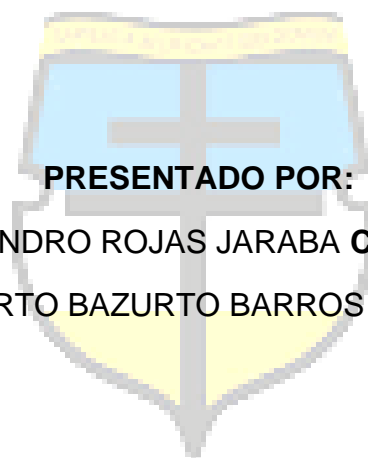


**OPTIMIZACIÓN EN LOS SISTEMAS DE FLOCULACIÓN-COAGULACIÓN-
SEDIMENTACIÓN DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE
“LA POLA”, DURANTE TEMPORADA INVERNAL**



PRESENTADO POR:

DAVID ALEJANDRO ROJAS JARABA **CÓDIGO.** 506211

CARLOS ALBERTO BAZURTO BARROS **CÓDIGO.** 504488

UNIVERSIDAD CATÓLICA
de Colombia
Facultad de Ingeniería

UNIVERSIDAD CATOLICA DE COLOMBIA

FACULTAD DE INGENIERIA

PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL

BOGOTA D.C

2020-1

**OPTIMIZACIÓN EN LOS SISTEMAS DE FLOCULACIÓN-COAGULACIÓN-
SEDIMENTACIÓN DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE
“LA POLA”, DURANTE TEMPORADA INVERNAL**

PRESENTADO POR:

DAVID ALEJANDRO ROJAS JARABA **CÓDIGO. 506211**

CARLOS ALBERTO BAZURTO BARROS **CÓDIGO. 504488**

MODALIDAD: PROYECTO DE INVESTIGACIÓN



UNIVERSIDAD CATÓLICA
Asesor(a)
PhD. WILFREDO MARIMON BOLIVAR
Colombia
Facultad de Ingeniería

UNIVERSIDAD CATOLICA DE COLOMBIA

FACULTAD DE INGENIERIA

PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL

BOGOTA D.C

2020-1



Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)

La presente obra está bajo una licencia:
Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)

Para leer el texto completo de la licencia, visita:
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.5/co/>

Usted es libre de:



Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra
hacer obras derivadas

Bajo las condiciones siguientes:



Atribución — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).



No Comercial — No puede utilizar esta obra para fines comerciales.

CONTENIDO

1. ALTERNATIVA	8
2. LÍNEA DE INVESTIGACIÓN Y EJE TEMÁTICO.....	8
2.1 LÍNEA DE INVESTIGACIÓN.....	8
2.2 EJE TEMÁTICO.....	8
3. INTRODUCCIÓN.....	9
4. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	10
5. JUSTIFICACIÓN.....	13
6. ANTECEDENTES.....	15
6.1 ANTECEDENTES DE LA PLANTA.....	15
6.2 FUENTES DE ABASTECIMIENTO DEL ACUEDUCTO ACTUAL	17
6.3 PROBLEMAS EN LA BOCATOMA COMBEIMA POR TURBIEDAD	17
7. ESTADO DEL ARTE.....	19
7.1 PRE-TREATMENT OF PETROLEUM REFINERY WASTEWATER BY COAGULATION AND FLOCCULATION USING MIXED COAGULANT: OPTIMIZATION OF PROCESS PARAMETERS USING RESPONSE SURFACE METHODOLOGY (RSM)	21
7.2 HIGH TURBIDITY WATER TREATMENT BY CERAMIC MICROFILTRATION MEMBRANE: FOULING IDENTIFICATION AND PROCESS OPTIMIZATION.....	21
7.3 A REVIEW OF POLYMERIC MEMBRANES AND PROCESSES FOR POTABLE WATER REUSE	22
7.4 EFFICIENT REMOVAL OF PHOSPHORUS FROM TURBID WATER USING CHEMICAL SEDIMENTATION BY $FeCl_3$ IN CONJUNCTION WITH A STARCH-BASED FLOCCULANT	22
7.5 BOLETÍN DE VIGILANCIA DE LA CALIDAD DEL AGUA PARA CONSUMO HUMANO	23
8. MARCO DE REFERENCIA	24
8.1 MARCO TEÓRICO.....	24
8.1.1 Calidad del agua.....	24
8.1.2 Turbiedad	26
8.1.2.1 Nefelometría.....	27

8.1.2.2	Turbidimetría	28
8.1.3	Potabilización del Agua	28
8.1.3.1	Coagulación	29
8.1.3.2	Floculación	31
8.1.3.3	Sedimentación.....	32
8.2	MARCO CONCEPTUAL	34
8.3	MARCO LEGAL	35
8.3.1	Normas que controlan los estándares de calidad del agua potable en Colombia.....	35
9.	OBJETIVOS.....	37
9.1	GENERAL	37
9.2	ESPECÍFICOS	37
10.	METODOLOGÍA.....	38
10.1	RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN GENERAL	38
10.2	CONFIGURACIÓN DE LAS MODELACIONES	38
10.3	MODELO COMPUTACIONAL	38
10.3.1	PRIMER ESQUEMA.....	38
10.3.2	SEGUNDO ESQUEMA	39
10.3.3	TERCER ESQUEMA.....	39
10.3.4	CUARTO ESQUEMA	39
10.3.5	QUINTO ESQUEMA.....	39
11.	RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	40
11.1	DATOS DE ENTRADA.....	40
11.2	PRIMER ESQUEMA	41
11.3	SEGUNDO ESQUEMA	44
11.4	TERCER ESQUEMA	46
11.5	CUARTO ESQUEMA	48
11.6	QUINTO ESQUEMA	50
11.7	BALANCE DE RESULTADOS	54
11.7.1	COMPARACIÓN RESULTADOS SEDIMENTADOR RECTANGULAR.....	54

11.7.2	COMPARACIÓN DE RESULTADOS ESQUEMA DOS Y TRES...	55
11.7.3	COMPARACIÓN DE RESULTADOS ESQUEMA CUATRO Y CINCO	57
11.8	SEXTO ESQUEMA	58
11.9	SÉPTIMO ESQUEMA.....	61
11.10	OCTAVO ESQUEMA.....	62
11.11	ANÁLISIS DE COSTOS.....	64
11.11.1	COSTS OF CONVENTIONAL VS. MEMBRANE TREATMENT FOR KARSTIC SPRING WATER.....	64
11.12	COMPARACIÓN ENTRE LAGUNA DE SEDIMENTACIÓN Y MEMBRANA	65
12.	CONCLUSIONES.....	67
13.	RECOMENDACIONES	68
14.	BIBLIOGRAFÍA.....	70
	ANEXOS	74

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1</i>	<i>Monitoreo del agua en Colombia.</i>	<i>25</i>
<i>Figura 2</i>	<i>Niveles de turbidez del agua.</i>	<i>27</i>
<i>Figura 3</i>	<i>Esquema de turbidímetro utilizado en Nefelometría.</i>	<i>27</i>
<i>Figura 3</i>	<i>Esquema de turbidímetro utilizado en Nefelometría.</i>	<i>28</i>
<i>Figura 5</i>	<i>Esquema de Potabilización del Agua.....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 6</i>	<i>Proceso Coagulación-Floculación.....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 7</i>	<i>Proceso de formación de flocs.</i>	<i>31</i>
<i>Figura 8</i>	<i>Sedimentador Rectangular.....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 9</i>	<i>Esquema N°1.....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 10</i>	<i>Esquema N°2.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 11</i>	<i>Esquema N°3.....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 12</i>	<i>Esquema N°4.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 13</i>	<i>Esquema N°5.....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 14</i>	<i>Esquema de PTAP con Laguna.....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 15</i>	<i>Esquema de PTAP con Laguna y aumento de trenes de operación.....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 16</i>	<i>Esquema de PTAP con membrana.....</i>	<i>62</i>

LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 1 Artículos sobre el tratamiento de elevados parámetros turbiedad en el agua, mediante nuevas configuraciones de equipos.....</i>	<i>20</i>
<i>Tabla 2 Marco conceptual.....</i>	<i>34</i>
<i>Tabla 3 Comparativas de normas sobre calidad del agua</i>	<i>36</i>
<i>Tabla 4 Resultados Esquema N° 1</i>	<i>41</i>
<i>Tabla 5 Resultados Esquema N°2</i>	<i>45</i>
<i>Tabla 6 Resultados Esquema N°3</i>	<i>47</i>
<i>Tabla 7 Resultados Esquema N°4</i>	<i>49</i>
<i>Tabla 8 Resultados Esquema N°5</i>	<i>51</i>
<i>Tabla 9 Resultados de Turbidez.....</i>	<i>54</i>
<i>Tabla 10 Resultados Esquema PTAP con Laguna</i>	<i>59</i>
<i>Tabla 11 Resultados Esquema PTAP con Laguna y aumento de trenes de operación.....</i>	<i>61</i>
<i>Tabla 12 Resultados de esquemas PTAP con membrana.....</i>	<i>63</i>
<i>Tabla 13 Artículo sobre análisis de costos de Operación y Mantenimiento para una PTAP.....</i>	<i>64</i>
<i>Tabla 14 Resultados de Turbidez - Esquemas externos.....</i>	<i>65</i>

LISTA DE ANEXOS

<i>Anexo 1 Representación de las unidades de una PTAP.....</i>	<i>74</i>
--	-----------

PERIODO: 2020-1

PROGRAMA ACADÉMICO: INGENIERIA CIVÍL.

ESTUDIANTE: CARLOS ALBERTO BARROS BAZURTO **CÓDIGO:** 504488

ESTUDIANTE: DAVID ALEJANDRO ROJAS JARABA **CÓDIGO:** 506211

DIRECTOR SUGERIDO: Ph.D. WILFREDO MARIMON BOLIVAR.

ALTERNATIVA: TRABAJO DE INVESTIGACIÓN.

1. ALTERNATIVA

Trabajo de Investigación.

2. LÍNEA DE INVESTIGACIÓN Y EJE TEMÁTICO.

2.1 LÍNEA DE INVESTIGACIÓN

La línea de investigación que tiene mayor relación con la propuesta de proyecto de grado, es la que está relacionada con el estudio y potabilización del agua y el saneamiento de la comunidad, ambas enfocadas a mejorar calidad de vida de la comunidad.

2.2 EJE TEMÁTICO.

La temática se enfoca en la calidad y tratamiento del agua, como también el saneamiento básico, para ello se utilizaran técnicas de potabilización para evaluar y comprobar los parámetros de calidad del agua establecidos por la norma.

3. INTRODUCCIÓN

A nivel mundial los métodos que se han implementado para el control de la calidad del agua han sido diversos, respondiendo a las necesidades de cada población en la que se implementa. Sin embargo, en la actualidad los procesos de potabilización del agua han desmejorado en varios aspectos generando consecuencias y afectaciones para la salud e integridad de las personas. Estas falencias generalmente están sujetas a crecimientos poblacionales o consideraciones que se obviaron en diseños de las estructuras que están encargadas para dicho procedimiento.

Por otro lado, y teniendo en cuenta que Colombia es uno de los países con mayor cantidad de cuerpos hídricos en el mundo, los sistemas de suministro derivados de ellos, son propensos a tener diversas falencias en cuanto a los diferentes acueductos que componen el país, y de los cuales se abastecen las diferentes ciudades y municipios del mismo; ya que estos, al haber sido construidos en una época diferente a la actual, con materiales y condiciones diferentes, son más proclives a sufrir daños y/o afectaciones.

El acueducto, es un sistema compuesto por diversas estructuras tales como: La micro cuenca, una captación, un desarenador, plantas de tratamiento, tanques de almacenamiento, redes de distribución y conexiones domiciliarias. Por lo tanto, y por medio de estos componentes es posible que el transporte del agua se proporcione de forma continua y fluida, desde las reservas naturales en donde se encuentran las principales fuentes hídricas hasta las ciudades y municipios distantes.

Este es el caso del acueducto ubicado en la ciudad de Ibagué en el municipio del Tolima, ya que, aproximadamente 300.000 habitantes de la ciudad de Ibagué se ven afectados, cuando hay fuertes lluvias, debido a los altos índices de turbiedad presentados en el agua captada, esto genera el racionamiento de la misma al punto de tener que suspender el servicio para solventar el problema de la turbidez.

Por estas circunstancias este documento se enfoca en una propuesta que tiene como objetivo principal reducir los niveles de turbidez presentados en el acueducto optimizando algún proceso interno de la planta.

En este trabajo se abarcan principalmente tres procesos internos de la planta, los cuales son coagulación, floculación y sedimentación; dentro de estos procesos se tendrán en cuenta los antecedentes más recientes de la planta ya que este tema ha sido tratado numerosas veces.

4. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

La escasez del agua potable es un desafío mundial que surge de la interacción entre el humano con la naturaleza, donde factores como: Las actividades productivas, asentamientos humanos y densidad poblacional alrededor de cuerpos hídricos, generan alteraciones fisicoquímicas y biológicas del agua.

Para el desarrollo del ser humano, el agua y los sistemas de saneamiento no pueden estar separados. Ambos son vitales para reducir la carga mundial de enfermedades y para mejorar la salud, la educación y la productividad económica de las poblaciones (Organización Mundial de la Salud, 2018)¹.

Debido a que en diversas partes del mundo no se tienen los suficientes controles y ambos factores se tratan por separado 2,1 billones de personas carecen de acceso a servicios de agua potable gestionados de manera segura (OMS/UNICEF 2017), así mismo 4,5 billones de personas carecen de servicios de saneamiento gestionados de forma segura (OMS/UNICEF 2017). Colombia, a pesar de ser uno de los países con más oferta hídrica en el mundo posee serios problemas de disponibilidad de calidad de agua para abastecer a numerosas poblaciones en grandes asentamientos, como algunas ciudades del país, en especial las que están más habitadas.

En el año 2019, el SIVICAP (Sistema de Información para la Vigilancia de la Calidad del Agua para Consumo Humano) reportó resultados de 20 departamentos y el distrito capital, con un cumplimiento en el reporte departamental del 63,6%. De las DTS (Direcciones Territoriales de Salud) que reportaron información, el 9,1% (3) presentaron nivel de riesgo “sin riesgo”, el 27,3% (9) con riesgo “bajo”, el 18,2% (6) con riesgo medio y el 9,1% (3) riesgo alto. Los departamentos con nivel de riesgo alto corresponden a: Huila, Nariño y Tolima (Instituto Nacional de Salud, 2019).

Un ejemplo claro de la situación que se presenta alrededor del país como bien nos indica el reporte del INS se puede observar en la ciudad de Ibagué ubicada en el departamento del Tolima, donde el fenómeno de turbidez afecta el abastecimiento de agua en gran parte de la ciudad, lo anterior sucede debido a la obstrucción que generan grandes masas de tierra acumuladas en distintas partes del acueducto de la ciudad, dejando sin agua a más de la mitad de la ciudad cuando Ibagué atraviesa la temporada invernal.

¹ Organización de Naciones Unidas. (2019). Agua. Mayo 10, 2020, de ONU Sitio web: <https://www.un.org/es/sections/issues-depth/water/index.html>

“La cuenca del Río Combeima, ha sido afectada hace un buen tiempo por los movimientos de masa de volúmenes, los cuales con frecuencia originan problemas para el sistema de abastecimiento de agua en la PTAP La Pola. Por ello desde hace varias décadas, la ciudad de Ibagué ha presentado deficiencias en el abastecimiento de agua potable debido principalmente a las continuas interrupciones en el servicio, ocasionadas por avalanchas sobre la cabecera del sistema de captación localizado en el Río Combeima, lo cual provoca en continuas ocasiones, que sea imposible el tratamiento del agua en la PTAP por la altísima turbiedad con que llega el agua cruda”.²

Conocer el concepto de turbiedad, que función tiene durante el tratamiento del agua y las distintas maneras de controlarla son de vital importancia para identificar los problemas que esta pueda generar a lo largo de la potabilización del cuerpo hídrico.

Con la bibliografía consultada en la cual se evidencian estudios similares a la problemática presentada de turbidez en fuentes hídricas, se observó la necesidad de recrear varios de los procesos realizados con coagulantes usados en el pretratamiento del agua, para corroborar su viabilidad e implementación en la Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) La Pola. Esta dosificación se realizara por medio de una simulación de casos presentados con los niveles de turbiedad registrados en temporada invernal (picos más altos).

El tipo de coagulante y su dosificación ideal, se hallará mediante la ejecución del software GPS X. A través de este se harán montajes que contribuirán a la búsqueda de una mejor implementación de estos químicos con su respectiva regulación ya que la información brindada al programa permanecerá dentro de los parámetros que exige la normativa vigente sobre la calidad del agua (RAS 330 de 2017) para la programación de las estructuras de la planta. De esta manera se recolectara información que puede brindar a detalle la posibilidad de conocer las falencias que presenta la estructura del acueducto objeto de estudio (Planta de Tratamiento de Agua Potable) o ajena a la misma que puedan incidir en su funcionamiento, especialmente en temporada de lluvias que es el periodo donde más elevados se encuentran los indicadores de turbiedad.

² Naranjo, G., Palomino, A., Sánchez, A., Moreno, J., Castro, M., Perdomo, M.C., & Maldonado, C. (2017). SISTEMA MATRIZ DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE SECTOR SUR DE LA CIUDAD DE IBAGUÉ.. Bogotá: CONSORCIO IEH GRUCON - PROFINVEST. p.27

Una vez se tenga esta información recolectada y verificada, se puede brindar soluciones razonables a mediano plazo que contribuya con la potabilización del agua, al igual que con la comunidad. Por otro lado, se conocen estudios y proyectos realizados recientemente para la mejora en el funcionamiento del acueducto pero el problema persiste y la comunidad se ve afectada, entonces.

¿De qué manera se puede proveer agua potable dentro de los estándares de calidad establecidos cuando se tienen altos valores de turbiedad en la fuente de agua en la planta de tratamiento La Pola mejorando los procesos de coagulación-floculación-sedimentación?

5. JUSTIFICACIÓN

El agua está en el epicentro del desarrollo sostenible y es fundamental para el desarrollo socioeconómico, además, una cuestión de derechos. A medida que crece la población mundial, se genera una necesidad creciente de conciliar la competencia entre las demandas comerciales de los recursos hídricos para que las comunidades tengan lo suficiente para satisfacer sus necesidades (OMS, 2019).

Dentro de un acueducto existen varias estructuras, donde las PTAP's convencionales (Plantas de Tratamiento de Agua Potable) desarrollan un papel importante en la desinfección, control y potabilización del agua que circula por ella. En Colombia, a pesar de contar con las estructuras adecuadas para el tratamiento del cuerpo hídrico, diversos sectores del país no cuentan con un suministro de agua potable a pesar de tener estos mecanismos (acueducto), distribuidos en gran parte del territorio nacional. Por un lado a nivel municipal de los 1102 municipios registrados solo 340 tienen agua apta para consumo humano según las DTS, así mismo de los 33 departamentos que se tiene evidencia, incluida la capital solo 3 presentan un nivel apto sin riesgo de consumo (IRCA 2019).

Según el IRCA Departamental, Huila está situado dentro de los cuatro departamentos con riesgo alto en cuanto a la calidad del agua que se consume. Estos resultados en gran parte se deben a la mala dirección y supervisión de los procesos llevados a cabo en el pretratamiento del agua que se capta en su mayoría del río Combeima. Los procesos que vienen siendo afectados cuando aumentan los niveles de turbidez, son los que se presentan al interior de la PTAP "La Pola" (Planta de Tratamiento de Agua Potable) como lo son la coagulación, floculación y sedimentación, ya que no se suministran dosificaciones adecuadas de los químicos utilizados en la PTAP cuando el agua captada viene demasiado contaminada.

Teniendo en cuenta los procesos anteriormente mencionados (coagulación-floculación-sedimentación), cabe resaltar que es muy importante que sean utilizados correctamente, ya que la producción de un floc muy pequeño o muy ligero produce una decantación insuficiente; mientras que el agua que llega a los filtros contienen una gran cantidad de partículas de floc que rápidamente ensucian los filtros y necesitan lavados frecuentes. Por otro lado cuando el floc es frágil,

este se rompe en pequeñas partículas que pueden atravesar el filtro y alterar la calidad del agua producida (Andía.Y - SEDEPAL, 2000)³.

Las zonas afectadas por deslizamientos que contribuyen a la contaminación de agua, son principalmente las áreas expuestas como los bordes de los escarpes del río Combeima, quebradas Chípalo, La Pioja, San Antonio, La Volcana, EL Tejar, Hato de la Virgen, Canal del Centenario y parte de la quebrada el Jordán. En estos sitios se suelen presentar deslizamientos y desprendimientos con volúmenes menores a 100m³ (Instituto Geofísico Universidad Javeriana, Consultoría Colombiana S.A, 2000).

Por lo tanto, la importancia de realizar este proyecto, se basa la implementación de una dosificación adicional de coagulante que regule y disminuya los elevados picos de turbidez (turbiedades mayores a 1.000 NTU que en condiciones críticas ha alcanzado niveles de 10.000 NTU en temporada invernal) presentados en el agua cruda que llega a tratarse en la Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) La Pola, principal planta de potabilidad del acueducto de Ibagué, que tiene la capacidad de circular alrededor de 2320 L/s según el IBAL.

“La Pola, es una planta convencional con un tanque de llegada de la conducción, una canaleta de conducción a seis floculadores, tres tanques sedimentadores de alta tasa y seis filtros rápidos, instalaciones para dosificación de químicos, laboratorio y tanque elevado para el lavado de filtros y un tanque de aguas tratadas desde donde se inicia la conducción a los tanques la Pola y Belén”.⁴ Teniendo en cuenta lo anterior, lo que se quiere demostrar con esta investigación es que una buena dosificación y uso de coagulantes como pretratamiento, cumplen con la función de reducción de altos índices de turbidez registrados durante temporada invernal, para que al momento en que el agua llegue a la planta pueda ser tratada sin problema y además la demanda sea cubierta con total normalidad y sin interrupciones. Caso contrario al que se ha venido presentando en los últimos años, ya que a pesar de tener empresas contratadas trabajando para mitigar esta situación, este acueducto sigue sin tener una alternativa confiable para contrarrestar dicha circunstancia presentada en el sistema de potabilización de agua en la cabecera municipal

³ Cárdenas, A. (2000). COAGULACIÓN Y FLOCULACIÓN. Mayo 13, 2020, de SEDEPAL Sitio web: http://www.sedapal.com.pe/c/document_library/get_file?uuid=2792d3e3-59b7-4b9e-ae55-56209841d9b8&groupId=10154

⁴ Ibid., p.101

6. ANTECEDENTES

La ciudad de Ibagué está situada en el centro occidente de nuestro país, sobre la Cordillera Central de los Andes entre el Cañón del Combeima y el Valle del Magdalena, en cercanías del Nevado del Tolima. Es la capital del departamento de Tolima. Se encuentra a una altitud de 1285 m.s.n.m; su área urbana se divide en 13 comunas y su zona rural en más de 17 corregimientos, 144 veredas y 14 inspecciones. Fue fundada el 14 de octubre de 1550 por el capitán español Andrés López de Galarza, lo que la convierte en una de las ciudades más antiguas de América. Por ser una ciudad capital, alberga la Gobernación del Tolima, el Palacio de Justicia, el Palacio Municipal, la Asamblea Departamental, la Fiscalía General de la Nación, y es el principal epicentro político, industrial, comercial, cultural, financiero y turístico del departamento.

La planta de tratamiento de agua potable de la ciudad de Ibagué presenta inconsistencias en la prestación del servicio relacionadas con interrupciones del servicio por causas atribuidas a constantes derrumbes que aportan una cantidad de sólidos suspendidos al agua en la cabecera del río Combeima fuente abastecedora del acueducto, no obstante hay comunidades que no reciben el servicio de agua potable por parte del IBAL y se abastecen de acueductos comunitarios que no cumplen con los requisitos de agua potable según la norma.

Según la información proveída por el personal de la empresa ibaguereña de acueducto y alcantarillado, en temporada de lluvias deben parar el servicio de agua para gran población de la ciudad de Ibagué debido a los altos índices de turbiedad en la captación del recurso hídrico. En temporada de lluvias deben parar el servicio de agua para gran población de la ciudad de Ibagué, debido a que la captación se ve afectada por la gran turbiedad.

6.1 ANTECEDENTES DE LA PLANTA

Entre los años 1914 y 1918 se hace el procedimiento necesario para la elaboración de los planos del acueducto con las empresas DUSSAN Y COCK CIA, 20 años después se hace contrato con la empresa LOBO GUERRERO, quien se encarga de la primera fase de la planta de filtración, tanques y toda la tubería y accesorios necesarios. El agua es captada del Rio Combeima, del cual se captan 1500 L/s, los otros 200 L/s son captados de la quebrada cay, teniendo esto claro se construyen dos bocatomas, una para cada captación. Ya teniendo las dos bocatomas serán conducidas estos dos afluentes hacia la PTAP "LA POLA" en la cual se realizan los procesos de filtración, decantación, coagulación

sedimentación, también se realizan los procesos químicos, para que cumpla los estándares para el consumo humano.

Ya después de haber pasado por todos los procesos nombrados anteriormente, pasa por el área de control de calidad, después de haber aprobado el área de control de calidad, se conduce por tuberías de 20" a los tanques de reserva (11). Se cuenta también con la planta llamada "CHEMBE" su nombre atribuido por el nombre de la vereda en la cual está ubicada, esta suministra 200 L/s, allí este afluente es tratado mediante procesos químicos para poder ser aceptada para el consumo humano, esta planta se encarga de abastecer en gran parte a el barrio llamado "EL SALADO". En total serian 11 los tanques de almacenamiento ubicados en toda la ciudad, los cuales se encargan de distribuirse mediante las redes domiciliarias para así llegar a los hogares, industrias y empresas de la ciudad.

Para el tratamiento de las aguas residuales se realizan en las plantas AMERICAS; ELTEJAR Y COMFENALCO , las cuales están ubicadas en lugares planificados por medio de un sistema aeróbico que permite controlar, reducir y mitigar la contaminación sobre las aguas y el medio ambiente , cumpliendo así todas las normas ambientales.

La PTARD EL TEJAR (Planta de Tratamiento de Aguas Residuales), se empezó a construir a mediados del año 1997, es uno de los principales componentes para poder descontaminar las fuentes hídricas de la ciudad de Ibagué, en este caso es el Rio Combeima, esta PTARD se encarga de recibir las aguas residuales de la parte sur-occidente de la ciudad , transportadas de los barrios del sur y la parte central de la ciudad por el interceptor Combeima, las contamina y las devuelve al rio Combeima de forma que pueda el rio asimilar la carga contaminante.

La Planta de tratamiento de Aguas Residuales Domésticas América, se encuentra ubicada en la ciudadela Las Américas, zona urbana de Ibagué, el área involucrada forma parte del espacio geográfico correspondiente al sistema hídrico de la quebrada la DOIMA, afluente del Rio OPIA, su cobertura: Las América, Rincón de las América y los Tunjos. Habitantes: 15.000 Hab. Caudal: 30 l/s.⁵

⁵ Naranjo, G., Palomino, A., Sánchez, A., Moreno, J., Castro, M., Perdomo, M.C., & Maldonado, C. (2017). SISTEMA MATRIZ DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE SECTOR SUR DE LA CIUDAD DE IBAGUÉ.. Bogotá: CONSORCIO IEH GRUCON - PROFINVEST. p.03

La planta de tratamiento de Aguas Residuales Domesticas Comfenalco, se encuentra ubicada en la ciudadela Comfenalco, zona urbana de Ibagué, el área involucrada forma parte del espacio geográfico correspondiente al sistema hídrico del Río Opía. Cobertura: Ciudadela Comfenalco Habitantes: 10.000 Hab. Caudal: 28 l/s.⁶

6.2 FUENTES DE ABASTECIMIENTO DEL ACUEDUCTO ACTUAL

El acueducto de la ciudad de Ibagué cuenta con 2 fuentes abastecedoras, la fuente principal que es la bocatoma del rio Combeima, esta abastece el 80% del agua tratada según el IBAL (empresa ibaguereña de acueducto y alcantarillado), la otra captación es de la quebrada cay que abastece otro porcentaje del agua restante.

Según el IBAL, la bocatoma ubicada en el rio Combeima, desde su construcción sufre en las temporadas de invierno, por su alta turbiedad, desde que se construyó esta bocatoma no se le ha hecho ningún tipo de inversión.

6.3 PROBLEMAS EN LA BOCATOMA COMBEIMA POR TURBIEDAD

Esta bocatoma tiene la particularidad de estar en funcionamiento más de 80 años, ya que fue construida en 1965, desde entonces y hasta la fecha no se le ha hecho ningún tipo de mantenimiento ni optimización que permita con el pasar de los años, un mejor paso del afluente para ser distribuido en los demás conectores del acueducto hasta llegar a la red de distribución de la ciudad de Ibagué, encargada de hacer llegar agua potable a cada usuario.

Hay varias formas de solucionar el problema del cierre de la bocatoma de la ciudad, pero se destacan dos sobre las demás. La primera y es considerada la solución más rápida según entes que conocen el tema es la construcción de un sistema dual con proceso de clarificación utilizando la teoría de la sedimentación con adición de coagulantes o floculantes (Este consiste en que mediante un sistema de captación de la quebrada La Platica se diluyan unos químicos con el agua turbia del Combeima, que optimicen el proceso de potabilización del agua captada en eventos de altos niveles de turbiedad hasta niveles permisibles).

Por otra parte lo que se mantiene como una opción viable ante medios es la ejecución del Consorcio Combeima 2017, que cuenta con una estructura hidráulica de 35 metros de largo, enrocados de protección, muros de contención de 4 metros de alto, sistema de captación lateral y de fondo, estructura metálica y de cubierta en el área de compuertas y operación y finalmente remodelación de la

⁶ IBAL (empresa ibaguereña de acueducto y alcantarillado) Línea disponible en: <https://www.ibal.gov.co/>

oficina de control. El desarrollo de esta obra fue de diez meses y su finalidad era alargar la vida útil de la bocatoma.⁷

Ambas soluciones quieren a largo plazo es que la bocatoma Combeima, no presente constantes cierres en épocas invernales, ya que es la bocatoma que abastece un 80% el agua de la ciudad de Ibagué, se pueden presentar soluciones a corto, mediano y largo plazo.

Una comisión especial del IBAL se trasladó a la cuenca alta de la quebrada Las Perlas, a 4 mil metros sobre el nivel del mar para determinar la gravedad del deslizamiento que provocó altos niveles de turbiedad en el río Combeima y que en ese momento tuvo con suministro intermitente a la ciudad.

De acuerdo con el gerente del IBAL, José Alberto Girón Rojas “Hace 22 años no se presentaba un creciente de esta magnitud; ya que la turbiedad llegó a más de 152 mil unidades, barro líquido, diluido en poca agua” (Gobernación de Ibagué, 2017).

En temporadas de altas lluvias, el IBAL hizo regulación con el agua captada en la bocatoma Cay y mezcla de las aguas de Cay y Combeima para bajar los niveles de turbiedad.

⁷ ANONIMO. (2018). Optimización de la Bocatoma Combeima, obra que seguirá asegurando Agua a los ibaguereños. Junio 23, 2019, de IBAL Sitio web: <http://ibal.gov.co/node/891>

7. ESTADO DEL ARTE

El IBAL, contrató la empresa consorcio IEH GRUCÓN - PROFINVEST, para la *"Consultoría para adelantar la revisión y actualización de los diseños de acueducto complementario de acuerdo con lo establecido en el reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico RAS 2000 y norma sismo resistente actual NSR10, brindando alternativas acorde con la situación actual y futura para la prestación del servicio de acueducto y dar así solución a la problemática del servicio en la ciudad de Ibagué"*.

En este se estudia el constante problema que tiene el acueducto en la ciudad de Ibagué, por derrumbes en río arriba de la ubicación de su bocatoma, produciendo altos índices de turbiedad los cuales llegan a la PTAP, y hacen más difícil su tratamiento por lo cual se suspende el servicio en la ciudad.

En 1994 el IBAL contrata a la firma consultora ESTUDIOS TÉCNICOS S.A., para que haga los estudios para diseñar la bocatoma en el río Combeima, los estudios son entregados en 1996, se hace el respectivo diseño de la bocatoma con las respectivas normas del momento. Algunas de las obras planteadas en este proyecto fueron ejecutadas y otras quedaron en nivel de diseño. Aun realizando estas obras el sistema de acueducto sigue presentando fallas.

En el año 2018 se realiza una optimización a la bocatoma Combeima, ya que presenta varias deficiencias, entre una de ellas es la turbiedad, aun así en el año 2019 del mes septiembre se cierra la bocatoma Combeima por altos índices de turbiedad, llegando a 10000 NTU.

Es por ello que mediante las bases de datos consultadas y expresadas a continuación, se evidenciaran procesos de tratamiento similares a lo que se quiere llegar con el sistema primario del acueducto de Ibagué.

Tabla 1 Artículos sobre el tratamiento de elevados parámetros turbiedad en el agua, mediante nuevas configuraciones de equipos.

Método de Búsqueda	Artículo/Guía	Autor
	Pre-treatment of petroleum refinery wastewater by coagulation and flocculation using mixed coagulant: Optimization of process parameters using response surface methodology (RSM)	Bineeta Singh, Pradeep Kumar
Science direct	High turbidity water treatment by ceramic microfiltration membrane: Fouling identification and process optimization.	Won-il Park, Sanghyun Jeong, Sung-Ju Im, Am Jang.
	A review of polymeric membranes and processes for potable water reuse	David M. Warsinger, Sudip Chakraborty, Emily W. Tow, Megan H. Plumlee.
	Efficient removal of phosphorus from turbid water using chemical sedimentation by FeCl ₃ in conjunction with a starch-based flocculant.	Jie Ren, Na Li, Hua Wei, Aimin Li, Hu Yang.
Instituto Nacional de Salud (INS) / IRCA 2019	Boletín de Vigilancia de la Calidad del Agua para Consumo Humano.	Ministerio de Salud

Fuente: Tomado por autoría

7.1 PRE-TREATMENT OF PETROLEUM REFINERY WASTEWATER BY COAGULATION AND FLOCCULATION USING MIXED COAGULANT: OPTIMIZATION OF PROCESS PARAMETERS USING RESPONSE SURFACE METHODOLOGY (RSM)

Este trabajo explica la viabilidad y eficacia de combinar coagulantes usados normalmente en el tratamiento del agua como lo es CuSO_4 (Sulfato de Cobre), FeCl_3 (Cloruro de Hierro) y $\text{CuSO}_4 + \text{FeCl}_3$ (Cloruro de cobre tribásico) para el tratamiento de aguas residuales provenientes de efluentes de una refinería de petróleo, todo este proceso llevado a cabo únicamente mediante coagulación y floculación. Este proceso se logró optimizando parámetros de forma independiente como lo es el pH y la dosificación de coagulantes mediante la metodología de superficie de respuesta.

Según el artículo, esta metodología considera el pH final, la reducción del parámetro DQO, la turbidez, el TDS y el color como variables dependientes. Esta separación y caracterización de variables sirvieron para desarrollar la relación entre variables (no se profundizó más en el tema).

Finalmente cabe destacar que dentro de la investigación uno de los resultados acentuados en la misma, radica en la correcta neutralización de las cargas y floculación de barrido, al descubrir que es mejor coagulante la combinación de químicos $\text{CuSO}_4 + \text{FeCl}_3$ (Cloruro de cobre tribásico) que cada uno actuando de manera independiente, debido a que esta nueva formación arrojó resultados finales de pH entre 5-7, reducción máxima de DQO de 76,77%, turbidez 89,47%, TDS 94,16% y color 95,29%. La dosificación de Cloruro de cobre tribásico fue de 0,20 g/L. Resultados muy favorables al tener en cuenta las condiciones y al cuerpo hídrico al que se aplicó la prueba.

7.2 HIGH TURBIDITY WATER TREATMENT BY CERAMIC MICROFILTRATION MEMBRANE: FOULING IDENTIFICATION AND PROCESS OPTIMIZATION.

En este artículo los autores se centran en el problema de la escasez de agua en el sudeste asiático. Por lo tanto, el problema más grande en las plantas de tratamiento es la turbiedad, este artículo se centra básicamente en implementar novedad al tratamiento de turbiedad, este sistema para el tratamiento de la turbiedad se llama Ensayo de filtración por membrana, muestra cómo funciona el sistema, las combinaciones que se pueden hacer con otros sistemas, el material del que es hecha la membrana, los resultados que arroja y las fórmulas utilizadas para cada sistema.

La importancia de este artículo está en que ya implementa un sistema para combatir la turbiedad el cual es el principal problema para el tratamiento de aguas, para poder generar el agua potable, mediante la implementación de nuevos equipos como lo son las membranas y los distintos contextos a los que este equipo se puede adaptar, siendo una herramienta muy útil y demasiado eficiente cuando se trata de remoción de grandes cantidades de turbidez en el agua.

7.3 A REVIEW OF POLYMERIC MEMBRANES AND PROCESSES FOR POTABLE WATER REUSE

En este artículo los autores hablan del gran desafío de la potabilización de agua, respecto al crecimiento de la población, una manera muy común de potabilizar el agua es mediante membrana, pero los autores se enfocan en los tipos de membrana que utilizan, sus revestimientos, su nanotecnología, su humectabilidad, carga superficial, entre otros aspectos. También describen los avances respecto a membranas como son biorreactores de membrana, electrodiálisis y ósmosis avanzada para mejorar la selectividad, consumo de energía, resistencia a las incrustaciones, y/o coste de capital.

7.4 EFFICIENT REMOVAL OF PHOSPHORUS FROM TURBID WATER USING CHEMICAL SEDIMENTATION BY $FeCl_3$ IN CONJUNCTION WITH A STARCH-BASED FLOCCULANT

En este artículo los autores explican cómo adicionaron un floculante a base de almidón como agente auxiliar, fue alimentado después de la aplicación del precipitante inorgánico tradicional de cloruro férrico ($FeCl_3$) para eliminar el fósforo inorgánico y orgánico de sus respectivas aguas residuales turbias simuladas. El cual tuvo resultados positivos respecto a la turbidez y al PH, sino también evidentemente redujo la dosis requerida de $FeCl_3$, después de varios estudios.

7.5 BOLETÍN DE VIGILANCIA DE LA CALIDAD DEL AGUA PARA CONSUMO HUMANO

En esta publicación de carácter informativo, el Ministerio de Salud nos muestra la información que brindan diferentes entidades territoriales de la salud al Instituto Nacional de Salud (INS). Este boletín se construyó mediante la recolección de muestras de agua para control y vigilancia que posteriormente fueron enviadas y evaluadas en un laboratorio donde se analizaron sus características y componentes.

Los resultados que se muestran publicados en el informe fueron registrados en el SIVICAP (Sistema de Información para la Vigilancia de la Calidad del Agua para Consumo Humano) donde se genera el índice de riesgo de la calidad del agua (IRCA). Estos datos que se ven publicados son tomados de los distintos afluentes encontrados en todo el territorio nacional y que su uso va dirigido al abastecimiento de sistemas de acueductos en todo Colombia, es por ello que la información está estructurada y dividida entre departamentos y subdivididas en municipios.

8. MARCO DE REFERENCIA

8.1 MARCO TEÓRICO.

Para el desarrollo de este proyecto se tiene como finalidad buscar técnicas que controlen altos niveles de turbidez del agua, para ello precisamos de conceptos fundamentales como lo son: turbiedad y sus distintas formas medición.

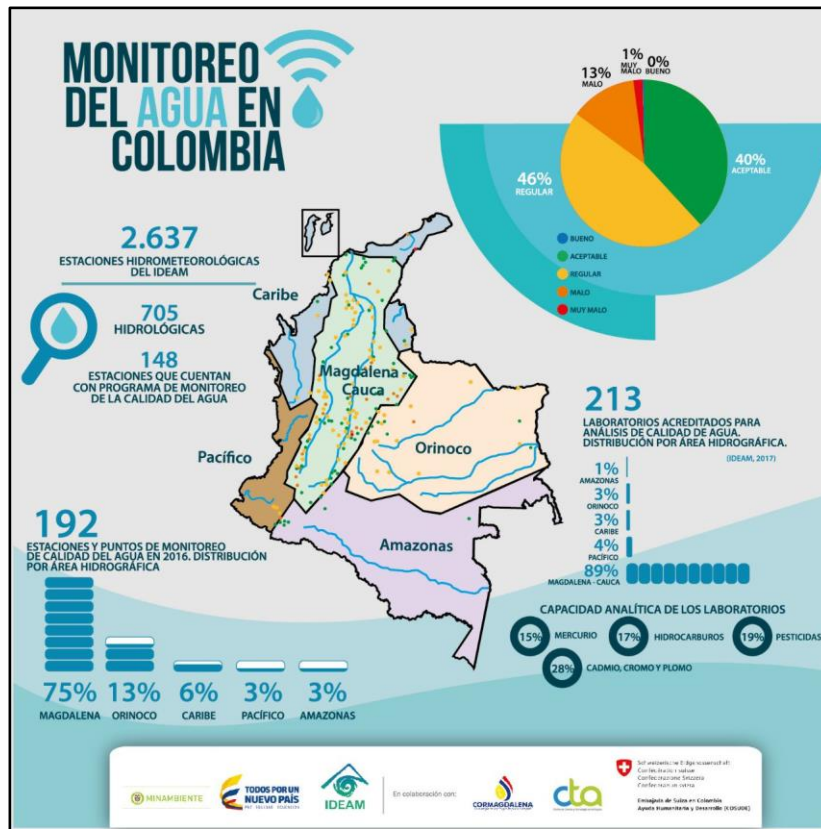
8.1.1 Calidad del agua

Los ríos y mares colombianos según diversos estudios transportan grandes cargas contaminantes de agua utilizada en diferentes procesos industriales y/o socioeconómicos, estas aguas residuales retornan nuevamente a los cauces de los ríos sin un tratamiento previo, además de esta problemática generada por causas humanas, aparecen otros factores que afectan la potabilidad de un cuerpo hídrico por factores comunes como desprendimiento de grandes volúmenes de sedimentos generalmente ocasionados por la erosión del terreno que rodea el cuerpo de agua o bien sea erosión generada por factores externos (intervención humana), esto en la mayor parte de tiempo genera un fenómeno llamado turbiedad, que es uno de los parámetros a tratar cuando de potabilización del agua se habla.

Para poder ser utilizada y aprovechada como recurso de abastecimiento por diferentes poblaciones, el agua debe cumplir con diversas características y criterios estipulados en la normativa, para estar dentro de los estándares de calidad permitidos en el país, ya que el agua que se consume, además de ello se utiliza para el higiene personal, preparación de alimentos entre otras actividades.

“El análisis de la calidad del agua, está soportado en las mediciones que se realizan desde la Red del Ideam y en la información de sectores económicos que recolectan datos de calidad del agua de manera sistemática, representados y espacializados en indicadores de calidad del agua y de amenaza potencial por contaminación.” (Sistema de Información Ambiental de Colombia SIAC 2013), es así como se puede evidenciar en la Figura N°1, los puntos de monitoreo de agua en Colombia.

Figura 1 Monitoreo del agua en Colombia.



Fuente: IDEAM-<https://t.co/xzSuMefBTH?amp=1>

Como podemos evidenciar en la Figura N°1 a pesar de ser numerosas las estaciones que poseen control de calidad del agua, siguen siendo pocas para cubrir la gran extensión hídrica del país, donde se puede evidenciar que el sector del Magdalena-Cauca en el centro del país es la parte más controlada y con más laboratorios avalados para realizar estudios de calidad del agua en Colombia, lo que nos sitúa en buen plano de cara al trabajo investigativo a realizar.

Dentro de los controles de calidad realizados al agua se encuentran las características físicas donde se encuentran cuatro parámetros que se deben cumplir, los cuales son color aparente, olor, sabor y turbiedad.

Para el desarrollo de este proyecto se tiene como finalidad buscar técnicas que controlen altos niveles de turbidez del agua, para ello precisamos de conceptos fundamentales como lo son: turbiedad y sus distintas formas medición.

8.1.2 Turbiedad

La turbidez tiene una gran importancia sanitaria ya que refleja un aproximación del contenido de materias coloidales, minerales u orgánicas, por lo que puede ser indicio de contaminación” (ESPIGARES GARCÍA y FERNÁNDEZ CREHUET, 1999). “Elevados niveles de turbidez pueden servir como cobertura a los microorganismos de los procesos de potabilización en las secciones de la PTAP. La causa de la turbidez del agua en tratamiento, puede deberse a un mal procedimiento en la planta de tratamiento o por otra parte a que el sedimento queda en suspensión durante el sistema de distribución, esto puede desencadenar una serie de hechos que parten desde daños a la estructura del acueducto, que en algunos caso interrumpe el trabajo continuo de la planta, o por otro lado la contaminación e intoxicación de las personas al consumir este tipo de agua que no cumple con los estándares de calidad.”⁸

La turbiedad se conoce como uno de los cuatro parámetros físicos que se evalúan en la calidad del agua, según la OMS (Organización Mundial de la Salud) la turbidez del agua para consumo humano, no debe superar en ningún caso las 5 NTU (Unidades Nefelométricas de Turbidez) pero idealmente se debe mantener por debajo de 1 NTU.

Los valores de turbiedad además se servir como parámetro de control, se usan para establecer el grado de tratamiento requerido por una fuente hídrica, es decirse obtiene información de su filtrabilidad, la tasa de filtración más adecuada, sedimentación, la efectividad de proceso de coagulación así como para determinar la potabilidad del agua.⁹

⁸ANONIMO. (2016). Turbidez. Febrero 14, 2020, de Lenntech Sitio web: <https://www.lenntech.es/turbidez.htm#%C2%BFCu%C3%A1%20es%20la%20m%C3%A1xima%20turbidez%20permitida%20en%20el%20agua%20para%20consumo%20humano?>

⁹Marcó, L. Azario, R. Metzler, C., & Garcia, C. (2004). Descripción general del sistema de potabilización. En La turbidez como indicador básico de calidad de aguas potabilizadas a partir de fuentes superficiales. Propuestas a propósito del estudio del sistema de potabilización y distribución en la ciudad de Concepción del Uruguay (Entre Ríos, Argentina)(p.11). Concepción del Uruguay: Programa Salud para todos, Cátedra de Salud Pública de la Facultad de Ciencias de la Salud, Universidad Nacional de Entre Ríos.

Figura 2 Niveles de turbidez del agua.



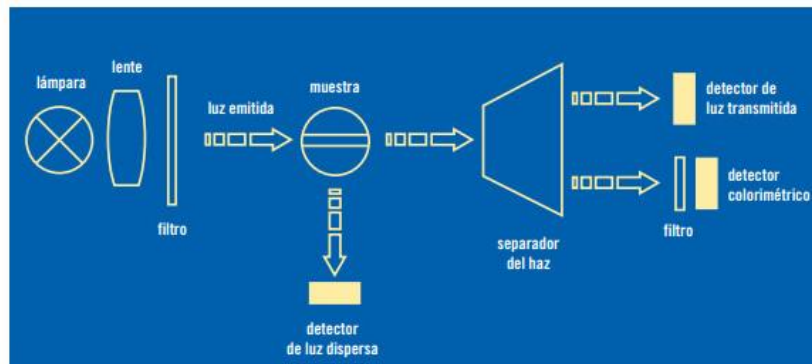
Fuente: <https://flowen.com.pe/blog/la-turbidez-uno-de-los-parametro-mas-fundamentales-de-la-calidad-del-agua-22>

Para ello existen una serie de ensayos de laboratorio que se proporcionan Dependiendo de la necesidad que presente el afluente o corriente hídrica a ser evaluada, los ensayos son dos:

8.1.2.1 Nefelometría

La mayoría de los turbidímetros comerciales diseñados para medir baja turbiedad dan comparativamente buenos resultados de intensidad de luz incidente. “Los turbidímetros con detectores de luz dispersa localizada a 90° del haz incidente se conocen con el nombre de nefelómetros. Su precisión, sensibilidad y aplicabilidad sobre un rango de turbiedad amplio hace que el método nefelométrico sea preferible a los métodos visuales” (Tanía Milena Carpio Galván, 2007). El reporte de los datos obtenidos por este método se establecen en unidades de turbiedad nefelométricas (NTU) y los rangos de lectura pueden variar dependiendo del turbidímetro usado para dicho fin, por lo general la escala regular va desde 0 NTU hasta 10.000 NTU, pero se puede simplificar o ajustar dependiendo de la necesidad en el estudio.

Figura 3 Esquema de turbidímetro utilizado en Nefelometría.

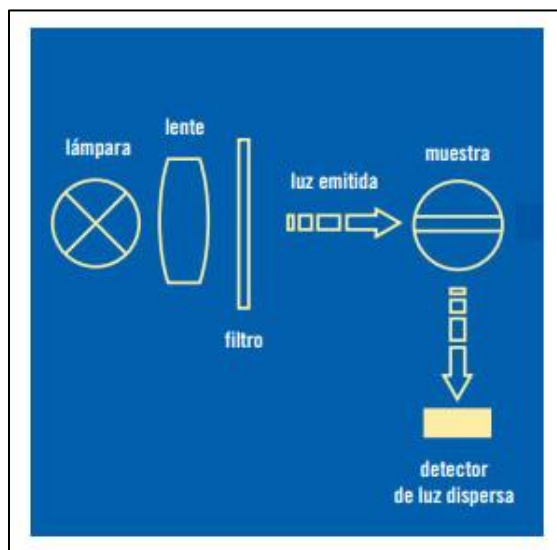


Fuente: <https://higieneambiental.com/aire-agua-y-legionella/que-nos-dice-la-turbidez-sobre-la-calidad-del-agua-potable>

8.1.2.2 Turbidimetría

“Es uno de los instrumentos más usados, la técnica empleada para este método consiste en el uso de un cultivo de microorganismos en un medio líquido, esto actúa como suspensión coloidal, la cual bloquea y refleja la luz que pasa a través de él”(Dayana Acebo González y Armando Hernández García, 2012).

Figura 4 Esquema de turbidímetro utilizado en Nefelometría.



Fuente: <https://higieneambiental.com/aire-agua-y-legionella/que-nos-dice-la-turbidez-sobre-la-calidad-del-agua-potable>

Cabe recordar que las unidades de medida utilizadas por este método se expresan en unidades de atenuación de formacina (FAU) y el rango puede variar entre los 40 FAU y 4000 FAU, esto se debe a que es más factible llevar a cabo este métodos sobre aguas altamente turbias, como lo son aguas residuales.

8.1.3 Potabilización del Agua

Este proceso básicamente hace referencia al tratamiento del agua existente, bien sea superficial o subterránea, con la finalidad de mejorar la calidad de este cuerpo hídrico según el uso que se le vaya a dar. Por otra parte según lo estipulado con los Ministerios de Ambiente, Vivienda y Protección Social, se le conoce a la potabilización como el “conjunto de operaciones y procesos que se realizan sobre el agua cruda, con el fin de modificar sus características físicas, químicas y microbiológicas para hacerla apta para el consumo humano y uso de sus actividades diarias” (Resolución 2115, 2007)¹⁰.

¹⁰ MINISTROS DE LA PROTECCIÓN SOCIAL Y DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. (Junio 22, 2007). Capítulo 1, Definiciones. En RESOLUCIÓN NÚMERO 2115 de

Mediante el transcurso del tratamiento del agua, se derivan una serie de procesos necesarios y obligatorios para obtener la calidad adecuada para el consumo humano, dentro de los cuales encontramos la coagulación, floculación, sedimentación y control de calidad del agua como los más importantes. En la siguiente figura, se muestran las fases del proceso de potabilización.

Cabe recordar que se le pueden añadir o no más subprocesos a la plata de tratamiento, dependiendo del nivel de contaminación del agua.

Figura 5 Esquema de Potabilización del Agua.



Fuente: <https://sites.google.com/site/elaguapotabilizacion/otabilizacion>

8.1.3.1 Coagulación

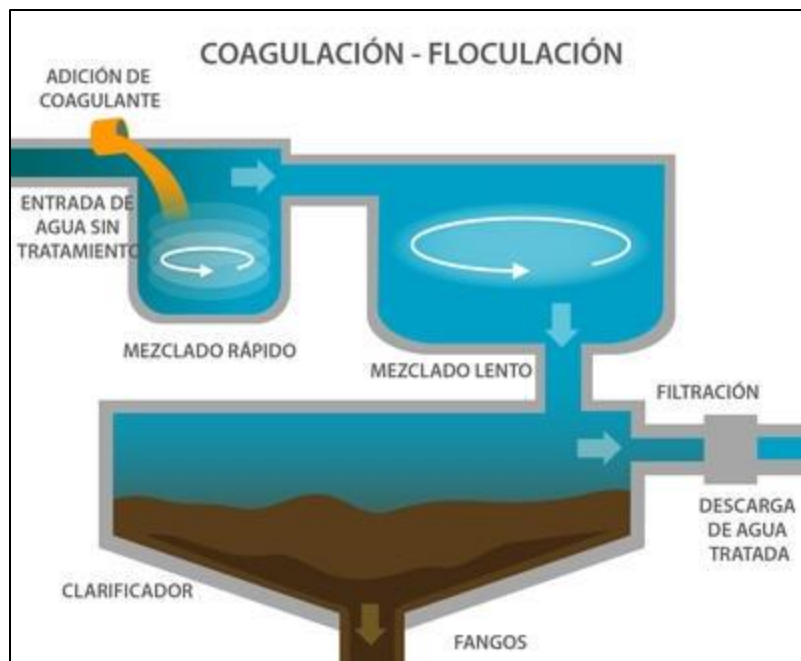
La coagulación en el proceso de tratamiento del agua tiene por objeto preparar a las partículas dispersas en el agua (mediante la anulación de las cargas superficiales) para lograr posteriormente mediante la floculación, otras partículas más voluminosas y pesadas que puedan ser separadas más fácilmente del agua.

La neutralización de la carga eléctrica del coloide, objeto de la coagulación, se realiza aplicando al agua determinadas sales de aluminio o hierro (coagulantes); generalmente se aplica sulfato de aluminio, de forma que los cationes trivalentes de aluminio o hierro neutralizan las cargas eléctricas negativas que suelen rodear a las partículas coloidales dispersas en el agua. Las reacciones de coagulación

son muy rápidas, ya que duran fracciones de segundo desde que se ponen en contacto las partículas con el coagulante.

La coagulación se consigue mediante una difusión rápida de las sustancias coagulantes en el agua objeto del tratamiento, empleando medios de agitación rápida. Tras la neutralización de las partículas coloidales, es decir una vez conseguida la desestabilización coloidal, las partículas formadas están en disposición de aglomerarse, esta aglomeración de las partículas descargadas, ayudadas ahora por una agitación lenta, es el objetivo de la floculación. La floculación está relacionada con los fenómenos de transporte de las partículas dentro del líquido, que son los que ocasionan el contacto de las partículas coaguladas.

Figura 6 Proceso Coagulación-Floculación.



Fuente: <http://www.elaguapotable.com/coagulacion-floculacion>

La coagulación y la floculación tienen lugar en sucesivas etapas, de forma que una vez desestabilizadas las partículas, la colisión entre ellas permita el crecimiento de los microflocos, apenas visibles a simple vista, hasta formar mayores flocos.

Al observar el agua que rodea a los microflocos, esta debería estar clara, si esto no ocurre, lo más probable, es que todas las cargas de las partículas no han sido neutralizadas y por tanto la coagulación no se ha completado, en este caso será necesario añadir más coagulante.

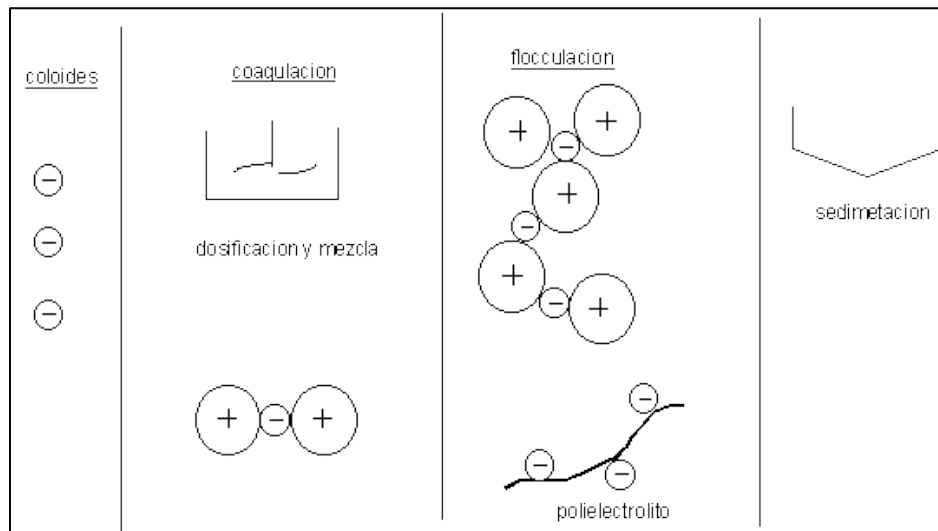
En la eficacia de la coagulación influyen diversos factores entre los que destaca el pH y otras características fisicoquímicas del agua, así como una adecuada energía de agitación rápida para conseguir una apropiada dispersión del coagulante y proporcionar las necesarias colisiones entre las partículas para conseguir una óptima coagulación.

8.1.3.2 Floculación

A continuación de la etapa de coagulación tiene lugar un segundo proceso llamado floculación, este tiene lugar tras someter a los microfloculos a una agitación lenta que permite la unión de estos en agregados mayores o flóculos, visibles a simple vista, con la suficiente cohesión y densidad para someterlos a la siguiente etapa de sedimentación. La floculación requiere un menor gradiente de agitación para impedir la rotura y disgregación de los flóculos ya formados. Los flóculos rotos son difíciles de retornar a su tamaño inicial.

La floculación se ve mejorada con el empleo de coayudantes de esta, conocidos como poli electrolitos, estos suelen ser macromoléculas de polímeros orgánicos (tipo poliacrilamidas)¹¹.

Figura 7 Proceso de formación de flocs.



Fuente: <http://www.elaguapotable.com/coagulacion-floculacion.htm>

8.1.3.3 Sedimentación

Esta zona es considerada como el “proceso natural por el cual las partículas más pesadas que el agua, que se encuentran en su seno de suspensión, son removidas por acción de la gravedad” (Ing. Luis Pérez Farrás, 2005).

Durante el proceso de decantación, se pueden encontrar alrededor de tres tipos de partículas entre los más comunes para remover, estos son:

- a) Suspensiones hasta diámetros de $10^{-4}cm$.
- b) Coloides entre $10^{-4}cm$ y $10^{-6}cm$.
- c) Soluciones para diámetros menores de $10^{-6}cm$.

Para el primer caso se necesita de una sedimentación simple, para el segundo proceso se necesita la cohesión de coloides con la finalidad de conformar flocs que se puedan sedimentar.¹²

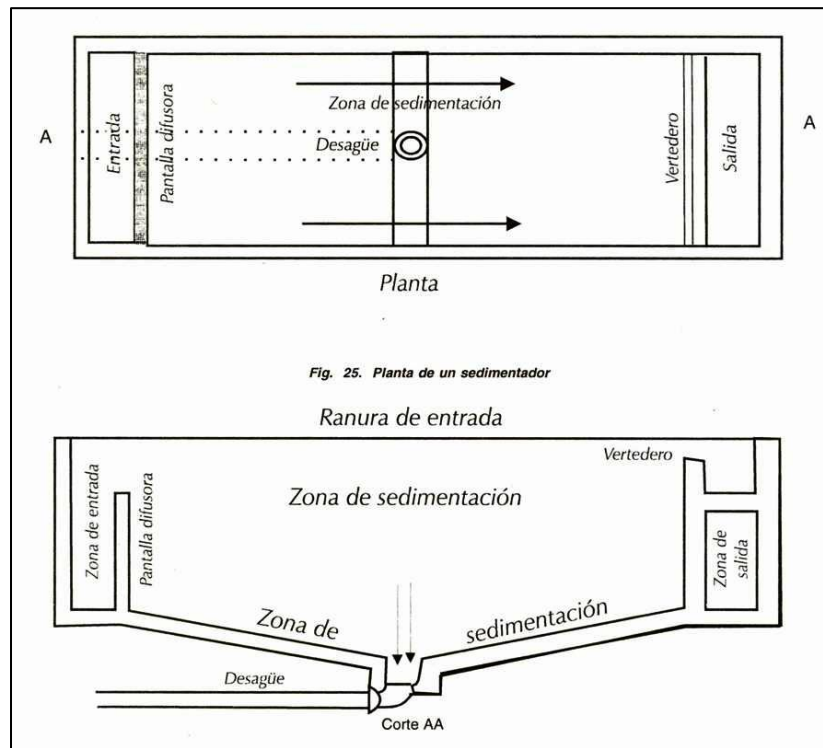
Para el último proceso se le agrega un paso antes de la formación de flocs que básicamente consiste en la agregación de un compuesto que transforme las partículas insolubles en compuestos solubles, posterior a ello se continua con el tratamiento del segundo proceso.¹³

A continuación se muestra la Figura 6 que contiene la vista en planta y de perfil de un sedimentador horizontal con sus respectivas zonas señaladas.

¹² Ing. Pérez, L.. (2005). TEORÍA DE LA SEDIMENTACIÓN. Instituto de Ingeniería Sanitaria y Ambiental: Instituto de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. p.02

¹³ *Ibíd.*, pág. 12.

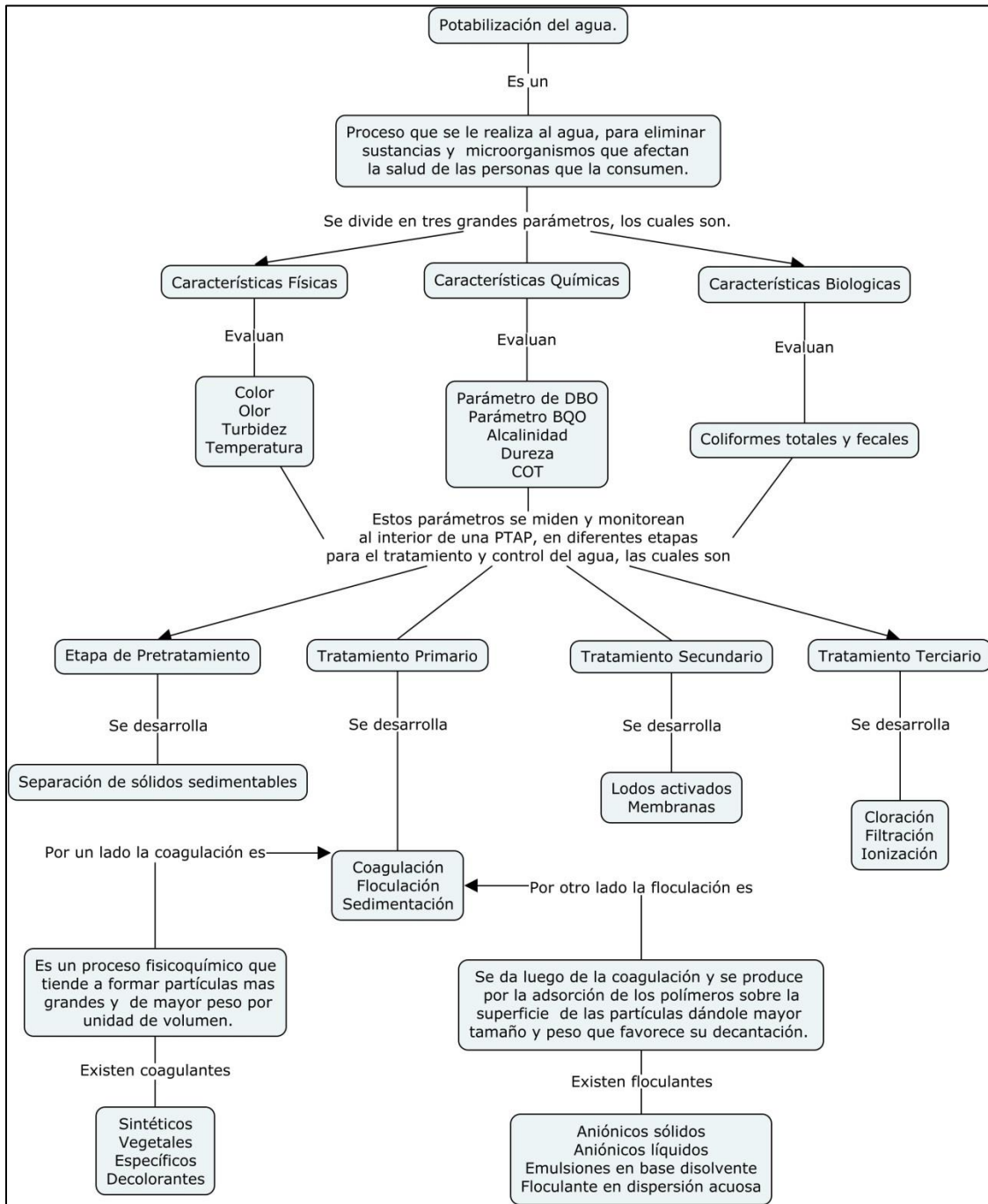
Figura 8 Sedimentador Rectangular.



Fuente: https://repositorio.sena.edu.co/sitios/calidad_del_agua/operacion_potabilizacion/index.html

8.2 MARCO CONCEPTUAL.

Tabla 2 Marco conceptual



Fuente: Tomado por autoría

8.3 MARCO LEGAL

8.3.1 Normas que controlan los estándares de calidad del agua potable en Colombia

A continuación se expondrán las normas a tener en cuenta para el trabajo a desarrollar.

- RAS 330 de 2017.
- Decreto 1575 de 2007. Protección y control de la calidad del agua.
- Resolución 2115 de 2007. Características, instrumentos básicos y frecuencias del control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano.
- Decreto 475 de 1998. Normas técnicas de calidad del agua potable.
- Artículo 38. Criterios de calidad admisibles para a destinación del recurso para consumo humano y doméstico.
- Artículo 39. Criterios de calidad admisibles para a destinación del recurso para consumo humano y doméstico.

Por ultimo en la Tabla 3 se comparan dos estándares de calidad del agua para consumo humano a nivel nacional mediante la Resolución 2115 de 2007 y a nivel internacional mediante estándares de la OMS.

Tabla 3 Comparativas de normas sobre calidad del agua

Estándares de calidad del agua potable para consumo humano		
Contaminantes	Resolución 2115 de 2007	OMS
Coliformes totales	0 UFC / 100 cm ³	0
Escherichia coli	0	-
Coliformes biológicos	0 UFC / 100 cm ³	0
Turbiedad	2	1,0 NTU
pH	6,5 - 9	6,5 - 8,5
Conductividad	1000 microS/cm	-
Dureza total	300	-
Alcalinidad total	200	-
Hierro total	0,3	0,3
Color	15 unidades	15 unidades
Sulfato	250	400
Antimonio	-	-
Arsenico	-	50
Asbesto	-	-
Bario	-	-
Belirio	-	-
Cadmio	-	5
Cromo	-	5
Fluor	-	1500
Mercurio	0,001	0,001
Niquel	-	-
Nitrato + Nitrtio	0,1 - 10	10
Selenio	-	10
Talio	-	-
Lindano	-	3
Metoxiclor	-	30
Txafeno	-	-
Trihalometano	-	-
Aluminio	0,2	0,2
Cloruro	250	250
Fosfatos	0,5	-
Fósforo total	-	-
Sólidos totales	-	-
Sólidos suspendidos totales	500	-
SDT	-	300
NTK	-	-

Fuente: Tomado por autoría

9. OBJETIVOS

9.1 GENERAL

Establecer las condiciones de operación requeridas para mejorar el proceso de remoción de sólidos suspendidos en el agua tratada por la PTAP *La Pola*.

9.2 ESPECÍFICOS

1. Llevar a cabo un diagnóstico de la información histórica de turbiedad en la calidad del agua en el IBAL (empresa ibaguereña de acueducto y alcantarillado) en temporada invernal e informes respectivos acordes a la problemática presentada.
2. Realizar escenarios de simulación de tratamiento de agua teniendo en el programa GPS-X para los procesos de coagulación, floculación y sedimentación.
3. Definir recomendaciones para obtener agua potable en los estándares de calidad requeridos para valores altos de turbiedad.

10.METODOLOGÍA

A continuación, se plasmará el procedimiento empleado durante todo el trabajo de grado. La metodología que se utilizó consta de cuatro 3 fases que se consideraron pertinentes para alcanzar los objetivos propuestos, las cuales son:

10.1 RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN GENERAL

Para hacer esta recopilación de información, se obtuvieron archivos directamente del IBAL (Empresa Ibaguereña de Acueducto y Alcantarillado), sobre cómo trabajaba la PTAP de Ibagué La Pola, además de ello se ubicaron y examinaron archivos externos al acueducto de este municipio, concretamente documentos de una empresa contratada para la optimización del acueducto de Ibagué, donde se presentaba información más detallada de cómo funcionaba esta planta de tratamiento, el caudal que recibía, las estructuras por las que estaba conformada y sus fallas presentadas por las cuales se veían interrumpidas las operaciones de la misma. Así mismo se evidenciaron las posibles soluciones que esta compañía tenía en planeación para ejecutar, dándonos una luz sobre lo que queríamos lograr con nuestra investigación.

10.2 CONFIGURACIÓN DE LAS MODELACIONES

Se llevó a cabo la modelación computacional a través del software GPS-X 7.0, donde en primera instancia se realizó el montaje de la planta de tratamiento con las características y datos recolectados con antelación, para analizar una manera de mitigar el problema de turbidez en el agua.

Posterior a ello, se realizaron diferentes modelos computacionales de los sistemas de la PTAP, planteando alternativas de solución a la misma. Para estas pruebas, se consideraron algunas disyuntivas que incluyeran la implementación de nuevas configuraciones de la planta, esto en cuanto a dosificaciones y tipos de coagulantes usados en la estructura, para que de esta manera se pudieran observar si los cambios significativos de estas disposiciones, afectaban de manera positiva o negativa la operación y tratamiento del agua.

10.3 MODELO COMPUTACIONAL

10.3.1 PRIMER ESQUEMA

En este, el esquema inicial, se dispuso de un caudal de agua de río, en donde se le agregaron los parámetros de turbiedad que acarrea el río Combeima, para este caso la turbiedad se agregó el valor de 1000 NTU (valor crítico registrado) y se dejaron los datos iniciales de agua de río (los que tiene por defecto el programa).

De este punto de captación, el agua pasa a la cámara de arena para reducir los sedimentos suspendidos, después de la cámara de arena se dirige a un dosificador, el cual se le da como parámetro de entrada la dosis del coagulante y el tipo de coagulante, del dosificador pasa al clarificador, de allí al micro-screen de correa que termina de eliminar partículas restantes que no se alcanzaron a solventar en los procesos anteriores, después se pasa por la desinfección y por último la descarga donde concluye el proceso.

10.3.2 SEGUNDO ESQUEMA

Se diseñó el segundo esquema con otra configuración, en donde se mantenía el agua de río (conservando sus parámetros), de este punto se conservaba como destino la cámara de arena, luego de pasar por esta unidad, esta vez el agua se disponía para un sedimentador de alta tasa, el cual estaba compuesto de una vez por un coagulador y un floculador, después del sedimentador de alta tasa, se dirige a el micro-screen de correa para finalmente pasar a desinfección y de esta manera, terminar el proceso.

10.3.3 TERCER ESQUEMA

Para la siguiente configuración se mantuvo el segundo esquema, pero a diferencia de la segunda representación, en esta, se modificaron las dosis de los coagulantes, los cuales eran polímeros.

10.3.4 CUARTO ESQUEMA

Para este cuarto modelo, se diseñó una configuración similar, pero después de que el flujo de agua salía de la cámara de arena, se dividía en 4 caudales en paralelo. Esta división en el sistema se hizo con la finalidad de que cada caudal entrara en un sedimentador de alta tasa manejando los mismos coagulantes y sus dosificaciones para después volver a unirse a un solo caudal, entrar al micro-screen de correa, después desinfección y como último descarga. En esta configuración que se distribuyó el caudal en 4 sedimentadores en paralelo, se modificó su dimensión y el número de trenes, para ver su influencia en la turbiedad final.

10.3.5 QUINTO ESQUEMA

Finalmente, este diseño tiene aspectos similares al cuarto esquema, pero a diferencia del anterior, se cambiaron los trenes de operación de cada sedimentador y se obtuvieron un total de tres. El área de cada sedimentador se dejó de $150 m^2$.

11. RESULTADOS Y ANÁLISIS

11.1 DATOS DE ENTRADA

El parámetro central tratado durante el desarrollo de este trabajo fue la turbiedad, como bien se sabe, la turbidez del agua es una medida de la cual depende la transparencia del agua, esto generalmente está relacionado con las partículas en suspensión. Partiendo de esta teoría nuestro enfoque se destinó en los sedimentadores y dosificadores de coagulantes, debido a que estas estructuras reducen y controlan los sedimentos suspendidos.

Como primera medida se realizó la caracterización del agua que se trató, ya que fue la misma en cada uno de los diseños. Para ello se tomaron los parámetros que traía por defecto el software, debido a que poseía unas medidas similares a las de un afluente natural como los ríos. Dentro de las medidas que se ubicaron en la configuración se contaron con las siguientes:

- $20.000 \frac{mg}{L}$ De sedimentos suspendidos totales.
- $0,5 \frac{mg}{L}$ De oxígeno.
- $2 \frac{gr}{m^3}$ De nitrato.
- $40 \frac{gr}{m^3}$ Valor de calcio soluble inicial.
- $4 \frac{gr}{m^3}$ De magnesio.
- $1 \frac{gr}{m^3}$ De cloro.
- $1 \frac{gr}{m^3}$ De hierro.
- $25 \frac{gr}{m^3}$ De ácido carbónico.
- 7 Valor del pH inicial.

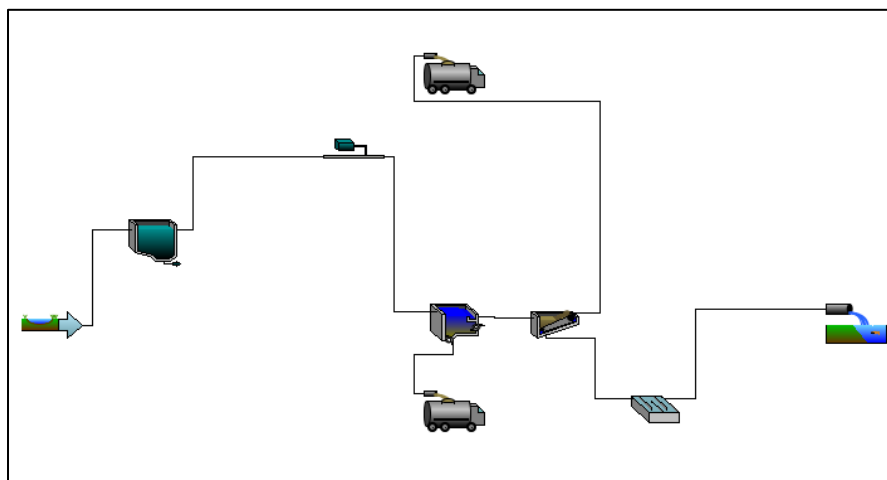
Lo único que cambiamos de la configuración que traía el agua de río que tenía el software, fue el nivel de turbiedad, que se mantuvo como el parámetro principal que teníamos que tratar de un afluente de agua con niveles de turbiedad máximos (críticos) de 10.000 NTU. El caudal utilizado en la modelación de los esquemas es el caudal que recibe la PTAP La Pola que tiene un valor de 2320 L/s

Para ello se realizaron cinco modelos en los cuales se modificaron las unidades de operación de la PTAP y su distribución, esto se logró aplicando diversas distribuciones de modelos existentes, con lo que se observó el comportamiento del agua al final de cada uno de los tratamientos brindados al cuerpo hídrico. Los modelos efectuados se muestran a continuación con sus respectivos resultados análisis de cada uno de los casos.

11.2 PRIMER ESQUEMA

En el esquema de la Figura 9, se colocó un dosificador y un clarificador rectangular como partes a observar del esquema planteado.

Figura 9 Esquema N°1



Fuente: Realizado por autoría (GPS-X 7.0)

Esta fue la primera planta diseñada, donde se obtuvieron los siguientes resultados finales.

Tabla 4 Resultados Esquema N° 1

Parámetros finales del agua			Resolución 2115 de 2007	OMS	Valoración
ITEM	UNIDAD	VALOR			
Flujo	m ³ /d	197416	-	-	No específica
SST	mg/L	4999,473	500	-	No Cumple
SDT	mg/L	254,8746	-	300	Cumple
Conductividad	microS/cm	289,1489	1000	-	Cumple
pH	-	6,357262	6,5 - 9	6,5 - 8,5	No Cumple
Fosfato Soluble	mgP/L	0,1	0,5	-	Cumple
Alcalinidad de Carbonatos	mgCaCO ₃ / L	0	-	-	No específica
Alcalinidad Anaranjado de Metilo	mgCaCO ₃ / L	50,52218	-	-	No específica
Alcalinidad Total	mgCaCO ₃ / L	61,93913	200	-	Cumple
Dureza carbonacea	mgCaCO ₃ / L	50,52218	-	-	No específica
Dureza no carbonacea	mgCaCO ₃ / L	65,93872	-	-	No específica
Dureza Total	mgCaCO ₃ / L	116,4609	300	-	Cumple
Turbiedad	NTU	2500,236	2 NTU	1 NTU	No Cumple
Color	mg/L(Pt-Co)	1	15 Unidades	15 Unidades	Cumple

Fuente: Tomado por autoría

Para esta primera representación de la planta tratada, en la que se utilizó un sedimentador rectangular, se tuvieron en cuenta parámetros muy importantes como lo son:

- Diferencias en las velocidades de sedimentación de las partículas, por lo que las de sedimentación más rápida, superan a las que se asientan más lentamente y se aglutinan con ellas.
- Gradientes de velocidad dentro del líquido, que causan partículas en una región donde haya una velocidad más alta para superar a aquellas en vías de flujo adyacentes que se mueven a velocidades más lentas.

La fórmula principal para este tipo de sedimentadores es:

$$V = \frac{H}{T_c}$$

Donde

- V = Velocidad de sedimentación.
- H = Altura.
- Tc = Tiempo que tarda la partícula en precipitar.

Trayendo a colación la teoría de sedimentadores ideales, se incluyen los de tipo rectangular dentro de esta misma familia, debido a su simplicidad y al manejo de flujo rectangular. Estas unidades comparten en su mayoría las condiciones operacionales, por lo cual estos mecanismos de tratamiento de agua potable son considerados de baja eficiencia en comparación a otros tipos, como por ejemplo los de alta tasa.

Los sedimentadores de tipo rectangular se les conocen también como tanques de pre-sedimentación debido a que en la mayoría de ocasiones son utilizados cuando existe la presencia de arena en el agua ya que este material se precipita por acción de la gravedad debido al peso de las partículas.

Los tanques de pre-sedimentación no tienen una calidad de transparencia muy buena, debido al perímetro reducido de rebose por área equivalente, por ello han dejado de ser útiles a media que pasa el tiempo, ya que conforme a estos avances surgieron nuevos diseños de sedimentadores que no solo cumplen una función primaria, sino que además optimizan tiempos de tratado del agua mejorando la eficiencia de operación de una PTAP.

Para este caso el coagulante que se escogió, fue sulfato de aluminio ($6 \frac{mg}{L}$) en un dosificador en línea. Como podemos evidenciar al hacer uso de un tanque de pre-sedimentación dentro de la modelación de la PTAP La Pola, se logró una notoria remoción del material en suspensión que contiene el agua, este modelo comprimió los niveles de turbiedad en un 85%, más sin embargo cuando entramos a revisar los parámetros establecidos por la normativa a nivel nacional e internacional, la calidad del agua resultante al terminar el proceso es de alto riesgo para el consumo humano, debido a que los valores que se registraron tuvieron que ser menor a 1 NTU y para este caso el nivel se mantuvo muy alto conservando valores sobre los 2500 NTU. Además de ello los TSS y el nivel de pH tampoco se encuentran dentro de los rangos estipulados por ambas normas.

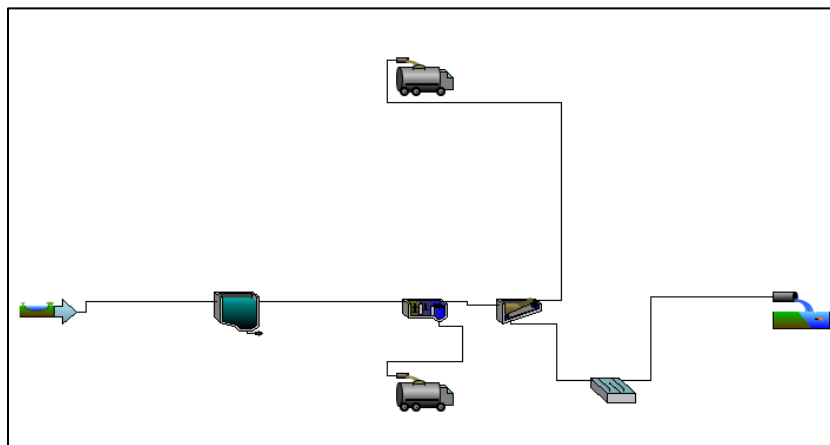
Por consiguiente pudimos deducir que un proceso básico realizado con este tipo de unidades no es suficiente cuando al frente se tiene un problema de turbidez del agua que en condiciones críticas se ha llegado a registrar valores críticos de 10.000 NTU. Se miraron los resultados proyectados de cara a futuro y la verdad con estos resultados del primer esquema no se avanzaría demasiado si la finalidad es optimizar los procesos de coagulación-floculación-sedimentación.

11.3 SEGUNDO ESQUEMA

Para este esquema se cambió el sedimentador a uno de alta tasa, la diferencia entre este sedimentador al tratado anteriormente (sedimentador rectangular), son sus placas ubicadas de manera inclinada, además, en este no se colocó un dosificador porque el sedimentador trae incluida la dosificación.

Dentro de las ventajas que acarrea esta unidad operacional (sedimentador) respecto al anterior, cabe resaltar que es más eficiente debido a su capacidad incrementada por unidad de área plana, por otro lado se tendría como desventaja principal de este tipo de sedimentadores su mantenimiento.

Figura 10 Esquema N°2



Fuente: Realizado por autoría (GPS-X 7.0)

Teniendo como inicio un área de 50m² y un tren en operación, se obtuvieron los resultados finales consignados en la Tabla 5.

Tabla 5 Resultados Esquema N°2

Parámetros finales del agua			Resolución 2115 de 2007	OMS	Valoración
ITEM	UNIDAD	VALOR			
Flujo	m ³ /d	199444,3	-	-	No especifica
SST	mg/L	3462,545	500	-	No Cumple
SDT	mg/L	222,7526	-	300	Cumple
Conductividad	microS/cm	267,6292	1000	-	Cumple
pH	-	7,000053	6,5 - 9	6,5 - 8,5	Cumple
Fosfato Soluble	mgP/L	0,1	0,5	-	Cumple
Alcalinidad de Carbonatos	mgCaCO ₃ / L	0,070458	-	-	No especifica
Alcalinidad Anaranjado de Metilo	mgCaCO ₃ / L	83,94188	-	-	No especifica
Alcalinidad Total	mgCaCO ₃ / L	95,40102	200	-	Cumple
Dureza carbonacea	mgCaCO ₃ / L	83,94188	-	-	No especifica
Dureza no carbonacea	mgCaCO ₃ / L	32,51903	-	-	No especifica
Dureza Total	mgCaCO ₃ / L	116,4609	300	-	Cumple
Turbiedad	NTU	1731,773	2 NTU	1 NTU	No Cumple
Color	mg/L(Pt-Co)	1	15 Unidades	15 Unidades	Cumple

Fuente: Tomado por autoría

En este caso se ve una reducción de turbiedad alta, pero no es la suficiente, ya que al final del tratamiento la turbiedad llego a 1731 NTU, por consiguiente la remoción de los Sólidos Suspendidos Totales tampoco fue la mejor, debido a la gran cantidad de partículas que permanecieron en el agua sin precipitarse.

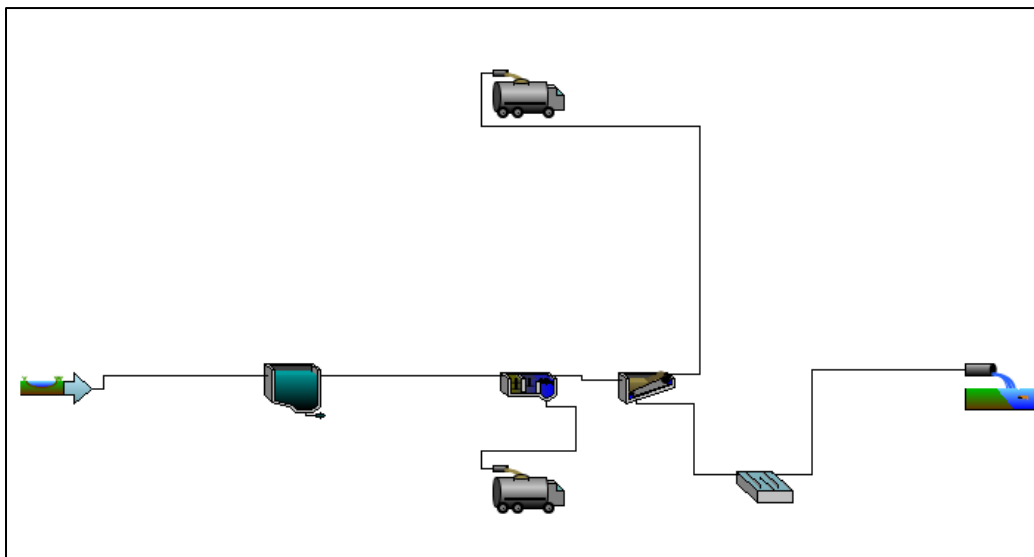
Para los resultados obtenidos, se tuvo en cuenta que el área superficial de un sedimentador de alta tasa es diferente al de uno convencional, puesto que el área superficial del sedimentador de alta tasa tiene piezas de poca profundidad conocidas como placas inclinadas, secciones o módulos de tubos. Estas secciones subdividen el área superficial en muchas más, de ahí su eficiencia en cuestión de remoción de sedimentos suspendidos. Otra característica muy importante es el tiempo de retención ya que es menor a 15 minutos y en los sedimentadores convencionales puede variar entre una a dos horas.

11.4 TERCER ESQUEMA

En este esquema se manejó el mismo sedimentador de alta tasa que se adoptó en el esquema 2, la única diferencia es que el área del sedimentador decidimos incrementarla 100 metros cuadrados, luego modificamos sus trenes de operación no solo con 1 como en el anterior caso sino con 3.

Una de las ventajas también de los sedimentadores de alta tasa es el tiempo de operación que es menor en comparación con el de los sedimentadores normales. A continuación se presenta el esquema de la figura 11 con sus partes realizadas.

Figura 11 Esquema N°3



Fuente: Realizado por autoría (GPS-X 7.0)

Los resultados de esta configuración se muestran a continuación en la Tabla 6.

Tabla 6 Resultados Esquema N°3

Parámetros finales del agua			Resolución 2115 de 2007	OMS	Valoración
ITEM	UNIDAD	VALOR			
Flujo	m ³ /d	199444,3	-	-	No especifica
SST	mg/L	1422,75	500	-	No Cumple
SDT	mg/L	222,7526	-	300	Cumple
Conductividad	microS/cm	267,6292	1000	-	Cumple
pH	-	7,000053	6,5 - 9	6,5 - 8,5	Cumple
Fosfato Soluble	mgP/L	0,1	0,5	-	Cumple
Alcalinidad de Carbonatos	mgCaCO ₃ / L	0,070458	-	-	No especifica
Alcalinidad Anaranjado de Metilo	mgCaCO ₃ / L	83,94188	-	-	No especifica
Alcalinidad Total	mgCaCO ₃ / L	95,40102	200	-	Cumple
Dureza carbonacea	mgCaCO ₃ / L	83,94188	-	-	No especifica
Dureza no carbonacea	mgCaCO ₃ / L	32,51903	-	-	No especifica
Dureza Total	mgCaCO ₃ / L	116,4609	300	-	Cumple
Turbiedad	NTU	711,8752	2 NTU	1 NTU	No Cumple
Color	mg/L(Pt-Co)	1	15 Unidades	15 Unidades	Cumple

Fuente: Tomado por autoría

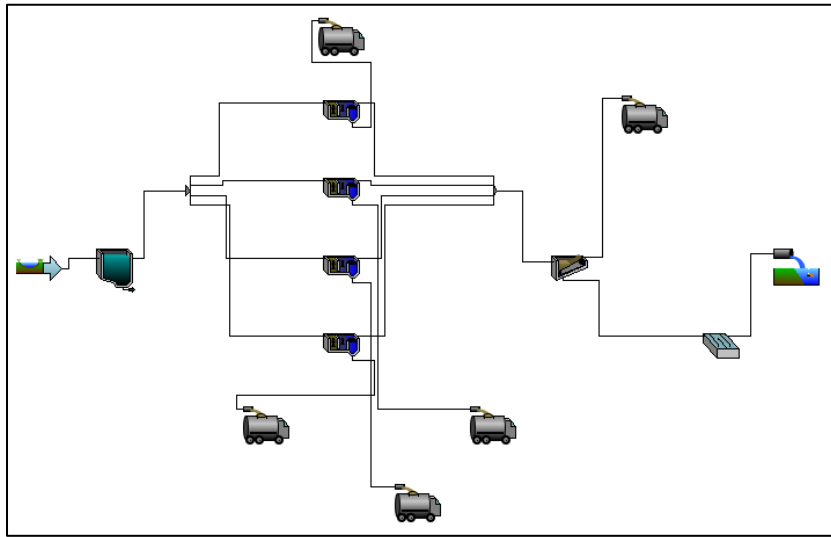
Para este diseño de plantas se mantuvo como el caso 2, este se diferencia del segundo debido al área del sedimentador, que para este caso se asumió de 150m² y el número de trenes en operación es de 3, de esta manera se obtuvieron los resultados finales consignados en la Tabla 6. Se consiguió una reducción final de la turbiedad en 711,8752 NTU y una mejor reducción de los TSS, pero aun no sigue siendo aceptable.

Como se esperaba al aumentar el área del sedimentador, en este caso su área superficial es mucho mejor, debido a que al aumentar el tamaño, se aumenta la cantidad de placas, teniendo así una remoción de sedimentos suspendidos más eficiente. Aunque su tiempo de retención aumente su eficiencia es mucho mejor.

11.5 CUARTO ESQUEMA

Para tratar la turbiedad en este esquema dividimos el caudal y lo repartimos en 4 sedimentadores de alta tasa, con esto se tuvo un tratamiento más eficiente. Este sistema se hizo en paralelo, donde cada sedimentador tenía una salida en la que más adelante se unificaban las cuatro tuberías salientes de cada unidad, el área de cada sedimentador para este caso fue de 50m² con un tren de operación.

Figura 12 Esquema N°4



Fuente: Realizado por autoría (GPS-X 7.0)

Para este caso se redujeron los niveles de turbidez mucho más a diferencia de los esquemas anteriores, los resultados se muestran a continuación.

Tabla 7 Resultados Esquema N°4

Parámetros finales del agua			Resolución 2115 de 2007	OMS	Valoración
ITEM	UNIDAD	VALOR			
Flujo	m ³ /d	199439,8	-	-	No especifica
SST	mg/L	2037,765	500	-	No Cumple
SDT	mg/L	222,7526	-	300	Cumple
Conductividad	microS/cm	267,6292	1000	-	Cumple
pH	-	7,000053	6,5 - 9	6,5 - 8,5	Cumple
Fosfato Soluble	mgP/L	0,1	0,5	-	Cumple
Alcalinidad de Carbonatos	mgCaCO ₃ / L	0,070458	-	-	No especifica
Alcalinidad Anaranjado de Metilo	mgCaCO ₃ / L	83,94188	-	-	No especifica
Alcalinidad Total	mgCaCO ₃ / L	95,40102	200	-	Cumple
Dureza carbonacea	mgCaCO ₃ / L	83,94188	-	-	No especifica
Dureza no carbonacea	mgCaCO ₃ / L	32,51903	-	-	No especifica
Dureza Total	mgCaCO ₃ / L	116,4609	300	-	Cumple
Turbiedad	NTU	1019,383	2 NTU	1 NTU	No Cumple
Color	mg/L(Pt-Co)	1	15 Unidades	15 Unidades	Cumple

Fuente: Tomado por autoría

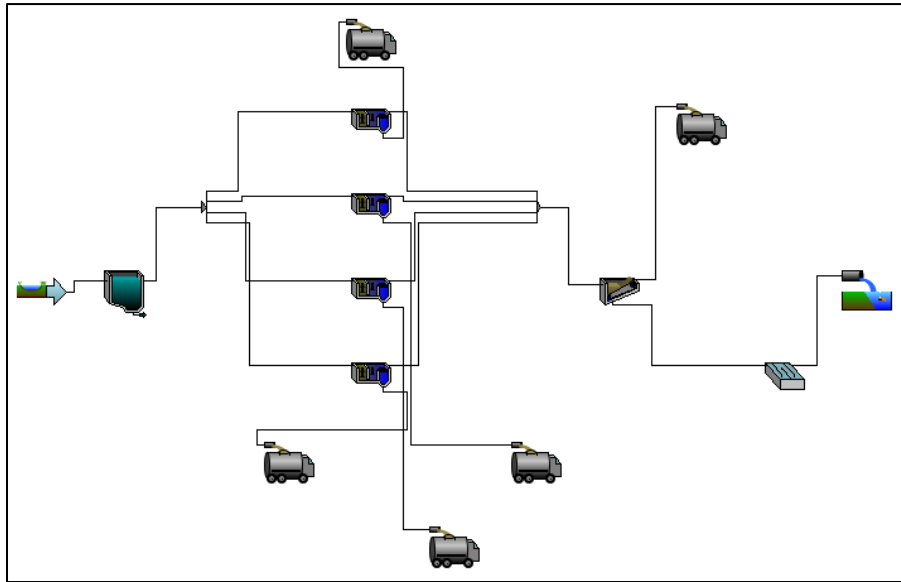
Como se observa, para este caso se registró un valor de 1019,383 NTU como turbidez final, lo que quiere decir que se logró una mejor eficiencia en la remoción de turbiedad a comparación de los casos anteriores, pero sigue sin estar dentro de los parámetros que se exigen por la norma.

En este caso donde se dividió el caudal para cuatro sedimentadores de alta tasa, la velocidad promedio fue baja puesto que el caudal se disminuyó. La ventaja de todo esto radicó en que la velocidad critica de asentamiento seria mayor, lo anterior surgió debido a que se manejó la misma longitud relativa pero con una velocidad promedio más baja. Por eso estos resultados de remoción más eficientes que los esquemas anteriores.

11.6 QUINTO ESQUEMA

Para tratar la turbiedad con este sistema, decidimos hacer reajustes similares a los del esquema 3, aumentamos el área en las cuatro unidades de sedimentación ampliando cada sedimentador con 100m² más, también se aumentaron los trenes de operación por cada separación del caudal dejando un total de tres por mecanismo, para así tener una reducción de sedimentos suspendidos más eficiente.

Figura 13 Esquema N°5



Fuente: Realizado por autoría (GPS-X 7.0)

Para este caso se obtuvieron los siguientes resultados, consignados en la Tabla 8.

Tabla 8 Resultados Esquema N°5

Parámetros finales del agua			Resolución	OMS	Valoración
ITEM	UNIDAD	VALOR	2115 de 2007		
Flujo	m ³ /d	199439,8	-	-	No especifica
SST	mg/L	913,4546	500	-	No Cumple
SDT	mg/L	222,7526	-	300	Cumple
Conductividad	microS/cm	267,6292	1000	-	Cumple
pH	-	7,000053	6,5 - 9	6,5 - 8,5	Cumple
Fosfato Soluble	mgP/L	0,1	0,5	-	Cumple
Alcalinidad de Carbonatos	mgCaCO ₃ / L	0,070458	-	-	No especifica
Alcalinidad Anaranjado de Metilo	mgCaCO ₃ / L	83,94188	-	-	No especifica
Alcalinidad Total	mgCaCO ₃ / L	95,40102	200	-	Cumple
Dureza carbonacea	mgCaCO ₃ / L	83,94188	-	-	No especifica
Dureza no carbonacea	mgCaCO ₃ / L	32,51903	-	-	No especifica
Dureza Total	mgCaCO ₃ / L	116,4609	300	-	Cumple
Turbiedad	NTU	457,2273	2 NTU	1 NTU	No Cumple
Color	mg/L(Pt-Co)	1	15 Unidades	15 Unidades	Cumple

Fuente: Tomado por autoría

Con las modificaciones realizadas al sistema se alcanzó la turbiedad más baja de todos los casos puestos a estudio, con 457,2273 NTU, lo mismo sucedió con los Solidos Suspendidos Totales (TSS) con una reducción considerable en comparación con los anteriores modelos llegando a 913,4546 mg/L, pero aun así estos valores siguen siendo inadmisibles para la calidad de agua que se está manejando.

En este último caso donde se manejó una combinación de lo realizado en el esquema tres, aumentando el área del sedimentador para así lograr con varias placas más área superficial, logrando en consecuencia una eficiencia mucho más alta y lo realizado en el esquema inmediatamente anterior a este dividiendo el caudal, hizo una velocidad promedio menor lo que generó que las partículas lograran precipitarse lo necesario, además, aumentar los trenes de operación hizo dividir el trabajo y lograr una eficiencia mucho más alta a comparación de todos los esquemas planteados.

Para poder hacer el estudio de cada planteamiento se analizaron algunas ecuaciones respecto a la dosis del coagulante y mezcladores. Como el caudal que se trató es bastante alto se descartó hacer diseños hidráulicos. Para poder

mezclar los coagulantes que se le adicionan al caudal, se utilizaron mezcladores rápidos para los cuales se pusieron a disposición las siguientes ecuaciones:

$$G = \sqrt{\frac{P}{\mu V}}$$

$$P = KdN^3D^5$$

En donde:

- G=gradiente de velocidad, s^{-1}
- V= volumen del tanque
- P=potencia requerida
- μ =viscosidad dinámica del agua

En donde:

- K= constante
- d=densidad del agua
- D=diámetro del impulsor
- N=velocidad del impulsor

Cabe resaltar que "K" es una constante que depende de la forma y del número de "aletas" del mezclador.

Recomendaciones mezcladores mecánicos:

- Tiempos de retención (10-90 s)
- Numero de Reynolds 100,000
- Velocidad tangencial de las paletas 0,6 m/s
- Longitud de paletas = 1/3 del ancho o diámetro del tanque
- Para mezcla completa, entrada del agua por la parte inferior del tanque y salida por la superior

Para mezclador mecánico el rango de gradiente de velocidad debe estar entre $500s^{-1}$ y $2000s^{-1}$ y el tiempo de mezcla debe ser menor a 60 s.

La siguiente formula se utiliza pero solo para el sulfato de aluminio, para hallar la concentración del coagulante.

$$GTC^{1,46} = 5,9 \times 10^6$$

Dónde:

- G= gradiente de velocidad
- T= tiempo de retención
- C= concentración del coagulante

Esta fórmula es válida solo para sulfato de aluminio en mezcladores rápidos.

De esta manera se obtuvo como resultado la concentración utilizada que fue de $50 \frac{mg}{L}$, teniendo como variables iniciales un gradiente de velocidad de $G = 60s$ y un tiempo de retención de $T = 500^{s^{-1}}$. Los valores dentro de la norma RAS 2000 el tiempo de retención debe ser menor o igual a 60 segundos, y el gradiente de velocidad está entre $500^{s^{-1}}$ y $2000^{s^{-1}}$.

11.7 BALANCE DE RESULTADOS

A continuación se realizaran las correspondientes comparaciones entre los modelos que se ajustaron más a la remoción de turbidez vs los que no son tan aptos en ello, teniendo en cuenta el nivel de turbidez. Recordemos que para este caso el valor de turbiedad tomado fue de 10.000 NTU.

A continuación se presenta una tabla con la recolección de los datos arrojados en materia de turbiedad por cada esquema.

Tabla 9 Resultados de Turbidez

ESQUEMA	TURBIEDAD	UNIDAD
N°1	2500,236	NTU
N°2	1731,773	NTU
N°3	711,875	NTU
N°4	1019,383	NTU
N°5	457,227	NTU

Fuente: Tomado por autoría

11.7.1 COMPARACIÓN RESULTADOS SEDIMENTADOR RECTANGULAR

Como se puede observar, el modelo que arrojó los valores más significativos de acuerdo a la Tabla 9 es el esquema N°1, como bien se sabe esta representación cuenta con un sedimentador rectangular dentro de las unidades más destacadas del mismo. Este tanque de pre-sedimentación en su mayoría se encarga de la eliminación de partículas como los granos de arena, ya que debido al peso de las partículas y por acción de la gravedad, este material se sedimenta de manera más factible a comparación de otros compuestos que pueda transportar el agua, como los lodos, limos o arcillas debido a que estos tipos materiales en la mayoría de veces se decantan teniendo en cuenta la implementación de químicos que desestabilicen sus partículas, para así formar flocs que se sedimenten de una forma más rápida y lleguen a la zona de lodos de la unidad.

Debido a que estos tanques de sedimentación fueron de los primeros modelos en implementarse para la remoción de partículas orgánicas e inorgánicas del agua, tienen procesos que con el paso del tiempo han sido mejorados con la creación de nuevos sedimentadores de distintas clases, que han hecho de este sedimentador un equipo básico para una Planta de Tratamiento de Agua. De acuerdo a la información consultada, un sedimentador rectangular implementa una zona de recepción de agua donde se controlan las corrientes (turbulencias) generadas por la llegada del afluente a la unidad, de ese punto el agua pasa a la zona de

sedimentación donde el área superficial de esta franja es la principal responsable de la correcta decantación de las partículas.

Se tiene que tener en cuenta que si el área dispuesta para la sedimentación de partículas tratadas y/o desestabilizadas no cumple con el tiempo de retención es muy probable que se filtren partículas que aún no completaron el proceso de decantación. Para el caso del esquema N°1 se tiene que el área superficial es de $100m^2$, además se sabe que al final del proceso el agua se mantiene contaminada, lo que la hace no apta para el consumo humano. Para este caso se asume que este problema se debió a que la velocidad del flujo en la unidad fue mayor a la velocidad de sedimentación, ya que cuando este caso ocurre, se filtran partículas que no alcanzaron a precipitarse en los procesos siguientes a este.

Esta opción se descarta en comparación a los otros modelos debido a que en la actualidad sale más rentable la construcción de un sedimentador de otra clase bien sea de alta tasa o mejor, que tengan más avances en comparación a los tanques de sedimentación, ya que los modelos actuales ofrecen mejor rendimiento en los procesos que se llevan a cabo en su interior.

11.7.2 COMPARACIÓN DE RESULTADOS ESQUEMA DOS Y TRES

En el caso de los siguientes modelos, de acuerdo a la Tabla 9 para el esquema dos la turbiedad arrojada al final fue 1731,773 NTU a pesar de ser modelos similares. Este sedimentador de alta tasa tiene un área de $50m^2$ y un tren de operación, por otro lado el esquema tres mostro una turbidez de 711,875 NTU las dimensiones por las que se optaron para esta unidad fue un área de $150m^2$ y tres trenes de operación.

Los resultados evidenciados tienen relación con el diseño para este tipo de sedimentadores. Para el diseño de las plantas del esquema dos al cinco se optó por implementar un sedimentador de alta tasa para el cual se manejan las siguientes fórmulas.

$$V_{sc} = \frac{Sc * V_o}{sen\theta + Lcos\theta} \quad (Ec. 1)$$

Donde Sc depende de la forma de las placas

- V_{sc} = Velocidad crítica de asentamiento.
- $Sc = 1$ Para sedimentadores de placas paralelas.
- $Sc = \frac{4}{3}$ Para tubos circulares.
- $Sc = \frac{11}{8}$ Para conductos cuadrados.

- θ = Angulo de las placas con la base.
- V_o = Velocidad promedio.
- $V_o = \frac{Q}{A \cdot \sin \theta}$ (Ec. 2)
- Q = Caudal
- A = Área de las placas (Largo que ocupan las placas * longitud de placas).
- $L = \frac{l}{d}$ (Ec. 3)
- L = Longitud relativa del sedimentador.
- l = Largo de la placa.
- d = Separación entre placas.

Para poder tener la Longitud corregida del sedimentador hay que calcular L' .

- $L' = 0,013 \text{ NRE}$
- $L' = \frac{0,013 * V_o * d}{\mu}$ (Ec. 4)

Después de tener L'

- $L_c = 2(L - L')$ (Ec. 5) si $L' > \frac{L}{2}$
- $L_c = L - L'$ (Ec. 6) si $L' \leq \frac{L}{2}$
- L_c = Longitud corregida del sedimentador
- $t = \frac{l}{V_o}$ (Ec. 7)
- t = Tiempo de retención en las celdas
- $C_s = \frac{Q}{A}$ (Ec. 8)

Cuando un sedimentador no cumple con las dimensiones dispuestas, se tiene que rediseñar partiendo del dimensionamiento de las placas que se alojan al interior de la zona de sedimentación. Para los esquemas objeto de análisis se pueden deducir dos factores de acuerdo a los resultados finales que arrojo cada uno.

- Los diseños de los sedimentadores en los esquemas simulados por el Software GPS-X 7.0 para ambos casos cumplen, puesto que no genero error la simulación al momento de ejecutar el programa.
- Al aumentar el área del sedimentador a un tamaño que no genere mayor afectación a la planta y manteniendo el mismo caudal, también aumentaran las dimensiones y la cantidad de placas al interior de la zona de sedimentación (área superficial), lo que quiere decir que el proceso se verá optimizado debido a que la velocidad de flujo se reducirá considerablemente generando una mejor decantación de flocs y partículas

que transporta el agua. Por otro lado al aumentar los trenes de operación, el caudal que recibe la unidad de sedimentación se divide en la cantidad de trenes que tenga el sistema que para este caso son tres, esta implementación de trenes disminuye la carga por unidad de tren existente en el sedimentador, generando una mayor efectividad en la remoción.

Por esta razón se considera una opción viable el esquema tres ya que genera una mejor remoción y optimización de los tratamientos a diferencia del esquema dos en cuanto a remoción de altos niveles de turbiedad.

11.7.3 COMPARACIÓN DE RESULTADOS ESQUEMA CUATRO Y CINCO

Los diseños finales tienen una particularidad, ya que los valores arrojados son los más bajos en consideración a los diseños anteriores como se observa en la Tabla 9, el sedimentador para ambos casos es de alta tasa.

La diferencia en cuanto a los diseños anteriores radica en el hecho de que el caudal saliente de la Bocatoma se dividió en cuatro unidades de sedimentación ubicadas de forma paralela como se puede observar en las figuras 12 y 13 respectivamente.

Para el caso del esquema cuatro se utilizaron cuatro sedimentadores con las especificaciones del diseño dos y para el esquema cinco se utilizaron cuatro unidades con las especificaciones del esquema 3. Cabe mencionar que la eficacia del esquema último respecto al del cuatro se debe a la misma consideración que se hizo en el numeral anterior, la diferencia es que va aplicada a cuatro sedimentadores por modelación respectiva.

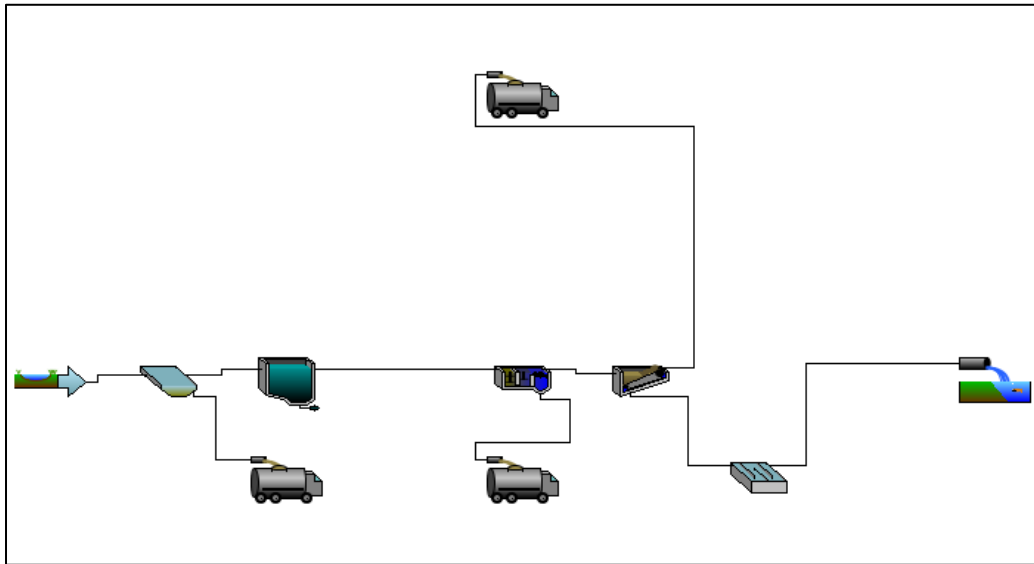
Con estos diseños se llegó a reducir el caudal tratado por cada unidad de sedimentación a diferencia de modelos pasados, lo que mejoró notablemente la calidad del agua al final del resultado pero aun así la propiedad del agua no se corrigió, quedando por fuera de los parámetros permitidos y exigidos por las normas de calidad de agua para consumo humano como son la Resolución 2115 de 2007 para Colombia, o la OMS como entidad encargada a nivel mundial.

Este indicador negativo a nivel de resultados nos llevó a la implementación de una nueva unidad distinta a la de un sedimentador para observar los cambios que esta genera dentro del proceso de potabilización de la planta.

11.8 SEXTO ESQUEMA

Como no se logró reducir la turbiedad con los esquemas planteados anteriormente, se diseñó un esquema el cual antes de coagulación-floculación, se agregaba la unidad de laguna de sedimentación, para poder así reducir más los sólidos suspendidos antes del tratamiento de coagulación-floculación, este fue el diseño con la laguna.

Figura 14 Esquema de PTAP con Laguna



Fuente: Realizado por autoría (GPS-X 7.0)

Para el diseño de la laguna de sedimentación se hicieron los siguientes cálculos, obteniendo como resultado las siguientes dimensiones.

$$V = A * D$$

En donde

- V = Volumen de la laguna.
- A = Área de la laguna.
- D = Profundidad de la laguna.

Para ese caso se asume una profundidad de 4 m

Sabiendo que:

$$V = Q * T$$

- Q = Caudal
- T = Tiempo de retención de la laguna (4 días)

Se tiene el volumen se obtiene de la siguiente manera.

$$\begin{aligned} \rightarrow V &= 200448 \frac{m^3}{d} * 4d \\ \rightarrow V &= 801792 m^3 \\ \rightarrow A &= \frac{801792m^3}{4m} \\ \rightarrow A &= 200448 m^2 \\ \rightarrow B &= \sqrt{A} \\ \rightarrow B &= \sqrt{200448m^2} \\ \rightarrow B &= 448 m \end{aligned}$$

Como resultado final del diseño de la laguna tenemos que los lados de la laguna serian cada uno de 448 m.

Una vez introducido los datos de la laguna y con la configuración previamente inducida para cada unidad dentro de la planta se inicia el tratamiento de la misma, obteniendo como resultado final los siguientes parámetros en el agua como resultado final después del tratamiento.

Tabla 10 Resultados Esquema PTAP con Laguna

Parámetros finales del agua			Resolución 2115 de 2007	OMS	Valoración
ITEM	UNIDAD	VALOR			
Flujo	m ³ /d	199442,8	-	-	No especifica
SST	mg/L	20,19953	500	-	Cumple
SDT	mg/L	222,7526	-	300	Cumple
Conductividad	microS/cm	267,6292	1000	-	Cumple
pH	-	7,000053	6,5 - 9	6,5 - 8,5	Cumple
Fosfato Soluble	mgP/L	0,1	0,5	-	Cumple
Alcalinidad de Carbonatos	mgCaCO ₃ / L	0,070458	-	-	No especifica
Alcalinidad Anaranjado de Metilo	mgCaCO ₃ / L	83,94188	-	-	No especifica
Alcalinidad Total	mgCaCO ₃ / L	95,40102	200	-	Cumple
Dureza carbonacea	mgCaCO ₃ / L	83,94188	-	-	No especifica
Dureza no carbonacea	mgCaCO ₃ / L	32,51903	-	-	No especifica
Dureza Total	mgCaCO ₃ / L	116,4609	300	-	Cumple
Turbiedad	NTU	10,59976	2 NTU	1 NTU	No Cumple
Color	mg/L(Pt-Co)	1	15 Unidades	15 Unidades	Cumple

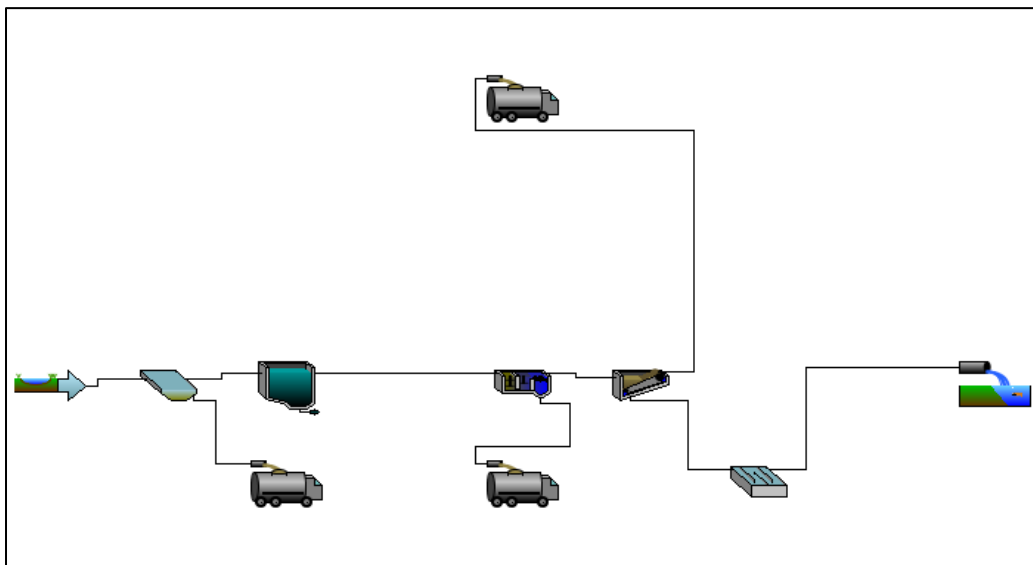
Fuente: Tomado por autoría

Con estos resultados podemos observar que tan solo con la laguna de sedimentación, no se logró el nivel de turbiedad final necesario que exige la norma para el agua potable, aunque por el momento es de los esquemas que registra los niveles más bajos de turbiedad de los esquemas planteados por esto se decidió aumentar los trenes de operación del sedimentador de alta tasa.

11.9 SÉPTIMO ESQUEMA

Para este esquema se planteó similar al anterior, solo que se cambiaron los trenes de operación del sedimentador de alta tasa quedando el esquema de la siguiente manera.

Figura 15 Esquema de PTAP con Laguna y aumento de trenes de operación



Fuente: Realizado por autoría (GPS-X 7.0)

Obteniendo los siguientes resultados.

Tabla 11 Resultados Esquema PTAP con Laguna y aumento de trenes de operación

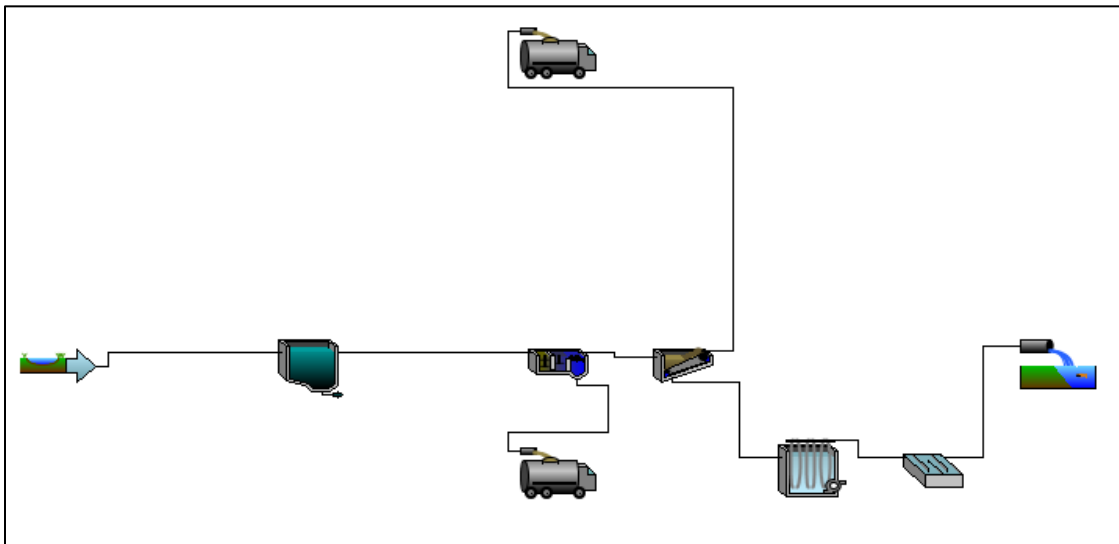
Parámetros finales del agua			Resolución 2115 de 2007	OMS	Valoración
ITEM	UNIDAD	VALOR			
Flujo	m ³ /d	199442,8	-	-	No específica
SST	mg/L	0,000139	500	-	Cumple
SDT	mg/L	222,7526	-	300	Cumple
Conductividad	microS/cm	267,6292	1000	-	Cumple
pH	-	7,000053	6,5 - 9	6,5 - 8,5	Cumple
Fosfato Soluble	mgP/L	0,1	0,5	-	Cumple
Alcalinidad de Carbonatos	mgCaCO ₃ / L	0,070458	-	-	No específica
Alcalinidad Anaranjado de Metilo	mgCaCO ₃ / L	83,94188	-	-	No específica
Alcalinidad Total	mgCaCO ₃ / L	95,40102	200	-	Cumple
Dureza carbonacea	mgCaCO ₃ / L	83,94188	-	-	No específica
Dureza no carbonacea	mgCaCO ₃ / L	32,51903	-	-	No específica
Dureza Total	mgCaCO ₃ / L	116,4609	300	-	Cumple
Turbiedad	NTU	0,500069	2 NTU	1 NTU	Cumple
Color	mg/L(Pt-Co)	1	15 Unidades	15 Unidades	Cumple

Fuente: Tomado por autoría

11.10 OCTAVO ESQUEMA

Para este esquema se optó por la implementación de una nueva operación al interior de la planta. Para poder tener una remoción más eficiente en el paso final del agua se requiere de un proceso terciario antes de la desinfección, este proceso tendría que ver con la implementación de una nueva unidad, esta es una membrana, la cual se implementó para lograr obtener un valor de turbiedad por debajo de 1NTU como lo estipula la norma. Pero no solo poniendo la membrana es suficiente, también aumentando el área del sedimentador y los trenes de operación de alta tasa para que este tenga una remoción más alta y así no llegue con tanta turbiedad a la membrana, realizamos el siguiente esquema con resultados para observar la turbiedad final.

Figura 16 Esquema de PTAP con membrana



Fuente: Realizado por autoría (GPS-X 7.0)

De esta manera se descartan los diseños cuatro y cinco porque a pesar de generar la menor remoción, el proceso constructivo y de mantenimiento saldrá desfavorable en relación calidad-precio que se tendría que destinar a la planta, por ello se optó por simular la nueva interacción teniendo como base el diseño tres que fue el más destacado después de los dos últimos modelos finales.

Para este caso se obtuvieron los siguientes resultados en cuestión de turbiedad.

Tabla 12 Resultados de esquemas PTAP con membrana

Parámetros finales del agua			Resolución 2115 de 2007	OMS	Valoración
ITEM	UNIDAD	VALOR			
Flujo	m ³ /d	199434,3	-	-	No especifica
SST	mg/L	0,914313	500	-	Cumple
SDT	mg/L	222,7526	-	300	Cumple
Conductividad	microS/cm	267,6292	1000	-	Cumple
pH	-	7,000053	6,5 - 9	6,5 - 8,5	Cumple
Fosfato Soluble	mgP/L	0,1	0,5	-	Cumple
Alcalinidad de Carbonatos	mgCaCO ₃ / L	0,070458	-	-	No especifica
Alcalinidad Anaranjado de Metilo	mgCaCO ₃ / L	83,94188	-	-	No especifica
Alcalinidad Total	mgCaCO ₃ / L	95,40102	200	-	Cumple
Dureza carbonacea	mgCaCO ₃ / L	83,94188	-	-	No especifica
Dureza no carbonacea	mgCaCO ₃ / L	32,51903	-	-	No especifica
Dureza Total	mgCaCO ₃ / L	116,4609	300	-	Cumple
Turbiedad	NTU	0,957156	2 NTU	1 NTU	Cumple
Color	mg/L(Pt-Co)	1	15 Unidades	15 Unidades	Cumple

Fuente: Tomado por autoría

Como se observan los resultados de la tabla anterior, corresponden al esquema que se le incorporo la membrana. Los niveles exigidos por la norma se cumplen a cabalidad, debido a la importancia de esta nueva unidad en el sistema de potabilización de la planta, donde se ve que la turbidez arroja un valor de 0,957 NTU y los TSS 0,91 mg/L estando muy por debajo de los limites exigidos de las normas utilizadas como referencia para la comparación de estos resultados. Como bien se sabe una membrana es capaz de filtrar las partículas ionizadas que aún siguen en el curso del agua. Desde el punto de vista económico se tendría que analizar la viabilidad que traería la incorporación de una membrana al sistema que compone la planta, ya que se tienen que tener en cuenta factores como su limpieza para que esta mantenga un alto desempeño en la filtración de partículas residuales que se transportan en el agua. Una membrana, se tiene que limpiar cuando su desempeño baja entre un 10% - 15% debido a que es muy susceptible a que se le cree un recubrimiento de sustancias poco solubles en la superficie de la misma, lo que nos lleva a pensar que se tiene que considerar un presupuesto considerable para la manutención periódica de esta estructura.

11.11 ANÁLISIS DE COSTOS

Para el análisis de costos mostrado a continuación se buscaron artículos que estuvieran relacionados con el tema. Para este caso, con base en el siguiente escrito, que muestra el estudio y funcionamiento de una Planta de Tratamiento convencional vs Planta de Tratamiento con membrana. Se dará una explicación a groso modo de lo que se tendría que considerar para la implementación de una membrana al tratamiento del agua en la PTAP La Pola.

Tabla 13 Artículo sobre análisis de costos de Operación y Mantenimiento para una PTAP

Método de Búsqueda	Artículo/Guía	Autor
Science Direct	Costs of conventional vs. membrane treatment for karstic spring water	Roberto Piant, Markus Boller, Daniel Urfer, Aurrlie Chappaz, Arnold Gmtinder

Fuente: Tomado por autoría

11.11.1 COSTS OF CONVENTIONAL VS. MEMBRANE TREATMENT FOR KARSTIC SPRING WATER

Según este estudio en donde compararon una planta de tratamiento convencional, en la que había floculación, la filtración de medios granulares, ozonización, filtración granular de carbón activado y desinfección final, para tratar aguas con niveles altos de turbiedad, se consideró colocar una membrana.

El estudio nos muestra que pueden aumentar los costos de mantenimiento y operación un 5% respecto a la membrana, pero la membrana en la que se utiliza micro ultrafiltración con carbón activado en polvo el aumento de costos llegaría a un 20% más que el de las plantas convencionales, quedando así sin poder competir con las plantas convencionales. También es de recalcar que no es necesario usar sistemas de membrana de ultra-micro ultrafiltración, ni ultrafiltración mientras no se requiera la eliminación de nitrato, sulfato o dureza.

Según lo visto en este artículo implementar una membrana en una planta convencional estaría entre un 30% -50% del costo de la planta ya implementada, hablando ya de los porcentajes totales del costo de la implementación de la membrana, entre un 15%-20% es en energía consumida por esta.

Una gran ventaja al ampliar la planta de tratamiento con la membrana es la gran calidad de agua en salida de la membrana.

11.12 COMPARACIÓN ENTRE LAGUNA DE SEDIMENTACIÓN Y MEMBRANA

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos de los esquemas externos a los plantados inicialmente, se decide hacer una comparación entre ellos debido a la eficacia que tuvieron en la remoción de partículas en suspensión y así mismo de la turbiedad.

Tabla 14 Resultados de Turbidez - Esquemas externos

ESQUEMA	TURBIEDAD	UNIDAD
N°6	10,59976	NTU
N°7	0,500069	NTU
N°8	0,957156	NTU

Fuente: Tomado por autoría

Como se puede observar, ya que la laguna de sedimentación es tan importante para el resultado final de la turbiedad se estudian algunas posibilidades de implementarla al igual que con la membrana.

Por un lado como se observa los esquemas seis y siete corresponden a la implementación de la laguna de sedimentación, una acompañada de un sedimentador de alta tasa con un tren de operación (esquema seis) y el otro esquema acompañado por un sedimentador de alta tasa con tres trenes de operación (esquema siete) como se puede prestar atención en la Tabla 14 se sabe que el esquema siete tiene una mayor remoción de partículas que el esquema inmediatamente anterior además de ello cumple con todos los parámetros exigidos en la norma esto se debe gracias al análisis expuesto anteriormente para los esquemas dos y tres enfocado en la implementación de los diversos tipos de sedimentadores de alta tasa.

Así mismo se evidencia que los resultados adquiridos por el esquema siete en comparación con los del esquema ocho son más eficientes, estos efectos se dan de esta manera, debido a que la unidad adicional implementada para el esquema siete fue la laguna de sedimentación, este proceso siempre se encuentra ubicado inmediatamente después de la bocatoma, es decir se convierte en un pre-tratamiento de la PTAP La Pola, haciendo una remoción considerable de partículas para reducir las cargas sedimentos una vez ingresen al debido proceso realizado al interior de la planta, y al contrario de ello, la membrana tiene una función posterior a la sedimentación de las partículas, lo que conlleva a filtrar partículas residuales producto de la gran turbidez presentada en el agua captada.

El acueducto de Ibagué cuenta con muy poco espacio para implementar una laguna, además esta se debería implementar después de la bocatoma, en donde se encuentre bastante vegetación, lo cual tendría un impacto ambiental bastante negativo ya que se tendrían que talar la cantidad suficiente de árboles y remoción de terreno vegetal para llevar a cabo la implementación de la misma. Por otro lado, económicamente hablando sería más viable la laguna que la membrana, cabe resaltar que estos niveles de turbiedad se presentan únicamente en temporadas invernales, es otra variable bastante importante.

12. CONCLUSIONES

- Teniendo en cuenta la caracterización del agua que es tomada del río Combeima, se sabe que la turbiedad está a niveles bastantes elevados generalmente en temporada invernal, época del año donde las laderas del río se vuelven vulnerables a constantes desprendimientos de tierra. Esta particularidad no solo genera grandes problemas en el tratamiento de la misma sino además en la captación ya que incluso en algunas ocasiones los sedimentos suspendidos generan taponamientos en la rejilla de la Bocatoma.
- Para que se remueva un porcentaje alto de sedimentos suspendidos totales es necesario un diseño con sedimentador de alta tasa con un área grande y con varios trenes de operación.
- Los sedimentadores de alta tasa tiene más área superficial para operar, esto los hace más eficientes y más económicos en comparación a los sedimentadores convencionales.
- Se concluyó que con los tratamientos de coagulación, floculación y sedimentación utilizados en la ejecución de los esquemas no se alcanzó un valor deseado o esperado para poder tener un tratamiento de agua más óptimo y económico del agua, sin embargo estos tratamientos ya mencionados son muy importantes para remover suficientes sedimentos suspendidos totales y así llegar al proceso terciario con un valor de turbiedad no muy alto y liberar al agua de grandes cantidades de partículas en suspensión para hacer de este afluente un recurso apto para el consumo humano.
- Ya teniendo todos los resultados de múltiples esquemas realizados en el software, se calculó que la turbiedad sin un proceso terciario avanzado no reduce la turbiedad a la escala necesaria para clasificar como agua potable según la norma de nuestro país.
- A pesar de no haber cumplido los objetivos planteados de la manera esperada, nos dimos cuenta al momento de revisar los resultados arrojados en todos los esquemas, los demás parámetros se mantuvieron dentro de los rangos aceptados por la normativa expuesta en la Tabla 3, este fue el indicio que se dio para colocar una unidad de operación adicional que se enfocara en el tratamiento final de los sólidos suspendidos no precipitados.

13.RECOMENDACIONES

- Como se pudo evidenciar a lo largo del desarrollo del trabajo de grado, el parámetro de turbiedad es uno de los más importantes e influyentes a la hora de evaluar los ítems de calidad del agua, debido a que es un factor que refleja el aspecto físico de la muestra, ya que a simple visualización deja ver que tan cristalino está el cuerpo hídrico de acuerdo a la cantidad de solidos suspendidos que tenga. En la tabla 3, se encuentran las normativas que rigen los estándares para la calidad del agua a nivel nacional en Colombia (Resolución 2115 de 2007) y a nivel mundial (OMS), donde el rango de turbidez que puede llegar a tener el agua destinada para consumo humano tiene un límite muy estricto en ambas normas. Para el caso que se presenta en la PTAP La Pola, ubicada a las afueras de la ciudad de Ibagué en donde los cinco esquemas evaluados para tratar niveles críticos registrados en esta Planta no pudieron solucionar los problemas de turbidez se recomienda hacer un estudio más detallado no solo con software a nivel computacional, sino además apoyar estos experimentos con una toma de muestra en laboratorios para analizar a detalle muestras provenientes del afluente cuando la ciudad atraviese la temporada invernal ya que es la época en la que más se ve esforzada la planta con el tratamiento del afluente.
- Según las RAS 330 de 2017 que es la norma que rige en nuestro país en la cual dice que para un filtro de arena rápido sea convencional o directo su turbiedad debe ser menor a 8 NTU, para la filtración lenta en una sola etapa el nivel de turbiedad de entrada al filtro debe ser menor a 15 NTU, para una filtración de diversas etapas el nivel de turbiedad de entrada al filtro debe ser menor a 80 NTU. Para el esquema uno el caudal de entrada tiene un nivel de turbiedad de 2500 NTU, para el segundo esquema el nivel de turbiedad de entrada al filtro es de 1730 NTU, para el tercer esquema su nivel de turbiedad a la entrada del filtro es de 711 NTU, para el esquema 4 el nivel de turbiedad a la entrada del filtro es de 1074 NTU para el esquema cinco el nivel de turbiedad de entrada al filtro es de 475 NTU. Teniendo estos datos se considera no poner un filtro de arena sino una membrana.
- Para continuar con la investigación es de vital importancia tener información más detallada de los procesos llevados a cabo al interior de la Planta de manera que se puedan hacer laboratorios como Test de Jarras para revisar la dosificación de coagulante que se lleva en la PTAP.

- De acuerdo a los resultados obtenidos en el esquema seis, donde se considera un sedimentador de alta tasa con tres trenes de operación y una membrana, se recomienda hacer un estudio más detallado de este diseño para acondicionar las operaciones logradas en este modelo a la planta existente teniendo en cuenta los costos que implica la instalación, el mantenimiento de la nueva estructura y mediante la implementación de la misma a la operación que posee la planta para que de esta forma se vea mejorado el rendimiento de esta unidad, cuando la turbidez se presente con niveles elevados o por fuera de los estimados para el diseño que fue dispuesto en la planta.

- Como se pudo observar al final de los esquemas externos, se cumplieron los parámetros de calidad de agua en cada uno. Para hacer uso de estos esquemas se recomienda hacer un estudio comparativo entre estas dos unidades (laguna y membrana) sobre cual es más eficiente en remoción, y cual trae mayores beneficios en relación costo-operación y costo-mantenimiento, ya que como se mencionó antes cada una de ellas trae aspectos a favor y en contra que merecen ser tenidos en cuenta si se quiere tener una verdadera optimización de los parámetros de agua para consumo humano.

14. BIBLIOGRAFÍA.

ANONIMO. (2016). Turbidez. Febrero 14, 2020, de Lenntech Sitio web: <https://www.lenntech.es/turbidez.htm#%C2%BFCu%C3%A1l%20es%20la%20m%C3%A1xima%20turbidez%20permitida%20en%20el%20agua%20para%20consumo%20humano?>

ANONIMO. (2018). Optimización de la Bocatoma Combeima, obra que seguirá asegurando Agua a los ibaguereños. Junio 23, 2019, de IBAL Sitio web: <http://ibal.gov.co/node/891>

ATOM. (2009). Sistema de tratamiento del agua. Junio 23, 2019, de Blogspot Sitio web: <http://sistemadetratamientodelagua.blogspot.com/2009/04/bocatoma.html>

Cárdenas, Y. (2000). COAGULACIÓN Y FLOCULACIÓN. Mayo 13, 2020, de SEDEPAL Sitio web: http://www.sedapal.com.pe/c/document_library/get_file?uuid=2792d3e3-59b7-4b9e-ae55-56209841d9b8&groupId=10154

Consejo Nacional De Economía Política Y Social. (2009, Febrero 10). Estrategias De Mitigación De Riesgo En La Cuenca Del Rio Cobeima Para Garantizar El Abastecimiento De Agua En La Ciudad De Ibagué. COMPES, (p. 6-22).

CORTOLIMA. (2002). Agenda Ambiental del Municipio de Ibagué. Marzo 04, 2019, de Corporación Regional Autónoma del Tolima Sitio web: https://www.cortolima.gov.co/sites/default/files/images/stories/centro_documentos/estudios/agendas/2002_Agenda_Ambiental_del_Municipio_de_Ibague_Completa.pdf

CORTOLIMA. (2016). El Recurso Hídrico de Ibagué es Suficiente para Abastecer a la Población. Marzo 18, 2019, de Corporación Regional Autónoma del Tolima Sitio web: <https://www.cortolima.gov.co/boletines-prensa/recurso-hidrico-ibagu-suficiente-abastecer-poblaci-n>

FLOREZ, Jorge A. RENGIFO, Hugo F. OSPINA, Oscar E. (2015, Marzo 31). Análisis experimental de la distribución de caudal en los sedimentadores de una planta de tratamiento de agua potable. INGENIUM Ciencia & Tecnología, No 9, (p. 6-23).

IBAL (empresa ibaguereña de acueducto y alcantarillado) Línea disponible en: <https://www.ibal.gov.co/>

IBAL. (2017). Reseña Histórica. Marzo 12, 2019, de IBAL Sitio web: <https://www.ibal.gov.co/resena-historica>

Marcó, L. Azario, R. Metzler, C., & Garcia, C. (2004). Descripción general del sistema de potabilización. En La turbidez como indicador básico de calidad de aguas potabilizadas a partir de fuentes superficiales. Propuestas a propósito del estudio del sistema de potabilización y distribución en la ciudad de Concepción del Uruguay (Entre Ríos, Argentina)(p.11). Concepción del Uruguay: Programa Salud para todos, Cátedra de Salud Pública de la Facultad de Ciencias de la Salud, Universidad Nacional de Entre Ríos.

Md. Asrafuzzaman, A. N. M. Fakhruddin, and Md. Alamgir Hossain, 'Reduction of Turbidity of Water Using Locally Available Natural Coagulants', *ISRN Microbiology*, 2011 (2011), 1–6 Disponible en: [<https://doi.org/10.5402/2011/632189>].

Ministerio de Salud. (1998). CAPITULO III. NORMAS ORGANOLEPTICAS, FISICAS, QUIMICAS Y MICROBIOLOGICAS DE LA CALIDAD DEL AGUA POTABLE. En Decreto 475 de 1998(p. 04). Bogotá D.C: Ministerio de Salud.

Ministerio de Desarrollo Económico. (2017). Capítulo 2, Sección 2, Artículo 54. En Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico - RAS (p. 38-39). Bogotá D.C. Universidad De Los Andes.

Ministerio de Desarrollo Económico. (2017). Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico - RAS. Bogotá D.C: Universidad de los Andes.

Ministerio de Salud. (2019). RESULTADOS DE LA VIGILANCIA DE LA CALIDAD DEL AGUA PARA CONSUMO HUMANO EN COLOMBIA, 2018. En Estado de la Vigilancia de la Calidad del Agua para Consumo Humano en Colombia, 2018(pp. 13-15). Instituto Nacional de Salud: ANONIMA.

MINISTROS DE LA PROTECCIÓN SOCIAL Y DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. (Junio 22, 2007). Capítulo 1, Definiciones. En RESOLUCIÓN NÚMERO 2115 de 2007(p.02). MINISTERIO DE LA PROTECCIÓN SOCIAL MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL: Congreso de la República.

MUSTAFÁ, Iván Fernando. (2010). B2. Demanda de Agua. En Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable Y Saneamiento Básico-RAS (p. 22-24). Bogotá D.C. Universidad de los Andes.

Naranjo, G., Palomino, A., Sánchez, A., Moreno, J., Castro, M., Perdomo, M.C., & Maldonado, C. (2017). SISTEMA MATRIZ DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE SECTOR SUR DE LA CIUDAD DE IBAGUÉ.. Bogotá: CONSORCIO IEH GRUCON - PROFINVEST. p.27

NATHANSON, Jerry A. (2019). Water supply system. Marzo 04, 2019, de ENCYCLOPEDIA BRITANNICA Sitio web: <https://www.britannica.com/technology/water-supply-system>

Organización de Naciones Unidas. (2019). Agua. Mayo 10, 2020, de ONU Sitio web: <https://www.un.org/es/sections/issues-depth/water/index.html>

OSPINA, Oscar E. (2015, Diciembre 11). Análisis De La Contaminación Microbiológica En El Rio Cobeima, Municipio De Ibagué. SciELO, No 2, (p. 5-10).

OSPINA, Oscar E.. (2014). Evaluación de la calidad del agua de lluvia para su aprovechamiento y uso doméstico en Ibagué, Tolima, Colombia. Ingeniería Solidaria, No 10, (p.129-142).

Park,W., Jeong, S., Im, S., & Jang, A, . (2019, Diciembre 14). High turbidity water treatment by ceramic microfiltration membrane: Fouling identification and process optimization. Environmental Technology & Innovation , Volúmen 17, p. 09. 2020, Marzo 09, De Science Direct Base de datos.

Pianta, R., Boller, M., Urfer, D., Chapazz, A., & Gmunder, A. (2000, Julio 05). Costs of conventional vs. membrane treatment for karstic spring water. Desalination, Volúmen 131, pp. 06-09. 2020, Mayo 19, De Science Direct Base de datos.

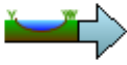
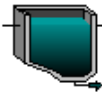






Ren, J. Li, N. Wei, H. Li, A., & Yang, H.. (2019). A modified chemical sedimentation for removal of TP from turbid water was provided.. En Efficient removal of phosphorus from turbid water using chemical sedimentation by FeCl₃ in conjunction with a starch-based flocculant Journal of Water Process SANCHEZ, Jenny P. JEREZ, Leidy K. Estudio Del Porcentaje De Eficiencia De La Remoción De Arenas En Desarenadores De Flujo Horizontal Al Construirlos Respecto A Teorías De Diseño. (p. 23-39). (2018). En: http://repository.lasalle.edu.co/bitstream/handle/10185/28361/40121137_2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y Engineering, Volúmen 36, p. 04. 2020, Marzo 02, De Science Direct: Base de Datos.

Sánchez, A. (2015). CAPÍTULO 2. TEORIA DE TANQUES SEDIMENTADORES. En EVALUACIÓN DE UN SEDIMENTADOR DE ALTA TASA CON UN MODELO DE DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL (DFC)(pp. 15-23). México D.F: UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.

Singh, B., & Kumar, P. (2020, Abril 21). Pre-treatment of petroleum refinery wastewater by coagulation and flocculation using mixed coagulant: Optimization of process parameters using response surface methodology (RSM). Journal of Water Process Engineering, Volúmen 36, p. 16. 2020, Mayo 14, De Science Direct Base de datos.

ANEXOS

Anexo 1 Representación de las unidades de una PTAP

AGUA DE RÍO	CÁMARA DE ARENA
	
SEDIMENTADOR RECTANGULAR	SEDIMENTADOR DE ALTA TASA
	
DEPÓSITO DE LODOS	MICROSCREEN DE CORREA
	
DESINFECCIÓN	MEMBRANA
	
RESULTADO FINAL DEL AGUA	LAGUNA DE SEDIMENTACIÓN
