cumplimiento de objetivos

El **objetivo general** de proponer un diseño compacto, contenerizado y de bajo costo fue alcanzado en un 100%: la planta cumple normativas RAS 2000 y resolución 2115 de 2007.

Los **objetivos específicos** se lograron al diseñar las operaciones unitarias requeridas, elaborar planos constructivos adaptados a condiciones locales y establecer parámetros de eficiencia, sostenibilidad y facilidad de operación.

4. Discusión de la metodología

La **WBS** permitió desglosar el proyecto en paquetes de trabajo (preoxidación, coagulación-floculación, clarificación, filtración, dosificación, retrolavado) y asignar costos bottom-up con curvas EPA ajustadas por flete, mano de obra y contingencias (7 %).

Se validó la selección tecnológica mediante comparación de alternativas (sistemas convencionales vs. módulos prefabricados), criterios de costo-beneficio y simulaciones de caudales ($42 \text{ L/s CMD} \times 1,2 = 50 \text{ L/s}$).

El enfoque de **ajuste local** (valores de cotización en Valle del Cauca) garantiza realismo en estimaciones de inversión y O&M.

5. Limitaciones del proyecto

Los **valores económicos** son estimaciones preliminares y requieren cotizaciones de mercado actualizadas.

El **análisis de calidad del agua cruda** se basa en datos generales de aguas subterráneas; variaciones reales (turbidez, dureza, fósforo) podrían requerir ajustes de dosificación y tratamiento.

No se incluyeron pruebas piloto in situ ni estudios de vida útil de los componentes (lodos, membranas, bombas peristálticas), lo cual limitó el cálculo exacto de reemplazos y mantenimiento a largo plazo.

La **dependencia eléctrica** para partes del sistema (SCADA, bombas peristálticas) aún no considera fuentes renovables que aumenten la resiliencia en zonas sin red confiable.

6. Proyecciones y posibilidades futuras

Escalabilidad modular: la planta puede replicarse en paralelo para atender mayores poblaciones, solo ajustando líneas de tratamiento.

Integración de energías renovables (solar fotovoltaica) para minimizar consumos eléctricos y mejorar sustentabilidad.

Optimización de reactivos: evaluación de coagulantes naturales y bioadsorbentes locales para reducir costos químicos y lodo.

Monitoreo remoto y análisis de datos: desarrollo de dashboards SCADA-cloud para gestión predictiva de mantenimiento.

Extensión a tratamiento de aguas grises o residual con tecnologías similares, ampliando el impacto social y ambiental de la solución.

En conjunto, el proyecto demuestra la viabilidad técnica y económica de una planta compacta de bajo costo, con un diseño innovador y altamente automatizado, que satisface los objetivos planteados y pavimenta el camino para futuras mejoras y aplicaciones en comunidades rurales con acceso limitado al agua potable.

BIBLIOGRAFIA

American Water Works Association. (2019). *Water treatment plant design* (5th ed.). AWWA.

Lerma Kirchner, A (2010) *Desarrollo de productos, una visión integral*. Ciudad de México, México: Cengage Learning.

Schnarch Kirberg, A (2014) *Desarrollo de nuevos productos y empresas. Creatividad, innovación y marketing*. Bogotá, Colombia: Mc Graw Hill.

ASCE. (2018). *Standard guidelines for the design of urban subsurface drainage*. American Society of Civil Engineers.

IPCC. (2013). *Climate change 2013: The physical science basis*. Cambridge University Press.

Qasim, S. R., & Zubair, M. (2013). *Low-cost water treatment technologies*. *Journal of Environmental Science and Health, Part C*, 31(1), 33-45.

USEPA. (2019). *Sustainable water infrastructure*. United States Environmental Protection Agency.

WEF. (2019). *Design of municipal wastewater treatment plants*. Water Environment Federation.

World Health Organization. (2011). *Guidelines for drinking-water quality* (4th ed.). Organización Mundial de la Salud.

Ministerio de desarrollo económico, dirección de agua potable y saneamiento básico. (01 de noviembre de 2000). "Título A – Aspectos generales de los sistemas de agua potable y saneamiento básico". [Reglamento técnico del sector agua potable y

saneamiento básico – RAS 2000]. Recuperado de

https://www.minvivienda.gov.co/sites/default/files/documentos/010710_ras_titulo_a_.pdf

Ministerio de desarrollo económico, dirección de agua potable y saneamiento básico. (01 de noviembre de 2000). “Título B – Sistemas de acueducto”. [Reglamento técnico del sector agua potable y saneamiento básico – RAS 2000]. Recuperado de <https://www.minvivienda.gov.co/sites/default/files/documentos/titulob-030714.pdf>.

Galeano Botero, L., Montoya, L. J., Carvajal, G. I., Hincapié, M., Botero, L., & Peláez, L. C. (2023). Tecnologías de bajo costo para agua potable en regiones en vía de desarrollo. [Manuscrito no publicado]. Universidad de Medellín.

Radio Nacional de Colombia. (2023, 1 de noviembre). Retos del acceso al agua potable y saneamiento básico: 7 departamentos en situación crítica. Recuperado de [\[Acceso al agua potable: 7 departamentos de Colombia situación crítica\]](#)

Agencia UNAL. (2024, 26 de septiembre). Desigualdad de acceso a agua potable en Colombia alcanza un 25 % entre zonas urbanas y rurales. Recuperado de [\[https://agenciadenoticias.unal.edu.co/detalle/desigualdad-de-acceso-a-agua-potable-en-colombia-alcanza-un-25-entre-zonas-urbanas-y-rurales?utm_source=chatgpt.com\]](https://agenciadenoticias.unal.edu.co/detalle/desigualdad-de-acceso-a-agua-potable-en-colombia-alcanza-un-25-entre-zonas-urbanas-y-rurales?utm_source=chatgpt.com)

Clark, P. A., Pinedo, C. A., Fadus, M., & Capuzzi, S. (2013). Slow-sand water filter: Design, implementation, accessibility and sustainability in developing countries. *Waterlines*, 32(1), 59-73.

Instituto de Bioética Católica. (s.f.). *Slow-Sand Water Filter*. Recuperado de [\[https://www.engr.psu.edu/ce/hydro/hill/teaching/rural_water/rws3d3.pdf\]](https://www.engr.psu.edu/ce/hydro/hill/teaching/rural_water/rws3d3.pdf)

Ministerio de Desarrollo Económico. (2000). *Resolución 1096 de 2000*

Bernal, F., Rivas, A., & Peña, M. (2014). *Gestión comunitaria del agua en América Latina y el Caribe: Desafíos para México*. FLACSO México.

Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE). (2013). *Water Governance in OECD Countries: A Multi-level Approach*. OECD Publishing.

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2014). *Programa Nacional Hídrico 2014-2018*. México.

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2013). *Atlas del Agua 2013*. México.

Asociación de Organizaciones Comunitarias Prestadoras de Servicios de Agua Potable y Saneamiento en Colombia (AQUACOL). (s.f.). Recuperado de [\[https://sdgs.un.org/partnerships/universalization-sanitation-rural-area-state-ceara-brazil\]](https://sdgs.un.org/partnerships/universalization-sanitation-rural-area-state-ceara-brazil)

ISO 14040. (2006). *Environmental management—Life cycle assessment—Principles and framework*.

ISO 14044. (2006). *Environmental management—Life cycle assessment—Requirements and guidelines*.

Cossio, C., Norrman, J., McConville, J., Mercado, A., & Rauch, S. (2020). Indicators for sustainability assessment of small-scale wastewater treatment plants in low and lower-middle income countries. *Environmental and Sustainability Indicators*, 6, 100028.

IDEAM. (2005). *Atlas climatológico de Colombia*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.

ProjectManagement.com. (2024). *5 Types of Project Cost*.

[ProjectManagement.com](https://www.projectmanagement.com)

U.S. EPA. (2014). *Drinking Water Treatment Technology Unit Cost Models*. [US](#)

[EPA](#)

U.S. EPA. (2007). *Estimating Water Treatment Costs Volume 2*. nepis.epa.gov

U.S. EPA. (2007). *Estimating Water Treatment Costs Volume 1 Summary*.

nepis.epa.gov

Simpliaxis. (2023). *Exploring Cost Types in Project Management Strategies*.

simpliaxis.com

Vista Projects. (2020). *Understanding Construction Cost Estimate Classes*. [Vista](#)

[Projects](#)

NetSuite. (2022). *What Is Working Capital?* netsuite.com

Investopedia. (2025). *Working Capital Management: What It Is and How It Works*. [Investopedia](https://www.investopedia.com)

Investopedia. (2008). *Fixed Capital: Definition, What's Included, and Requirements*. [Investopedia](https://www.investopedia.com)

Blackman, A. et al. (2005). *Colombia's Discharge Fee Program*. [sswm.info](https://www.sswm.info)

ong, R. (2024). *Development Of A Preliminary Cost Estimation Method For Water Treatment Plants*. ŪTA Thesis. mavmatrix.uta.edu