

**DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE OPERACIÓN EN UNA PLANTA
COMPACTA MOVIL DESARROLLADA PARA SITUACIONES DE
EMERGENCIA**

**LEIDY YOHANA GIRALDO GARCÍA-1742846
GABRIELA HERNANDEZ FERNANDEZ -1744384**



**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE LOS RECURSOS NATURALES Y DEL AMBIENTE – EIDENAR
PROGRAMA DE INGENIERIA SANITARIA Y AMBIENTAL
SANTIAGO DE CALI
2024**

**DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE OPERACIÓN EN UNA PLANTA
COMPACTA MOVIL DESARROLLADA PARA SITUACIONES DE
EMERGENCIA**

**LEIDY YOHANA GIRALDO GARCÍA-1742846
GABRIELA HERNANDEZ FERNANDEZ-1744384**

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO
SANITARIO Y AMBIENTAL**

**DIRECTOR:
ING.MSC.PHD.LUIS DARIO SANCHEZ TORRES
INSTITUTO CINARA**



**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE LOS RECURSOS NATURALES Y DEL AMBIENTE – EIDENAR
PROGRAMA DE INGENIERIA SANITARIA Y AMBIENTAL
SANTIAGO DE CALI
2024**

Tabla de Contenido

1. Resumen	8
2. Introducción.....	9
3. Antecedentes	10
4. Planteamiento del problema.....	11
5. Justificación	14
6. Objetivos	15
7. Marco teórico.....	16
7.1. Marco conceptual	16
7.1.1. Elementos conceptuales asociados a los equipos médicos de emergencia -EMT	16
7.1.2. Elementos conceptuales asociados a la potabilización del agua	18
7.2. Marco legal.....	21
8. Metodología.....	22
8.1. Enfoque metodológico	22
8.2. Definición de la fuente de abastecimiento	23
8.2.1. Criterios de selección	23
8.2.2. Recopilación de información de la fuente de abastecimiento.....	25
8.2.3. Medición de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del agua cruda.....	28
8.3. Reconocimiento y puesta en marcha de la planta compacta	28
8.4. Análisis de los resultados para las condiciones de operación y mantenimiento de la planta.	33
9. Resultados	33
9.1. Descripción de la planta compacta y puesta en marcha	34
9.1.1. Componentes de la planta.....	34
9.1.2. Identificación de los procesos que hacen parte de la planta de tratamiento	36
9.1.3. Montaje y puesta en marcha	45
9.2. Comportamiento de la calidad del agua durante el ciclo operativo analizado ..	49
9.3. Comparación de los resultados frente a la Normatividad Colombiana y la guía OMS	54
9.4. Guía de ensamble, operación y mantenimiento de la planta	57
9.5. Determinación capacidad de operación de la PTAP	61

10. Conclusiones	62
11. Recomendaciones	62
12. Referencias.....	64

Índice de Figuras

Figura 1. Árbol de problemas	13
Figura 2. Esquema de distribución Equipo médico de Emergencia	17
Figura 3. Esquema Metodológico.....	23
Figura 4. Puntos de muestreo análisis extendido (cambiar por esquema).....	33
Figura 5. Esquema PTAP móvil	37
Figura 6. Gradiente de velocidad versus RPM.	42
Figura 7. Floculador hidráulico diseñado	43
Figura 8. Esquema cámara de contacto de cloro	44
Figura 9. Adaptación conexiones PTAP.....	45
Figura 10. Fugas identificadas.....	46
Figura 11. Comportamiento de la Turbiedad en la PTAP	50
Figura 12. Comportamiento del pH en la PTAP	51
Figura 13. Comportamiento del color en la PTAP	52
Figura 14. Resultados E-coli agua tratada.....	53
Figura 15. Comportamiento del pH de acuerdo con la Normativa.....	54
Figura 16. Comportamiento del Turbiedad de acuerdo con la Normativa	55
Figura 17. Comportamiento del Cloro residual de acuerdo con la Normativa.....	56
Figura 18. Comportamiento del E-coli después de la desinfección en la planta de acuerdo con la Normativa	57

Índice de Tablas

Tabla 1. Conceptos asociados al tratamiento de agua	18
Tabla 2. Características físicas del agua para consumo humano.....	19
Tabla 3. Características microbiológicas del agua para consumo humano	19
Tabla 4. Procesos de tratamiento.....	20
Tabla 5. Medios Filtrantes	20
Tabla 6. Marco legal.....	22
Tabla 7. ICA Ríos municipio de Cali	26
Tabla 8. Parámetros de Calidad del rio Cauca.....	27
Tabla 9. Medición de parámetros en laboratorio.....	29
Tabla 10. Inventario equipo de potabilización	34
Tabla 11. Descripción procesos de tratamiento de la planta	37
Tabla 12. Dotación OPS para Equipos médicos de emergencia móvil Tipo 1.....	39
Tabla 13. Calculo Caudales EMT.....	39
Tabla 14. Caudal de operación	40
Tabla 15.. Diseño floculador	41
Tabla 16. Diseño cámara de contacto cloro.....	44
Tabla 17. Resultados pruebas – Agua cruda-Agua tratada.....	47
Tabla 18. Guía de ensamblaje, operación y mantenimiento para el almacenamiento de agua cruda, coagulación, floculación y sedimentación.....	58
Tabla 19. Guía de ensamblaje, operación y mantenimiento para la filtración y desinfección	59
Tabla 20. Guía de ensamblaje, operación y mantenimiento para el almacenamiento del agua tratada	60

Agradecimientos

Queremos expresar nuestros más sinceros agradecimientos a todas las personas e instituciones que hicieron posible la realización de este trabajo de grado:

En primer lugar, a nuestros queridos padres, por su amor incondicional, apoyo constante y los sacrificios que han hecho para permitirnos llegar hasta este momento.

A nuestro director de tesis, Luis Darío Sánchez, por su orientación experta, paciencia y dedicación durante todo el proceso de investigación y redacción de este trabajo académico.

A todo el personal del Instituto Cinara, especialmente a Don Jeimmy y al Tec. MSc, Noel Muñoz Soto, por su colaboración invaluable, consejos técnicos y disposición para ayudarnos en cada paso de este proyecto.

Finalmente, extendemos nuestro agradecimiento a la Fundación San Raffaele Barco Hospital por brindarnos el acceso a su equipo, lo cual nos permitió llevar a cabo las pruebas experimentales que respaldan este trabajo de grado.

Su generoso apoyo y contribuciones fueron fundamentales para el éxito de este trabajo. Estaremos eternamente agradecidos por su ayuda y confianza en nuestro proyecto.

¡Gracias a todos!

1. Resumen

El presente trabajo de grado se centró en la evaluación y optimización de una Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) compacto móvil, diseñada para ser utilizada en situaciones de emergencia y desastres. En un contexto donde la escasez de agua potable representa un desafío crítico, especialmente en situaciones de emergencias, este estudio abordó la necesidad de asegurar un suministro continuo y seguro de agua tratada para satisfacer las necesidades básicas de un equipo médico de emergencias (EMT), garantizando su autonomía en la prestación de sus servicios de salud.

Para la evaluación, se utilizó como fuente de abastecimiento el agua del río Cauca en su llegada a la PTAP de Puerto Mallarino. Se optimizaron las condiciones de operación y mantenimiento de la PTAP compacta móvil, definiendo criterios específicos para la selección de fuentes, identificando los procesos de tratamiento necesarios, y evaluando la capacidad de la planta para tratar agua. La metodología empleada incluyó un análisis detallado de la planta en condiciones operativas reales, lo que permitió identificar tanto fortalezas como áreas de mejora en los procesos de tratamiento. Como parte de estas mejoras, se diseñó e implementó un floculador hidráulico portátil y se diseñó una cámara de contacto de cloro, esenciales para incrementar la eficiencia del tratamiento.

Los resultados mostraron que la PTAP fue efectiva en la eliminación de contaminantes bacterianos y en la mejora de parámetros críticos como la turbiedad y el color del agua tratada. En conclusión, la planta compacta demostró ser adecuada para enfrentar los desafíos del tratamiento de agua en situaciones de emergencia, aunque se destaca la necesidad de ajustes continuos para garantizar la calidad del agua y la protección de la salud pública.

Palabras claves:

Tratamiento de agua potable, planta compacta móvil, Equipos médicos de emergencia (EMT), WASH, abastecimiento de agua en emergencias, floculador hidráulico.

2. Introducción

La importancia del acceso a agua potable en situaciones de emergencia y desastre no puede subestimarse. Cuando ocurren desastres naturales o emergencias, las infraestructuras de suministro de agua potable suelen resultar dañadas e inaccesibles, dejando a las personas afectadas sin una fuente confiable de agua limpia y segura. Esta situación puede desencadenar una serie de problemas de salud que van desde enfermedades gastrointestinales hasta deshidratación, e incluso poner en riesgo la vida de quienes se ven afectados.

En este contexto, es fundamental asegurar que las personas afectadas por emergencias tengan acceso a agua potable en cantidades suficientes y con la calidad necesaria para satisfacer sus necesidades básicas. La logística y la gestión eficiente del suministro de agua son elementos clave para garantizar una distribución equitativa y prevenir complicaciones adicionales de salud. Asimismo, el acceso al agua se convierte en un factor determinante para el desempeño óptimo de las labores realizadas por los equipos médicos de emergencia (EMT) durante situaciones críticas.

El presente proyecto de grado se centra en la determinación de los parámetros de operación para una planta compacta móvil desarrollado específicamente para situaciones de emergencia. La planta compacta fue desplegada y sometida a pruebas experimentales en las instalaciones del Instituto Cinara ubicado en la Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) de Puerto Mallarino. El estudio se enfocó en evaluar múltiples variables, incluyendo la calidad del agua de entrada, los procesos de tratamiento necesarios, la capacidad de producción, la logística de despliegue y el mantenimiento.

Con este trabajo, se espera no solo mejorar la capacidad de respuesta ante emergencias, sino también contribuir al desarrollo de soluciones más efectivas y sostenibles para garantizar el acceso a agua potable en situaciones adversas.

3. Antecedentes

La Organización Mundial de la Salud (OMS) - 2020, define como un desastre las situaciones imprevistas que representan serias e inmediatas amenazas para la salud pública o cualquier situación de salud pública que pone en peligro la vida o salud de una cantidad significativa de personas y exige la acción inmediata. Generalmente los desastres son ocasionados por fenómenos naturales; según Abiles, (2008), todos los desastres son únicos en el sentido de que afectan a zonas con grados distintos de vulnerabilidad y en condiciones económicas, sanitarias y sociales peculiares, también existen similitudes entre ellos; por lo tanto, identificar dichos factores permite tener una mejor gestión en la respuesta oportuna de la emergencia generada tras la situación de desastre.

La Organización Panamericana de la Salud, (OPS, 1999), plantea que algunos servicios como el abastecimiento de agua y el alcantarillado son vulnerables en situaciones de desastres; dado que las instalaciones se pueden dañar por diversas causas como: la interrupción en el suministro eléctrico, derrumbes, arrastre de sólidos y estructuras, que se dan luego de inundaciones, tormentas, terremotos y huracanes, estos factores pueden llevar a generar rupturas en las tuberías, suspensión de servicio de agua potable y limitaciones en las operaciones de potabilización. En este sentido Abiles, (2008), expresa que el agua se convierte en el bien más importante para la población afectada y la escasez o contaminación de este recurso puede tener consecuencias muy graves sobre la salud pública, puesto que, si las plantas de tratamiento no funcionan correctamente, el agua puede estar contaminada con sustancias químicas o biológicas, lo que la hace insegura para el consumo humano.

El derecho humano al agua (DHA) ha sido definido como *“la innovación más notable en gestión del agua en la historia moderna, en la medida en que procura volver al individuo al centro de la administración del recurso”* (McGraw, 2011) brindándole así, un poco más de seguridad frente al abastecimiento de agua a las personas. No obstante, según la (OMS/UNICEF 2019), 2200 millones de personas carecen de acceso a servicios de agua potable gestionados de forma segura y el 90% de los desastres naturales están relacionados con el agua (UNISDR 2015- Oficina de las Naciones unidad para la Reducción del Riesgo y Desastres).

Por su parte la Organización Mundial de la Salud, en la guía para la calidad de agua de consumo humano (2011), en el capítulo 6 establece los estándares técnicos mínimos requeridos en el abastecimiento de agua potable aplicables para situaciones de emergencia. En Colombia no existe una normativa específica vigente relacionada directamente con el suministro de agua en emergencias; en estas circunstancias, la unidad nacional para la gestión del riesgo (UNGRD), dentro del marco de la Ley 1523 de 2012, asume la responsabilidad de proveer dicho recurso a los Equipos médicos de emergencia que se despliegan a atender la situación. Además, la Resolución 0154 de 2014 establece los lineamientos para la elaboración de Planes de Emergencia y Contingencia para la gestión de desastres y emergencias vinculadas a los servicios públicos domiciliarios de acueducto, junto con otras disposiciones. A su vez, la Resolución 2115 de 2007 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, define instrumentos esenciales para el control y la vigilancia de la calidad del agua destinada al consumo humano.

La OPS/OMS (2010), crearon la guía de tecnologías apropiadas para el suministro de agua en situaciones de emergencia, este documento está dirigido a diversas instituciones gubernamentales, y personal de apoyo en las emergencias, en él se presentan diferentes opciones de tecnologías para el suministro de agua, aclarando que dichas tecnologías no son de uso permanente, es decir, no sustituyen los sistemas de abastecimiento de agua convencional o no convencional en condiciones normales. Las tecnologías implementadas incluyen sistemas para recolección de aguas lluvias, la filtración lenta y la perforación de pozos profundos de pequeño diámetro. Para cada una de las tecnologías en la guía se presenta la caracterización del sistema y sus componentes, instrucciones para el montaje e instalación, parámetros de operación, y orientación para el mantenimiento.

La Organización Mundial de la Salud, ha realizado donaciones de equipos con la finalidad de fortalecer las capacidades de respuesta en situaciones de emergencias en algunos países, dentro de estas donaciones la OMS ha optado por suministrar además de equipos médicos; plantas compactas para el tratamiento de agua, estas últimas según Espinoza y Martínez (2011), pueden ser ubicadas en diferentes lugares, se pueden transportar con facilidad y permiten una respuesta y puesta en operación inmediata.

Colombia es un país que, debido a sus particularidades geográficas, condiciones climatológicas y factores tectónicos, es susceptible a que se presenten frecuentemente situaciones de desastres como inundaciones, incendios forestales, deslizamientos, sismos, sequías y actividades volcánicas; es por esto, que diferentes autores han estudiado la implementación de alternativas que permitan superar efectivamente dichas situaciones. Espinoza y Martínez (2011) realizaron un diseño de una planta móvil de potabilización de agua para ser empleada en situaciones de desastre, sin embargo, en ese proyecto no se realiza una puesta en marcha de dicho prototipo, en donde se evalúe la viabilidad de este.

Teniendo en cuenta los antecedentes anteriormente mencionados, es importante adelantar estudios que permitan la potabilización de agua empleando tecnologías adecuadas para situaciones de emergencias, minimizando así las problemáticas que se puedan presentar en estas situaciones debido a la escasez de este recurso o a su contaminación. Es por esto que el presente trabajo de grado tiene como objetivo realizar un análisis que permita el mejoramiento de las condiciones de operación y mantenimiento de una planta de tratamiento de agua potable compacta diseñada y propuesta para un equipo médico de emergencia (EMT).

4. Planteamiento del problema

La limitada disponibilidad de agua potable en situaciones de emergencia es una problemática grave, dado que dicho recurso es esencial para la supervivencia humana y es utilizada para satisfacer necesidades básicas como beber, cocinar, limpieza e higiene personal. Así mismo, el agua es esencial para la supervivencia de la mayoría de los demás seres vivos y para la conservación del medio ambiente.

En situaciones de emergencia, el acceso al agua potable se puede ver comprometido debido a los daños en las infraestructuras provocados por: los cortes en el suministro eléctrico, taponamiento de las tuberías, arrastre de cobertura vegetal o estructuras que generan

interrupciones en el suministro de agua. La disponibilidad de agua potable se agrava debido a la contaminación de las fuentes hídricas.

Además, la demanda de agua aumenta después de una situación de emergencia, dado que, este recurso es vital para atender las problemáticas generadas por los desastres, dado que se emplea en la prestación de la atención primaria, asegurar condiciones de saneamiento o controlar la propagación de fuego en situaciones de emergencia; por lo que es importante asegurarse de que se tenga acceso permanente y suficiente de este recurso. La limitada disponibilidad de agua causa condiciones deficientes de saneamientos, por lo que contribuye a la proliferación de vectores, generando afectaciones a la salud de la población.

Así mismo, la escasez de este recurso origina conflictos por el agua, lo que genera aumento en la desigualdad social, y puede terminar con desplazamiento de las poblaciones locales. Por lo anterior, es importante estar preparado y tener un plan de emergencia que incluya la obtención y almacenamiento de agua segura para uso durante la crisis. Ya que la ausencia de este recurso puede generar problemáticas que se desencadenan en afectaciones en los índices de morbilidad y mortalidad de la población afectada.

En este sentido, diferentes instituciones internacionales como la OPS y la OMS, han reunido esfuerzos para implementar estrategias y tecnologías, con la finalidad de apoyar a los países, en la respuesta y el abastecimiento de agua en situaciones de emergencia, reconociendo la vulnerabilidad que a menudo se presenta frente a eventos extremos y que genera mayores desafíos para hacer frente a las crisis y las situaciones de emergencia. En un desastre se presenta una menor capacidad financiera y técnica, así como una mayor vulnerabilidad al cambio climático y problemas por la inadecuada infraestructura.

Existen diferentes mecanismos para apoyar la respuesta en las situaciones de emergencia, entre ellas esta: apoyo financiero, asistencia técnica, acceso a información actualizada y asistencia humanitaria. En el caso de Colombia, la OPS en conjunto con la OMS, en el marco del proyecto *“Implementación de la iniciativa EMT en las Américas”* realizó una donación a uno de los equipos médicos de emergencia (EMT) constituidos en el país, que incluyó una planta compacta móvil diseñada especialmente para situaciones de emergencias y desastres, con la finalidad de garantizar el suministro constante de agua potable. Sin embargo, al tratarse de una nueva tecnología, el EMT local no dispone de las herramientas y conocimientos necesarios para poner en marcha la planta y asegurar la potabilización del agua. Además, en las capacitaciones proporcionadas por las instituciones donantes no se abordaron aspectos cruciales como la capacidad de operación, aspectos conceptuales de los procesos y los parámetros de mantenimiento asociados con el uso de la planta. Esta situación implica que el EMT requiera dedicar esfuerzos significativos en actividades que les permitan entender a fondo los procesos y el funcionamiento operativo de la PTAP.

En la realización de este estudio, se ha identificado como problemática central la limitada disponibilidad de agua en situaciones de emergencia. Este problema es de suma importancia, dado que la escasez de este recurso esencial puede agravar considerablemente las situaciones de crisis. Con el fin de comprender en profundidad las causas y efectos asociados a esta problemática, se ha desarrollado un árbol de problemas, el cual se presenta en la Figura 1. Este árbol ha sido elaborado con el propósito de visualizar de manera sistemática los factores

que contribuyen a la escasez de agua en contextos de emergencia y sirve como base para el desarrollo de esta investigación.

Considerando la complejidad de la situación, se plantea la siguiente pregunta de investigación que guiará el desarrollo del presente trabajo de grado: ¿Cuáles son los parámetros de operación que permiten el uso efectivo de una planta compacta móvil diseñado específicamente para abordar la escasez de agua en situaciones de emergencia? Esta pregunta es crucial, ya que la efectividad de la planta compacta móvil dependerá en gran medida de la comprensión y optimización de estos parámetros de operación. A través de este enfoque, se busca contribuir al desarrollo de soluciones efectivas y sostenibles para enfrentar la escasez de agua en situaciones de emergencia, mejorando así la capacidad de respuesta y mitigando los impactos adversos en las comunidades afectadas.

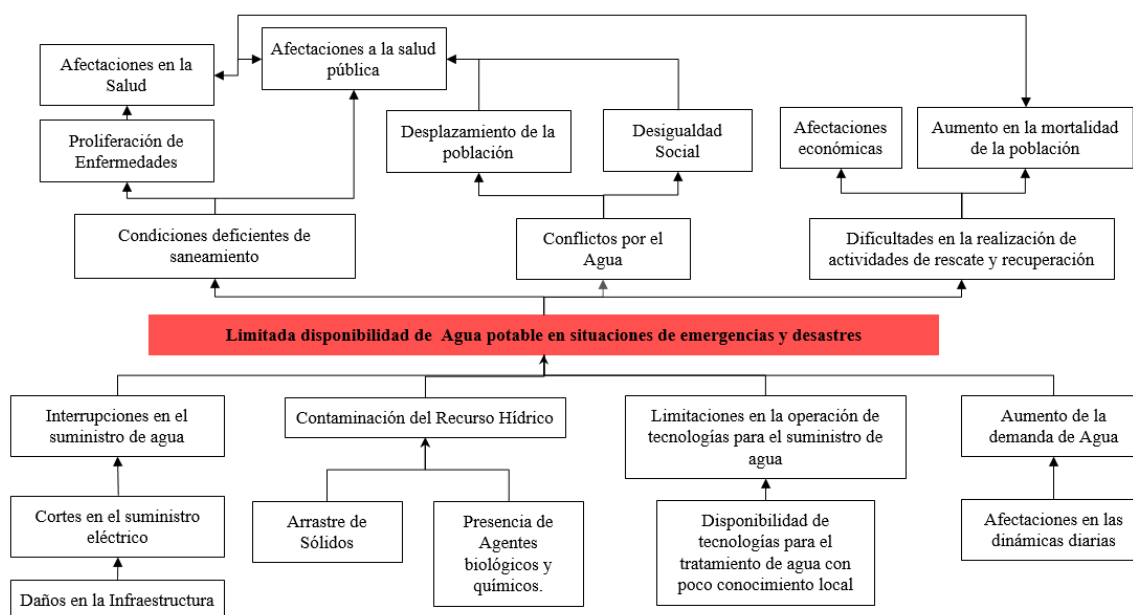


Figura 1. Árbol de problemas

Descriptores:

- En el año 2017 se registraron 174 afectaciones al acueducto generados por situaciones de emergencias (UDGRD)
- Uno de los efectos inmediatos de un desastre suele ser el daño a los sistemas de abastecimiento de agua, sistemas de alcantarillado y desagües y los efectos negativos en los servicios básicos de saneamiento (OPS)
- El 90% de los desastres naturales están relacionados con el agua (UNISDR)
- 2399 eventos generan emergencias anualmente.
- Entre 2006 y 2014 se reportaron 3.181 muertos y 12,3 millones de afectados por desastres naturales (Departamento Nacional De Planeación).
- El gobierno colombiano ha destinado 2,1 billones de pesos (414 millones de dólares) para la atención de emergencias y desastres climáticas.

5. Justificación

El presente trabajo de grado se enfocó en fundamentos teóricos y científicos para abordar una problemática global de alta relevancia, la escasez de agua durante situaciones de emergencia y desastres. Se busca reducir el tiempo de respuesta de las entidades responsables de atender emergencias y garantizar el suministro rápido de agua potable en hospitales de campaña, considerando la capacidad de los equipos de respuesta a emergencias médicas para actuar en cualquier lugar del mundo.

Si bien los desastres surgen de una compleja relación de efectos generados por fenómenos naturales con condiciones previas de vulnerabilidad social, económica y ambiental, su clasificación suele realizarse de acuerdo con las características de la amenaza natural que los originó, según el tipo de fenómeno, a la manera en que aparece (súbita, como los terremotos, o mediata, como los huracanes), y a su duración, ya sea corta, mediana o larga, (CEPAL 2014).

En Colombia existen alrededor de 6,7 millones de personas socialmente vulnerables y expuestas a amenazas por inundaciones, movimientos en masa y avenidas torrenciales; y, además, existen cerca de 16 millones de personas en zonas de amenaza sísmica alta, concentradas principalmente en las capitales del país (DPN, 2018). Así mismo, según el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC), los sistemas naturales y humanos están experimentando las consecuencias relacionadas con el aumento de 1°C en la temperatura promedio global, tales como eventos climáticos extremos y aumentos en el nivel del mar, donde los impactos esperados serán mayores con el aumento previsto de 1,5°C (Gobierno de Colombia 2020).

El país, también, tiene un conflicto armado interno, que contribuye a la inseguridad y la violencia en algunas áreas. Según cifras de la unidad para la atención y reparación integral de las víctimas (UARIV 2022), 9'237.051 personas han sido víctimas del conflicto (en su mayoría por desplazamiento forzado), por lo que, aproximadamente, el 19,14% de los colombianos se han visto afectados de alguna manera por la confrontación armada. Esto ha afectado la capacidad del país para hacer frente a las situaciones de emergencia, debido a que los recursos económicos se han desviado para combatir conflictos sociales. La inversión de la Nación y de las entidades territoriales en gestión del riesgo alcanzó los 11,3 billones de pesos, de los cuales el 74% se destina para el manejo de desastres; el 20% para reducción del riesgo; el 4% para gobernanza; y solo el 2% para conocimiento de los riesgos (Gobierno de Colombia 2020).

Asimismo, Colombia se encuentra entre los países más ricos del mundo en recursos hídricos ubicándose en la séptima posición, después de China con una disponibilidad de 2.132 km³/año. En el país existen cuatro vertientes principales: Caribe, Pacífico, Orinoco y Amazonas. Cerca del 70% de la población está asentada en las vertientes del Caribe, siendo los ríos Cauca y Magdalena, los más representativos. Sin embargo el país presenta serios problemas en la disponibilidad de agua de calidad en muchas regiones; en especial, aquellas zonas más pobladas. Esto se debe principalmente, a la contaminación, deforestación, erosión, pérdida de capacidad de retención y regulación del recurso hídrico, alterando drásticamente la biodiversidad y los ecosistemas que regulan directa e indirectamente la oferta hídrica

(Duran 2018). sí extrapolamos esta condición habitual a situaciones de emergencia el problema para potabilizar el agua se agrava muchos más.

Es debido a estas situaciones, que se han desarrollado diversas tecnologías que permitan solventar la problemática del suministro de agua en situaciones de emergencias y desastres, por ejemplo, las plantas compactas, las cuales se pueden ver un poco limitadas en términos de funcionamiento debido a que estas al tener que ser móviles y prácticas en su ensamblaje, no tienen la capacidad de tratar aguas con cargas contaminantes muy elevadas lo cual indica presencia de altos niveles de sustancias tóxicas, orgánicas o inorgánicas, que pueden ser dañinas para la salud humana y el medio ambiente. En este sentido, es importante identificar los rangos de los parámetros físicos-químicos del agua a tratar, con la finalidad de garantizar un agua apta para el consumo humano que cumpla con los valores máximos permisibles establecidos por la normatividad vigente nacional e internacional.

Este trabajo de grado contribuye con la adquisición de conocimientos teórico-prácticos que permitan mitigar problemáticas relacionadas con la potabilización, acceso y disponibilidad de agua en situaciones de emergencias y desastres, a través del uso eficiente de una planta compacta móvil.

6. Objetivos

Objetivo General

Contribuir a la atención de emergencias y desastres mediante la evaluación y el mejoramiento de las condiciones de operación y mantenimiento de una planta de tratamiento de agua potable compacta diseñada y propuesta para un equipo médico de emergencia (EMT).

Objetivos Específicos

- Definir los criterios de selección y la calidad de la fuente de abastecimiento utilizada en el caso de estudio.
- Identificar los procesos de tratamiento y condiciones de operación de la planta compacta destinada a la gestión de emergencias.
- Evaluar el nivel de tratabilidad de la planta compacta con la fuente seleccionada, precisando las condiciones de operación y mantenimiento óptimas que garanticen su funcionamiento eficiente.

7. Marco teórico

7.1. Marco conceptual

7.1.1. Elementos conceptuales asociados a los equipos médicos de emergencia -EMT

Una emergencia se define como una situación o estado en el que las capacidades de las personas para mantener condiciones de vida normales se ven notablemente reducidas, con riesgo o daño para la salud, la vida y el sustento. El alcance de una emergencia puede ser desde un impacto local con consecuencias limitadas a amplias zonas devastadas por un desastre con consecuencias catastróficas (OMS, 2013).

Por otra parte, la Organización Mundial de la Salud (OMS) establece que un desastre se caracteriza por ser una situación inesperada que representa una amenaza grave e inmediata para la salud pública, o cualquier condición que ponga en peligro la vida o salud de un número significativo de personas, requiriendo acción inmediata. Un grupo de expertos de las Naciones Unidas (ONU) define los desastres como interrupciones en el sistema ecológico humano que superan la capacidad de respuesta de la comunidad afectada para abordar los efectos y funcionar con normalidad.

En respuesta a las problemáticas mencionadas, la OPS ideó la creación de equipos médicos de emergencia en las Américas, con el propósito de brindar una respuesta oportuna a las emergencias y desastres que puedan surgir a nivel mundial. Estos equipos, conocidos como EMT, están compuestos por profesionales de la salud, incluyendo personal médico, enfermeros, fisioterapeutas, paramédicos, entre otros, quienes ofrecen atención clínica directa a las poblaciones afectadas por emergencias y desastres, así como apoyo a los sistemas locales de salud. Los EMT pueden ser tanto de origen gubernamental (equipos civiles y militares) como de organizaciones no gubernamentales, y su acción puede ser tanto a nivel nacional como internacional (OPS, 2020).

En el ámbito de los hospitales de campaña destinados a situaciones de emergencia y desastres, la disponibilidad de servicios de agua, saneamiento e higiene adquiere gran relevancia. Estas instituciones médicas provisionales, diseñadas para brindar atención primordial en períodos críticos, demandan un suministro ininterrumpido de agua potable como requisito para salvaguardar la vida y la salud de las comunidades afectadas. En relación con el reconocimiento del agua como un derecho humano fundamental, su aseguramiento no solo preserva la dignidad de los pacientes, sino que también optimiza la eficacia de las intervenciones médicas desplegadas. Por ende, la preservación y el fortalecimiento de la infraestructura hídrica asociada a estos establecimientos emergentes se vuelven necesarios para fortalecer la capacidad de respuesta ante desastres, garantizando así la prestación idónea de asistencia médica y la protección de vidas en momentos críticos.

En la Figura 2, se presenta el esquema de distribución o también llamada huella de un equipo médico de emergencia, con la finalidad de ilustrar la magnitud de los despliegues realizados por dichas instituciones. El espacio para la potabilización y tratamiento de agua, se aprecia en el área sombreada amarilla.

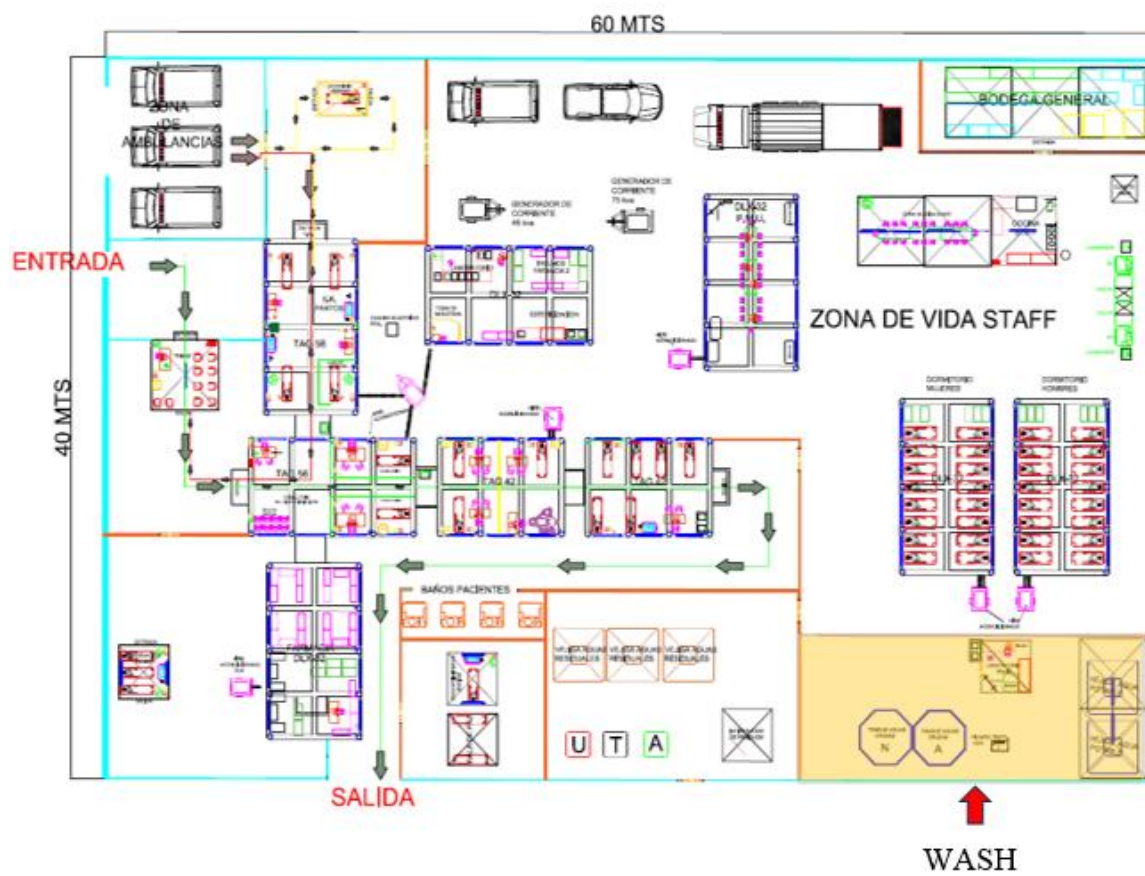


Figura 2. Esquema de distribución Equipo médico de Emergencia

Dentro de los equipos médicos de emergencia, el componente de WASH (Agua, Saneamiento e Higiene) abarca un conjunto de medidas dirigidas a garantizar el acceso a agua potable, instalaciones sanitarias adecuadas y prácticas higiénicas seguras en entornos de atención médica en situaciones de crisis. Este componente es fundamental para mantener altos estándares de higiene y evitar la propagación de enfermedades infecciosas en comunidades afectadas por desastres naturales, conflictos u otras emergencias. La implementación efectiva de medidas de WASH en los equipos médicos de emergencia protege la salud y la vida de los pacientes, el personal médico y las poblaciones vulnerables al tiempo que mejora la eficacia de las intervenciones médicas.

Especialmente crucial dentro de los equipos médicos de emergencia es el aspecto del agua potable. Numerosos aspectos de la atención médica de emergencia dependen del suministro de agua potable segura y confiable, desde la preparación de soluciones y medicamentos hasta la higiene personal y la limpieza de equipos médicos. La disponibilidad de agua potable evita la contaminación cruzada y facilita la higiene adecuada en el entorno de atención médica, además de garantizar una adecuada hidratación para pacientes y personal médico. Asegurar el acceso a agua potable de alta calidad es esencial en situaciones de emergencia, cuando los sistemas de agua pueden estar comprometidos o inexistentes, para salvaguardar la vida, la salud y el bienestar de las personas afectadas.

7.1.2. Elementos conceptuales asociados a la potabilización del agua

La Organización Mundial de la Salud (OMS) define la potabilización del agua como el proceso mediante el cual el agua cruda se transforma en agua apta para el consumo humano, eliminando o reduciendo los contaminantes hasta niveles seguros. Este proceso incluye varias etapas, como la coagulación, floculación, sedimentación, filtración y desinfección. Según la OMS, la potabilización tiene como objetivo principal proteger la salud pública al asegurar que el agua consumida no contenga microorganismos patógenos, sustancias químicas peligrosas ni radionucleidos que puedan causar enfermedades, (OMS, 2017; OPS, 2017).

En la Tabla 1, se presentan algunos conceptos clave relacionados con el tratamiento de agua, incluyendo algunas variables de laboratorio, con su respectiva bibliografía asociada.

Tabla 1. Conceptos asociados al tratamiento de agua

Concepto clave	Descripción	Referencia
Agua	Componente esencial de la biosfera, vital para la vida y el medio ambiente.	<i>IDEAM, 2007</i>
Agua Cruda	Agua en su estado natural, antes de tratamiento.	<i>Ministerio de Vivienda, 2010</i>
Agua Potable	Agua apta para consumo humano según estándares físicos, químicos y microbiológicos.	<i>Ministerio de Vivienda, 2010</i>
Calidad del Agua	Evaluación mediante variables físicas, químicas y biológicas para determinar su calidad acorde a usos.	<i>Orozco, 2005</i>
Métodos de Evaluación	Combinación de métodos fisicoquímicos y biológicos para evaluación exhaustiva.	<i>Samboni, 2007</i>

Concepto clave	Descripción	Referencia
Turbiedad	Opacidad debido a material particulado en suspensión.	<i>Pérez & Restrepo, 2008</i>
Color	Presencia de materia orgánica y metales, afecta la transparencia del agua.	<i>Sierra, 2011</i>
pH	Potencial hidrogeno del agua, que afecta la biodiversidad.	<i>Pérez & Restrepo, 2008</i>
Alcalinidad	Capacidad del agua para neutralizar iones hidronio.	<i>Sawyer, McCarty & Parkin, 2003</i>
Cloro	Agente desinfectante para eliminar microorganismos patógenos.	<i>Hernando et al., 2018</i>

En la Tabla 2, se presentan los límites máximos permisibles, de acuerdo con lo estipulado en la resolución 2115 de 2017.

Tabla 2. Características físicas del agua para consumo humano

Parámetro	Unidades	Valor Permisible
Color aparente	Unidades de platino cobalto (UPC)	15
Olor y sabor	Aceptable o no aceptable	Aceptable
Turbiedad	Unidades nefelométricas de turbiedad (NTU)	2
Conductividad	Microsiemens o mhos μ S	1000 μ S/cm

Fuente: Resolución 2115, 2017

Los microorganismos que se hallan en el agua poseen una diversidad de características, ejerciendo influencia en aspectos organolépticos, químicos y biológicos. En el conjunto de microorganismos acuáticos, se incluyen bacterias, algas, protozoarios flagelados, virus y larvas del reino vegetal, presentando la posibilidad de ser patógenos o no. La detección de microorganismos en el agua se convierte en un indicador crítico de su salubridad, destacándose la importancia de los Coliformes totales y fecales, responsables de enfermedades entéricas con impacto tanto en la salud pública como en el ámbito económico (OMS, 2006).

Las características microbiológicas del agua para consumo humano deben enmarcarse en los siguientes valores máximos aceptables desde el punto de vista microbiológico, los cuales son establecidos teniendo en cuenta los límites de confianza del 95% y para técnicas con habilidad de detección desde 1 Unidad Formadora de Colonia (UFC) o 1 microorganismo en 100 cm³ de muestra.

Tabla 3. Características microbiológicas del agua para consumo humano

Técnica Utilizada	Coliformes Totales	Escheriachia Coli
Filtración por membrana	0 UFC/ 100 cm ³	0 UFC/ 100 cm ³
Enzima sustrato	< de 1 microorganismo en 100 cm ³	< de 1 microorganismo en 100 cm ³

Técnica Utilizada	Coliformes Totales	Escheriachia Coli
Sustrato definido	0 microorganismo en 100 cm ³	0 microorganismo en 100 cm ³
Presencia- ausencia	Ausencia en 100 cm ³	Ausencia en 100 cm ³

Fuente: Resolución 2115, 2017

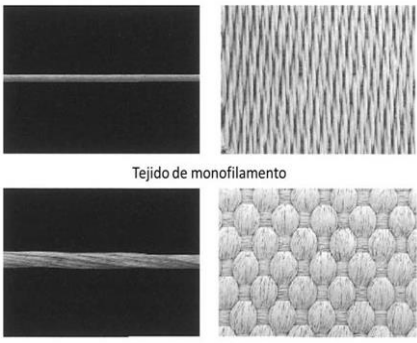
Los diferentes procesos de tratamiento empleados para mejorar la calidad del agua cruda se presentan en la .

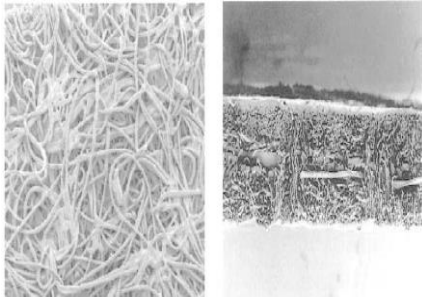
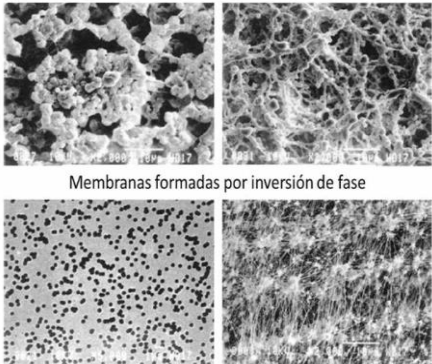
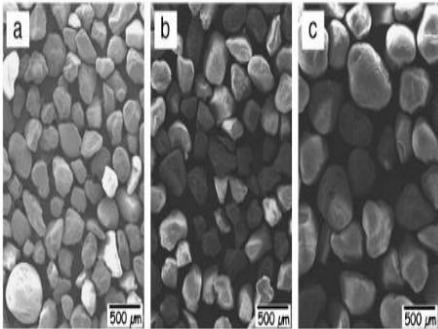
Tabla 4 y en la Tabla 5 se presenta un resumen de los diferentes medios de filtración.

Tabla 4. Procesos de tratamiento

Proceso	Descripción	Referencia
Coagulación	Proceso de adición de coagulante seguido de mezcla vigorosa para aglutinar y unir partículas suspendidas en el agua, facilitando su remoción.	Arboleda, 1992; Edzwald, 2010; Aquaquimi, 2013
Floculación	Promueve la formación de floc (conglomerados de partículas) mediante la unión de partículas pequeñas, facilitando su sedimentación posterior.	Vargas, 2009
Sedimentación	Eliminación de sólidos suspendidos pesados por gravedad, al permitir que se asienten en el fondo del tanque sedimentador.	Vargas, 2009
Filtración	Retención y eliminación de sólidos suspendidos mediante una malla filtrante, donde el tamaño de poro y la velocidad de flujo son clave para la eficacia del proceso.	B. Marín, 2009
Desinfección	Proceso para eliminar o neutralizar organismos patógenos (bacterias, virus, protozoos) presentes en el agua, asegurando su potabilidad y seguridad para el consumo humano.	Wagner, 2001

Tabla 5. Medios Filtrantes

Material	Descripción	Apariencia
Mallas y tejidos	Las mallas y tejidos consisten en estructuras de hilos entrelazados que actúan como filtros para retener partículas sólidas según el tamaño de los poros. Mallas metálicas: comúnmente fabricadas con acero inoxidable, cobre u otros metales resistentes. Tejidos sintéticos: principalmente nylon, poliéster u otros polímeros sintéticos.	 Tejido de monofilamento Tejido de multifilamento

Material	Descripción	Apariencia
Materiales no tejidos	Estos materiales no están entrelazados como en los tejidos, pero retienen partículas por medio de la estructura de las fibras. Polipropileno: ampliamente utilizado en cartuchos y filtros por su resistencia y capacidad para retener sedimentos. Poliéster: es otro material común en filtros no tejidos debido a su resistencia química y durabilidad.	
Membranas	Las membranas son barreras semipermeables que permiten el paso selectivo de ciertas partículas o compuestos. Polímeros: como polisulfona, poliamida (nylon), polietileno, celulosa, entre otros, utilizados en membranas de microfiltración, ultrafiltración y ósmosis inversa.	 Membranas formadas por inversión de fase Membrana de película grabada Membrana formadas por estiramiento de película
Materiales granulares	Consisten en medios filtrantes en forma de gránulos o partículas dispuestas en capas para retener impurezas. Arena de sílice: Empleado en filtros de lecho profundo para remover partículas y sólidos suspendidos. Carbón activado: Utilizado para adsorber compuestos orgánicos y químicos. Antracita: usada en filtros multimedia para mejorar la calidad del agua tratada.	

Fuente: Autores

7.2. Marco legal

Con el objetivo de contextualizar el marco legal, se consideró la Constitución Política de Colombia, junto con diversas leyes, decretos y resoluciones pertinentes en el ámbito nacional que abordan la gestión y regulación del recurso hídrico. Además, se destaca que la planta objeto de este trabajo recibió el respaldo de la Organización Mundial de la Salud (OMS) como donante principal. En este sentido, es imperativo tener en cuenta la normativa

internacional establecida por la OMS, que es la guía normativa de despliegues internacionales de hospitales móviles. En la Tabla 6, se presenta el marco normativo guía.

Tabla 6. Marco legal

Documento/Normativo	Descripción
Constitución Política de Colombia de 1991, Capítulo 3, Artículo 79	Establece el derecho fundamental de todas las personas a gozar de un ambiente sano, con garantías para la participación comunitaria en decisiones que lo afecten.
Decreto 1575 de mayo 09 de 2007	Establece el Sistema para la Protección y Control de la Calidad del Agua para Consumo Humano, emitido por el Ministerio de la Protección Social y el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.
Resolución 2115 de junio 22 de 2007	Define características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano, conforme al Decreto 1575 de 2007.
Resolución 0330 de 2017	Adopta el Reglamento Técnico para el Sector Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS), derogando resoluciones anteriores y estableciendo nuevas normativas.
Resolución 0799 de 09 de diciembre de 2021	Por la cual se modifica la Resolución 0330 de 2017.
Resolución 0548 de 26 de julio de 2022	Por la cual se adiciona un artículo transitorio a la Resolución 799 de 2021
Manual de clasificación y estándares mínimos para los EMT-2023 (OMS/OPS)	Proporciona normas y principios para equipos médicos de emergencia (EMT), ofreciendo guías prácticas para crear capacidad y comprender los requisitos.

8. Metodología

8.1. Enfoque metodológico

El enfoque metodológico de este trabajo de grado es de carácter experimental, según Murillo, (2011), esta metodología se centra en la manipulación de una o más variables de estudio, para controlar el aumento o disminución de dichas variables y su efecto en los procesos identificados, lo cual se adapta a las finalidades del presente trabajo de investigación donde se pretende determinar las condiciones de operación de una planta compacta móvil desarrollada para situaciones de emergencia, a través de análisis experimentales a escala real, para cumplir con dicho fin, la metodología se dividió en tres fases, las cuales se presentan en la Figura 3.

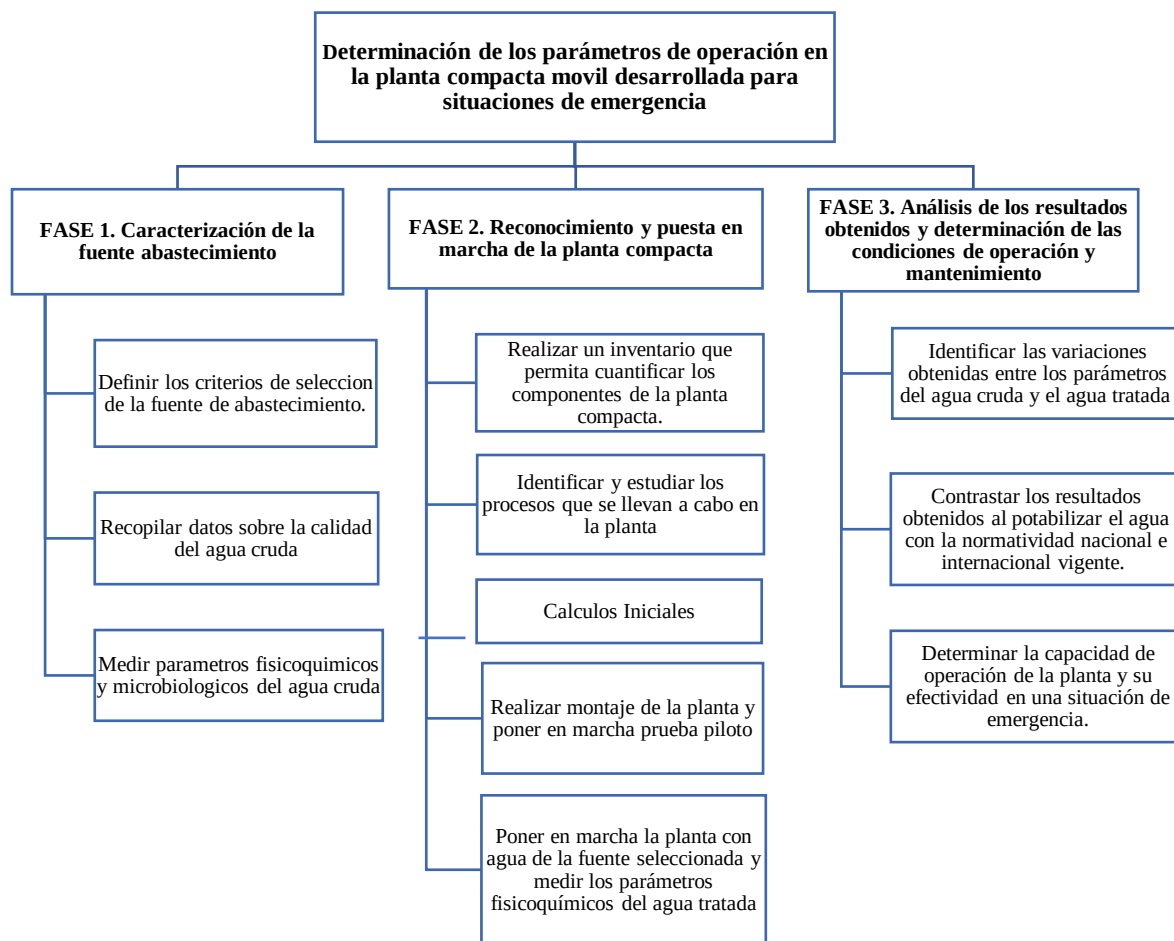


Figura 3. Esquema Metodológico

8.2. Definición de la fuente de abastecimiento

Esta primera fase se enfocó en la caracterización de la fuente de abastecimiento para llevar a cabo los análisis experimentales. Para ello, inicialmente se establecieron criterios de selección de la fuente, que consideraron la disponibilidad del recurso, accesibilidad, calidad de agua y su viabilidad para la conducción hasta la PTAP compacta móvil.

8.2.1. Criterios de selección

Para seleccionar la fuente de abastecimiento de la PTAP para el presente trabajo de investigación se tomaron en consideración los siguientes criterios de selección:

- **Calidad del agua:**

La selección de la fuente de abastecimiento para una Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) se centra en gran medida en la calidad del agua cruda disponible. La evaluación exhaustiva de esta calidad es esencial para garantizar que el agua cumpla con los estándares

requeridos para el tratamiento y la posterior distribución como agua potable. Aspectos como la presencia de contaminantes, la carga bacteriana, y la turbidez del agua cruda son consideraciones clave. La calidad del agua cruda no solo afecta la eficacia del tratamiento, sino que también tiene implicaciones directas en la salud pública y el bienestar de la comunidad.

Este criterio es esencial, al potabilizar agua en una situación de emergencia, por lo cual se recomienda seleccionar la fuente hídrica menos contaminada para reducir los riesgos asociados a su consumo y costos de tratabilidad. Sin embargo, para fines de esta investigación, se pretende seleccionar una fuente con cierto grado de contaminación, dado que esto, nos permite evaluar los rangos de tratabilidad de la PTAP, por ende, se asume que, si la planta tiene la capacidad de potabilizar una fuente con riesgo alto, podrá potabilizar fuentes con riesgos menores.

- **Disponibilidad del recurso:**

Este criterio es fundamental, ya que asegura que la fuente seleccionada pueda satisfacer la demanda de agua potable requerida de manera sostenible. Evaluar la disponibilidad del recurso implica considerar no solo la cantidad de agua disponible, sino también su estabilidad a lo largo del tiempo, dado que, la disponibilidad del recurso garantiza la continuidad en el suministro de agua potable, salvaguardando así la salud y el bienestar de la comunidad atendida por la PTAP.

En una situación de emergencia la disponibilidad del recurso agua es de vital importancia, ya que es esencial para la supervivencia y el bienestar de las personas afectadas. En este sentido, la disponibilidad de la fuente para su tratamiento es primordial, puesto que, durante crisis y desastres naturales, la disponibilidad de agua potable y segura se convierte en un recurso crítico para satisfacer las necesidades básicas de la población, como la hidratación, la preparación de alimentos y la higiene personal. La falta de acceso a agua limpia puede aumentar el riesgo de enfermedades transmitidas por el agua, lo que agrava aún más la situación de emergencia.

Para fines de esta investigación, es indispensable el acceso al recurso hídrico, dado que, se debe garantizar que la fuente tenga la capacidad de proporcionar la cantidad de agua requerida para satisfacer las necesidades de la planta de tratamiento y llevar a cabo los análisis experimentales programados.

- **Accesibilidad al recurso:**

La proximidad y facilidad de acceso a la fuente no solo simplifican las operaciones y el mantenimiento, sino que también reducen la necesidad de infraestructura adicional, lo que puede disminuir los costos de inversión. Además, una fuente de agua cercana permite una supervisión más efectiva y rápida de la calidad del agua, lo que contribuye a una respuesta más ágil ante posibles problemas o emergencias.

En una situación de emergencia la accesibilidad al recurso es fundamental, la proximidad y facilidad de acceso a fuentes de agua seguras permiten una rápida implementación de

medidas de tratamiento. Al estar cerca, se reduce el tiempo y los recursos necesarios para transportar el agua cruda a las instalaciones de potabilización, lo que resulta en una respuesta más rápida y eficiente para satisfacer las necesidades de agua potable de la población afectada.

Para la investigación en curso, este es uno de los criterios más relevantes para tener en cuenta en la selección de la fuente, por tal motivo, como posibles fuentes de abastecimiento se consideraron aquellos ríos del municipio de Santiago de Cali, que abastecen una planta de tratamiento de agua potable, puesto que esta particularidad permitirá tener acceso a la fuente, limitando complicaciones relacionadas con los permisos para la concesión de aguas.

- **Transporte y conducción:**

El transporte de agua cruda hasta una Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) es un aspecto crucial en el proceso de abastecimiento de agua. Este transporte es fundamental para llevar el agua desde su fuente de origen hasta la planta, donde se realizará el tratamiento necesario para convertirla en agua potable apta para el consumo humano. Garantizar un transporte eficiente y seguro del agua cruda es esencial para asegurar que el recurso llegue en condiciones adecuadas para su posterior tratamiento, evitando contaminaciones y manteniendo la calidad del agua durante todo el proceso.

En una situación de emergencia, la cercanía al recurso hídrico reduce los tiempos de viaje y los costos asociados al transporte, optimizando los recursos disponibles durante la emergencia. Además, una accesibilidad adecuada facilita la movilización de equipos y personal especializado hacia la fuente de agua.

Este criterio es fundamental para la selección de la fuente en la presente investigación, dado que se requiere una cantidad de agua considerable y continua para llevar a cabo los análisis experimentales. Además, el transporte de agua, a través de carrotanques implica la inversión de recursos económicos altos, por lo anterior, se pretende conducir el agua a través de mangueras y tuberías desde la fuente hasta la PTAP.

8.2.2. Recopilación de información de la fuente de abastecimiento

Una vez definidos los criterios de selección, se procedió a realizar la búsqueda de la fuente de abastecimiento para llevar a cabo el análisis experimental. Es importante recalcar que, la búsqueda de la fuente de abastecimiento se centró en aquellas fuentes hídricas que ya abastecían a una PTAP del municipio de Santiago de Cali, puesto que ya contaban con datos históricos sobre la calidad del agua. Así mismo, la existencia de una infraestructura de potabilización asociada al recurso hídrico facilitó la posibilidad de solicitar acceso a las instalaciones y realizar el despliegue de la planta compacta móvil objeto de estudio. En este sentido, se consideraron los ríos Cali, Meléndez, Pance y Cauca.

Para identificar el índice de calidad de agua de las fuentes consideradas, se consultó el *“Informe anual sobre el estado de los recursos naturales y del ambiente municipio de Santiago De Cali”* publicado por la contraloría general del municipio, y en la actualización de los Objetivos de Calidad del Tramo II del Río Cauca, con la finalidad de categorizar cada

fuentes de acuerdo al índice de Calidad de Agua (ICA). En la Tabla 7, se presentan los índices de calidad de agua de acuerdo con las fuentes consultadas. Se puede apreciar que la calidad de agua de las fuentes se clasifica entre aceptable y regular, siendo regular solo para el Río Cauca, siendo la fuente seleccionada para el presente trabajo

Tabla 7. ICA Ríos municipio de Cali

Fuente	Punto de monitoreo	2022		2023	
		ICA	Clasificación	ICA	Clasificación
Río Cali	EPU – Jardín Botánico	0,89	Aceptable	0,86	Aceptable
Río Meléndez	EPU (Vía La Buitrera Polvorines)	0,86	Aceptable	0,92	Bueno
Río Pance	EPU (Puente sede DeporCali)	0,97	Bueno	0,93	Bueno
Río Cauca	Juanchito	0,75	Regular	0,65	Regular

Fuente: Adaptación Informe anual sobre el estado de los recursos naturales (2023) y Objetivos de calidad Río Cauca.

Se optó por seleccionar como fuente de abastecimiento el río Cauca, dado que esa fuente puede ser de referencia como fuente representativa para el despliegue del hospital de emergencia acorde con condiciones locales particulares.

Así mismo, la decisión de seleccionar como fuente de abastecimiento el río Cauca, plantea desafíos significativos de contaminación. El río Cauca, como se ha evidenciado en estudios como el de Álvarez et al. (2018), enfrenta problemas de contaminación por diversos agentes, lo que lo convierte en un escenario de interés para poner a prueba la eficacia y adaptabilidad de la PTAP en condiciones adversas. Sumado a esto, García et al. (2021), destaca la importancia de las pruebas en condiciones reales para validar la efectividad de las tecnologías de tratamiento de agua.

Otro factor determinante, que influyó directamente en la selección del río Cauca fue la colaboración que se logró establecer con el instituto de investigación Cinara en la sede de puerto Mallarino, los cuales facilitaron un espacio dentro de sus instalaciones para realizar el montaje de la planta. En términos de disponibilidad del recurso y accesibilidad, realizar el montaje de la planta dentro de las instalaciones del instituto, garantizó la disponibilidad de la fuente de abastecimiento en la cantidad requerida y de manera continua.

En relación con el transporte o conducción del recurso hídrico, cabe destacar que en el Instituto Cinara se han desarrollado diversas investigaciones académicas. Por ello, sus

instalaciones cuentan con un sistema de conducción que va desde el desarenador de Puerto Mallarino hasta uno de los módulos del antiguo sistema de tratamiento, ubicado dentro del instituto. Sin embargo, dicho sistema de conducción requirió adecuaciones adicionales para garantizar el suministro de agua desde el módulo hasta la planta de tratamiento de agua potable (PTAP) móvil que se va a evaluar.

Además, el instituto Cinara y la Universidad del Valle apoyó el presente trabajo de investigación con el préstamo de equipos de laboratorio y financiación de las pruebas microbiológicas, para llevar a cabo el análisis experimental. La suma de todas las consideraciones descritas con anterioridad hizo que el río Cauca fuera la fuente de abastecimiento más favorable para desarrollar el trabajo de grado.

Una vez definida la fuente de abastecimiento para el presente trabajo de investigación, se realizó una búsqueda en la literatura para recopilar información relevante. A continuación, se presenta una descripción de la fuente de abastecimiento seleccionada:

El Río Cauca es la principal arteria fluvial del Occidente Colombiano, nace en el sur del país en el Macizo Colombiano, en el cerro de El Español cerca al Páramo de Sotará en el Departamento del Cauca, a una altura aproximada de 3.200 msnm, y desciende siguiendo su curso en dirección paralela a la cordillera Occidental. Tiene una longitud de 1.360 kilómetros y desemboca en el río Magdalena, en el Departamento de Bolívar, constituyéndose en su más importante afluente. Atraviesa de sur a norte nueve departamentos (Cauca, Valle del Cauca, Quindío, Risaralda, Caldas, Antioquia, Córdoba, Sucre y Bolívar), brindando grandes beneficios y servicios ambientales vitales a cerca de 183 municipios; servicios que son la base del desarrollo socioeconómico, además de ser un corredor multifuncional para la conectividad con Latinoamérica y el mundo (CONPES 3624 de 2009).

En la ciudad de Santiago del Cali, el río Cauca sirve como fuente de abastecimiento de la planta de tratamiento de agua potable Puerto Mallarino, la cual, de acuerdo con los reportes de EMCALI, inicio captando un caudal de 3,3 m³/s y ha sido ampliada hasta 6.6 m³/s, para abastecer a de agua potable a más de dos millones de personas, produciendo el 80% del agua tratada por las empresas públicas municipales de la ciudad.

En cuanto a las características fisicoquímicas del río Cauca, se destaca su pH cercano a la neutralidad, generalmente entre 6,5 y 7,5. Además, presenta una temperatura promedio de 23°C, lo que lo convierte en un río tropical. En términos de turbidez, el río Cauca suele mostrar una cierta cantidad de sedimentos suspendidos, aunque esta situación varía según la época del año y las actividades humanas a lo largo de su curso. En cuanto a la conductividad, se puede considerar moderada, oscilando entre 120 y 200 µS/cm. Por otro lado, en términos de oxígeno disuelto, el río Cauca presenta valores adecuados para mantener la vida acuática, con niveles que generalmente superan los 6 mg/L (Villa et al., 2023).

Tabla 8. Parámetros de Calidad del río Cauca

Parámetro	Valor Aproximado
Oxígeno Disuelto	5,78 mg O ₂ /L
pH	7,2 unidades

Parámetro	Valor Aproximado
Temperatura	20 °C
Coliformes totales	43000 NMP/100 mL
Coliformes fecales	23000 NMP/100 mL
DBO	3,29 mg/L
DQO	18,9 mg/L
Solidos suspendidos totales	56 mg/L
Turbiedad	Aumento en eventos por alta carga contaminante
Caudal	1,215 - 7,500 m³/s

Fuente: Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca, calidad del agua del río Cauca 2021-2022

8.2.3. Medición de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del agua cruda

Las pruebas de jarras permitieron realizar las primeras caracterizaciones de la fuente de acuerdo con sus parámetros fisicoquímicos y microbiológicos. Se realizaron cuatro pruebas de jarras al agua cruda, en donde se registraron valores iniciales y finales de temperatura, pH, turbiedad, conductividad, alcalinidad, color, alcalinidad y color de acuerdo con la dosis de coagulante empleada.

Para realizar las pruebas de jarras se empleó como coagulante sulfato de aluminio tipo A. Este coagulante fue seleccionado para la planta compacta móvil sobre otros tipos de coagulantes debido a sus características de calidad con menos residuos en el proceso. Este sulfato es transparente y no deja residuos visibles en el agua tratada y de los componentes de la planta, lo que es esencial para mantener la calidad estética del agua potable o tratada, especialmente en entornos móviles donde la limpieza del proceso es fundamental. Otra ventaja clave del sulfato de aluminio tipo A es su rápida formación de floculación, lo que facilita la sedimentación de partículas durante el tiempo de reposo posterior a la mezcla. Esto mejora la eficiencia de la separación de sólidos suspendidos, contribuyendo a un tratamiento más efectivo del agua en la planta compacta móvil.

Para la mezcla rápida se ajustó el equipo de jarras a 200 rpm durante 2 minutos, una vez pasado este tiempo, para la mezcla lenta se configuró el equipo a 50 rpm, durante 10 minutos, posteriormente se apagó el equipo y se tomó un tiempo de sedimentación de 15 minutos.

8.3. Reconocimiento y puesta en marcha de la planta compacta

Esta segunda fase del trabajo se enfocó en la identificación de los equipos, procesos, funcionamiento y toma de datos experimentales. Para ello inicialmente se procedió a realizar un inventario de cada uno de los componentes y equipos asociados a la infraestructura de la PTAP móvil objeto estudio; por lo cual, se realizó un despliegue del equipo EMT durante dos semanas, en donde se realizó el armado y montaje de las estructuras de acuerdo con la

secuencia de potabilización; posteriormente se procedió a diligenciar una base de datos en Excel especificando proceso, cantidad, medidas y descripción de cada uno de los equipos.

Posteriormente, se identificaron y estudiaron los procesos de potabilización que constituyen la PTAP móvil objeto estudio, dado que la planta no contaba con fichas técnicas, ni manuales de operación, para identificar los procesos y especificaciones generales de la planta, se estableció contacto con proveedor y se complementó la información suministrada con literatura científica. Durante estos procesos se identificaron algunos vacíos operativos que limitaban el funcionamiento correcto de la planta potabilizadora, por lo cual, se propuso el diseño y la implementación de estructuras (Floculador y Cámara de contacto de cloro), para complementar el tratamiento del agua.

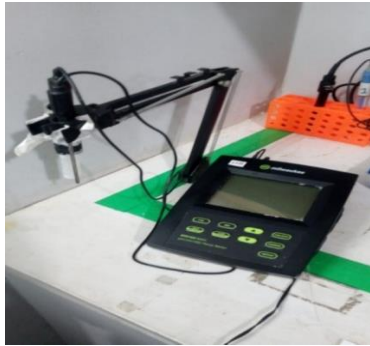
Adicionalmente, en esta fase se incluyeron los cálculos de operación de la planta. Para el caudal de funcionamiento, se calculó la cantidad de agua requerida por el Equipo médico de emergencia (EMT) durante un despliegue, de acuerdo con las dotaciones establecidas en “*Los lineamientos para la clasificación y estándares mínimos para los equipos médicos de emergencia*” de la OPS, para un hospital móvil tipo 1. Los caudales de dosificación del coagulante y cloro se calcularon de acuerdo con la concentración del químico y el caudal de funcionamiento de la planta. Además, se especificaron los procedimientos y cálculos efectuados en el diseño de las estructuras de mejoramiento (Floculador y Cámara de contacto de cloro). Una vez definidos los caudales de operación, se realizaron las pruebas de operación considerando la obtención de agua potable.

Posteriormente, se procedió a poner en funcionamiento la planta con el agua cruda de la fuente seleccionada, para iniciar las corridas con la fuente de agua seleccionada, inicialmente se realizaron los acoples y conexiones desde el punto de captación hasta la entrada a la planta. En cada una de las etapas, se tomaron pruebas fisicoquímicas, centrándose en parámetros clave como la turbidez, el pH, temperatura, e-coli y color. Además, se realizaron pruebas de jarras con el objetivo de determinar los valores cruciales de mezcla lenta y rápida, así como los tiempos de sedimentación, contribuyendo así a la obtención precisa de la calidad del agua.

En la Tabla 9, se describe el procedimiento e instrumento que se emplearon en la medición de los parámetros.

Tabla 9. Medición de parámetros en laboratorio

Parámetro	Procedimiento	Equipo
Turbiedad	Este parámetro se midió con la ayuda de un turbidímetro, inicialmente se calibró el equipo, posteriormente se llenó la celda con la muestra y se procedió a limpiarla con un paño, luego se introdujo la muestra en el equipo y se tomó lectura del resultado.	

Parámetro	Procedimiento	Equipo
pH y Temperatura	Para medir el pH, se utilizó un medidor calibrado con una solución patrón, se introdujo en la muestra y se esperó un minuto para estabilizar la lectura. Para la temperatura, se usó un termómetro, introduciéndolo a 10 cm bajo la superficie de la muestra durante 30 segundos antes de registrar el resultado.	
Color	Para la medición de color se empleó un espectrofotómetro, la muestra de agua se añadió en una celda, esta se limpió con un paño y se introdujo en el equipo, posteriormente, se configuró el equipo para iniciar con la lectura.	
Cloro residual	La medición de cloro residual se realizó con un colorímetro (HI-701). Para ello, se encendió el equipo, se depositó la muestra en la celda, se limpió y se introdujo en el mismo, una vez el equipo registró la lectura C2, se sacó la muestra y se le agregó el reactivo, se ingresó nuevamente en el equipo y se registró la lectura.	
<i>E-coli</i>	Para la prueba de e-coli se contó con ayuda externa, en este sentido, se recolectaron las muestras en recipientes estériles, se marcaron y se entregaron al personal de laboratorio asignado, el cual, se encargó de inocular el medio de cultivo con la muestra de agua e incubó la muestra de 24 a 48 horas a 35 °C.	

Fuente: Autores

Para iniciar con el funcionamiento se determinaron los caudales de operación. A continuación, se describen los cálculos realizados para la estimación de los caudales:

- Caudales de Operación

$$Q_{operación} = \frac{(Vol. Agua)}{T_{operación}} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

$Q_{operación}$ = Caudal de operación PTAP

$Vol. Agua$ = Volumen de agua requerido por día

$T_{operación}$ = Tiempo de operación por día

○ Caudales de Dosificación

Para calcular el caudal de dosificación de coagulante se empleó la Ecuación 2, es importante recalcar que el caudal de coagulación varió en los diversos análisis experimentales de acuerdo con las condiciones del agua cruda a tratar, por lo cual, antes de cada corrida se realizó una prueba de jarras y se calculó el caudal de dosificación en relación con la dosis optima de coagulante hallada para cada caso. Así mismo, en cada prueba se ajustaba el sistema de dosificación de la PTAP con la finalidad de garantizar el caudal de coagulación.

$$Q_{coagulación} = \frac{Q_{operación} \times \square Planta \square}{\square Coagulante \square} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

$Q_{coagulación}$ = Caudal de coagulación

$Q_{operación}$ = Caudal de operación de la PTAP (10 L/Min)

$\square Planta \square$ = Dosis optima (mg/L)

$\square Coagulante \square$ = Concentración de coagulante (40000 mg/L)

Para la dosificación de cloro se empleó la Ecuación 3. Este cálculo se realizó una única vez dado que se usó el mismo caudal de dosificación, para los diversos análisis experimentales.

$$Q_{cloración} = \frac{Q_{operación} \times \square Planta \square}{\square Cloro \square} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

$Q_{cloración}$ = Caudal de cloración

$Q_{operación}$ = Caudal de operación de la PTAP (10 L/Min)

$\square Planta \square$ = Concentración final de cloro (1 mg/L)

$\square Cloro \square$ = Concentración inicial de cloro (80000 mg/L)

Para la toma de datos experimentales, se optó por dividir las pruebas en dos momentos, las cuales se describen detalladamente a continuación:

- **Análisis exploratorio**

El análisis exploratorio se llevó a cabo con el propósito de comprender y evaluar la calidad del agua cruda utilizada en el proceso de tratamiento en la planta de agua potable. Este

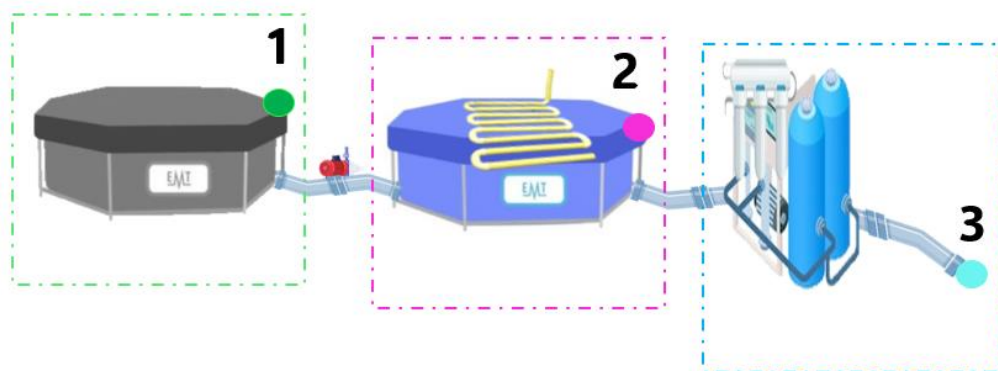
análisis inicial permitió identificar patrones, tendencias y posibles problemas que pudieran influir en la eficacia del tratamiento y la calidad del agua final. Se realizaron un total de cuatro (4) corridas, cada una con una duración de tres (3) horas. Durante cada corrida, inicialmente se efectuaron mediciones de la turbiedad del agua cruda, y se realizó la prueba de jarras para determinar la dosis óptima de coagulante a emplear. Una vez establecida la dosis óptima, se puso en funcionamiento la planta.

Al agua cruda se le midieron diferentes parámetros, tales como la temperatura, pH, turbiedad, conductividad, alcalinidad y color, con la finalidad de determinar la calidad de agua a tratar. Al término de las tres horas de operación, se tomó una muestra del agua tratada y se realizaron mediciones de las mismas variables mencionadas anteriormente para el agua cruda. Adicionalmente, se llevaron a cabo análisis de coliformes fecales y de cloro residual en el agua tratada. Este procedimiento se replicó en cada una de las tres (3) corridas realizadas. Una vez completado el experimento, se compararon los parámetros fisicoquímicos obtenidos tanto en el agua cruda como en el agua tratada, contrastando sus diferencias.

- **Operación continua para verificar componentes de la planta**

Durante este análisis se llevó a cabo una prueba operativa continua de la planta para evaluar el funcionamiento de los componentes de la planta en una jornada típica de operación. Para lograr esto, se planificó una operación de 8 horas de funcionamiento continuo. En primer lugar, se procedió con el llenado del tanque de almacenamiento de agua cruda, transfiriendo luego el agua a través de una manguera hasta el punto de coagulación. A continuación, el agua siguió su trayecto a través de la estructura de floculación y se dispuso dentro del tanque de sedimentación. Se esperó aproximadamente dos horas hasta que el agua sedimentada alcanzara el nivel mínimo requerido para alcanzar la tubería de salida hacia el tanque. Una vez el agua sedimentada alcanzó la altura deseada, se puso en marcha la planta y el agua fue conducida a través de una manguera hacia los filtros, continuando su recorrido hasta la desinfección y cloración, finalizando así el proceso de tratamiento.

Una vez que el agua completó el ciclo a través de todos los procesos de la planta, se procedió a la toma de parámetros experimentales. Para ello, se tomaron muestras cada 15 minutos en tres puntos diferentes (agua cruda, agua sedimentada y agua tratada), midiendo diversos parámetros como pH, turbidez y color en cada una de las muestras. Además, se realizaron análisis de cloro residual cada 15 minutos y coliformes fecales cada hora en el agua tratada. Este procedimiento se repitió a lo largo de ocho horas de funcionamiento. En la Figura 4, se ilustran los puntos de muestreo considerados en el análisis extendido.



PUNTOS DE MUESTREO

1. Agua cruda
2. Agua sedimentada
3. Agua filtrada

Figura 4. Puntos de muestreo análisis extendido (cambiar por esquema)

8.4. Análisis de los resultados para las condiciones de operación y mantenimiento de la planta.

Esta última fase, permitió comparar el comportamiento de las variables de estudio durante los procesos de potabilización, para ello, se realizaron graficas de pH, turbiedad y color, representando el agua cruda, agua sedimentada y agua tratada, con la finalidad de identificar el comportamiento de dichas variables a su paso por la PTAP. Para *E-coli* se graficaron solo los valores del agua cruda y el agua tratada. Los datos del agua tratada se compararon con los valores máximos permitidos en la normatividad legal vigente a nivel nacional, a través de la resolución 2115 del Ministerio de Salud y a nivel internacional con los valores recomendados por la organización mundial de la Salud (OMS), los cuales rigen a los equipos médicos de emergencias en movilizaciones fuera del país.

Finalmente, de acuerdo con los resultados se determinaron las condiciones de operación y mantenimiento de la PTAP, así mismo, se presentan recomendaciones para tener en cuenta antes, durante y después de un despliegue, en términos de abastecimiento de agua.

9. Resultados

Los resultados de este trabajo se organizaron en dos partes. En primer lugar, se incluyó la descripción de los componentes de la planta, con sus procesos de tratamiento según la tecnología y, se presentan los resultados obtenidos en el montaje y puesta en marcha de la planta. El análisis de los resultados de esta primera parte es de tipo descriptiva, porque básicamente identifica el funcionamiento de la planta. Sin embargo, en el ítem de montaje y puesta en marcha se tabularon los resultados preliminares obtenidos en las pruebas de Jarra.

La segunda parte agrupa los resultados relacionados con los análisis obtenidos en las durante el ciclo operativo, el cual incluyo la variación de los parámetros evaluados en las diferentes etapas de tratamiento y la comparación de estos con los valores máximos permisibles

estipulados en la normativa. El análisis de los resultados de este segundo bloque se realizó a través de graficas con la información obtenida lo cual permitió visualizar tendencias y cambios a lo largo del tiempo en los procesos de potabilización. Finalmente, se tabularon algunos aspectos claves relacionados con la operación y mantenimiento de la PTAP estudiada. Los hallazgos obtenidos no solo contribuyen al entendimiento del funcionamiento de la planta, sino que también ofrecieron orientación práctica para la toma de decisiones informadas en escenarios críticos.

9.1. Descripción de la planta compacta y puesta en marcha

9.1.1. Componentes de la planta

Para un equipo médico de emergencia (EMT), resulta crucial asegurar un suministro confiable y seguro de agua durante situaciones de emergencia. En este sentido, una planta de tratamiento de agua potable compacta y móvil es una tecnología precisa y efectiva, ya que garantiza el tratamiento del agua en áreas afectadas por emergencias. Además, proporciona autonomía y autosostenibilidad al EMT al eliminar la dependencia de terceros para el suministro de agua.

De acuerdo con lo anterior, además de contar con la tecnología adecuada, un EMT debe conocer el funcionamiento y componentes asociados a la misma. En este sentido, con la finalidad de ampliar el conocimiento sobre la PTAP evaluada en la Tabla 10, se presenta el inventario de los componentes y equipos asociados a la planta compacta, especificando la cantidad y medidas; además a cada uno de los elementos identificados se le asigno un código de acuerdo con el proceso de tratamiento al que se encuentra asociado.

Tabla 10. Inventario equipo de potabilización

Proceso	Descripción	Cantidad	Foto	Medidas
Captación	Bomba portátil de gasolina con mochila tipo tabla de transporte	1		NA
	Manguera de succión con flotador y válvula de pie y filtro tipo canasta	1		5,08 cm
	Blader de almacenamiento y transporte de agua cruda	1		750 L
Almacenamiento del agua cruda	Tanque de agua color Negro con cubierta y piso	1		1500 galones

Proceso	Descripción	Cantidad	Foto	Medidas
	Estructura metálica de tanque para almacenamiento de agua cruda	1		
	Válvula mariposa	1		5,08 cm
	Manguera de succión con filtro tipo canasta	1		2,54 cm
Coagulación sedimentación	Tanque de agua color Azul con cubierta y piso	1		1500 galones
	Estructura metálica de tanque para almacenamiento de agua cruda	1		
	Estructura de PVC codos y tubos (floculador)	1		
	Válvula mariposa	3		5,08 cm
	Recipiente de almacenamiento de coagulante	1		1L
	Estructura metálica de soporte de Coagulante	1		

Proceso	Descripción	Cantidad	Foto	Medidas
	Manguera de succión	1		2,54 cm
Filtración, desinfección y cloración	Estructura de filtros y componentes de desinfección y cloración	1		
Almacenamiento del agua potable	Blader de almacenamiento de agua potable	2		1500 galones
	Manguera de succión	2		2,54 cm

Fuente: Autores

Conocer los diferentes componentes de la planta es de alta relevancia para el equipo médico de emergencia, dado que permite optimizar los procesos de armado, desarmado y mejorar los mecanismos de respuesta ante la movilización a una emergencia. Esto permite mantener un orden adecuado y asegurar que, durante el despliegue, no falten piezas cruciales que podrían obstaculizar el funcionamiento de la PTAP. Así mismo, durante un despliegue es indispensable considerar aspectos prácticos como el peso y el volumen de las estructuras, garantizando un traslado eficaz.

9.1.2. Identificación de los procesos que hacen parte de la planta de tratamiento

Las Plantas de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) constituyen un conjunto integrado de estructuras, equipos y materiales destinados a mejorar las características físicas, químicas y microbiológicas del agua cruda, con la finalidad de hacerla apta para el consumo humano. La planta compacta móvil, revisada en el presente trabajo de grado, fue suministrada por la Fundación San Raffaele Barco Hospital, la cual es la única en Colombia en proceso de certificación ante la OMS para tener el primer equipo médico de emergencia del país. En la Figura 5, se presenta el esquema de la PTAP móvil.

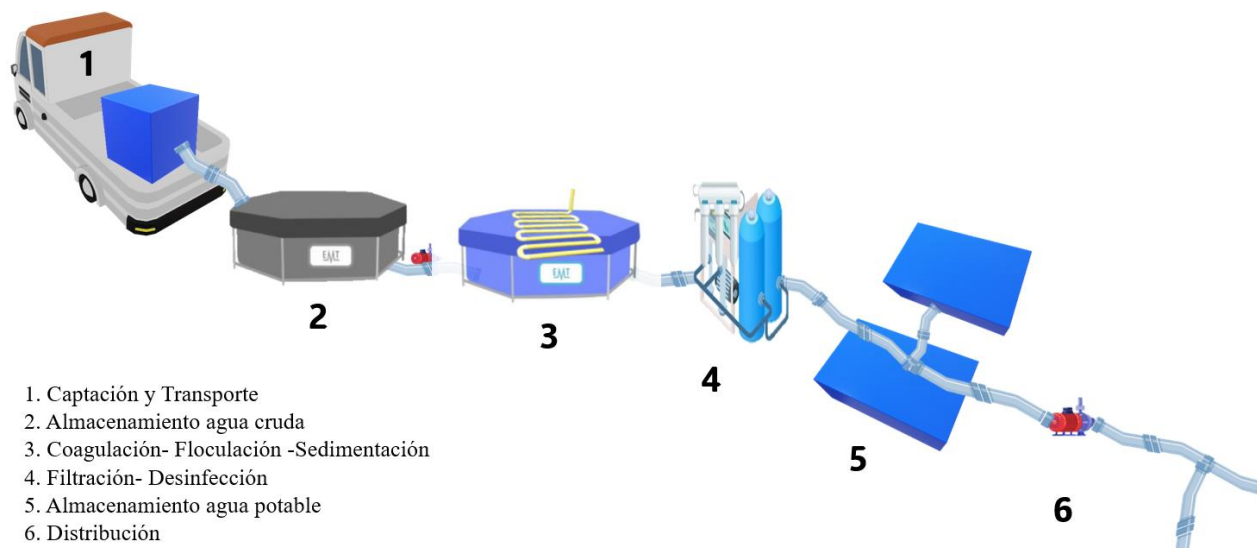
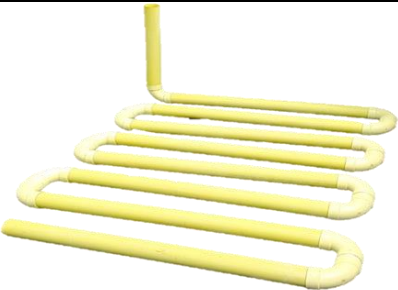


Figura 5. Esquema PTAP móvil
 Fuente: Autores

En la Tabla 11, se presenta y se describen los procesos unitarios del equipo para potabilización de agua.

Tabla 11. Descripción procesos de tratamiento de la planta

Proceso	Descripción	Imagen
Captación y Transporte	Emplea un equipo especializado para la captación y transporte del agua cruda desde la fuente de hasta la PTAP. Se utilizan mangueras flexibles de acople rápido. En este caso, se optó por adecuar la infraestructura del sitio para acceso continuo al agua.	
Almacenamiento de Agua Cruda	Utiliza un depósito octogonal negro con capacidad de 1500 galones (5600 litros) para almacenar el agua cruda antes del tratamiento.	
Coagulación	Desestabiliza partículas coloidales mediante un coagulante (sulfato de aluminio Tipo A líquido al 4%) para facilitar su posterior eliminación. Se implementó una estructura de dosificación para mejorar la adición del coagulante.	

Proceso	Descripción	Imagen
Floculación	Se diseñó un floculador hidráulico horizontal para inducir la aglomeración de partículas y facilitar su sedimentación. Utiliza tuberías de PVC desarmables para portabilidad y simplicidad en el ensamblaje.	
Sedimentación	Proceso físico donde las partículas sólidas se separan y depositan en el fondo de un tanque. Se lleva a cabo en el mismo depósito azul utilizado para la coagulación y la floculación.	
Filtración Rápida	Remueve partículas suspendidas y coloidales mediante filtros de carbón activado, arena de sílice y membranas de ultrafiltración.	
Desinfección y Cloración	Desinfección con luz ultravioleta para eliminar microorganismos patógenos, seguida de cloración mediante inyección de hipoclorito. Se propuso una cámara de contacto de cloro para asegurar el tiempo de contacto, aunque no se construyó por limitaciones económicas.	
Almacenamiento de Agua Potable	Dispone de dos depósitos flexibles de plástico, cada uno con capacidad de 1000 galones (3700 litros), para almacenar agua potable tratada y asegurar un suministro constante en la situación de emergencia.	

○ **Estimación del caudal de operación**

Para calcular el caudal de operación de la PTAP, se determinó la cantidad de agua requerida para abastecer el equipo médico de emergencia (EMT) para quince (15) días, siendo este, el tiempo mínimo de duración de un despliegue. Para este cálculo se consideraron las dotaciones establecidas por la Organización Panamericana de la Salud (OMS, 2021), en la “clasificación y estándares mínimos para los equipos médicos de emergencia”, específicamente el estándar técnico dos (2), para el abastecimiento de agua en situaciones de emergencia se definen las dotaciones.

Tabla 12. Dotación OPS para Equipos médicos de emergencia móvil Tipo 1

Categoría	Dotación
Integrante EMT	60 L/Persona-día
Atenciones ambulatorias	5 L/paciente
Partos	100 L/parto
Equipos de esterilización	50 L/día

Fuente: Adaptación (OMS, 2021)

En la Tabla 13, se presenta el volumen de agua requerido por el EMT para un día de funcionamiento y el consumo total para el despliegue de 15 días.

Tabla 13. Calculo Caudales EMT

Cantidad	Categoría	Consumo (m³/d)	Consumo (m³/15 d)
36	Integrante EMT	2,16	32,4
100	Atenciones Ambulatorias	0,50	7,50
1	Partos	0,10	1,50
1	Equipos de Esterilización	0,05	0,75
Total		2,81	42,15

Fuente: Autores

De acuerdo con la Tabla 13, se calculó que en un despliegue del EMT se requerirá de aproximadamente 42,15 m³ de agua para satisfacer las necesidades de la emergencia durante los 15 días de operación continua, que es el tiempo promedio que se les autoriza a los equipos médicos de emergencia prestar sus servicios. Además, es importante añadir que en caso de que la emergencia se prolongue por un tiempo mayor al mínimo establecido, el personal encargado de WASH deberá suministrar los servicios por el tiempo extra requerido.

Una vez calculado el volumen de agua requerido por el EMT, se procedió a determinar el caudal de operación de la PTAP compacta empleando la Ecuación 1, cabe destacar que el tiempo utilizado es de 6 horas, debido a que es el tiempo en el cual funcionaria la planta de manera continua para garantizar la cantidad de agua que requiere el EMT y disminuir el consumo energético producido por la planta. De acuerdo con la Tabla 14, el caudal de operación es de 7,8 L/min, sin embargo, se optó por ajustar dicho caudal a 10 L/min con la finalidad de contar con una reserva de agua en caso de imprevistos, como factor de seguridad.

Tabla 14. Caudal de operación

Caudal	Calculo	Valor
Caudal de operación ($Q_{operación}$)	$Q_{operación} = \frac{(2,81 \text{ m}^3)}{6 \text{ horas}} \times \frac{1000 \text{ L}}{1 \text{ m}^3} \times \frac{1 \text{ hora}}{60 \text{ min}}$	$Q_{operación} = 7,8 \text{ L/min}$ / min $\rightarrow 10 \text{ L/min}$

○ Caudales de Dosificación

Para calcular el caudal de dosificación de coagulante se empleó la Ecuación 2, el caudal de coagulación varió en los diversos análisis experimentales de acuerdo con las condiciones del agua cruda a tratar, por lo cual, antes de cada corrida se realizó una prueba de jarras y se calculó el caudal de dosificación en relación con la dosis optima de coagulante hallada para cada caso. Así mismo, en cada prueba se ajustó el sistema de dosificación de la PTAP con la finalidad de garantizar el caudal de coagulación. Para la dosificación de cloro se empleó la Ecuación 3. Este cálculo se realizó una única vez dado que se usó el mismo caudal de dosificación, para los diversos análisis experimentales.

• **Cálculo del floculador**

En la revisión de la planta se identificó la inexistencia del proceso de floculación. Tal como aparecía en los manuales, la floculación se debía realizar por agitación manual con un remo, siendo ineficaz para llevar a cabo el tratamiento. Por esa razón se procedió con el diseño adecuado del floculador hidráulico que desempeña un papel crucial en la optimización de la planta compacta móvil de tratamiento de agua, asegurando una eficiente remoción de sólidos suspendidos y partículas coloidales para mejorar la calidad del agua tratada. Este componente tiene un impacto significativo en la capacidad operativa y la eficacia global del sistema, además el diseño del floculador hidráulico facilita el trabajo de los operadores en campo. Fue así, como se llevaron a cabo pruebas específicas para determinar los parámetros clave de diseño del floculador hidráulico.

Tabla 15.. Diseño floculador

Datos Iniciales		
Parámetro	Valor	Unidad
Caudal	0,01	m^3/min
Tiempo	6	min
Longitud	1	m
Diámetro	0,0762	m
Gravedad	9,8	m/s^2
Viscosidad	0,00000093	n/m^2
Datos Calculados		
Parámetro	Calculo	Valor
Volumen	$Volumen = caudal \times tiempo$ $Volumen = 0,01 \frac{m^3}{min} \times 6 min = 0,06 m^3$	$0,06 m^3$
Área	$A = \pi * \frac{(Diámetro * 0,0254)^2}{4}$ $A = 3,1416 * \frac{(3 pul * 0,0254)^2}{4}$	$0,005 m^2$
Velocidad	$velocidad = \frac{Caudal}{Area}$ $velocidad = \frac{0,01 \frac{m^3}{min}}{0,005 m}$	$2,19 \frac{m}{min}$
Hf	$10,674 \times \left(\frac{caudal}{c}\right)^{1,852} \times \frac{Longitud}{Diámetro^{4,87}}$ $10,674 \times \left(\frac{0,01 \frac{m^3}{min}}{150}\right)^{1,852} \times \frac{1 m}{0,0762^{4,87}}$	$0,055 m$
Gradiente	$Gradiente = \sqrt{\frac{Hf * gravedad}{Viscosidad * Tiempo}}$ $Gradiente = \sqrt{\frac{0,055m * 9,8 \frac{m}{s}}{0,00000093 * 360 s}}$	$40 s^{-1}$

Para corroborar el valor del gradiente se empleó la Figura 6, teniendo en cuenta las revoluciones por minuto determinadas en la prueba de jarras sin deflectores, dando como resultado un gradiente de velocidad de $40 s^{-1}$

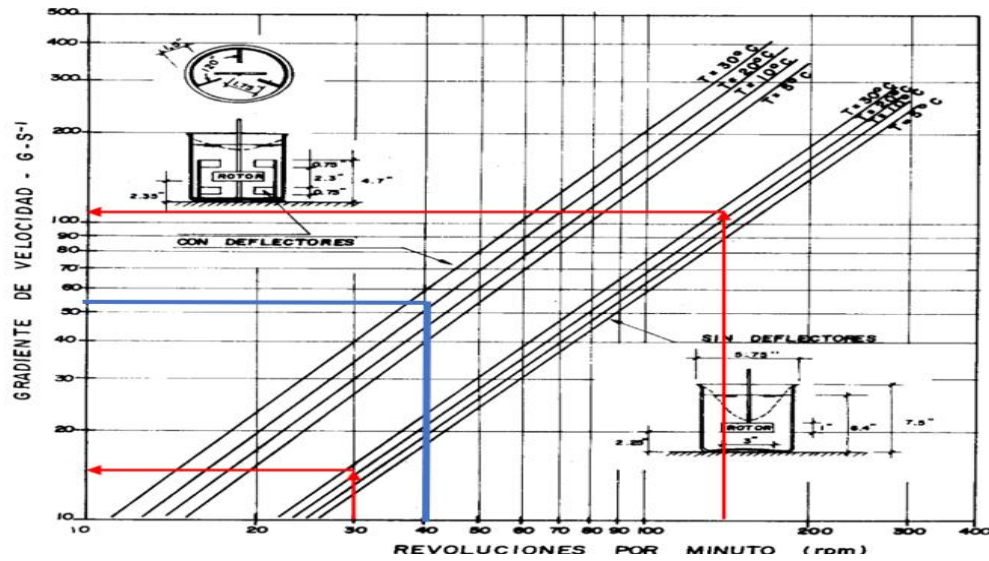


Figura 6. Gradiante de velocidad versus RPM.

Fuente: (Kawamura, 1966)

Después de calcular el volumen requerido para el floculador utilizando la Ecuación 4, se tomó la decisión de utilizar tubería de PVC para su construcción debido a su facilidad de ensamblaje y disponibilidad. Se seleccionó un diámetro específico que se adaptara al tamaño de la piscina donde se lleva a cabo el proceso de coagulación-floculación. Este diámetro fue elegido para asegurar que se mantuviera el gradiente de velocidad para un proceso eficiente y efectivo.

$$\text{Volumen} = \text{Caudal} * \text{tiempo de mezcla optimo}$$

Ecuación 4

$$\text{Volumen} = 0.00016 * 360 = 0,057 \text{ m}^3 = 57,6 \text{ l}$$

Se decidió que el ancho máximo del floculador fuera de un metro, debido a las dimensiones de la piscina donde se ubicaría. Para determinar el número necesario de tubos de floculación, se dividió el volumen disponible por el diámetro del tubo seleccionado. Se optó por utilizar tubos de PVC con un diámetro de tres pulgadas (7,62 cm). Se aplicó la Ecuación 5 para calcular la cantidad de tubos de 1 metro requeridos para alcanzar el caudal y el gradiente.

$$\text{Numero de tubos} = \frac{\text{Volumen}}{\text{Diametro}}$$

Ecuación 5

$$\text{Numero de tubos} = \frac{57,6}{7,62} = 7,6 \approx 8$$

Finalmente, se optó por ocho tubos de un metro de longitud cada uno, junto con dos tubos dispuestos verticalmente: uno de 90 cm y otro de 20 cm. Estos tubos están conectados mediante tes también de PVC. Esta unidad permitió mejorar la eficiencia para la aglutinación y sedimentación de partículas suspendidas.

Este sistema de tuberías y conexiones ofrece una configuración efectiva para el floculador hidráulico, garantizando un adecuado tiempo de retención, mezcla del agua y el gradiente estimado. La disposición de los tubos permite una distribución uniforme del coagulante, facilitando así el proceso de floculación, la implementación de esta tecnología mejoró sustancialmente los procesos de coagulación-floculación, tal y como se observa en la Figura 7 donde se evidencia un agua clarificada. Así mismo los análisis experimentales arrojaron reducciones mayores al 50% en los niveles de turbiedad, confirmando que las condiciones de operación del floculador, especialmente el gradiente de velocidad, fueron óptimas para el tratamiento. Figura 7.

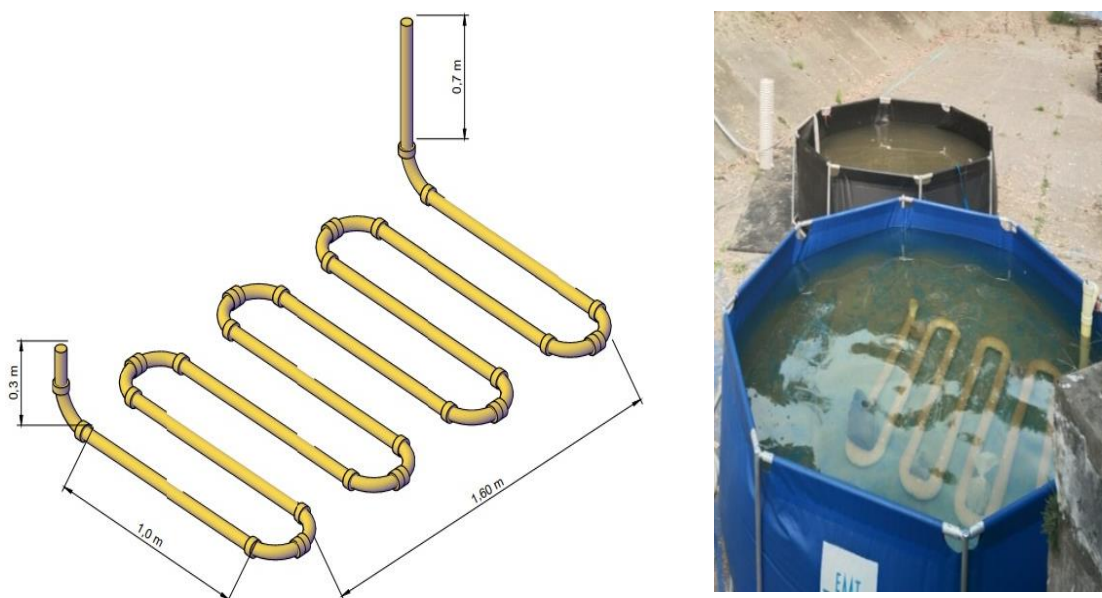


Figura 7. Floculador hidráulico diseñado

- **Cálculo de la cámara de contacto de cloro**

La utilización de una cámara de contacto de cloro en plantas de potabilización de agua es esencial para asegurar la desinfección efectiva del agua tratada, eliminando microorganismos patógenos y garantizando la seguridad del suministro de agua potable. En el contexto de una planta compacta móvil, donde la movilidad y la eficiencia espacial son prioritarias, la implementación de una cámara de contacto de cloro se vuelve aún más crucial. En este proyecto, se realizaron cálculos para estimar el caudal de diseño, el volumen, el área y la longitud óptimos de la cámara de contacto.

En la Tabla 16, se presentan los criterios considerados clave para el funcionamiento de la cámara de contacto. La optimización de estos aspectos no solo mejorará la efectividad de la desinfección, sino que también contribuirá significativamente a la mejora general de la eficiencia y confiabilidad del sistema de potabilización de agua en su conjunto.

Tabla 16. Diseño cámara de contacto cloro

Datos	Valor	Unidades
Caudal	0,00016	m ³ /s
Tiempo	1800	s
Volumen	0,192	m ³
Profundidad	0,3	m
Área	0,64	m ²
Ancho	0,6	m
Largo	1,1	m
Velocidad	0,2	m/s
Distancia	240	m
Distancia entre compartimientos	0,1	m
Numero de compartimientos	16	#

En la Figura 8, se presentan los planos de perfil y de planta de la cámara de contacto de cloro diseñada para complementar el sistema de tratamiento de la PTAP, con sus respectivas dimensiones.

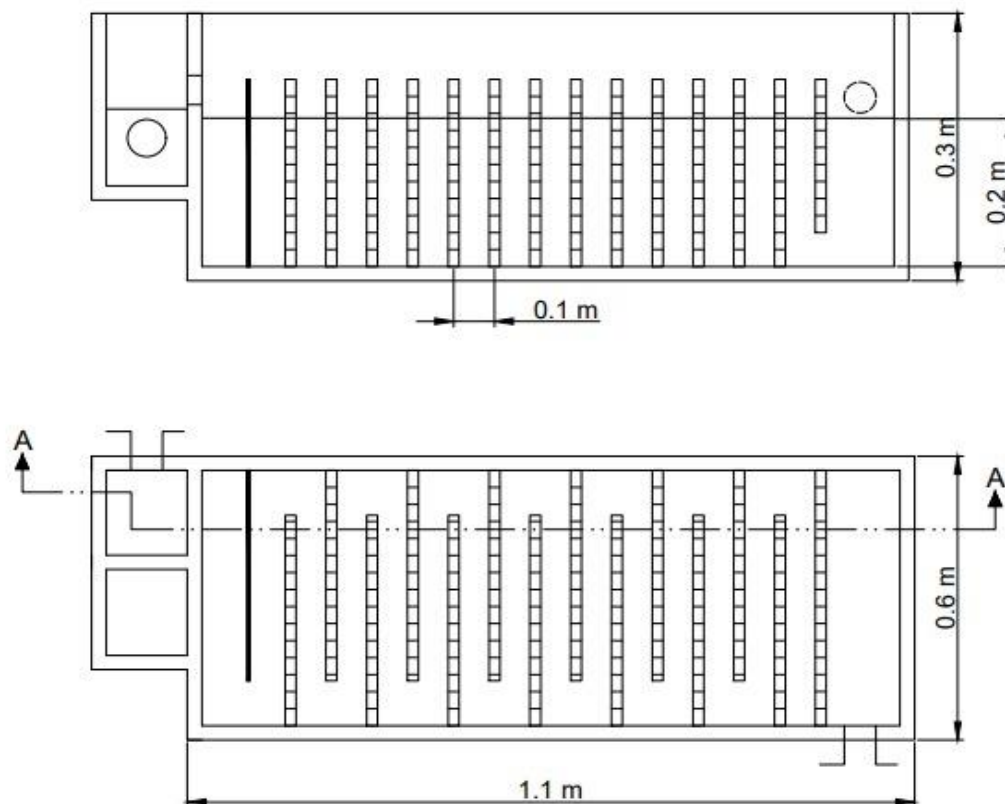


Figura 8. Esquema cámara de contacto de cloro

Fuente: Autores

9.1.3. Montaje y puesta en marcha

Para realizar la puesta en marcha de la planta se hicieron varios ajustes en las conexiones con el fin de asegurar su correcto funcionamiento. Para asegurar la conexión entre los procesos de la PTAP, se realizó un acople en la válvula de salida del tanque de sedimentación para conectar dicha estructura con los filtros. La conexión eléctrica a los filtros tenía un enchufe tipo D y se tuvo que hacer un cambio por un enchufe tipo A, con la finalidad de asegurar el suministro de energía (ver Figura 9).



Figura 9. Adaptación conexiones PTAP

Una vez ajustadas todas las conexiones, dio inicio con la operación la planta, empleando como fuente de abastecimiento agua potable, en esta puesta marcha se identificó que el sistema de filtros presentaba múltiples fugas, tal y como se observa en la Figura 10. Para solucionar, dicha situación se contactó a él proveedor y este se encargó de realizar los ajustes necesarios.

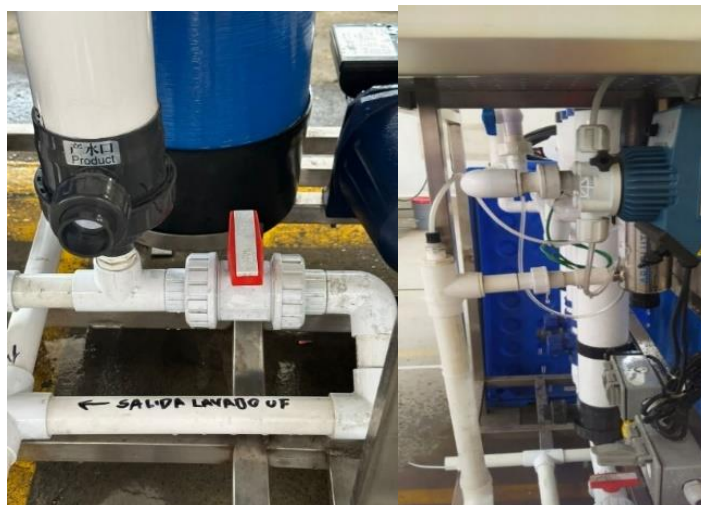


Figura 10. Fugas identificadas

Con los ajustes implementados, se procedió a realizar las pruebas de jarra al agua cruda. En la Tabla 17, se presentan las condiciones de operación obtenidas en las pruebas de jarras.

Tabla 17. Condiciones de operación PTAP

Proceso	rpm	tiempo (min)
Mezcla rápida	200	1:30
Mezcla lenta	60	6
Sedimentación	-	10

En la Tabla 18 se presentan los resultados obtenidos de acuerdo con la dosis optima de coagulante por prueba de jarras ejecutada.

Tabla 18. Resultados Prueba de Jarras para diferentes concentraciones de coagulante

Parámetros	Prueba Jarras 1		Prueba Jarras 2		Prueba Jarras 3		Prueba Jarras 4	
	AC	DO (25mg/L)	AC	DO (21 mg/l)	AC	DO (18mg/l)	AC	DO (25mg/l)
T (°C)	25,5	26,6	25,6	25,7	28,0	27,6	26,3	27,2
pH	9,4	4,2	8,5	5,2	6,3	4,2	5,8	4,6
Turbiedad (UNT)	53,0	4,7	53,0	3,8	33,0	4,5	40,0	3,3
Conductividad (uS/cm)	106	505	103	640	178	425	236	449
Alcalinidad (mg/l CO ₃)	40,3		40,3		34,1		27,4	
Color (UPC)	414,5	19,2	414,5	17,6	284,5	26,8	192,2	11,5

AC= Agua cruda, DO=dosis optima de coagulante

Fuente: Autores

Los resultados de las pruebas de jarras muestran una mejora significativa en la calidad del agua cruda del río Cauca después del proceso de coagulación. Se observa una reducción de la turbiedad, pasando de valores iniciales que oscilaban entre 33 y 53 UNT a valores finales entre 3,3 y 4,7 UNT, lo cual indica una eficacia notable en la eliminación de partículas suspendidas. Además, se logró ajustar el pH del agua tratada a valores adecuados a las guías de calidad del agua con valores entre 5,8 y 9,4. Estos resultados facilitan la operación con etapas subsiguientes en el proceso de potabilización del agua.

- **Análisis exploratorio**

En esta etapa del estudio, se procedió a operar la planta utilizando la fuente de abastecimiento seleccionada para dos corridas cada una con una duración de seis (6) horas. Durante cada prueba, se realizaron mediciones iniciales de la turbiedad del agua cruda y se llevó a cabo la prueba de jarras para determinar la dosis óptima de coagulante a emplear. Una vez establecida la dosis óptima 18 y 25 mg/l respectivamente, se procedió a la puesta en marcha completa de la planta para evaluar su desempeño bajo condiciones operativas representativas.

Al agua cruda se le midieron diferentes parámetros, tales como la temperatura, pH, turbiedad, conductividad y color, con la finalidad de determinar la calidad de agua a tratar. Con la finalidad de evaluar el comportamiento inicial de la planta de tratamiento de agua potable e identificar posibles fallas técnicas o de operación.

Tabla 17. Resultados pruebas – Agua cruda-Agua tratada

Agua Tratada (Dosis 18 mg/l)							
Parámetros	Agua Cruda	P1	P2	P3	P4	P5	P6
T (°C)	28,00	33,1 0	31,20	31,60	31,60	30,90	30,70
pH	6,25	7,35	7,90	7,91	8,00	7,81	7,70
Turbiedad (UNT)	33,00	2,60	1,34	1,16	1,22	1,09	1,26
Conductividad (uS/cm)	178,0	842,0	981,0	580,0	161,0	132,0	133,0
Color (UPC)	284,54	3,00	0,08	3,00	25,15	30,72	24,26
Cloro Residual	-	0,54	3,50	0,60	3,77	7,62	9,15
Coliformes fecales (UFC/100ml)	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Coliformes totales (UFC/100ml)	-	0,00	0,00	0,00	120,0	224,0	160,0 0
Agua Tratada (Dosis 25 mg/l)							
Parámetros	Agua Cruda	P1	P2	P3	P4	P5	P6
T (°C)	26,30	33,1 0	33,00	33,00	31,20	32,60	31,50
pH	5,80	5,24	6,73	6,33	7,64	6,76	7,52
Turbiedad (UNT)	40,00	2,40	1,60	0,70	0,90	1,10	0,80

Agua Tratada (Dosis 18 mg/l)							
Parámetros	Agua Cruda	P1	P2	P3	P4	P5	P6
Conductividad (uS/cm)	236,00	957,0	786,0	1178,0	289,0	2,19	5,11
Color (UPC)	27,38	25,15	26,27	27,83	29,83	36,73	26,27
Cloro Residual	-	6,08	1,46	2,23	4,54	0,69	3,00
Coliformes fecales (UFC/100ml)	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Coliformes totales (UFC/100ml)	-	0,00	0,00	0,00	180,0	104,0	164,0

Fuente: Autores

Los resultados obtenidos revelan algunas variaciones notables en los parámetros evaluados entre el agua cruda y el agua tratada. Se observó una reducción significativa en la turbiedad y el color del agua tratada en comparación con el agua cruda, lo cual indica una efectividad inicial del proceso de tratamiento para eliminar partículas suspendidas y materiales disueltos que causan color.

Además, se registraron cambios en la conductividad del agua tratada, sugiriendo posibles ajustes necesarios en el proceso de tratamiento para garantizar una reducción adecuada de sales disueltas.

El análisis también señaló la presencia de cloro residual en algunas muestras de agua tratada, indicando una posible sobredosificación de cloro durante el proceso de desinfección. Es importante tener en cuenta que no se detectaron coliformes fecales en ninguna de las muestras, lo que sugiere un buen tratamiento y una buena eliminación de contaminantes bacterianos.

Estos resultados preliminares resaltan la importancia de una evaluación continua y detallada del funcionamiento de la planta de tratamiento. Teniendo en cuenta que deben de realizarse ajustes y optimizaciones continuos en el proceso de tratamiento para garantizar una calidad de agua potable óptima y consistente.

- **Revisión de la operación de la planta en un ciclo operativo**

Durante esta etapa del proyecto, se llevó a cabo una prueba operativa de la planta con el propósito fundamental de simular y evaluar su desempeño bajo condiciones continuas de funcionamiento. Este análisis consistió en una corrida extendida de 8 horas, para revisar y analizar el comportamiento del sistema a lo largo de un ciclo operativo representativo en una jornada de operación para suministro en hospital de emergencia

Este análisis integral y la posterior evaluación normativa son esenciales para garantizar que la planta cumpla con los requisitos regulatorios y las expectativas de calidad del agua potable, asegurando así la protección de la salud pública y la preservación ambiental.

9.2. Comportamiento de la calidad del agua durante el ciclo operativo analizado

A continuación, se presentan los resultados obtenidos durante 10 horas de funcionamiento continuo. En este período, se tomaron muestras de agua cada 15 minutos en tres puntos diferentes: agua cruda, agua sedimentada y agua tratada, tal y como se ilustra en la Figura 4.

En la Figura 11, se graficó el comportamiento de turbiedad con respecto al tiempo en horas, para el agua cruda (piscina negra de almacenamiento de agua cruda), agua sedimentada (piscina azul) y agua tratada. Se pudo observar la variación de la turbidez a lo largo de las horas de la prueba, abarcando los estados antes, durante y después del tratamiento.

La turbiedad, presentó mejoras significativas en dos momentos clave del tratamiento. Después de la sedimentación, el agua logró reducir sus valores de turbidez de un rango inicial de 8 a 18 UNT a un rango más bajo de 2 a 8 UNT. Estos resultados reafirman la importancia de la implementación del floculador hidráulico, al cual se le atribuyen estos logros en la clarificación del agua.

El comportamiento de la turbiedad se presenta en la Figura 11 indicando que el comportamiento de ese parámetro en el agua sedimentada da respuesta a las variaciones que presenta el agua cruda. Aunque el agua sedimentada presenta valores inferiores de turbidez en comparación con el agua cruda, la turbidez del agua sedimentada no logra estabilizarse por completo. Esta situación puede explicar porque, la operación continua de la PTAP se realizó con una dosis fija de coagulante obtenida en la prueba de jarras realizada durante la primera hora de funcionamiento. Esto sugiere que, bajo condiciones operativas reales como las evaluadas, es posible que se requieran ajustes periódicos en la dosis de coagulante para optimizar la estabilidad y eficiencia del proceso de tratamiento (González, 2015; López, 2018).

Además, la turbidez del agua sedimentada puede no estabilizarse completamente debido a la naturaleza de los contaminantes, las condiciones de tratamiento y la dinámica de la turbidez. Según Kawamura (2000), *"la sedimentación y filtración son procesos efectivos para reducir la turbiedad, pero no siempre pueden eliminarla por completo. Factores como el tamaño y densidad de las partículas influyen en la eficacia de estos procesos"*. Por su parte, Crittenden et al. (2012) señalan que *"el objetivo de la sedimentación es reducir la turbiedad a niveles aceptables, pero no necesariamente eliminarla totalmente. La estabilización de la turbiedad en niveles bajos depende de la composición del agua cruda y las condiciones del proceso"*. Estos factores resaltan la complejidad del tratamiento del agua y la necesidad de un monitoreo y ajuste constante para lograr una calidad de agua adecuada.

Al final del proceso de tratamiento, se obtuvieron valores de turbidez en el agua tratada que oscilaron entre 1,2 y 2 UNT. Estos resultados fueron inferiores a las expectativas iniciales. Se reconoce que parte de la variabilidad en los resultados puede atribuirse al tiempo de maduración durante la operación de los filtros utilizados (Sánchez, 2006). Estos datos demuestran una mejora sustancial en la calidad del agua a lo largo del tratamiento, con una

eficaz eliminación de la turbiedad en la sedimentación como al final del proceso, evidenciando la efectividad en el tratamiento del agua.

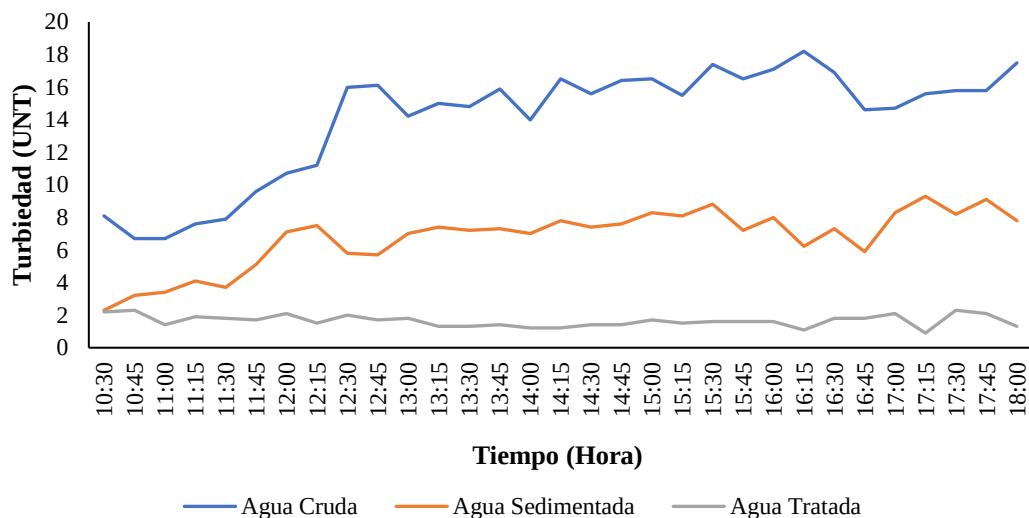


Figura 11. Comportamiento de la Turbiedad en la PTAP
Fuente: Autores

En la Figura 12, se presentan los resultados del comportamiento del pH, durante las ocho horas de prueba en las tres etapas clave del proceso (agua cruda, agua floculada y agua tratada). La regulación precisa del pH es esencial durante la etapa de coagulación-floculación, ya que para llevar a cabo este proceso de manera eficaz se requiere mantener el pH dentro de un rango específico, generalmente entre 6 y 8 (Andia, 2000). Esto permite optimizar la formación de flóculos y la posterior sedimentación, mejorando la eficiencia del tratamiento y minimizando el uso de químicos.

En la Figura 12, se observa que los valores de pH obtenidos en las pruebas oscilaron en un rango entre 6 y 8.4 unidades de pH, por lo que se encuentran dentro de los rangos recomendados para la coagulación-floculación. Según Letterman (1999), "La coagulación es más efectiva cuando el pH del agua se encuentra entre 5.5 y 7.5, dependiendo del tipo de coagulante utilizado". Además, el pH óptimo para la filtración suele estar en un rango similar para evitar la disolución de los flóculos formados (Droste, 1997).

El comportamiento estable del pH durante todas las etapas del tratamiento puede deberse a la capacidad tampón del agua y a la dosificación constante de reactivos químicos, que ayudan a mantener el pH dentro de un rango estrecho. Según Kawamura (2000), "el pH del agua tratada tiende a mantenerse estable si los procesos de coagulación y sedimentación están bien controlados, ya que estos procesos neutralizan las variaciones de pH que pueden ocurrir en el agua cruda".

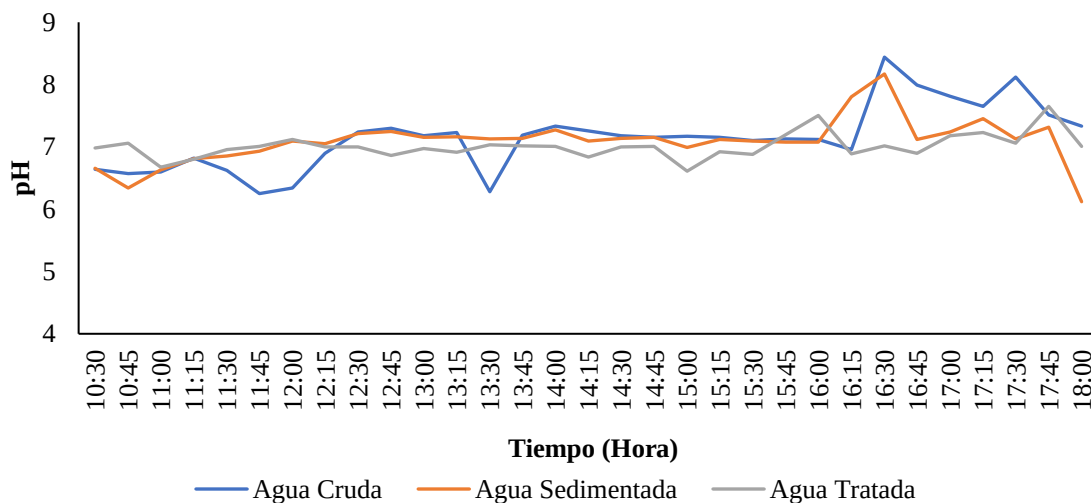


Figura 12. Comportamiento del pH en la PTAP
Fuente: Autores

En la Figura 13, se graficó el comportamiento del color en cada fase del proceso de potabilización con respecto al tiempo. En un primer momento, el agua cruda presentó valores de color aparente que variaron entre 63 y 140 Unidades de Platino-Cobalto (UPC). Estos altos valores de color aparente en el agua cruda pueden atribuirse a la presencia de diversas sustancias orgánicas y partículas suspendidas. La materia orgánica disuelta, como ácidos húmicos y fúlvicos derivados de la descomposición de material vegetal, contribuye significativamente al color. Además, los compuestos de hierro y manganeso disueltos, junto con la presencia de algas, fitoplancton y sedimentos finos en suspensión, también pueden influir en la coloración del agua cruda (Orellana, 2005).

En el agua sedimentada, se evidenció una reducción sustancial del color aparente en un 48%, logrando mantenerse en un intervalo comprendido entre 17 y 80 UPC. Este descenso puede deberse al proceso en la eliminación de partículas o de materia orgánica responsables de la coloración. En el agua tratada, se observó una mejora significativa en los valores de color aparente, manteniéndose por debajo de 15 UPC, estos resultados muestran que el sistema ha sido eficaz para mantener el color aparente en los valores recomendado en la guía de calidad de agua cumpliendo con los estándares de potabilidad (OMS, 2017).

Es importante destacar que la respuesta a las variaciones de color en el agua sedimentada en comparación con el agua cruda, donde ambos muestran picos y descensos en rangos de tiempo similares, puede reflejar la necesidad de ajustes en el proceso de tratamiento. Esta fluctuación del color sugiere que, al igual que ocurre con la turbidez, el color del agua sedimentada sigue una tendencia similar a la del agua cruda. Esto podría indicar que el proceso de sedimentación, aunque efectivo en la reducción del color, podría beneficiarse de ajustes adicionales para lograr una mayor estabilización y disminución del color, (Sánchez, 2006; González, 2015).

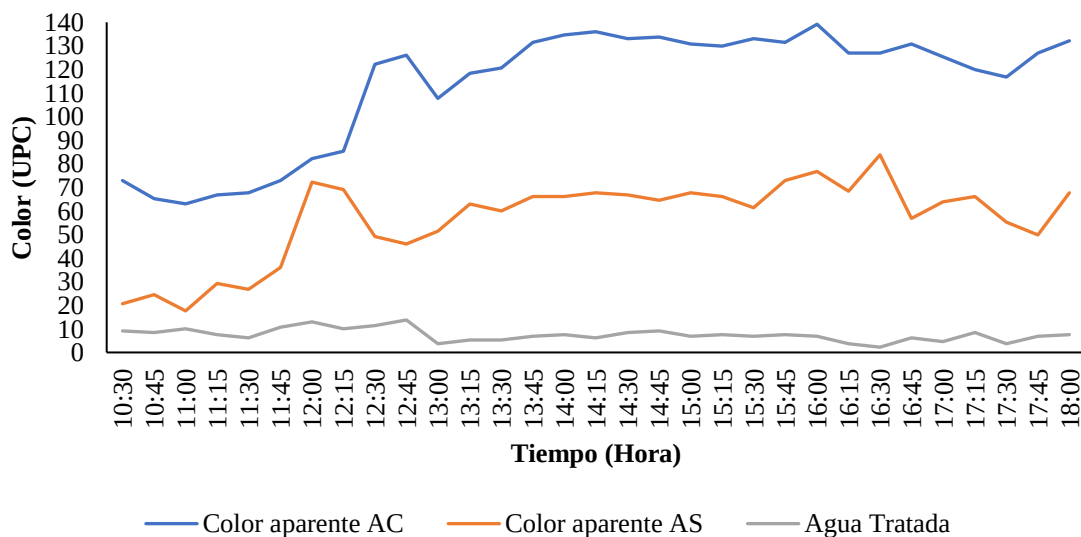


Figura 13. Comportamiento del color en la PTAP
Fuente: Autores

En la Figura 14, se presentan los resultados obtenidos para las pruebas microbiológicas (*E-coli*), las cuales se tomaron cada hora durante las 8 horas de prueba, realizando a su vez el muestreo al agua cruda. Al inicio de la prueba se pudo evidenciar que no se logró la correcta desinfección del agua, este comportamiento se puede atribuir a que al comienzo se presentaron dificultades con la correcta dosificación del cloro, sin embargo, a lo largo de la prueba se logró ajustar la dosis, obteniendo cero (0) unidades formadoras de colonias el agua tratada. Este resultado muestra que, en general, la planta es efectiva para eliminar microorganismos indicadores de contaminación bacteriana reduciendo el agua de 2800 UFC/100 ml a 0 UFC/100 m.

Es importante destacar que durante la fase experimental de este trabajo de grado no logró determinar con certeza si la eficiencia en la remoción de microorganismos fue resultado de la radiación ultravioleta o de la dosificación de cloro. Esto se debe a que ambos procesos se llevan a cabo de manera continua y el diseño modular de la PTAP impide la toma de muestras entre ellos. Por lo tanto, los resultados presentados en la Figura 14, corresponden a muestras de agua que ya habían pasado por ambos procesos de tratamiento, radiación y cloración, lo que dificulta atribuir los resultados obtenidos a uno de los dos métodos específicos.

Como se presentó en la descripción de los procesos la PTAP evaluada además de cloro cuenta con radiación ultravioleta para la desinfección del agua. La radiación UV es efectiva para inactivar microorganismos al dañar su material genético, pero su eficacia depende del tiempo de exposición y de la intensidad de la radiación. En el caso de la PTAP evaluada, la radiación UV complementa el proceso de cloración, proporcionando una segunda línea de defensa contra los patógenos. En este sentido, el hecho de que en las primeras horas de funcionamiento algunos microorganismos persistieron a pesar de la desinfección con cloro y UV puede deberse a factores como fallas en el sistema de radiación UV, la dificultad de controlar la dosis inicial de cloro, la ausencia de una cámara de contacto y la posible formación de resistencia en algunos patógenos.

Además, la radiación UV, aunque efectiva para muchos patógenos, también depende de un contacto adecuado y un contacto efectivo para garantizar su eficacia (Letterman, 1999).

Asimismo, el cloro, aunque eficaz contra muchos patógenos, no es igualmente efectivo para todos los tipos de microorganismos. La presencia de un residual de cloro no garantiza una seguridad absoluta, ya que algunos patógenos pueden ser más resistentes (White, 1999). La combinación de cloración y radiación UV está diseñada para abordar una amplia gama de microorganismos, pero la falta de una cámara de contacto de cloro puede haber reducido la eficacia en las primeras horas. Este análisis resalta la importancia de implementar un diseño de tratamiento que incluya todas las etapas necesarias para garantizar la desinfección completa y efectiva del agua, además de ajustar los parámetros de operación según las necesidades específicas del proceso y las características del agua tratada.

Figura 14. Resultados E-coli agua tratada

 Agua Cruda Resultado: 2800 (UFC/100mL)	 Hora 11:00 Resultado: 204 (UFC/100mL)	 Hora 12:00 Resultado: 8 (UFC/100mL)
 Hora 13:00 Resultado: 7 (UFC/100mL)	 Hora 14:00 Resultado: 5 (UFC/100mL)	 Hora 15:00 Resultado: 0 (UFC/100mL)
 Hora 16:00 Resultado: 0 (UFC/100mL)	 Hora 17:00 Resultado: 0 (UFC/100mL)	 Hora 18:00 Resultado: 0 (UFC/100mL)

Fuente: Autores

9.3. Comparación de los resultados frente a la Normatividad Colombiana y la guía OMS

En el análisis de los resultados presentados en las Figuras 15, 16, 17 y 18, se evaluaron diversos parámetros del agua tratada en comparación con las normativas nacionales colombianas y las directrices de la Organización Mundial de la Salud (OMS).

En la Figura 15, se graficó el pH del agua tratada comparando con la normativa. Se observó que dicho parámetro se encuentra en concordancia con las normativas tanto colombiana como la guía OMS. Según la normativa colombiana, el rango aceptable para el pH en agua potable se encuentra entre 6,5 y 9,0 (Resolución 2115, 2007), mientras que la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2021) establece un rango más ajustado, entre 6,5 y 8,5. Aunque estos valores cumplen con las normas actuales, es fundamental reconocer que la estabilidad química del agua puede verse afectada, incluso cuando el pH está dentro del rango normativo. La inestabilidad química puede llevar a corrosividad o incrustaciones, lo que potencialmente puede afectar la integridad y durabilidad de los materiales en la planta de tratamiento y los equipos que hacen parte del sistema de distribución (Smith et al., 2008).

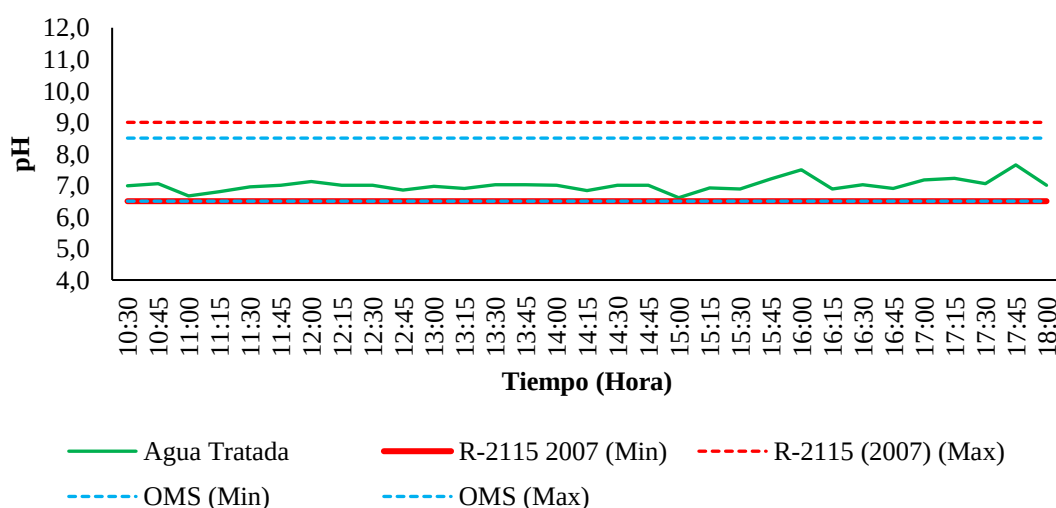


Figura 15. Comportamiento del pH de acuerdo con la Normativa
Fuente: Autores

La normativa nacional colombiana y las directrices de la Organización Mundial de la Salud (OMS) establecen rangos específicos para el pH en agua destinada al consumo humano. Mantener los valores dentro de estos parámetros resulta crucial para prevenir efectos adversos tanto en los procesos de tratamiento como en la salud pública. Es importante señalar que, incluso cuando se cumplen las normativas, el agua puede ser químicamente inestable. Esta inestabilidad puede manifestarse en forma de corrosividad o incrustaciones, lo cual podría afectar la integridad y durabilidad de los materiales utilizados en la planta de tratamiento y en el sistema de distribución.

El control preciso del pH durante el tratamiento se logró por selección y dosificación adecuadas del coagulante, así como la optimización de los tiempos de floculación y sedimentación fueron fundamentales para mantener el pH en los rangos establecidos, lo cual contribuye con la integridad y eficacia del sistema de potabilización.

El parámetro turbiedad, se presenta en la Figura 16, se identificó que los resultados obtenidos cumplen con la normativa internacional y de la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2021), que establece que este parámetro debe mantenerse por debajo de 5 Unidades Nefelométricas de Turbidez (UNT). A pesar de esto, es crucial destacar que, si bien la planta cumplió con la normativa colombiana en un 90%, la cual exige valores de turbiedad inferiores a 2 UNT (Resolución 2115, 2007), se registró un valor ligeramente superior al inicio de la prueba, alcanzando 2,3 UNT. La turbidez es un indicador de la presencia de partículas en suspensión que impiden el paso de la luz, que también puede incluir partículas con microorganismos. Aunque la planta logró una reducción significativa de la turbidez, es necesario optimizar los procesos de sedimentación y filtración para cumplir con los estándares de calidad microbiológica y fisicoquímica (AWWA, 2011).

Asimismo, controlar efectivamente la turbidez es esencial para garantizar la eliminación adecuada de impurezas y, por ende, para producir agua potable segura. La normativa internacional de la OMS, con un límite de 5 UNT, establece un estándar global que asegura la aceptabilidad visual del agua y minimiza los riesgos asociados con la presencia de partículas en suspensión (OMS, 2021).

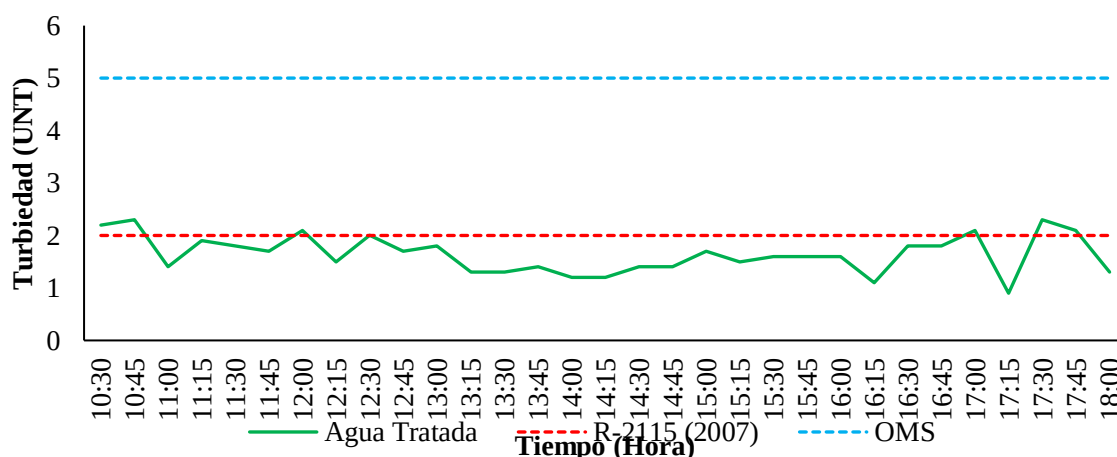


Figura 16. Comportamiento de la Turbiedad de acuerdo con la Normativa
Fuente: Autores

En la Figura 17, se graficó el comportamiento del parámetro cloro residual de acuerdo con la normativa. Este parámetro desempeña un papel crucial en la desinfección del agua para consumo humano. Según la normativa colombiana, establecida en la Resolución 2115 de 2007, el valor aceptable del cloro residual libre debe estar comprendido entre 0,3 y 2,0 mg/L en cualquier punto de la red de distribución del agua. La operación de planta de potabilización logró cumplir con esta normativa en más del 80% de los casos, con todos los valores por debajo de 2,0 mg/L, y solo dos de ellos por debajo del límite inferior de 0,3 mg/L. Los demás valores se mantuvieron dentro del rango establecido.

En cuanto a la normativa internacional de la Organización Mundial de la Salud (OMS), que es un poco más exigente, estableciendo un rango de 0,5 a 1,0 mg/L, en este caso solo se logró cumplir con menos del 50% de los casos. Este hecho resalta que la falta de una cámara de cloro diseñada en la planta afectó la capacidad de mantener la concentración de cloro residual durante el funcionamiento. Los problemas operativos relacionados con la regulación del dosificador impidieron mantener el cloro residual dentro de los límites establecidos, lo que destaca la necesidad de mejorar la dosificación y el tiempo de contacto del cloro para cumplir con las directrices internacionales del residual (Haas et al., 2015).

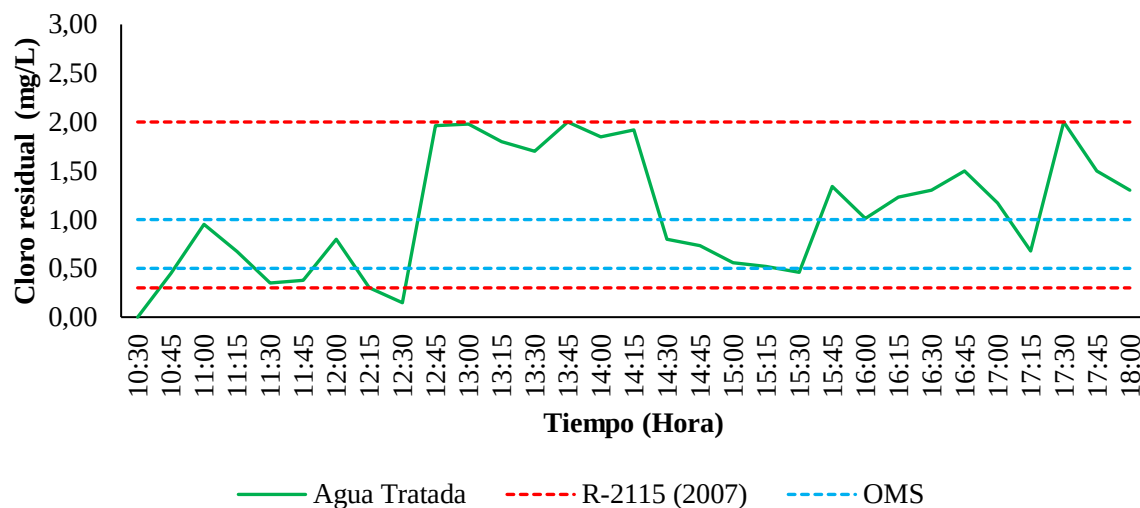


Figura 17. Comportamiento del Cloro residual de acuerdo con la Normativa
Fuente: Autores

La importancia de cumplir con estas regulaciones radica en que el cloro residual libre es crucial para mantener la integridad microbiológica del agua potable y prevenir la propagación de enfermedades transmitidas por el agua. La desinfección adecuada garantiza la eliminación de microorganismos patógenos, salvaguardando la salud de quienes consumen el agua tratada.

La Figura 18, muestra el comportamiento del parámetro E. coli en relación con la normativa legal vigente. Durante las primeras horas de tratamiento, se observa una alta presencia de este microorganismo en el agua, situación que se relaciona directamente con las complicaciones iniciales en la dosificación de cloro. A partir de la primera hora de tratamiento, se observa una disminución considerable en la concentración de E. coli. Sin embargo, a pesar de la cloración, la planta continúa presentando bacterias y no se cumple con las guías establecidas. Esto puede deberse a varios factores: dosificación inadecuada de cloro, problemas con el dosificador, demanda de cloro, tiempo de contacto insuficiente y recontaminación. En nuestro caso, el problema fue directamente con el dosificador, cuya regulación deficiente impidió una aplicación constante y adecuada de cloro.

Las normativas nacionales e internacionales son rigurosas en este parámetro debido al riesgo directo que representa para la salud pública si no se regula adecuadamente. Ambas

normativas estipulan que la cantidad de unidades formadoras de colonias por cada 100 ml de agua tratada debe ser igual a cero. El incumplimiento de estos estándares indica que el proceso de desinfección no fue completamente efectivo, representando un riesgo significativo para la salud de los consumidores.

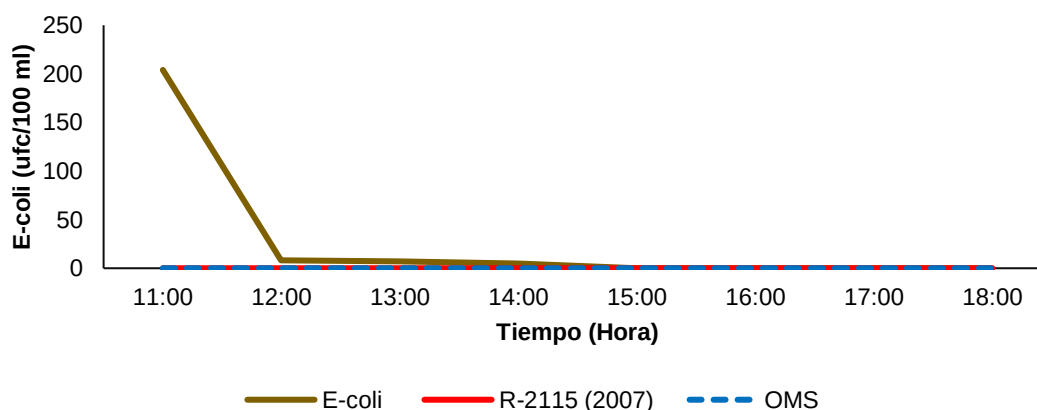


Figura 18. Comportamiento del E-coli después de la desinfección en la plata de acuerdo con la Normativa
Fuente: Autores

Finalmente, es importante destacar que los análisis presentados sobre la calidad del agua se basan en los ensayos llevados a cabo en el presente estudio, en la fuente específica y sus variaciones en el periodo estacional y acorde al riesgo sanitario, por lo cual, los análisis obtenidos no deben generalizarse a todos los tipos de agua o condiciones operativas. En este sentido, para el EMT el despliegue de la PTAP debe considerar la caracterización de la fuente de abastecimiento en el lugar específico de uso.

Adicionalmente, se debe considerar que las normativas de calidad del agua son dinámicas y se actualizan continuamente para reflejar nuevos conocimientos científicos y avances tecnológicos. En este contexto, las plantas de tratamiento deben mantener una flexibilidad operativa para adaptarse a estos cambios y asegurar un tratamiento efectivo. Evaluar la capacidad de tratamiento de la planta para otros contextos, junto con sus limitaciones en relación con la calidad del agua cruda, el caudal y otros factores, va más allá del alcance y los recursos disponibles para este trabajo.

9.4. Guía de ensamble, operación y mantenimiento de la planta

El ensamblaje, la operación y el mantenimiento de la planta compacta requieren de una comprensión detallada de los procesos implicados. Las Tablas 20, 21, 22 proporcionan una guía para garantizar el funcionamiento eficiente y seguro de la planta, abarcando desde la instalación inicial hasta los procedimientos de mantenimiento preventivo y correctivo. Con esta información, se busca facilitar la comprensión y ejecución de cada tarea, optimizando el rendimiento y prolongando la vida útil de la planta.

Tabla 18. Guía de ensamblaje, operación y mantenimiento para el almacenamiento de agua cruda, coagulación, floculación y sedimentación

Etapa del sistema	Guía de Ensamblaje	Operación y mantenimiento
Almacenamiento del agua cruda	Preparación del Área: - Asegurar que el área esté limpia y nivelada. Verificar la presencia y condición de todos los componentes necesarios. Colocación de los Vértices y Tubos Metálicos: - Distribuir uniformemente los vértices de la piscina en el suelo según las dimensiones. Montaje de los Tubos Superior e Inferior: - Colocar un tubo superior e inferior en un vértice de la piscina. - Alinear correctamente los extremos de estos tubos con los vértices correspondientes. Insertión de un Extremo de la Piscina: - Introducir con cuidado uno de los extremos de la piscina de plástico en el tubo superior previamente montado. Unión de los Vértices y Montaje de la Piscina: - Continuar uniendo los vértices de la piscina, insertando los extremos en los tubos superiores e inferiores en cada vértice. - Hay que asegurar que los tubos superiores e inferiores se acoplen a los vértices simultáneamente	Preparación de la Piscina: - Verificar la integridad estructural para asegurar que no haya fugas ni daños visibles. - Revisar los sistemas de entrada y salida de agua para asegurarse de que funcionen - Regular el flujo de agua hacia la piscina de sedimentación. Tiempo de Residencia y Separación de Sólidos: - Establecer un tiempo adecuado de residencia en la piscina para permitir la sedimentación completa. - Controlar el nivel de agua para asegurar una separación efectiva de los sólidos Remoción de Sedimentos Acumulados: - Programar rutinas diarias de limpieza para retirar los sedimentos acumulados en el fondo de la piscina. - Utilizar equipos de limpieza adecuados Mantenimiento Preventivo: - Inspeccionar regularmente la piscina y su estructura metálica en busca de corrosión, fugas u otros deterioros. - Realizar reparaciones según sea necesario para asegurar el funcionamiento de los equipos.
Floculación-Coagulación y sedimentación	Preparación de la Piscina: - Verificar el buen estado de la piscina, realizarlos mismos pasos de preparación que para la piscina del agua cruda. Montaje del Floculador: - Armaz el floculador utilizando los codos y tubos numerados. - Aplicar cinta de teflón en las roscas antes de unir los componentes - Unir los codos y tubos siguiendo el orden establecido Instalación de los Tubos Verticales, Atril y bomba: - Colocar dos tubos verticales en los extremos del floculador - Instalar un atril en la parte externa de la piscina colocar el recipiente con el coagulante - Colocar la bomba entre las piscinas	Preparación de Reactivos: - Calcular las dosificaciones necesarias según la calidad del agua y las condiciones requeridas. - Preparar la solución de coagulantes Adición de Coagulantes: - Añadir el coagulante gradualmente al agua para una mezcla efectiva. - Monitorear la turbidez y formación de flóculos para ajustar la dosis de coagulante Tiempo de Floculación y Clarificación: - Establecer un tiempo adecuado de floculación para la aglomeración y sedimentación de flóculos. - Verificar la clarificación mediante pruebas de turbidez. Mantenimiento Preventivo: - Limpiar regularmente los tanques para eliminar acumulaciones de lodos.

Tabla 19. Guía de ensamblaje, operación y mantenimiento para la filtración y desinfección

Etapa del sistema	Guía de Ensamblaje	Operación y mantenimiento
Filtración	Ensamblaje y conexiones • Conecta la manguera flexible desde la salida de la piscina azul hasta la bomba de la unidad modular donde se encuentran los filtros. • Asegúrate de abrir las válvulas en los filtros para permitir la entrada del agua a las unidades de filtración. • Verifica que el nivel de agua en la piscina azul se encuentre aproximadamente a 15 cm por encima de la tubería de salida. Una vez la lámina de agua alcance la altura necesaria, conecta el enchufe de la PTAP a la energía.	Monitoreo Continuo: • Observar presión y flujo para identificar requerimiento de limpieza. Lavado y Mantenimiento de Filtros: • Programar rutinas regulares de lavado de filtros. • Inspeccionar visualmente los medios filtrantes y reemplazarlos según las recomendaciones del fabricante. Inspección de Equipos: • Realizar inspecciones periódicas de los equipos de filtración. • Identificar y reparar cualquier fuga, obstrucción o deterioro de los componentes. Pruebas de Calidad del Agua: • Realizar pruebas regulares de calidad del agua y ajustar los parámetros de operación
Desinfección	Verificación de Llaves de Paso: • Antes de la desinfección, asegurarse de que todas las llaves de paso relacionadas estén abiertas. • Dirigir correctamente el flujo de agua hacia el área de desinfección para un tratamiento efectivo. Ajuste del Dosificador: • Acceder al dosificador utilizado para aplicar el agente desinfectante en el agua. • Verificar las instrucciones para determinar la cantidad adecuada de desinfectante según las características del agua y las necesidades del proceso. Verificación Final: • Después de ajustar el dosificador, verificar que esté dispensando la cantidad correcta de desinfectante en el agua. • Realizar pruebas adicionales según sea necesario para confirmar la efectividad del proceso de desinfección. • Registrar los parámetros relevantes del proceso de desinfección, como la cantidad de desinfectante utilizado y el tiempo de contacto con el agua.	Monitoreo Continuo: • Supervisar regularmente el sistema de desinfección para garantizar su correcto funcionamiento. • Observar indicadores clave como la dosificación del desinfectante, el tiempo de contacto y la calidad del agua tratada. Ajuste de Dosificación: • Verificar periódicamente las condiciones del agua de entrada y ajustar la dosificación de desinfectante según sea necesario. Inspección de Equipos: • Realizar inspecciones rutinarias de los equipos de dosificación de desinfectante y asegurarse de que estén en buen estado de funcionamiento. • Identificar y corregir cualquier anomalía o falla de manera oportuna. Mantenimiento Preventivo: • Programar mantenimientos preventivos regulares según las recomendaciones del fabricante. • Limpiar y calibrar los equipos periódicamente Pruebas de Eficacia: • Realizar pruebas periódicas de eficacia del proceso de desinfección. • Ajustar los parámetros de operación según los resultados de las pruebas.

Tabla 20. Guía de ensamblaje, operación y mantenimiento para el almacenamiento del agua tratada

Etapa del sistema	Guía de Ensamblaje	Operación y mantenimiento
Almacenamiento del agua tratada	Preparación del Área: • Selecciona una superficie plana y nivelada para instalar los bladders de almacenamiento de agua potabilizada. • Asegúrate de que el área esté libre de objetos afilados o punzantes que puedan perforar los bladders durante su instalación o uso. Verificación de las Válvulas: • Antes de desplegar los bladders, verifica que las válvulas de llenado estén cerradas para evitar posibles fugas de agua. • Asegúrate de que todas las conexiones y sellos estén en buenas condiciones y sin signos de deterioro. Desdoblado y Llenado de los Bladders: • Desdobla los bladders de almacenamiento de acuerdo con las instrucciones del fabricante. • Una vez desplegados, procede a llenar los bladders con agua tratada. Monitoreo y Verificación: • Supervisa el proceso de llenado para asegurarte de que los bladders se llenen completamente y sin problemas. • Verifica visualmente que no haya fugas en las conexiones de las válvulas y en las paredes de los bladders durante el llenado. • Una vez llenos, realiza pruebas de estanqueidad en los bladders para verificar que no haya fugas de agua.	Inspección Regular: • Realizar inspecciones visuales periódicas de los tanques de almacenamiento para detectar signos de fugas, corrosión u otros daños. Limpieza y Desinfección: • Programar rutinas de limpieza y desinfección de los bladders de almacenamiento según las normativas y estándares locales. • Utilizar procedimientos adecuados y productos químicos aprobados para eliminar sedimentos y microorganismos. Control de Acceso: • Mantener cerradas y aseguradas todas las entradas al área de almacenamiento para prevenir la contaminación y el acceso no autorizado. • Implementar sistemas de seguridad y control de acceso según sea necesario. Monitoreo de Calidad del Agua: • Realizar análisis periódicos del agua almacenada para verificar la calidad y la potabilidad. • Tomar medidas correctivas si se detectan problemas de calidad del agua almacenada. • Mantener registros de las actividades de operación y mantenimiento realizadas, incluyendo fechas de limpieza, desinfección y análisis de calidad del agua.

9.5. Determinación capacidad de operación de la PTAP

De acuerdo con los lineamientos del ICONTEC, para evaluar la capacidad de operación de una planta de tratamiento de agua, se deben realizar diversas pruebas que aseguren su eficiencia y cumplimiento con los estándares de calidad. Estas pruebas incluyen la evaluación del rendimiento de los sistemas de coagulación, floculación, sedimentación, filtración y desinfección (ICONTEC, 2020). Adicionalmente, se deben realizar análisis microbiológicos, como la determinación de la presencia de coliformes y *E. coli*, así como pruebas fisicoquímicas para verificar parámetros como turbidez, pH, y concentración de cloro residual (ICONTEC, 2020). Estas pruebas son esenciales para garantizar que la planta cumpla con las normativas de potabilidad y brinde agua segura para el consumo.

Sin embargo, aunque el ICONTEC establece un conjunto exhaustivo de pruebas para asegurar el rendimiento de los sistemas de tratamiento, la alta demanda de recursos económicos y el alcance del trabajo de grado limitaron la implementación completa de dichas pruebas. En su lugar, la capacidad de producción de la planta compacta móvil se determinó mediante una serie de pruebas operativas y análisis de laboratorio, diseñadas para simular condiciones reales de funcionamiento. Estas pruebas incluyeron ensayos piloto con agua potable, pruebas de jarras y operación continua durante un período extendido. Durante este proceso, se hizo seguimiento a parámetros fisicoquímicos básicos para el tratamiento de agua potable, asegurando un análisis del comportamiento de la planta.

Inicialmente se evaluó la capacidad de tratamiento de la planta, determinando que puede producir hasta 14.400 litros de agua por día. Esto representa un suministro suficiente para atender las necesidades básicas del EMT durante una situación de emergencia. Esta capacidad de producción garantiza la continuidad de los servicios esenciales durante períodos críticos. Así mismo, se analizaron detalladamente las tecnologías y procesos de tratamiento implementados en la planta, identificando que el proceso de coagulación no era eficiente. Para mejorar este aspecto, se diseñó y probó un floculador hidráulico que demostró una mejora significativa en la coagulación, facilitando la eficaz remoción de contaminantes y asegurando la producción de agua potable que cumple con los estándares de calidad establecidos.

Una de las observaciones importantes durante las pruebas fue la evaluación de la portabilidad y logística de la planta. Se identificó que el proceso de ensamblaje y operación puede requerir más de dos personas debido al peso y complejidad del equipo, lo que puede limitar su despliegue rápido en situaciones de emergencia.

Los análisis de calidad del agua tratada mostraron que la planta cumple con los parámetros establecidos para turbidez, cloro residual, pH y ausencia de contaminantes microbiológicos, asegurando la producción de agua segura. Sin embargo, es importante indicar que los filtros tienen un periodo de maduración, por lo que no se recomienda usar el agua producida en las primeras 1-2 horas después del inicio de la operación.

Los resultados obtenidos proporcionan una evaluación integral de la capacidad de operación de la planta compacta móvil en condiciones de emergencia. Si bien la planta presenta fortalezas en términos de capacidad de tratamiento y calidad del agua, se identificaron requerimientos de mejora en el floculador, cámara de contacto de cloro y fugas en los filtros, pero, especialmente en cuanto a la portabilidad y logística.

10. Conclusiones

Este trabajo de grado contribuye al mejoramiento de la calidad de agua en situaciones de emergencia mediante la evaluación de una planta de tratamiento de agua potable compacta para un equipo médico de emergencia (EMT). Las principales conclusiones de este trabajo son las siguientes:

Se establecieron criterios para la selección de la fuente de abastecimiento. La calidad de la fuente seleccionada, el río Cauca, ha demostrado ser adecuada para evaluar la planta en condiciones críticas debido a su baja calidad, lo cual permitió probar la capacidad de la planta compacta para enfrentar desafíos significativos en términos de tratamiento del agua en situaciones de emergencia. Los análisis presentados sobre la calidad del agua se basan en una fuente específica durante la prueba y sus variaciones en el periodo estacional y acorde al riesgo sanitario, por lo cual, los análisis obtenidos no deben generalizarse a todos los tipos de agua o condiciones operativas.

La identificación de los procesos de tratamiento y la puesta en operación de la planta compacta permitió comprender su capacidad. Se evidenció que la floculación-coagulación no se llevaba a cabo de manera eficiente y eficaz, por lo que se optó por diseñar e implementar un floculador hidráulico que optimizó el proceso y su operación. Además, se identificó que el proceso de desinfección requería una cámara de contacto para mejorar la eliminación de microorganismos. Estas mejoras en los procesos de tratamiento fueron fundamentales para garantizar el funcionamiento de la planta.

Las pruebas de tratabilidad muestran que es posible obtener agua segura cuando opere durante una emergencia, siempre y cuando la fuente de abastecimiento presente características similares en los parámetros fisicoquímicos al agua utilizada en este trabajo. No obstante, se ha observado una limitación en su capacidad de ser transportada y manejada, lo que podría representar un obstáculo en situaciones de emergencia. A pesar de su eficacia en el tratamiento del agua, es esencial mejorar su portabilidad y facilidad de manejo para asegurar una respuesta efectiva y poder atender a los afectados.

11. Recomendaciones

Después de evaluar la Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) compacta, diseñada para situaciones de emergencia, se han identificado varios aspectos que requieren mejoras para garantizar su eficacia y funcionalidad óptima:

- **Portabilidad del sistema de tratamiento**

Es la mayor limitación identificada, y es conveniente replantear el diseño, agrupando los procesos, ajustando los parámetros de diseño a la capacidad evaluada en este trabajo, verificando que los materiales se ajusten a condiciones adecuadas de transporte y montaje. Para el EMT el despliegue de la PTAP debe considerar la caracterización de la fuente de abastecimiento en el lugar específico de uso.

- **Personal especializado en WASH (Agua, Saneamiento e Higiene):**

Es importante tener en cuenta que, generalmente, el Equipo de Manejo de Emergencias (EMT) durante un despliegue está conformado en un 90% por personal clínico. Sin embargo, la ausencia de personal capacitado en WASH (Agua, Saneamiento e Higiene) puede repercutir en problemáticas mayores relacionadas con el consumo de agua. Por lo tanto, se hace necesario que el EMT incluya al menos dos personas expertas en WASH.

- **Sistema de cloración:**

La implementación de la cámara de contacto de cloro diseñada durante el presente trabajo de investigación es fundamental. Esta cámara asegura el contacto efectivo del cloro con el agua durante los 30 minutos requeridos por normativa, eliminando microorganismos para asegurar los estándares de calidad del agua. Su instalación en la PTAP Compacta optimizará el proceso de desinfección, garantizando estándares de calidad y seguridad del agua potable en situaciones de emergencia.

Así mismo, es necesario optimizar el tanque de almacenamiento de cloro y la dosificación, tal y como está concebido en la planta, presenta mayor inyección de cloro respecto a la cantidad estimada en los cálculos, lo cual incrementa la dosis recomendada para consumo. El sistema actual limita su accesibilidad, mantenimiento y su operación favoreciendo riesgos por accidentes laborales.

- **Limpieza de las unidades de almacenamiento**

Se sugiere la adquisición de una nasa para la PTAP Compacta, especialmente considerando que su despliegue puede llevarse a cabo al aire libre. Esta circunstancia aumenta la posibilidad de que residuos de hojas u otros contaminantes ingresen en el sistema de almacenamiento de agua cruda y tratada.

12. Referencias

Abilés, V. (2008). El agua en situaciones de emergencia. Higiene y sanidad. Revisado el 19 de octubre de 2022.

Álvarez, M., Gutiérrez, L., & Ramírez, J. (2018). Evaluación de la calidad del agua del río Cauca en el municipio de La Virginia (Risaralda, Colombia). *Revista de Ciencias Ambientales*, 52(2), 131-143.

Aquaquimi (2012). sulfato de aluminio. https://www.aquaquimi.com/Paginas/productos_quimicos/cat_floculantes/sulfato_de_alumina.html

Andía, Y. (2000). Tratamiento de agua, coagulación y floculación. Lima, Perú: SEDEPAL. Ardila Ardila, A. V. Patrones de circulación atmosférica en el valle geográfico del Río Cauca y su impacto en la calidad del aire regional (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Colombia).

Arboleda, J. (1992). Teoría de la coagulación del agua en Teoría y práctica de la purificación del agua. Bogotá, Colombia. Editorial ACODAL.

AWWA (American Water Works Association). (2011). **Water Quality and Treatment: A Handbook of Community Water Supplies**. McGraw-Hill.

Benetti, A. D., Mavaieie Júnior, P. A., & Duran Romero, D. A. (2018). El abastecimiento de agua potable en desastres y emergencias. In Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (36.: 2018 out.: Guaiquil). Trabajos técnicos. Guaiquil: AIDIS, 2018.

Castro, H. U. (2021). Caña de azúcar en el espléndido valle del río Cauca: Colombia Historia ambiental, conflictos ambientales y acción colectiva. Universidad del Valle.

Causas y consecuencias de la contaminación del agua en Colombia - Observatorio Regional Ambiental y de Desarrollo Sostenible del Río Bogotá. (s. f.). <http://www.orarbo.gov.co/es/con-la-comunidad/noticias/causas-y-consecuencias-de-la-contaminacion-del-agua-en-colombia>. Ginebra-Suiza. 45p. Revisado el 17 de octubre de 2022.

Cepal, N. (1 de febrero de 2014). Manual para la Evaluación de Desastres. <https://repositorio.cepal.org/handle/11362/35894>.

Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC), ASOCARS, & Universidad del Valle. (s.f.). Análisis hidráulico de las crecientes históricas del río Cauca. Ecopedia. https://ecopedia.cvc.gov.co/sites/default/files/archivosAdjuntos/corc-cvc-uv_analisis_crecientes_historicas.pdf

Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC), & Fundación Río Cauca. (s.f.). Plan de Manejo Integral de la Cuenca del Río Cauca. Ecopedia.

https://ecopedia.cvc.gov.co/sites/default/files/archivosAdjuntos/plan_de_man_integ_pmin_-_publicacion_noviembre_3.pdf

Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (2021-2022). Fichas de estaciones hidrométricas operadas por CVC sobre el río Cauca en la estación Juanchito. Proyecto de Modelación del Río Cauca a. – PMC.

Crittenden, J. C., Trussell, R. R., Hand, D. W., Howe, K. J., & Tchobanoglous, G. (2012). *MWH's Water Treatment: Principles and Design*. Wiley.

De Desarrollo Territorial Findeter, B. (2021). Estudio del Sector Agua Potable y Saneamiento Básico Colombiano. <https://repositorio.findeter.gov.co/handle/123456789/9703>.

Droste, R. L. (1997). *Theory and Practice of Water and Wastewater Treatment*. Wiley.

Duque Escobar, G. (2019). El Río Cauca en el desarrollo de la región. Departamento de Matemáticas y Estadística.

Durán, LMA (2018). Evaluación de la calidad del agua de los ríos de Colombia utilizando parámetros físicoquímicos y biológicos. *Dinámica Ambiental*, 1, 83–102. <https://doi.org/10.18041/2590-6704/ambiental.1.2016.4593>.

Emergencias y Desastres (2022). http://www.who.int/water_sanitation_health/hygiene/emergencies/en/. Revisado el 19 de octubre de 2022.

Espinoza, A., & Martínez, E. (2011). Diseño de una planta móvil de potabilización de agua. Revisado el 17 de octubre de 2022.

Galvis, C, A, (2022). Estado del Arte sobre la calidad del Río Cauca. Instituto Cinara, Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle.

García, A., Torres, E., & Martínez, D. (2021). Evaluación de la eficacia de una Planta de Tratamiento de Agua Potable en condiciones reales de contaminación: estudio de caso en el río Cauca. *Journal of Water Treatment*, 30(4), 217-230.

González, J. (2015). Tratamiento de aguas y ajuste de coagulantes. *Revista de Ingeniería Ambiental*, 23(4), 233-245.

Gualdrón Durán, L. E. (2016). Evaluación de la calidad de agua de ríos de Colombia usando parámetros físicoquímicos y biológicos.

Guías para la calidad del agua de consumo humano: Cuarta edición que incorpora la primera adenda. (24 de abril de 2017). Who.int; World Health Organization. <https://www.who.int/es/publications/i/item/9789241549950>

Haas, C. N., Rose, J. B., & Gerba, C. P. (2015). Quantitative Microbial Risk Assessment. Wiley.

Hernando, L. T., Eugenia, G. M. M., & [Tutor, C. P. J. (2018). Cuantificación de cloro residual en agua potable y su inhibición con tiosulfatos. <http://repositorio.umsa.bo/xmlui/handle/123456789/19072>

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM. Hoja metodológica del indicador Índice de calidad del agua (Versión 1,00). Sistema de Indicadores Ambientales de Colombia - Indicadores de Calidad del agua superficial. 10 p.

Kawamura, S and Tanaka, Y (1966) The application of colloid titration techniques to coagulant dosage control. Water Sewage Works 133 348-357.

Letterman, R. D. (1999). Water Quality and Treatment: A Handbook of Community Water Supplies. American Water Works Association.

López, M. (2018). *Optimización de procesos de sedimentación en plantas de tratamiento de agua potable*. Journal of Water Resources, 34(2), 147-159.

Marín, B. (2009). pág. 162, Filtración. Tratamiento físico. Tratamiento del agua antes del uso industrial. Manual de química del agua teoría y práctica. Universidad del Magdalena

Ministerio de la Protección Social. Decreto 1575 de 2007, mayo 2007, por el cual se establece el Sistema para la Protección y Control de la Calidad del Agua para Consumo Humano. Bogotá: el Ministerio. 2007.

Ministerio de Desarrollo Económico. Dirección de Agua Potable y Saneamiento Básico. Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico RAS – 2010.

Moreno Angulo, G. E. (2014). Análisis ambiental de la cuenca alta del río cauca, sus actores principales y la afectación en el suministro de agua potable para la ciudad de Santiago de Cali. ¿qué acción tomar? Universidad Icesi.

Orellana, J. A. (2005). Unidad Temática N° 6: Tratamiento de las aguas. Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rosario. Recuperado de https://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/civil/ing_sanitaria/Ingenieria_Sanitaria_A4_Capitulo_06_Tratamiento_de_Aguas.pdf

Organización Mundial de la Salud. Organización Panamericana de la Salud. El agua en situaciones de emergencia. Revisado el 17 de octubre de 2022.

OMS. (1995). Guías para la calidad del agua potable. Ginebra, Suiza: Organización Mundial de la Salud (OMS). Volumen 1. 195 p. Revisado el 17 de octubre de 2022.

Organización Mundial de la Salud. (2017). Guías para la calidad del agua de consumo humano: Cuarta edición que incorpora la primera adenda. Recuperado de <https://www.who.int/publications/i/item/9789241549950>.

OMS. (2011). Guías para la calidad del agua potable. Ginebra-Suiza. 45p. Obtenido de la Organización Mundial de la Salud (OMS). (2006). Guías para la calidad del agua potable.

Orozco, C., Pérez, A., Gonzáles, M. N., Rodríguez, F., & Alfayate, J. (2005). Contaminación Ambiental. Una visión desde la Química. España: Thomson Editoriales Spain Paraninfo, S.A.

Pérez, H. J., Morales, M. G., & Sánchez, J. D. (2000). Calidad bacteriológica del agua para consumo humano en zonas de alta marginación de Chiapas. Salud pública de México, 1-10

Pinzon. (2015). Diseño de un sistema compacto de potabilización de agua para consumo humano en la granja la fortaleza ubicada en el municipio de Melgar- Tolima. Recuperado de: <https://hdl.handle.net/10901/11285>.

Sánchez, P. (2006). Operación de filtros en plantas de tratamiento de agua. Editorial Académica.

Samboni, Y. C. (diciembre de 2007). “Revisión de parámetros fisicoquímicos como indicadores de calidad y contaminación del agua. Ingeniería e Investigación, 27(3), 172-181.

Sawyer, CN, McCarty, PL y Parkin, GF (2003) Química para ciencias ambientales y de ingeniería. Quinta edición, McGraw Hill Inc., Nueva York, 587-590.

Unidad de Gestión del Riesgo de Desastres. (2015). Plan nacional de gestión del riesgo de desastres. Bogotá D.C.

Universidad de Salamanca. (2012). universidad de salamanca. Obtenido de <http://cidta.usal.es/cursos/agua/modulos/principal/logo.html>

Villa, R. A. S., Corredor, J. A. G., & Tobar, Y. (2023). Estudio de las mejores condiciones para determinar plaguicidas en aguas y sedimentos del Río Cauca-Colombia: Condiciones para determinar plaguicidas en aguas y sedimentos. Revista EIA, 20(39), 3904-pp.

White, G. C. (1999). Handbook of Chlorination and Alternative Disinfectants. John Wiley & Sons.

World Health Organization, European Regional Office. Emergency preparedness & response program. EURO/EPR/90 Copenhagen: WHO, European Regional Office; 1990.