



OPTIMIZACION DE LOS PROCESOS (COAGULACIÓN, FLOCULACIÓN, SEDIMENTACIÓN, FILTRACIÓN Y DESINFECCIÓN) DE LA PLANTA DE POTABILIZACION DE AGUA DEL MUNICIPIO DE HATO COROZAL, CASANARE.

ALVARO YESID RIVERA CORREA

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
SEDE PAMPLONA
FACULTAD DE INGENIERIAS Y ARQUITECTURA
INGENIERIA AMBIENTAL
PAMPLONA
2018





**OPTIMIZACION DE LOS PROCESOS (COAGULACIÓN, FLOCULACIÓN,
SEDIMENTACIÓN, FILTRACIÓN Y DESINFECCIÓN) DE LA PLANTA DE
POTABILIZACION DE AGUA DEL MUNICIPIO DE HATO COROZAL,
CASANARE.**

ALVARO YESID RIVERA CORREA

**Trabajo de grado para optar por el título de
Ingeniero Ambiental**

**Director de trabajo de grado
Msc. Julio Isaac Maldonado Maldonado
Director del programa de Ingeniería Ambiental**

**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
SEDE PAMPLONA
FACULTAD DE INGENIERIAS Y ARQUITECTURA
INGENIERIA AMBIENTAL
PAMPLONA
2018**





Nota de aceptación

Presidente del jurado

Jurado

Jurado

Pamplona, Norte de Santander. 15 de Junio del 2018.





Agradezco...

A Dios, por siempre guiar mi camino y darme la fortaleza para afrontar los obstáculos de la vida.

A Yesid, mi padre, porque es mi más grande ejemplo de superación y solidaridad. Por su esfuerzo y apoyo incondicional en cada etapa de mi vida.

A Zuleima mi madre, por sus consejos y aliento en los momentos de dificultad. Por su amor sincero y por enseñarme el verdadero valor de la vida.

A Daniel y Juan Camilo, mis hermanos, por todas las experiencias y momentos juntos.

A toda mi familia, abuelos, tíos y primos; porque siempre han querido lo mejor para conmigo.

A mis profesores, por tener la paciencia y sabiduría de transmitir sus conocimientos.

Y por último a todas aquellas que han estado en mi vida, que de una u otra manera aportaron en la consecución de mis objetivos.

Muchas gracias.





TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN.....	12
ABSTRACT	13
INTRODUCCION.....	14
1. HATO COROZAL Y SU PLANTA DE TRATAMIENTO	15
1.1 CARACTERISTICAS GENERALES DEL MUNICIPIO DE HATO COROZAL	15
1.2 DESCRIPCION EMPRESAS PÚBLICAS DE HATO COROZAL.....	16
1.3 DESCRPCION DEL SISTEMA DE ABASTECIMIENTO	17
1.3.1 Fuente de abastecimiento.....	17
1.3.2 Captación.	17
1.3.3 Conducción del agua captada.....	17
1.4 DESCRIPCION GENERAL DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO	17
1.4.1 Desarenador.....	18
1.4.2 Tubería de agua cruda.....	18
1.4.3 Aforo y coagulación.	18
1.4.4 Floculación- sedimentación.....	18
1.4.5 Filtración.	19
1.4.6 Desinfección.	19
1.4.7 Almacenamiento y distribución.	19
2. EVALUACION A LOS PROCESOS DE POTABILIZACION	20
2.1 COAGULACION.....	20
2.1.1 Condiciones iniciales.	21
2.1.2 Selección de parámetros óptimos.	22
2.1.3 Almacenamiento, manejo y dosificación de sustancias químicas.....	30
2.1.4 Mezcla rápida.	32
2.2 FLOCULACION.....	35
2.2.1 Tiempo de mezcla lenta.	35





¡Estoy comprometida!

2.2.2	Gradiente óptimo de mezcla lenta.....	37
2.2.3	Distribución y tiempo de retención reales en las unidades	39
2.2.4	Gradientes reales en los floculadores	42
2.3	SEDIMENTACION	44
2.3.1	Tiempo de retención hidráulico	45
2.3.2	Eficiencia de sedimentación.....	45
2.3.3	Carga hidráulica superficial.....	46
2.3.4	Manejo y tratamiento de lodos	47
2.4	FILTRACION.....	48
2.4.1	Características del proceso de filtración.....	48
2.4.2	Características del proceso de lavado	51
2.5	DESINFECCION	55
2.5.1	Tiempo de contacto	55
2.5.2	Dosis óptima de cloro	56
2.5.3	Corrección de pH.....	58
2.5.4	Calidad de agua tratada.....	58
3.	ANALISIS Y OPTIMIZACIONES.....	59
3.1	PROCESO DE COAGULACION	59
3.2	PROCESO DE FLOCULACION.....	60
3.3	PROCESO DE SEDIMENTACION	61
3.4	PROCESO DE FILTRACION.....	61
3.5	PROCESO DE DESINFECCION.....	63
3.6	AGUA TRATADA	64
4.	CONCLUSIONES.....	65
	RECOMENDACIONES.....	66
	BIBLIOGRAFIA.....	67
	ANEXOS	69





LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Dosificación de sustancias en la coagulación _____	21
Tabla 2. Propiedades del agua cruda trabajadas _____	22
Tabla 3. Dosis de sulfato aplicado _____	23
Tabla 4. Dosis optima de cada turbiedad trabajada _____	26
Tabla 5. Concentración de sulfato aplicado _____	26
Tabla 6. Concentraciones óptimas para cada turbiedad trabajada _____	28
Tabla 7. PH de coagulación trabajado _____	28
Tabla 8. PH óptimos de coagulación para cada turbiedad trabajada _____	30
Tabla 9. Caudal de coagulante _____	32
Tabla 10. Caudal de cal _____	32
Tabla 11. Medidas de la canaleta parshall _____	33
Tabla 12. Condiciones hidráulicas de la canaleta parshall _____	34
Tabla 13. Tiempo de mezcla trabajado _____	35
Tabla 14. Tiempos óptimos de mezcla lenta seleccionados _____	37
Tabla 15. Gradiente de mezcla lenta trabajados _____	37
Tabla 16. Gradientes óptimos seleccionados _____	39
Tabla 17. Calculo de velocidades en el canal de agua coagulada _____	40
Tabla 18. Distribución de agua en las unidades de floculación _____	41
Tabla 19. Tiempos de retención hidráulicos en los floculadores _____	41
Tabla 20. Perdidas por carga en las unidades de floculación _____	43



¡Estoy comprometida!

Tabla 21. Gradientes reales de floculación	44
Tabla 22. Tiempo de retención de los sedimentadores	45
Tabla 23. Eficiencia de sedimentación	46
Tabla 24. Carga hidráulica superficial de los sedimentadores	47
Tabla 25. Velocidad y caudal en los filtros	49
Tabla 26. Caudal y tasa media de filtración	49
Tabla 27. Eficiencia de las estructuras de filtración	50
Tabla 28. Caudal y velocidad de lavado	52
Tabla 29. Duración del proceso de lavado	53
Tabla 30. Alturas dentro del filtro	55
Tabla 31. Dosificación de cloro	56
Tabla 32. Cloro residual en la red, Vereda el Cedral y barrio Villa Juliana	57
Tabla 33. Calidad del agua suministrada	58
Tabla 34. Comparación de parámetros	59
Tabla 35. Condiciones óptimas de floculación	60
Tabla 36. Comparación de eficiencias de sedimentación	61
Tabla 37. Características del material filtrante	62
Tabla 38. Condiciones del lecho filtrante	62
Tabla 39. Características del agua tratada	64



LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Ubicación geográfica del municipio de Hato corozal, Casanare _____	15
Figura 2. Variación de la turbiedad y el color en el tiempo de muestreo. _____	20
Figura 3. Variación del pH durante el tiempo de muestreo _____	21
Figura 4. Comportamiento de la turbiedad remanente según la dosis de sulfato aplicada _____	24
Figura 5. Comportamiento de la turbiedad remanente según la dosis de sulfato aplicada _____	24
Figura 6. Comportamiento del color según la dosis de sulfato aplicado _____	25
Figura 7. Comportamiento del color según la dosis de sulfato aplicado _____	25
Figura 8. Comportamiento de la turbiedad según la concentración de sulfato aplicada _____	27
Figura 9. Comportamiento del color según la concentración de sulfato aplicada _____	27
Figura 10. Comportamiento de la turbiedad remanente según el pH de coagulación _____	29
Figura 11. Comportamiento del color según el pH de coagulación _____	29
Figura 12. Esquema de la canaleta parshall _____	33
Figura 13. Comportamiento de la turbiedad según el tiempo de mezcla lenta _____	36
Figura 14. Comportamiento del color según el tiempo de mezcla lenta. _____	36
Figura 15. Comportamiento de la turbiedad según el gradiente de mezcla _____	38
Figura 16. Comportamiento del color según el gradiente de mezcla _____	38
Figura 17. Comportamiento de la turbiedad en el proceso de lavado _____	53
Figura 18. Comportamiento del color en el proceso de lavado _____	54



¡Estoy comprometida!

Figura 19. Variación de la concentración _____ 57





LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. ENSAYO DE JARRAS _____	69
ANEXO B. COAGULACION _____	81
ANEXO C. REGISTRO FOTOGRAFICO _____	84





RESUMEN

Para la evaluación de la planta de tratamiento de agua potable del municipio de Hato corozal y manejada por la empresa de servicios públicos EPHAC SA ESP se tuvo en cuenta las variables más importantes que inciden directamente con la calidad del agua tratada, verificando que todos los parámetros y características de las estructuras utilizadas en la potabilización cumplan con la normatividad colombiana; más específicamente con la resolución 2115 del 2007 y Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico.

Toda la información de los aspectos analizados en el desarrollo de la evaluación del funcionamiento y operación de los procesos de potabilización (coagulación; floculación; sedimentación; filtración y desinfección) con la finalidad de mejorar el tratamiento del agua se encuentra plasmada en el documento.

Mediante un muestreo se obtuvo una idea de las características del agua cruda que ingresa a la PTAP, y partiendo de esos valores se determinaban las variables óptimas y de funcionamiento de cada proceso involucrado. Con los resultados se plantearon conclusiones y las mejoras operacionales y/o estructurales requeridas para optimizar el tratamiento.



ABSTRACT

For the evaluation of the potable water treatment plant of the municipality of Hato Corozal and managed by the utility EPHAC SA ESP, the most important variables that directly affect the quality of the treated water were taken into account, verifying that all the parameters and characteristics of the structures used in purification comply with Colombian regulations; more specifically with Resolution 2115 of 2007 and Technical Regulation of the Drinking Water and Basic Sanitation Sector.

All information on the aspects analyzed in the development of the evaluation of the operation and operation of the purification processes (coagulation, flocculation, sedimentation, filtration and disinfection) in order to improve water treatment is reflected in the document.

Through sampling, an idea was obtained of the characteristics of the raw water that enters the PTAP, and based on these values, the optimal and operating variables of each process involved were determined. With the results, conclusions were drawn and the operational and / or structural improvements required to optimize the treatment.





INTRODUCCION

El agua como servicio público es un bien que muchas personas utilizan cada día, pero también y desafortunadamente a tiempo de hoy con el desarrollo que existe y las grandes masas de dinero que manejan los países hay un sin número de personas que debido a que no cuentan con este beneficio reclaman, exigen y esperan acceder al tan preciado líquido.

El estado como ente gobernante debe garantizar el abastecimiento a cada persona que habita el territorio, pero la dificultad de cumplir con este deber aumenta debido a múltiples factores dentro de los cuales están el mal manejo de los recursos monetarios por parte del gobierno, la alta tasa de crecimiento poblacional, la contaminación del recurso agua y en ciertos casos la escasez del mismo; independientemente de la cantidad de población que este beneficiada del servicio es prioridad y obligación suministrar el líquido de excelente calidad, que cumpla con los valores óptimos de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos en un agua potable, que sea apta para el consumo humano y no genere problemas de salud. A raíz de lo anterior, como mecanismo de acción se implementa el tratamiento de agua en plantas de potabilización y un monitoreo constante en las redes de distribución.

Toda estructura utilizada en el tratamiento de agua potable debe tener un funcionamiento adecuado para que realice de forma correcta los procesos que se dan dentro de la misma, por lo que para el diseño inicial de una planta de tratamiento de agua potable (PTAP) se tienen en cuenta variables como la población a beneficiar, el periodo de diseño y las condiciones físico químicas y microbiológicas del agua cruda, puesto que tienen mayor relevancia y afectan directamente las características de la PTAP.

El periodo de diseño se considera como la cantidad de tiempo que teóricamente debe funcionar de forma correcta una estructura bajo las condiciones iniciales de construcción, pero básicamente casi siempre se comienzan a presentar problemas de eficiencia en el tratamiento, bien sea por el cambio de las condiciones hidráulicas, deterioro de las unidades o simplemente errores operacionales; y es allí donde se hace necesario realizar una evaluación general del funcionamiento de la PTAP que permita ver las falencias y errores, para posteriormente y en base a los resultados llevar a cabo todas las correcciones necesarias para mejorar el proceso.

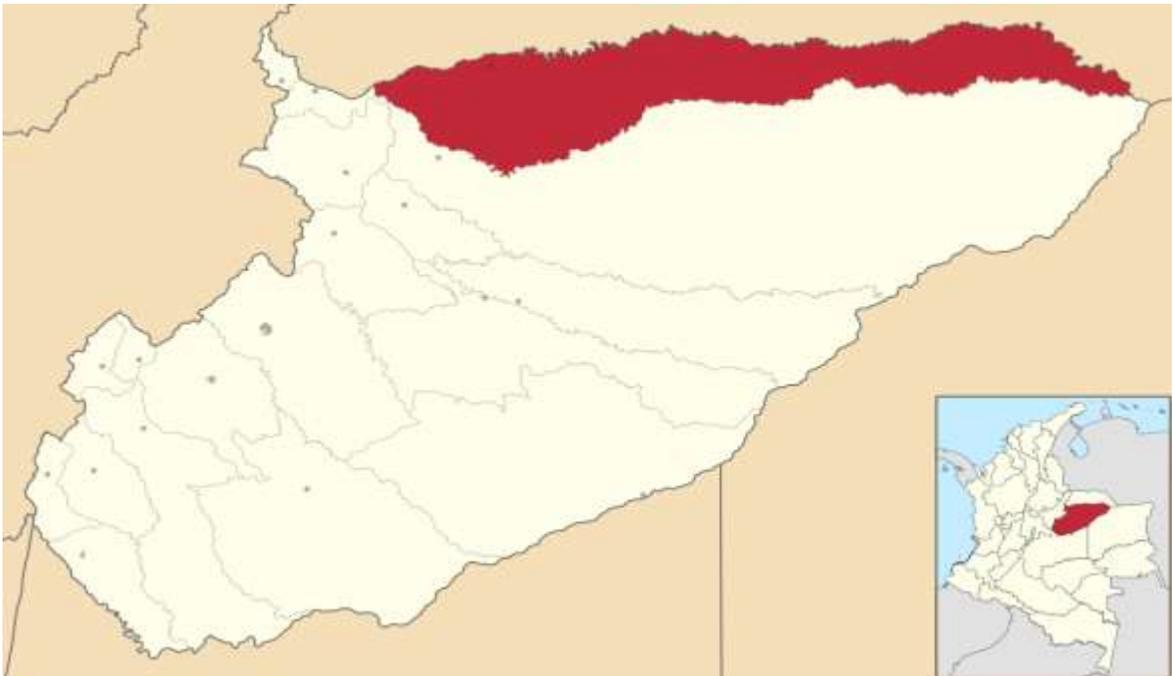


1. HATO COROZAL Y SU PLANTA DE TRATAMIENTO

1.1 CARACTERISTICAS GENERALES DEL MUNICIPIO DE HATO COROZAL

El municipio de Hato Corozal se encuentra ubicado en el departamento de Casanare, con coordenadas geográficas de $6^{\circ}19'27''$ de latitud Norte y $71^{\circ}45'55''$ de longitud Oeste, corresponde a la Orinoquia o llanos orientales colombianos, la unidad climática que se destaca es la cálida húmeda; la cual presenta temperaturas que oscilan entre 23 y 32 grados centígrados. Posee una población aproximada de 11.500 habitantes, una extensión de tierra de 5.436 kilómetros cuadrados en la cual encontramos los grandes paisajes de altiplanicie, lomerío, piedemonte, planicie y valle y debido a esta variedad paisajística la altitud media del municipio es de 250 metros sobre el nivel del mar.

Figura 1. Ubicación geográfica del municipio de Hato corozal, Casanare



Fuente: Alcaldía de Hato corozal.

Es un municipio próspero, rico en ganadería, agricultura y diversas especies de fauna y flora que conviven en un extraordinario hábitat sobre la vega de los ríos Chire, Aricaporo y Casanare. El uso del suelo del municipio se distribuye de la siguiente manera: Agricultura, Pastoreo, Protección-Conservación, Protección-



¡Estoy comprometida!

Producción y Extracción. Los principales usos que se le dan, es la agricultura y la ganadería. Las áreas aptas para la agricultura han sido desarrolladas en las zonas de vega de los ríos y en el piedemonte por pequeños propietarios, básicamente en cultivos de plátano, maíz y yuca que tienen como primer objetivo, el autoconsumo y también existen algunos cultivos tecnificados destinados a ser comercializados.¹

Los límites municipales establecidos en el decreto 870 de 1974 se determinan de la siguiente manera:

Con el Municipio de Paz de Ariporo: Partiendo de la desembocadura del río Ariporo, en el río Casanare, donde concurren los territorios de Hato Corozal y Paz de Ariporo en el límite con la Intendencia de Arauca.

Con el Municipio de Sácama: Partiendo del cerro Manare, donde se encuentra el vértice geodésico denominado “Manare 1136” donde concurren los territorios de Hato Corozal, Paz de Ariporo, Támara y Sácama.

Con el Departamento de Arauca: Este límite corresponde al río Casanare que divide el departamento de Casanare con el de Arauca.

1.2 DESCRIPCION EMPRESAS PÚBLICAS DE HATO COROZAL

EPHAC S.A E.S.P es una empresa ligada a la Alcaldía Municipal de Hato Corozal, tiene como responsabilidad los servicios de alcantarillado, acueducto y recolección de residuos sólidos. Actualmente cuenta con siete empleados en administración y ocho en el área operacional; en cabeza de la Gerente Diana Mairely Barón Quintero. Fue creada en el año 2008 por el alcalde de turno Joel Olmos Cordero.

Tiene como función realizar el manejo y mantenimiento de la red de alcantarillado que transporta el efluente a la planta de tratamiento de agua residual, del mismo modo se encarga del tratamiento de agua potable y toda la red de distribución, realiza la recolección de los residuos sólidos más no la deposición final

¹ ALCALDIA DE HATO COROZAL, “Nuestro Municipio” (En línea) (21 de marzo del 2018)

Disponible en:(http://www.hatocorozalcasanare.gov.co/informacion_general.shtml)



¡Estoy comprometida!

1.3 DESCRPCION DEL SISTEMA DE ABASTECIMIENTO

1.3.1 Fuente de abastecimiento.

El agua que se trata proviene de un afluente superficial llamado quebrada las guamas. En el sitio de captación, el cauce presenta una distancia de 6.1 metros de ancho y una lámina de agua de 0.5 metros en época de verano y 0.84 en invierno. Aguas arriba de la captación la quebrada también es utilizada para actividades agrícolas y ganaderas, debido a que las características del agua son muy buenas.

1.3.2 Captación.

Está ubicada a una distancia de 0.3 kilómetros del desarenador y 0.85 kilómetros de la PTAP. La captación del agua superficial se realiza a través de una estructura hidráulica denominada bocatoma de captación, destinada a derivar cierta cantidad de agua del cauce por medio de 2 rejillas de fondo, que tienen como medidas un ancho de 0.48 metros y 1.16 metros de largo, el agua recolectada cae al canal de recolección y es transportada a la cámara de recolección donde posteriormente y controlada por una válvula de cierre es dirigida al desarenador. El canal de recolección tiene 2.5 metros de longitud, 0.48 metros de ancho y una profundidad máxima de 0.5 metros.

1.3.3 Conducción del agua captada.

El agua captada llega al desarenador desde la cámara de recolección por medio de una tubería subterránea de PVC que consta de un tubo de 0.4064 metros (16") de diámetro y dos tubos de 0.2032 metros (8") de diámetro y cada uno tiene una longitud de 300 metros.

1.4 DESCRIPCION GENERAL DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO

La planta de potabilización de agua está ubicada a 6.5 kilómetros del casco urbano del municipio, es una estructura de tipo convencional donde se realizan todos los procesos necesarios para que el agua suministrada en la red de acueducto sea apta para el consumo humano. Fue construida en el año 2010 con una capacidad máxima de operación de 50 litros por segundo y un tiempo de retención total de 120 minutos. Actualmente la planta es operada la mayor parte del tiempo con un caudal de 19.02 litros por segundo, pero puede variar dentro de un rango de 11 a 23 litros por segundo; dependiendo de factores como es el mantenimiento y lavado de las estructuras, aumento excesivo de los parámetros fisicoquímicos de entrada y nivel del tanque de almacenamiento.





¡Estoy comprometida!

1.4.1 Desarenador.

La planta cuenta con una estructura desarenadora convencional de flujo horizontal de 270 metros cúbicos de volumen, está diseñada para retirar las partículas en suspensión más pesadas y con diámetros mayores a 0.2 milímetros de diámetro. El paso del agua hacia el desarenador es controlado por válvulas, consta de una cámara de entrada que reduce la velocidad del agua, una cámara de excesos, cámara de sedimentación, desagüe de lodos, pantallas de quietamiento y una cámara de salida. Las dimensiones totales son de 19.55 metros de largo, 5.69 metros de ancho y una profundidad media de 2.5 metros. Construido en concreto estructural con un ancho de muros de 0.24 metros.

1.4.2 Tubería de agua cruda.

El agua con el tratamiento preliminar de desarenación es llevada al punto de aforo por medio de un tubo subterráneo de PVC de 0.4068 metros (16") de diámetro y con una longitud de 0.55 kilómetros, el total del agua desarenada no es utilizada en la planta de potabilización, debido a que cierta cantidad es desviada para abastecimiento de veredas cercanas por medio de las tuberías de 8 pulgadas.

1.4.3 Aforo y coagulación.

El flujo proveniente del desarenador llega a una cámara de entrada donde su paso es controlado por una compuerta metálica, aguas arriba de la canaleta se le adiciona cal hidratada. La medición del caudal y la adición del coagulante se realizan en la canaleta parshall que tiene una garganta de 6 pulgadas y además es el lugar donde se lleva a cabo la mezcla rápida. El agua mezclada es llevada a las unidades de floculación a través de un canal de 3.2 metros de largo y 0.40 metros de ancho.

1.4.4 Floculación- sedimentación.

La PTAP maneja dos trenes de estructuras que funcionan de forma paralela. Cada tren tiene un floculador hidráulico de tipo Alabama, que a su vez tiene 9 compartimientos en forma de cuadrado, cada lado mide 1.3 metros y tienen una profundidad máxima de 3 metros. El ancho de muro entre cada compartimiento es de 0.2 metros y 0.3 metros los muros exteriores del floculador. De allí el agua floculada pasa al sedimentador del respectivo tren, esta estructura trabaja con un flujo ascendente; cuenta con paneles de tipo colmena (hexagonales) con una inclinación de 45 grados. Tiene 4.2 metros de largo, 4.3 metros de ancho y una profundidad útil de 4.9 metros, el agua clarificada es recolectada por dos canaletas de recolección fabricadas en fibra de vidrio y tienen como dimensiones una distancia de 4.2 metros de largo, 0.25 metros de ancho y una altura máxima de lámina de agua de 0.16 metros. Posteriormente el fluido es recolectado por una canal 8.9 metros que lo distribuye a las unidades de filtración.



¡Estoy comprometida!

1.4.5 Filtración.

Este proceso se lleva a cabo mediante seis filtros de tipo convencional, su lecho filtrante está compuesto por grava, arena y antracita, cada filtro tiene 1.24 metros de ancho, 2.35 metros de largo, una profundidad útil de filtración de 4.2 metros, 0.6 metros de borde libre y está construido en muros de 0.3 metros. El agua filtrada es recibida por un tanque de equilibrio el cual posee un vertedero que tiene como destino el serpentín donde se le adiciona soda caustica para corregir el pH. El lavado se hace mediante la tanque de equilibrio que recibe agua filtrada y actúa mediante diferencia de alturas de lámina de agua, el caudal del lavado es evacuado por una canaleta de 0.265 metros de ancho, 0.44 metros de altura total y con 16 orificios por lado de diámetro de dos pulgadas ubicados a 0.27 metros del fondo del canal.

1.4.6 Desinfección.

Se realiza mediante la adición de cloro gaseoso a un caudal de agua suministrado por una bomba, creando una solución hiperclorada la cual es suministrada al tubo de salida del tanque de almacenamiento por acción de la misma bomba. La mezcla es realizada en una caseta que está próxima al tanque de almacenamiento. El cloro es comprado en presentaciones de 68 kilogramos netos con 99 % de pureza y es producido por una empresa colombiana llamada Brinsa química.

1.4.7 Almacenamiento y distribución.

El almacenamiento se realiza en un tanque de concreto estructural de 1587 metros cúbicos de capacidad máxima, de forma cuadrada con medidas útiles de 23 metros y 3 metros de profundidad, con muros de 0.3 metros de ancho. La salida de agua del tanque se realiza por un tubo de 0.6096 metros (24") de diámetro donde es llevada a toda la red de distribución por acción de la gravedad.

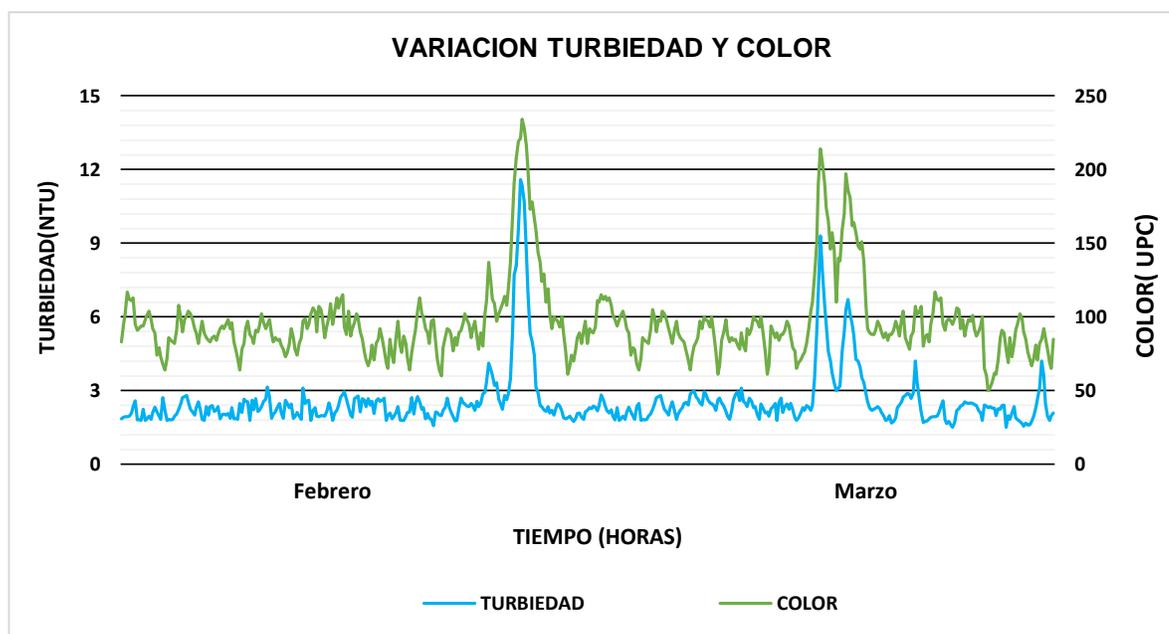
2. EVALUACION A LOS PROCESOS DE POTABILIZACION

La evaluación consiste en tener en cuenta el funcionamiento y la operación actual de la planta para cada proceso que compone el tratamiento del agua, y además los resultados obtenidos en cada prueba realizada para buscar las condiciones óptimas de funcionamiento y operación de cada etapa, mediante esa información se generan todas las mejoras operacionales o estructurales que deben realizarse para obtener la mayor eficiencia en el sistema potabilizador. Debido a la falta de equipos para realizar medidas de un mayor número de parámetros se establece que para este caso los valores fisicoquímicos que se tienen en cuenta a lo largo de la evaluación son el color, la turbiedad, pH y temperatura.

2.1 COAGULACION

La evaluación de este proceso incluye la selección de parámetros óptimos, manejo, almacenamiento y dosificación de sustancias utilizadas en esta etapa y mezcla rápida. En primer lugar se fijan las condiciones iniciales de funcionamiento del proceso dentro la PTAP para tener un punto a comparar. Los valores de los parámetros a tener en cuenta fueron obtenidos del muestreo compuesto realizado durante 20 días, y se obtuvieron los datos presentados en la figura 2. Mediante un análisis estadístico se seleccionaron los datos más frecuentes de turbiedad y color agrupados en intervalos.

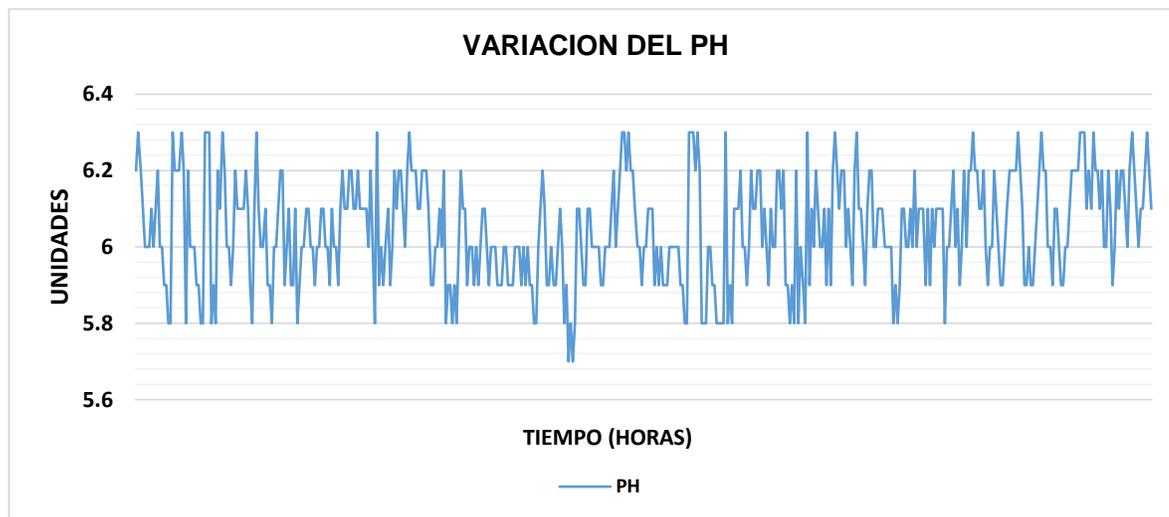
Figura 2. Variación de la turbiedad y el color en el tiempo de muestreo.



Fuente: Autor.

Inicialmente se había establecido utilizar los registros de mediciones de parámetros fisicoquímicos de la planta junto con los del muestreo realizado, pero no se llevó de esa forma debido a que los registros encontrados no son confiables puesto que tienen muchos datos faltantes.

Figura 3. Variación del pH durante el tiempo de muestreo



Fuente: Autor

Como resultado del muestreo se determina que el agua cruda que entra en la planta es ligeramente acida, todos los valores medidos se encuentran en un rango de 5.7 a 6.3 unidades.

2.1.1 Condiciones iniciales.

En la tabla 1 se muestra los valores de dosis y concentración de coagulante que se utilizan normalmente en la operación de la planta dependiendo de la turbiedad que está entrando, también el caudal de cal que se suministra al agua pero teniendo en cuenta que no manejan un pH óptimo de coagulación, la selección de dicho caudal se realiza de forma objetiva por parte del operario.

Tabla 1. Dosificación de sustancias en la coagulación

Turbiedad (UNT)	Color (UPC)	Caudal de coagulante (mL/min)	Dosis de coagulante (mg/L)	Concentración	Caudal de cal al 1% (mL/min)
0-3	80-135	1100	10	1%	200
3.01-6	80-180	1600	21	1.5%	200
6.01-9	180-220	2000	35	2%	400
9.01-12	220-280	2400	42	2%	400

Fuente: Autor.



El almacenamiento se realiza en una bodega debidamente ventilada, que evita la exposición directa a los rayos del sol y brinda un buen ambiente, las sustancias están separadas del suelo gracias a pallets de carga, en dicha estructura se alberga el sulfato de aluminio, la cal y la soda caustica; todas en estado sólido. El manejo por parte del personal se lleva a cabo con la debida seguridad, cumpliendo con la vestimenta y elementos de protección necesarios para no sufrir problemas por el contacto con los químicos. La cantidad necesaria se verifica por medio de una balanza de resorte tipo reloj.

La mezcla rápida se genera gracias al resalto hidráulico que tiene lugar en la parshall, debido a que esta estructura es de difícil modificación las condiciones de funcionamiento normal se adoptan como óptimas.

2.1.2 Selección de parámetros óptimos.

Para determinar estos parámetros se establece que las propiedades a controlar en las pruebas fueron el color y la turbiedad, pero con un poco más de relevancia el color, puesto que es el factor que genera más inconvenientes según los operarios.

Se empleó el método de pruebas de jarras, este equipo funcionaba con jarras de vidrio transparente de un litro cada una, sin deflectores; un motor de velocidad variable permite el movimiento de seis ejes verticales con paletas. De 0 a 300 revoluciones por minuto (RPM) es el rango de velocidad de funcionamiento del aparato. En el anexo A están las condiciones y los resultados de cada una de las pruebas de jarras realizadas.

En la tabla 2 se observa las propiedades iniciales del agua cruda que fue empleada para realizar las pruebas de jarras:

Tabla 2. Propiedades del agua cruda trabajadas

Turbiedad (UNT)	2.45	4.8	7.59	11.59
Color (UPC)	106	128	191	247
pH	6.2	5.9	5.8	5.8
Temperatura (°C)	24.3	24.3	23.8	23.9

Fuente: Autor.

Cada valor de las propiedades del agua a trabajar está dentro del rango elegido anteriormente para caracterizar las entradas de agua, buscando encontrar valores medios dentro de dichos rangos para garantizar que los valores óptimos que se obtengan funcionen adecuadamente en todo el intervalo.



2.1.2.1 Determinación de la dosis óptima de coagulante.

Se requiere determinar la dosis de coagulante que mejor actúe al momento de operación de la PTAP, debe ser el valor que genere menos turbiedad remanente y color al finalizar la prueba. El coagulante actúa de manera desestabilizante sobre las partículas incitándolas a unirse generando la formación de flocs de fácil sedimentación. Se utilizó sulfato de aluminio tipo A, inicialmente con una concentración del 1 %. Se realizaron dos pruebas de jarras para cada turbiedad con el fin de obtener más datos para garantizar una exacta determinación de la dosis óptima. Los resultados de las pruebas de jarras se pueden apreciar en el anexo A. Las dosis aplicadas al agua cruda y de acuerdo a la turbiedad trabajada se encuentran en la tabla 3.

Tabla 3. Dosis de sulfato aplicado

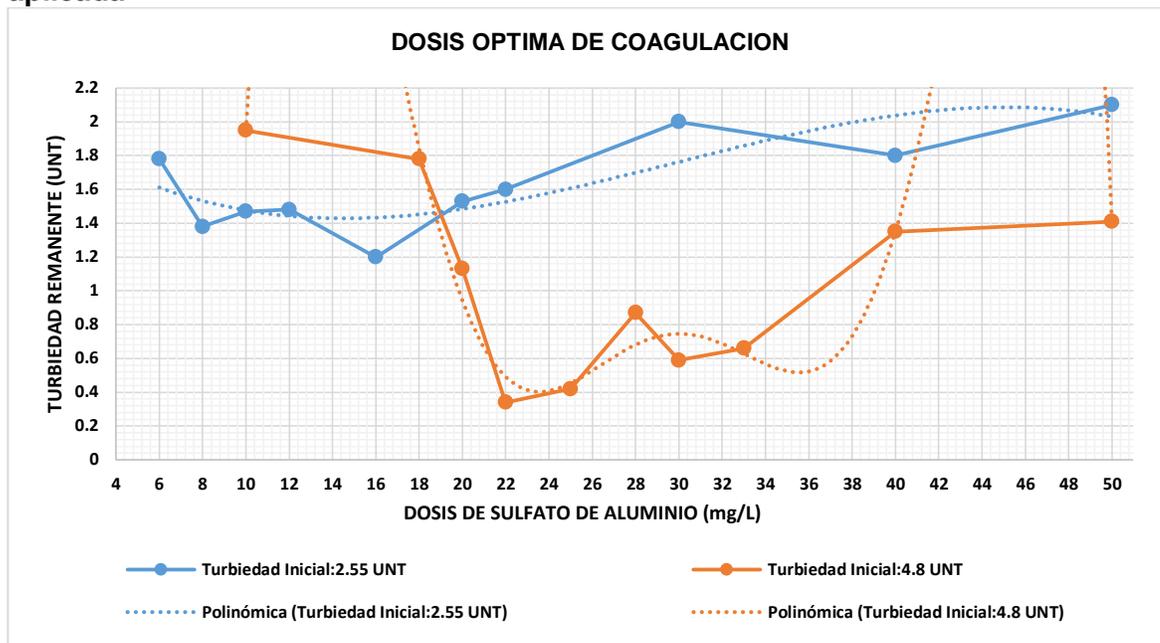
Turb. inicial: 2.55 UNT - Color Inicial:106 UPC			Turb. inicial: 4.8 UNT - Color Inicial:126 UPC		
Dosis de coagulante	Turbiedad remanente	Color	Dosis de coagulante	Turbiedad remanente	Color
6	1.78	33	10	1.95	60
8	1.38	31	18	1.78	55
10	1.47	29	20	1.13	44
12	1.48	28	22	0.34	36
16	1.2	22	25	0.42	38
20	1.53	26	28	0.87	48
22	1.6	32	30	0.59	44
30	2	42	33	0.66	43
40	1.8	42	40	1.35	56
50	2.1	39	50	1.41	60

Turb. inicial: 7.59 UNT - Color Inicial:191 UPC			Turb. inicial: 11.54 UNT - Color Inicial:247 UPC		
Dosis de coagulante	Turbiedad remanente	Color	Dosis de coagulante	Turbiedad remanente	Color
10	1.98	42	10	1.54	48
20	1.78	42	20	1.41	52
22	1.63	37	30	1.48	39
24	1.54	35	34	1.23	32
27	1.31	27	37	1.36	36
30	1.37	33	40	1.68	49
32	1.37	36	43	1.62	56
35	1.36	38	46	1.55	55
40	1.56	42	49	1.54	48
50	1.72	47	50	1.59	49

Fuente: Autor.

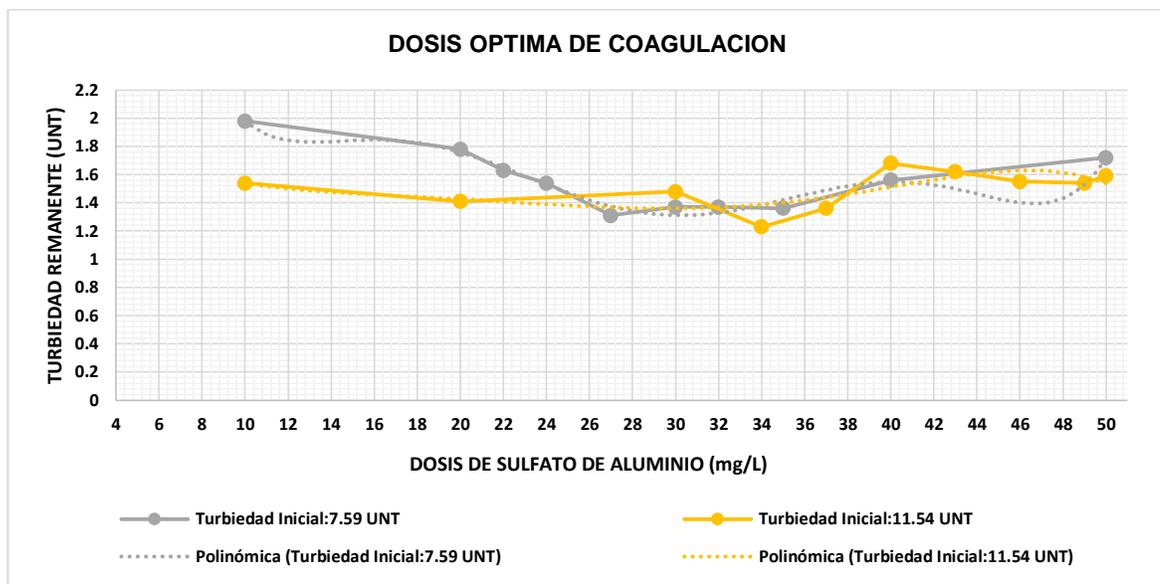
En las figuras 4, 5, 6 y 7 se puede observar el comportamiento de la turbiedad y el color remanente obtenido como resultados de las pruebas con el aparato de jarras.

Figura 4. Comportamiento de la turbiedad remanente según la dosis de sulfato aplicada



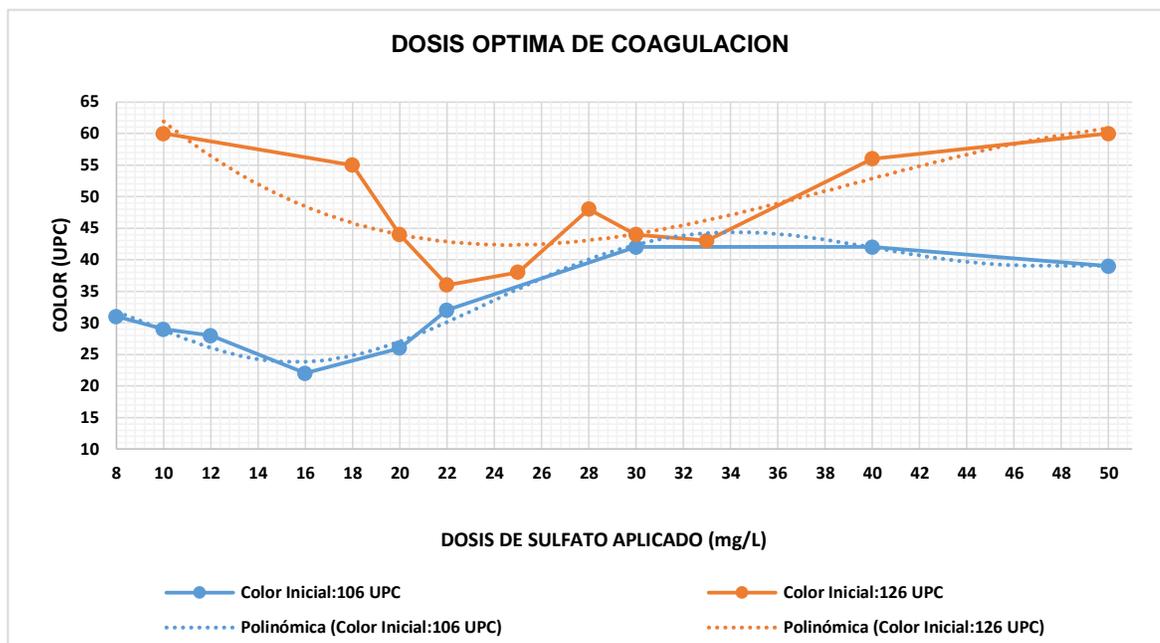
Fuente: Autor.

Figura 5. Comportamiento de la turbiedad remanente según la dosis de sulfato aplicada



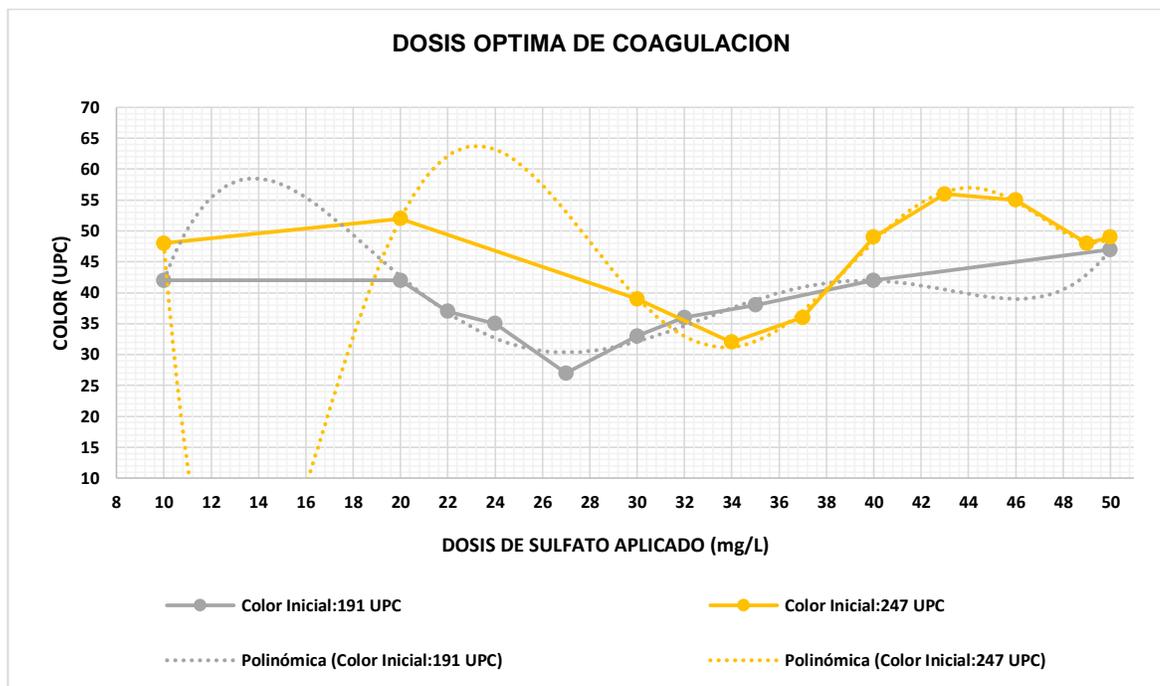
Fuente: Autor.

Figura 6. Comportamiento del color según la dosis de sulfato aplicado



Fuente: Autor.

Figura 7. Comportamiento del color según la dosis de sulfato aplicado



Fuente: Autor.

Las dosis óptimas se obtienen mediante la interpolación de las curvas ajustadas, cada parámetro arroja una dosis diferente pero bastante cerca entre sí, para facilitar la dosificación es recomendable seleccionar una dosis de número entero y para este caso se da un poco de relevancia al color a la hora de la selección. En la tabla 4 se pueden apreciar las dosis óptimas seleccionadas.

Tabla 4. Dosis óptima de cada turbiedad trabajada

Turbiedad (UNT)	Dosis óptima de coagulante (mg/L)		
	Según turbiedad	Según color	Dosis Seleccionada
0-3	13.9	15.8	16
3.01-6	23.8	23.2	23
6.01-9	28.5	27.1	27
9.01-12	34.5	33.9	35

Fuente: Autor.

2.1.2.2 Determinación de la concentración óptima del coagulante.

Es necesario determinar la concentración que bajo condiciones de operación ayude a generar una correcta floculación, para estas pruebas se utilizó las dosis óptimas obtenidas anteriormente. Se eligen concentraciones de 0.5 a 2.5 % con 0.5 de diferencia para facilitar la preparación del coagulante. En la tabla 5 se observa la turbiedad y el color remanente de acuerdo a la concentración de sulfato aplicado.

Tabla 5. Concentración de sulfato aplicado

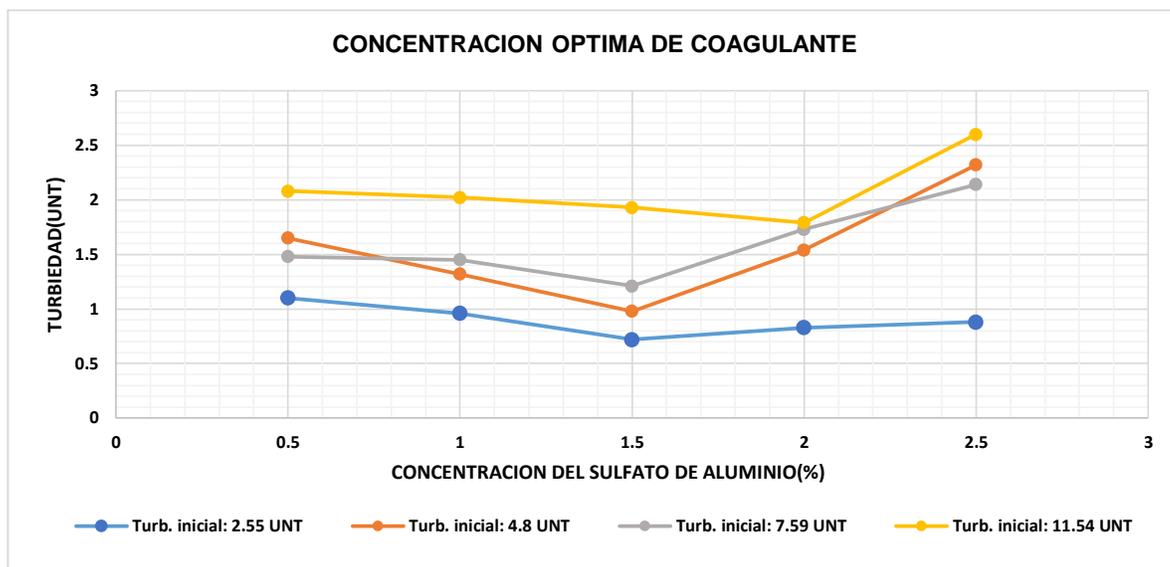
Turb. inicial: 2.55 UNT		Color Inicial:106 UPC		Turb. inicial: 4.8 UNT		Color Inicial:126 UPC	
Concentración de coagulante	Turbiedad remanente	Color	Concentración de coagulante	Turbiedad remanente	Color	Concentración de coagulante	Turbiedad remanente
0.5	1.1	46	0.5	1.65	56	0.5	1.65
1	0.96	31	1	1.32	35	1	1.32
1.5	0.72	22	1.5	0.98	28	1.5	0.98
2	0.83	46	2	1.54	51	2	1.54
2.5	0.88	55	2.5	2.32	72	2.5	2.32

Turb. inicial: 7.59 UNT		Color Inicial:191 UPC		Turb. inicial: 11.54 UNT		Color Inicial:247 UPC	
Concentración de coagulante	Turbiedad remanente	Color	Concentración de coagulante	Turbiedad remanente	Color	Concentración de coagulante	Turbiedad remanente
0.5	1.48	63	0.5	2.08	81	0.5	2.08
1	1.45	47	1	2.02	55	1	2.02
1.5	1.21	33	1.5	1.93	49	1.5	1.93
2	1.73	35	2	1.79	31	2	1.79
2.5	2.14	52	2.5	2.6	57	2.5	2.6

Fuente: Autor.

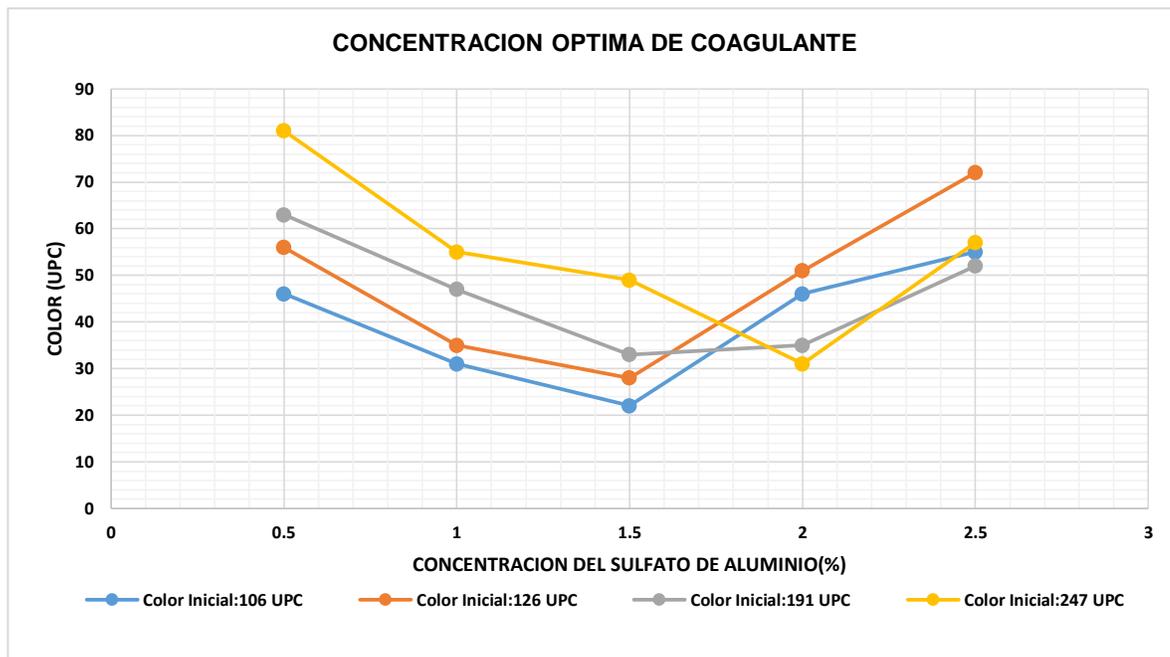
En las figuras 8 y 9 se puede observar el comportamiento de la turbiedad y el color remanente obtenido como resultados de las pruebas con el aparato de jarras según la concentración de sulfato aplicado.

Figura 8. Comportamiento de la turbiedad según la concentración de sulfato aplicada



Fuente: Autor.

Figura 9. Comportamiento del color según la concentración de sulfato aplicada



Fuente: Autor.

De acuerdo a los resultados obtenidos y su posterior análisis, en la tabla 6 se establecen las concentraciones óptimas para cada agua trabajada.

Tabla 6. Concentraciones óptimas para cada turbiedad trabajada

Turbiedad (UNT)	Concentración óptima de coagulante (%)		
	Según turbiedad	Según color	Concentración Seleccionada
0-3	1.5	1.5	1.5
3.01-6	1.5	1.5	1.5
6.01-9	1.5	1.5	1.5
9.01-12	2	2	2

Fuente: Autor.

2.1.2.3 Determinación del pH óptimo de coagulación.

Es un factor que influye con gran impacto en el proceso de coagulación, por lo cual se hace de vital importancia encontrar el pH óptimo exacto. Para estas pruebas se manejó un rango que va desde 4.5 hasta 8, adicionando ácido sulfúrico y cal, para bajar y subir el pH según fuese el caso. Los resultados fueron obtenidos utilizando los datos óptimos anteriores y se muestran en la siguiente tabla.

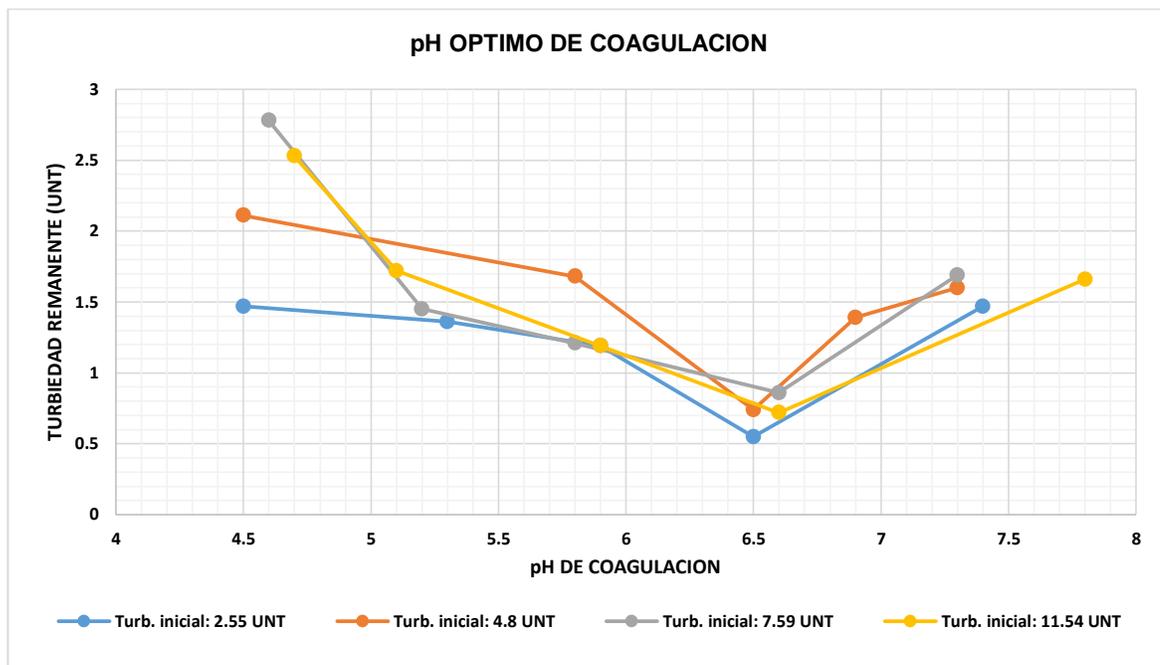
Tabla 7. PH de coagulación trabajado

Turb. inicial: 2.55 UNT		Color Inicial:106 UPC		Turb. inicial: 4.8 UNT		Color Inicial:126 UPC	
pH	Turbiedad remanente	Color	pH	Turbiedad remanente	Color	Turbiedad remanente	Color
4.5	1.47	58	4.5	2.11	69		
5.3	1.36	43	5.8	1.68	41		
5.9	1.19	32	6.5	0.74	16		
6.5	0.55	12	6.9	1.39	24		
7.4	1.47	38	7.3	1.6	43		
Turb. inicial: 7.59 UNT		Color Inicial:191 UPC		Turb. inicial: 11.54 UNT		Color Inicial:247 UPC	
pH	Turbiedad remanente	Color	pH	Turbiedad remanente	Color	Turbiedad remanente	Color
4.6	2.78	74	4.7	3.53	102		
5.2	1.45	59	5.1	1.72	85		
5.8	1.21	35	5.9	1.19	46		
6.6	0.86	14	6.6	0.72	18		
7.3	1.69	26	7.8	1.66	37		

Fuente: Autor.

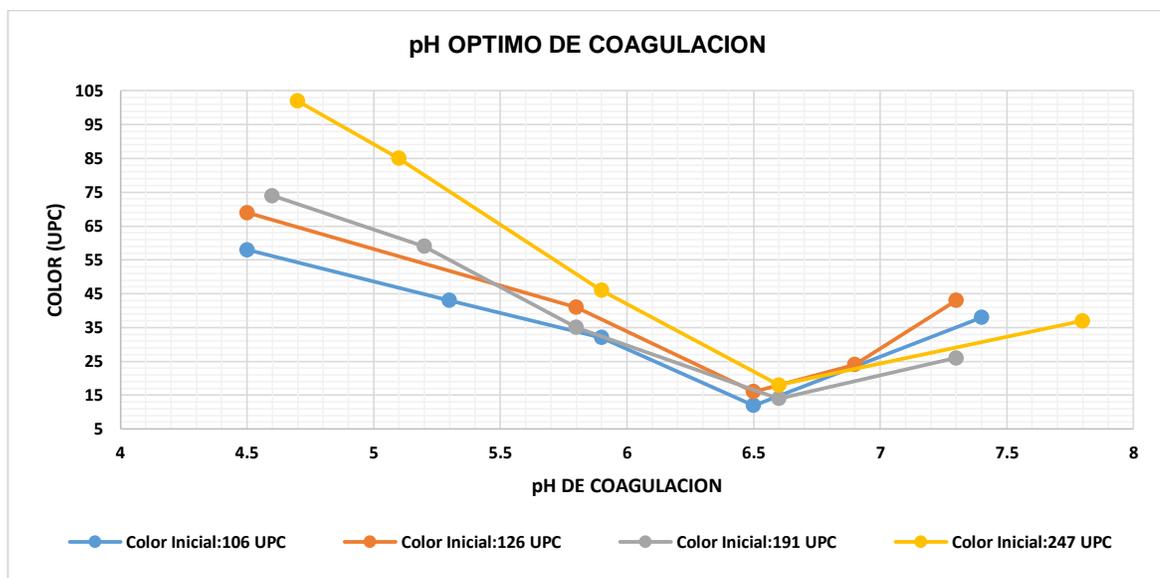
En las figuras 10 y 11 se puede observar el comportamiento de la turbiedad y el color remanente obtenido como resultados de las pruebas con el aparato de jarras según el pH de coagulación.

Figura 10. Comportamiento de la turbiedad remanente según el pH de coagulación



Fuente: Autor.

Figura 11. Comportamiento del color según el pH de coagulación



Fuente: Autor.



Los pH óptimos de coagulación seleccionados se pueden observar en la tabla 8.

Tabla 8. PH óptimos de coagulación para cada turbiedad trabajada

Turbiedad (UNT)	pH óptimo de coagulación		
	Según turbiedad	Según color	pH Seleccionado
0-3	6.5	6.5	6.5
3.01-6	6.5	6.5	6.5
6.01-9	6.6	6.6	6.6
9.01-12	6.6	6.6	6.6

Fuente: Autor.

2.1.3 Almacenamiento, manejo y dosificación de sustancias químicas.

2.1.3.1 Almacenamiento y manejo.

En las condiciones iniciales se establece que estos dos aspectos se están realizando de forma adecuada en la planta, sin embargo no está de más dar una pequeña ampliación al tema. El sulfato de aluminio es adquirido en estado sólido en presentaciones de 25 kilogramos y la cal de igual modo se recibe en estado sólido pero en sacos de 25 o 10 kilogramos. La bodega donde se almacena tiene las siguientes dimensiones: 5.8 metros de largo, 1.8 y 2.6 metros de ancho y alto respectivamente. Los operarios utilizan tapabocas, gafas, guantes, casco y overol para el manejo y posterior preparación de las sustancias.

2.1.3.2 Dosificación de sustancias químicas.

Para iniciar con la dosificación se debe tener en cuenta la preparación de las sustancias que se van a adicionar, por lo que cabe resaltar que los operarios de la PTAP están bien capacitados con respecto a ese punto y lo realizan de forma correcta, se realiza en tanques de 250 litros con un motor de 0.75 HP y 500 litros con un motor de 1.5 HP para la cal y el coagulante respectivamente y el suministro de la sustancia se controla a través de una llave de paso de media pulgada de diámetro.

Ahora para la dosificación se debe hallar los caudales correctos de cada sustancia que se agrega al agua cruda, y para eso se tienen en cuenta todos los parámetros óptimos obtenidos anteriormente y el caudal de agua que entra a la planta, para este caso se trabaja con 19.02 litros por segundo; pues es este valor con que funciona la PTAP la mayor parte del tiempo.





Para la determinación del caudal de coagulante se utiliza la siguiente ecuación:

Ecuación 1. Caudal de coagulante

$$Q_c = \frac{Q_e * [CM]}{[Cc] - [CM]}$$

Donde:

Q_c = Caudal del coagulante (L/s)

Q_e = Caudal de entrada de agua cruda (L/s)

[CM]= Concentración de la mezcla (mg/L)

[Cc]= Concentración del coagulante (mg/L)

Para la determinación del caudal de cal se parte del valor de pH promedio con el que entra el agua cruda a la planta, este valor obtenido del muestreo realizado; y además volumen gastado para realizar la corrección de pH para las turbiedades trabajadas. Y se utilizó la siguiente formula:

Ecuación 2. Determinación caudal de cal

$$Q_c = V_g * Q_e * 60$$

Donde:

Q_c = Caudal del cal (mL/min)

Q_e = Caudal de entrada de agua cruda (L/s)

V_g = Volumen gastado por litro de agua cruda (mL)

En la tabla 9 y 10 se muestran los caudales obtenidos.



Tabla 9. Caudal de coagulante

Turbiedad (UNT)	Color (UPC)	Dosis de coagulante (mg/L)	Concentración de coagulante	Caudal de coagulante(L/min)
0-3	80-135	16	1.50%	1.22
3.01-6	80-180	23	1.50%	1.75
6.01-9	180-220	27	1.50%	2.06
9.01-12	220-280	35	2.0%	2.00

Fuente: Autor.

Tabla 10. Caudal de cal

Turbiedad (UNT)	Color (UPC)	pH promedio de entrada	Volumen de cal gastado (mL)	Caudal de cal (mL/min) al 0.5%
0-3	80-135	6.10	0.88	1004
3.01-6	80-180	6.02	0.95	1084
6.01-9	180-220	5.97	1	1141
9.01-12	220-280	5.76	1.1	1255

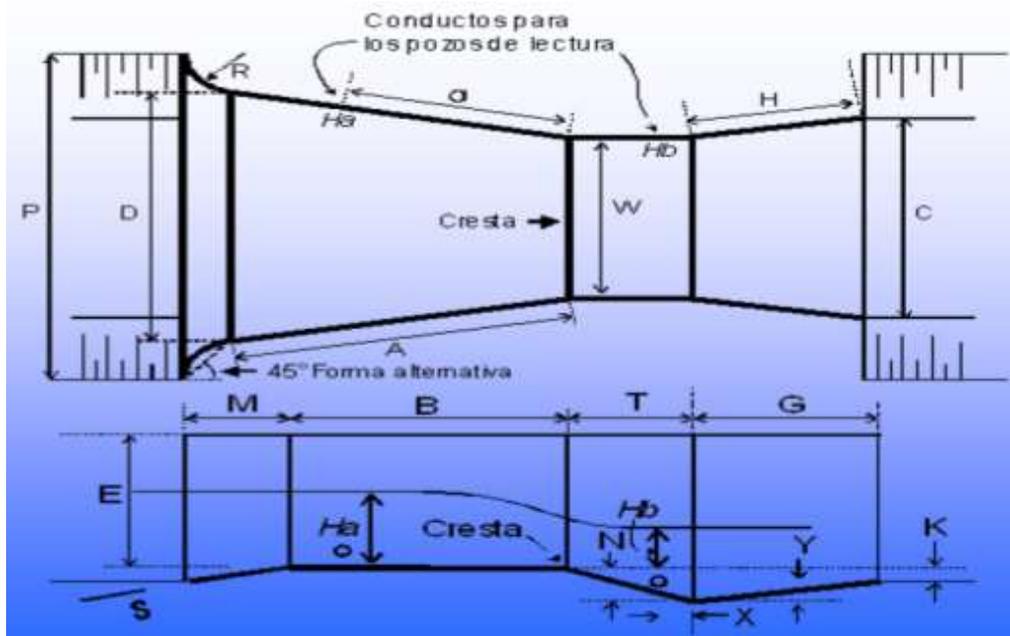
Fuente: Autor.

La medición del caudal de coagulante y cal que se suministra se realiza de manera manual, es decir, se cronometra el tiempo que pasa para obtener un volumen de la sustancia en una probeta aforada. El tiempo de aforo debe estar entre 25 a 45 minutos puesto que después de este tiempo se empieza a disminuir el caudal debido a la pérdida de altura en los tanques de preparación de cada sustancia.

2.1.4 Mezcla rápida.

Para esta etapa se realiza un análisis hidráulico a la canaleta, se obtuvo un tiempo de mezcla rápida de 0.8 segundos mediante el cálculo de la longitud del resalto y la velocidad media del agua, y además el gradiente de velocidad que se presenta en el resalto.

Figura 12. Esquema de la canaleta parshall



Fuente: Oliveras, Jordi. Canal parshall, casi cien años midiendo caudales.

Tabla 11. Medidas de la canaleta parshall

MEDIDA	TIPO (m)	REAL (m)	MEDIDA	TIPO (m)	REAL (m)
A	0.621	0.615	K	0.076	0.075
C	0.394	0.395	N	0.114	0.110
D	0.397	0.365	D'	0.315	0.293
T	0.305	0.300	W	0.1524	0.150

Fuente: Autor.

De la tabla 11 se observa que no existe gran variación entre las medidas de tipo diseño y la reales en el canal parshall. Estos valores son los utilizados para realizar el análisis hidráulico y los resultados son los siguientes presentados en la tabla 12, las ecuaciones utilizadas para el análisis se pueden observar en el anexo B.

Tabla 12. Condiciones hidráulicas de la canaleta parshall

Condiciones del canal	Medidas tipo	Medidas reales	Unidades
Caudal (Q)	0.01902	0.01902	m ³ /s
Lámina de agua en la entrada (ha)	0.150	0.150	m
Ancho de la canaleta en la sección D'	0.315	0.293	m
Velocidad en la sección D' (V ₁)	0.402	0.432	m/s
Energía específica en la sección D' (E ₁)	0.272	0.270	m
Velocidad antes del resalto (V ₂)	2.034	2.013	m/s
Altura de la lámina de agua antes del resalto (h ₂)	0.061	0.063	m
Numero de froude (F)	2.622	2.561	
Altura lámina de agua en la cresta del resalto (h ₃)	0.199	0.199	m
Sumergencia (S)	0.566	0.592	m
Perdida de carga (h _f)	0.203	0.197	m
Velocidad en la cresta del resalto (V ₃)	0.628	0.638	m/s
Altura lamina después del resalto (h ₄)	0.112	0.115	m
Velocidad después del resalto (V ₄)	0.431	0.419	m/s
Velocidad media (V _m)	1.031	1.023	m/s
Longitud del resalto (L _R)	0.825	0.815	m
Tiempo de mezcla rápida (TMR)	0.800	0.796	s
Energía específica después del resalto (E ₄)	0.159	0.159	m
Perdida de carga (Δh)	0.113	0.111	m
Gradiente de mezcla (G)	1229	1220	s ⁻¹

Fuente: Autor.

Los valores de tiempo y gradiente de mezcla rápida cumplen efectivamente con la norma colombiana (TMR <1 s y gradiente 1000 s⁻¹ < G < 2000 s⁻¹) (RAS 2000). Las pérdidas por carga que tienen lugar en el canal de transporte de agua coagulada son despreciables debido a que sus dimensiones son pequeñas. El número de froude me define si el flujo es estable o inestable, para el resalto debe ser inestable y estar en los valores de F < 1.7 y 2.5 < F < 4.5, por lo tanto en este caso es totalmente adecuado para el funcionamiento del canal.

2.2 FLOCULACION

Para este proceso se tienen en cuenta todos los parámetros óptimos obtenidos en las pruebas realizadas para la coagulación, el tiempo de mezcla lenta y el gradiente de mezcla serán las propiedades a encontrar por medio de la prueba de jarras. Se hallaran los tiempos de retención y gradientes reales de los floculadores. En el anexo A se puede observar los resultados de las pruebas de jarras correspondientes a la floculación.

2.2.1 Tiempo de mezcla lenta.

Es el tiempo de retención hidráulico de los floculadores, es decir el tiempo que demora el agua en recorrer toda la estructura de floculación. En la tabla 13 se observan los valores de turbiedad y color obtenidos según el tiempo de mezcla utilizado para las pruebas de jarras.

Tabla 13. Tiempo de mezcla trabajado

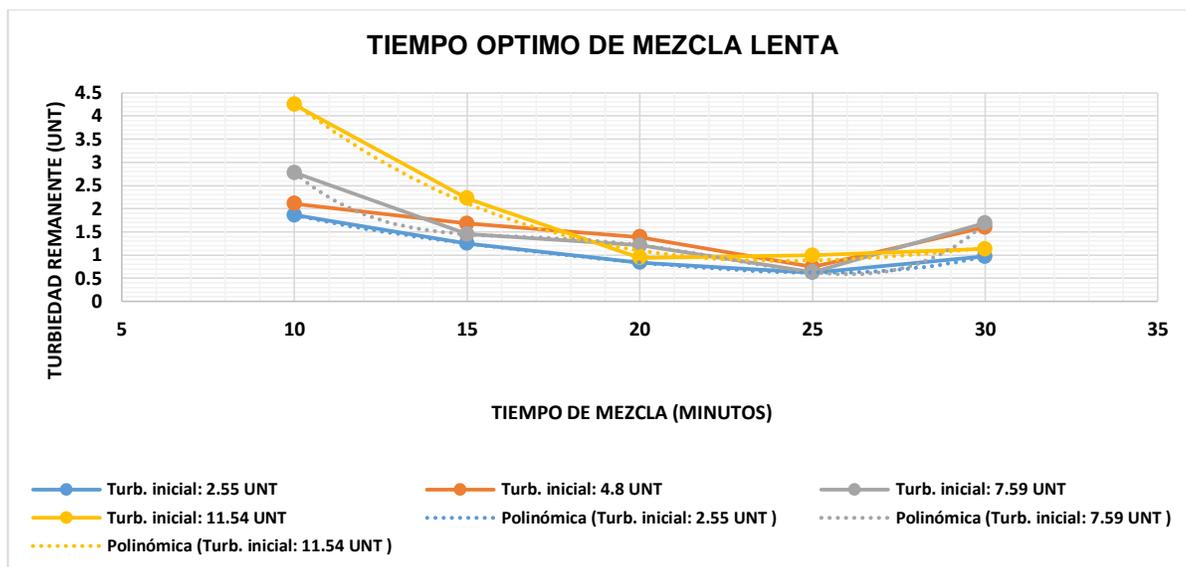
Turb. inicial: 2.55 UNT Color Inicial:106 UPC			Turb. inicial: 4.8 UNT Color Inicial:126 UPC		
Tiempo de mezcla(min)	Turbiedad remanente	Color	Tiempo de mezcla(min)	Turbiedad remanente	Color
10	1.86	58	10	2.11	69
15	1.25	41	15	1.68	41
20	0.84	19	20	1.39	24
25	0.62	7	25	0.74	16
30	0.97	23	30	1.6	22

Turb. inicial: 7.59 UNT Color Inicial:191 UPC			Turb. inicial: 11.54 UNT Color Inicial:247 UPC		
Tiempo de mezcla(min)	Turbiedad remanente	Color	Tiempo de mezcla(min)	Turbiedad remanente	Color
10	2.78	74	10	4.25	102
15	1.45	59	15	2.22	57
20	1.21	35	20	0.94	29
25	0.63	14	25	0.99	14
30	1.69	26	30	1.13	35

Fuente: Autor.

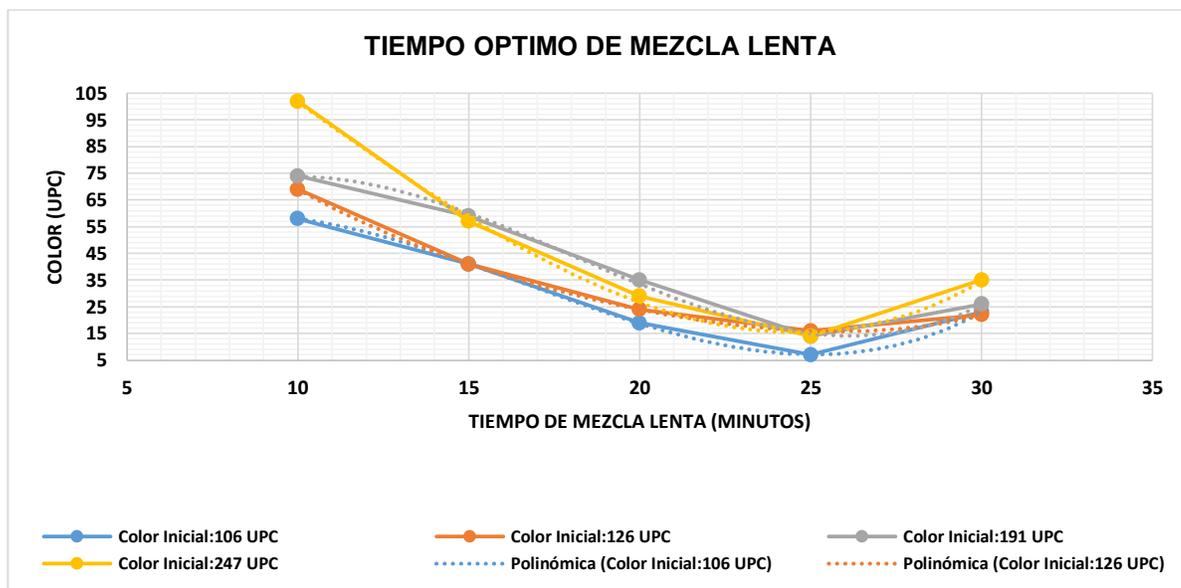
En las figuras 13 y 14 se representa gráficamente el comportamiento de los valores obtenidos para el tiempo de mezcla lenta.

Figura 13. Comportamiento de la turbiedad según el tiempo de mezcla lenta



Fuente: Autor.

Figura 14. Comportamiento del color según el tiempo de mezcla lenta.



Fuente: Autor.

Tabla 14. Tiempos óptimos de mezcla lenta seleccionados

Turbiedad (UNT)	Tiempo óptimo de mezcla lenta (minutos)		
	Según turbiedad	Según color	Tiempo seleccionado
0.1-3	25	25	25
3.01-6	25	25	25
6.01-9	25	25	25
9.01-12	20	25	25

Fuente: Autor.

Para floculadores hidráulicos de tipo Alabama el tiempo óptimo debe estar en un rango de 20 a 30 minutos, es decir que el tiempo obtenido por medio de las pruebas está dentro de lo que permite y manda la norma colombiana.

2.2.2 Gradiente óptimo de mezcla lenta

La tabla 15 muestra los valores de turbiedad y color obtenidos en las pruebas de jarras utilizando diferentes gradientes de mezcla, aplicando todos los parámetros óptimos hallados anteriormente.

Tabla 15. Gradiente de mezcla lenta trabajados

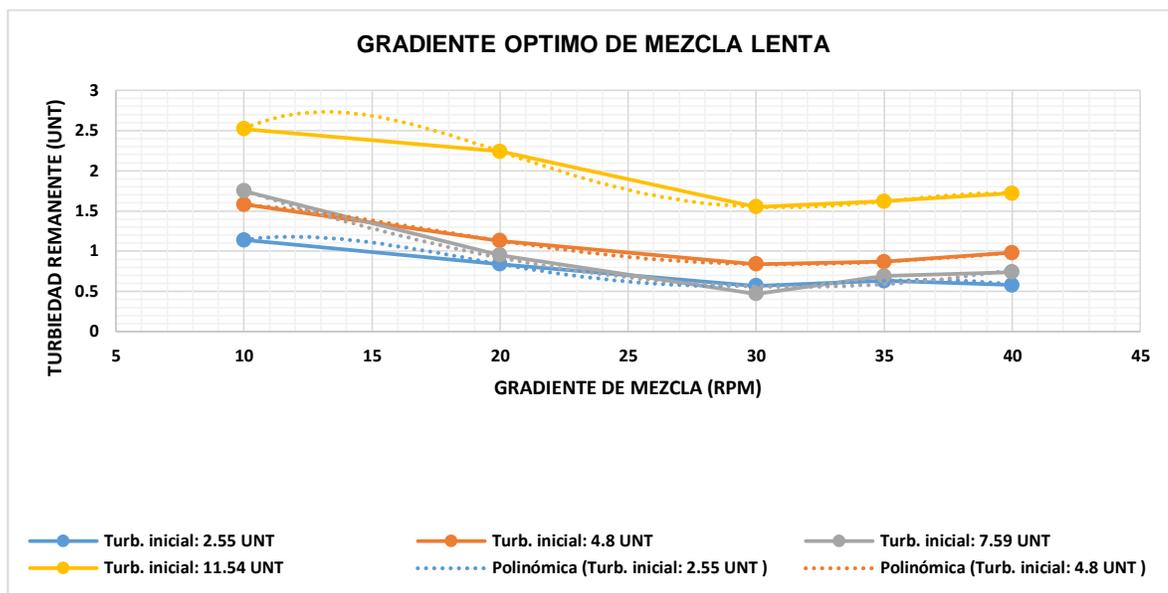
Turb. inicial: 2.55 UNT			Turb. inicial: 4.8 UNT		
Color Inicial:106 UPC			Color Inicial:126 UPC		
Gradiente de mezcla	Turbiedad remanente	Color	Gradiente de mezcla	Turbiedad remanente	Color
10	1.14	53	10	1.58	56
20	0.84	32	20	1.13	47
30	0.57	11	30	0.84	12
35	0.63	14	35	0.87	18
40	0.58	24	40	0.98	32

Turb. inicial: 7.59 UNT			Turb. inicial: 11.54 UNT		
Color Inicial:191 UPC			Color Inicial:247 UPC		
Gradiente de mezcla	Turbiedad remanente	Color	Gradiente de mezcla	Turbiedad remanente	Color
10	1.75	64	10	2.52	75
20	0.95	37	20	2.24	56
30	0.47	13	30	1.55	16
35	0.69	14	35	1.62	23
40	0.74	18	40	1.72	24

Fuente: Autor.

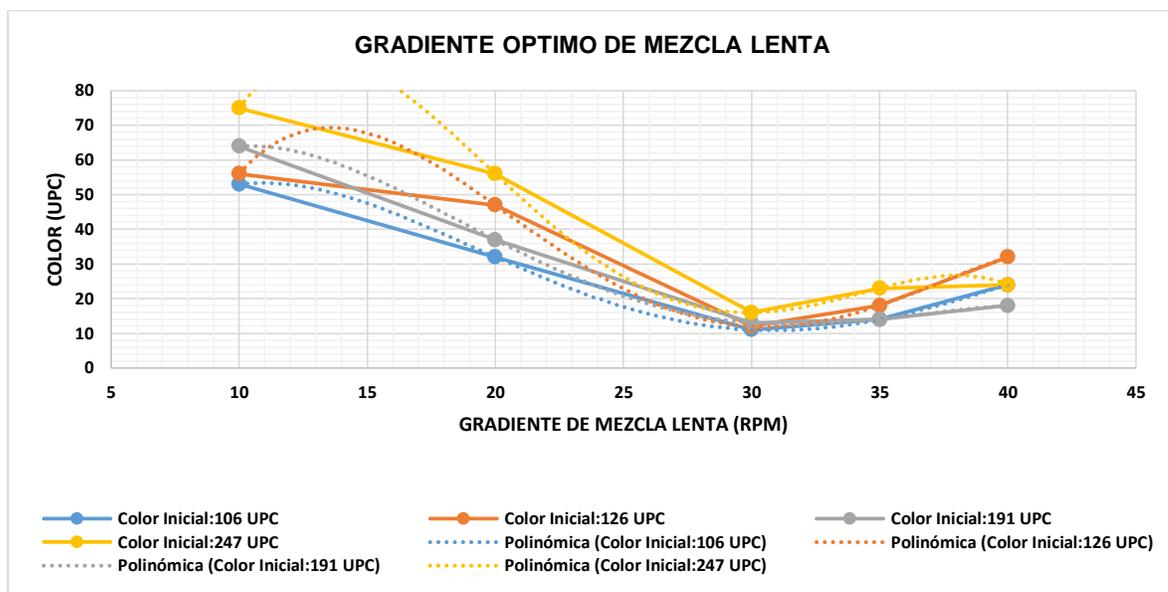
En las figuras 15 y 16 se representa gráficamente el comportamiento de los valores obtenidos para el tiempo de mezcla lenta.

Figura 15. Comportamiento de la turbiedad según el gradiente de mezcla



Fuente: Autor.

Figura 16. Comportamiento del color según el gradiente de mezcla



Fuente: Autor.



La tabla 16 muestra los gradientes óptimos seleccionados para cada turbiedad trabajada.

Tabla 16. Gradientes óptimos seleccionados

Turbiedad (UNT)	Gradiente óptimo de mezcla lenta			
	Según turbiedad	Según color	Gradiente Seleccionado	
			RPM	S ⁻¹
0-3	30	30	30	23
3.01-6	30	30	30	23
6.01-9	30	30	30	23
9.01-12	30	30	30	23

Fuente: Autor.

Para floculadores hidráulicos de tipo Alabama el gradiente de mezcla lenta debe estar en un rango de 20 a 70 s⁻¹, los resultados obtenidos arrojan que 23 s⁻¹ es el gradiente más adecuado para que funcione la PTAP y además está cumpliendo con la norma.

2.2.3 Distribución y tiempo de retención reales en las unidades

2.2.3.1 Distribución del agua coagulada

A partir de la medida de la velocidad y área en los canales que transportan el agua coagulada a las unidades de floculación se encuentra el caudal que entra a cada floculador.

La medida de la velocidad se realizó de manera práctica por medio del tiempo de recorrido del agua en la longitud del canal.

Ecuación 3. Velocidad de flujo

$$V_f = \frac{L_c}{T_p}$$

Donde:

Vf= Velocidad de flujo en el canal (m/s)

Lc= Largo del canal (m)

Tp= Tiempo promedio de recorrido (s)

Tabla 17. Calculo de velocidades en el canal de agua coagulada

Prueba N°	Canal	
	Derecho	Izquierdo
1	10.92	11.83
2	10.91	11.87
3	10.88	11.62
4	10.82	11.68
5	10.86	11.72
Promedio (s)	10.878	11.744
Ancho (m)	0.4	0.4
Largo (m)	3.22	3.22
Lámina de agua (m)	0.091	0.075
Área (m²)	0.0364	0.03
Velocidad de flujo (m/s)	0.30	0.27

Fuente: Autor.

La tabla 18 muestra el caudal con que funciona cada unidad de floculación, utilizando la ecuación:

Ecuación 4. Caudal en el canal de agua coagulada

$$Qf = Vf * Ac$$

Donde:

Qf= caudal de floculación (m³/s)

Vf= Velocidad de flujo en el canal (m/s)

Ac= Área mojada (m²)

Tabla 18. Distribución de agua en las unidades de floculación

Floculador	Área mojada (m ²)	Velocidad de flujo (m/s)	Caudal (L/s)	Porcentaje de flujo (%)
1 (LADO DERECHO)	0.036	0.30	0.0108	56.65
2 (LADO IZQUIERDO)	0.030	0.27	0.0082	43.25

Fuente: Autor.

2.2.3.2 Tiempo de retención hidráulicos reales

Utilizando el caudal de cada floculador y los volúmenes útiles de cada compartimiento se obtiene el tiempo de retención hidráulico, mediante la aplicación de la ecuación 5. En la tabla 19 se observa los resultados.

Ecuación 5. Determinación de tiempos de retención

$$TRH = \frac{Vu}{Qf}$$

Donde:

TRH= Tiempo de retención hidráulico (s)

Vu= Volumen útil (m³)

Qf= caudal de floculación (m³/s)

Tabla 19. Tiempos de retención hidráulicos en los floculadores

Comp. N°	Área (m ²)	Floculador			
		(1) Derecho		(2) Izquierdo	
		Volumen útil (m ³)	Tiempo de retención (min)	Volumen útil (m ³)	Tiempo de retención (min)
1	1.69	3.28	5.07	3.24	6.57
2		3.35	5.18	3.28	6.64
3		3.45	5.33	3.31	6.71
4		3.43	5.31	3.38	6.85
5		3.45	5.33	3.41	6.92
6		3.53	5.46	3.53	7.16
7		3.57	5.52	3.53	7.16
8		3.58	5.54	3.57	7.23
9		3.58	5.54	3.57	7.23
		Tiempo de retención total		48.28	62.46

Fuente: Autor.

Anteriormente se estableció el rango en el que debe estar el tiempo de retención total de cada floculador (20 a 30 minutos), según los resultados las estructuras de floculación de la PTAP no están cumpliendo con lo mencionado anteriormente.

2.2.4 Gradientes reales en los floculadores

Para la determinación de los gradientes reales en cada compartimiento de las unidades de floculación se utiliza la siguiente ecuación:

Ecuación 6. Gradiente en floculadores hidráulicos de tipo Alabama

$$G = \sqrt{\frac{H_f * g}{v * t}}$$

Donde:

G= Gradiente (s⁻¹)

H_f= Pérdidas de carga totales (m)

g= Gravedad (m/s²)

v= Viscosidad cinemática (m²/s) *(9.2068x10⁻⁷ m²/s a T= 24.3 °C)

t= Tiempo de retención (s)

2.2.4.1 Pérdidas por carga

Las pérdidas por carga es un valor que depende de los orificios y elementos que intervienen en la entrada de los compartimientos, se halla por medio de las fórmulas para pérdidas por carga para orificios, y los resultados se pueden observar en la tabla 18.

Ecuación 7. Pérdida total en la entrada de cada compartimiento

$$H_f = H_e + H_c + H_s$$

Donde:

H_f= Pérdida total (m)

H_e= Pérdida en el orificio de entrada (m)

H_c= Pérdida en el codo (m)

H_s= Pérdida en el orificio de salida (m)

Ecuación 8. Perdidas en orificios

$$H_{e,c,s} = \frac{Q_f^2}{2g * C_d^2 * A^2}$$

Donde:

He, c, s= Perdida según sea el caso (m)

Qf= Caudal de floculación (m³/s)

g= Gravedad (m/s²)

Cd= Coeficiente de descarga (Cd_e= 0.61, Cd_c= 0.4, Cd_s= 0.65)

A= Área del orificio (m²)

Las pérdidas totales se observan en la tabla 20.

Tabla 20. Perdidas por carga en las unidades de floculación

Entrada a cámara	Área (m ²)	Velocidad (m/s)	Perdida por carga (m)				
			Orificio de entrada	Codo	Orificio de salida	Total	
(1)Derecho	1	0.051	0.213	0.0062	0.0009	0.0055	0.0126
	2	0.053	0.204	0.0057	0.0008	0.0050	0.0115
	3	0.063	0.172	0.0041	0.0006	0.0036	0.0083
	4	0.063	0.172	0.0041	0.0006	0.0036	0.0083
	5	0.063	0.172	0.0041	0.0006	0.0036	0.0083
	6	0.053	0.204	0.0057	0.0008	0.0050	0.0115
	7	0.073	0.148	0.0030	0.0004	0.0026	0.0061
	8	0.073	0.148	0.0030	0.0004	0.0026	0.0061
	9	0.130	0.083	0.0009	0.0001	0.0008	0.0019
(2)Izquierdo	1	0.051	0.163	0.0036	0.0005	0.0032	0.0073
	2	0.053	0.155	0.0033	0.0005	0.0029	0.0067
	3	0.063	0.132	0.0024	0.0004	0.0021	0.0048
	4	0.063	0.132	0.0024	0.0004	0.0021	0.0048
	5	0.063	0.132	0.0024	0.0004	0.0021	0.0048
	6	0.053	0.155	0.0033	0.0005	0.0029	0.0067
	7	0.073	0.113	0.0017	0.0003	0.0015	0.0035
	8	0.073	0.113	0.0017	0.0003	0.0015	0.0035
	9	0.130	0.063	0.0006	0.0001	0.0005	0.0011

Fuente: Autor.

En la tabla 21 se puede observar los gradientes de velocidad reales en cada cámara o compartimiento de floculación.

Tabla 21. Gradientes reales de floculación

Entrada a cámara	Gradiente real (s^{-1})	Gradiente real promedio (s^{-1})
(1) Derecho	1	24.1
	2	21.7
	3	17.9
	4	18.0
	5	19.5
	6	21.1
	7	16.3
	8	15.0
	9	9.3
(2) Izquierdo	1	16.1
	2	14.6
	3	12.2
	4	12.1
	5	13.1
	6	14.1
	7	10.9
	8	10.0
	9	6.2

Fuente: Autor.

Los floculadores no están cumpliendo con lo establecido en la norma colombiana (Gradiente promedio 20-70 s^{-1}), presenta valores por debajo del límite inferior permitido.

2.3 SEDIMENTACION

Es el proceso donde las partículas del agua que se unieron para formar el floc son retiradas del agua por acción de la gravedad. Para esta etapa se obtiene la eficiencia de la unidad de sedimentación en función del agua clarificada, y además el tiempo de retención de la estructura. Cada sedimentador funciona con el caudal que viene de los floculadores, bien sea el lado derecho o el lado izquierdo.

2.3.1 Tiempo de retención hidráulico

Por medio del caudal con el que funcionan las estructuras de sedimentación y el volumen de estas mismas se obtiene el tiempo de retención para cada sedimentador.

Ecuación 9. Determinación de tiempos de retención

$$TRH = \frac{Vu}{Qe}$$

Donde:

TRH= Tiempo de retención hidráulico (s)

Vu= Volumen útil (m³)

Qe= caudal de entrada a la estructura (m³/s)

Tabla 22. Tiempo de retención de los sedimentadores

SEDIMENTADOR			
(1) Derecho		(2) Izquierdo	
Volumen útil (m ³)	Tiempo de retención (min)	Volumen útil (m ³)	Tiempo de retención (min)
80.66	124.77	80.66	163.43

Fuente: Autor.

El tiempo de retención recomendado para un sedimentador hidráulico de flujo ascendente está en un rango de 120 a 240 minutos (RAS 2000).

2.3.2 Eficiencia de sedimentación

Consiste en determinar el porcentaje de remoción de material en suspensión o flocs con el cual funcionan las estructuras de sedimentación, se determina en función del agua que entra a la PTAP y la que sale de los sedimentadores. La eficiencia está determinada mediante la siguiente ecuación:

Ecuación 10. Eficiencia de sedimentación.

$$Es = 100 - \left(\frac{Vs * 100}{Ve} \right)$$

Donde:

Es= Eficiencia del sistema (%)

Vs= Valor de salida (UNT o UPC)

Ve= Valor de entrada (UNT o UPC)

Tabla 23. Eficiencia de sedimentación

Entrada		Salida		Eficiencia (%)	
Turbiedad (UNT)	Color (UPC)	Turbiedad (UNT)	Color (UPC)	De turbiedad	De color
0-3	80-135	0.61	27	59	74
3.01-6	80-180	0.68	35	85	73
6.01-9	180-220	0.81	34	89	83
9.01-12	220-280	1.64	39	84	84

Fuente: Autor.

De la tabla 23 se puede observar que el sedimentador funciona con diferentes eficiencias según la turbiedad, cuando la turbiedad y el color a la entrada de la planta presenta valores altos existe una mayor cantidad de materia por remover por consecuente se presenta que las eficiencias sean mejores; pero en general las estructuras de sedimentación funcionando paralelamente presentan una buena eficiencia.

2.3.3 Carga hidráulica superficial

La carga hidráulica de un sedimentador me determina el volumen de agua que puede soportar la estructura por cada unidad de área en determinado tiempo, se obtiene mediante el producto del caudal diario de la planta y el área de sedimentación. Los resultados se pueden apreciar en la tabla 24.



Ecuación 11. Carga hidráulica superficial en sedimentadores

$$CSH = \frac{Qe}{As}$$

Donde:

CHS= Carga hidráulica superficial (m³/m²*día)

Qe= Caudal de entrada a la estructura (m³/día)

As= Área de sedimentación (m²)

Tabla 24. Carga hidráulica superficial de los sedimentadores

	Sedimentador	
	(1) Derecho	(2) Izquierdo
Caudal (m ³ /día)	930.9	710.7
Área de sedimentación (m ²)	18.1	18.1
Carga hidráulica superficial (m ³ /m ² *día)	51.3	39.2

Fuente: Autor.

Para un buen funcionamiento de un sedimentador de flujo ascendente la carga hidráulica con la que opera no debe superar los 60 m³/m²*día.

2.3.4 Manejo y tratamiento de lodos

Los lodos son todo el material en suspensión que gracias al proceso de floculación son convertidos en flocs para ser atrapados por los paneles hexagonales ubicados en los sedimentadores. Todo este material se deposita en el fondo de la estructura y debe ser removido para evitar una saturación que me genere problemas en la producción de agua clarificada.

Los lodos producidos en el sedimentador son evacuados a través de 2 válvulas de 6 pulgadas de diámetro que lo transportan a los lechos de secado, donde el material sólido es extraído de los lechos para darle una disposición final como residuo sólido. Sin embargo en ciertas ocasiones cuando no se realiza una evacuación constante el volumen de lodos del sedimentador y el agua de lavado de los filtros supera la



capacidad de los lechos por lo que se realiza un vertimiento aguas debajo de la planta a una fuente hídrica.

La PTAP cuenta con cuatro lechos iguales de 4.2 metros de largo, 3.1 metros de ancho y una altura útil de 0.8 metros que tienen como capacidad total de 41.67 m³ para secado de lodos.

2.4 FILTRACION

Debido a que no todas las partículas decantaron en el proceso de sedimentación, se hace necesario y a través de un lecho filtrante que está formado por grava, arena y antracita retirarlas en su totalidad. En este punto se evalúan las características del proceso de filtración, de lavado y además la del lecho filtrante.

2.4.1 Características del proceso de filtración

2.4.1.1 Tasa y caudal de filtración

Estos valores fueron determinados cerrando la válvula que permite el paso de agua clarificada a los filtros, se cronometró el tiempo que duraba en bajar el nivel de agua dentro del filtro. Los datos tomados se realizaron para condiciones donde filtro estaba limpio y sucio para así obtener un valor medio aproximado. Las ecuaciones utilizadas son las siguientes:

Ecuación 12. Caudal de filtración

$$Q_f = \frac{A_f * h}{t}$$

Donde:

Q_f= Caudal de filtración (m³/s)

A_f= Área de filtración (m²)

h= Altura de lámina de agua filtrada (m)

t= Tiempo (s)

Ecuación 13. Tasa de filtración

$$Vf = \frac{Qf}{Af} * 86400$$

Donde:

Vf= Tasa de filtración (m/s)

Qf= Caudal de filtración (m³/s)

Af= Área de filtración (m²)

Tabla 25. Velocidad y caudal en los filtros

Filtro	Área de filtración (m ²)	Filtro sucio				Filtro limpio			
		Δh (m)	Tiempo (s)	Caudal (m ³ /s)	Tasa de filtración (m ³ /m ² *día)	Δh (m)	Tiempo (s)	Caudal (m ³ /s)	Tasa de filtración (m ³ /m ² *día)
1	2.914	0.36	161	0.00652	193.19	0.4	136	0.0086	254.12
2		0.4	198	0.00589	174.55	0.4	166	0.0070	208.19
3		0.03	130	0.00067	19.94	0.06	134	0.0013	38.69
4		0.025	125	0.00058	17.28	0.06	129	0.0014	40.19
5		0.01	130	0.00022	6.65	0.03	141	0.0006	18.38
6		0.07	135	0.00151	44.80	0.15	159	0.0027	81.51

Fuente: Autor.

Tabla 26. Caudal y tasa media de filtración

Filtro	Caudal (m ³ /s)	Tasa media de filtración (m ³ /m ² *día)
1	0.00754	223.66
2	0.00645	191.37
3	0.00099	29.31
4	0.00097	28.73
5	0.00042	12.51
6	0.00213	63.15

Fuente: Autor.

Las tasa media de filtración de filtros compuestos por arena y antracita debe estar en un rango de 180 a 300 (m³/m²*día) (RAS 2000), por lo que se obtiene que cuatro de los seis filtros de la planta no están cumpliendo con esta condición, y además como agravante los filtros deficientes presentan valores de filtración medios bastante alejados del límite inferior mínimo.

2.4.1.2 Eficiencia del proceso

Para determinar la eficiencia se tomó en cuenta el valor promedio de turbiedad y color que entra y sale de las estructuras, se manejan promedios debido a que los datos obtenidos no estuvieron determinados en paralelo con los valores de entrada de agua cruda a la PTAP. Se utiliza la ecuación 14 y el resultado está presentado en la tabla 27.

Ecuación 14. Eficiencia de filtración

$$Ef = 100 - \left(\frac{Vs * 100}{Ve} \right)$$

Donde:

Ef= Eficiencia del sistema (%)

Vs= Valor de salida (UNT o UPC)

Ve= Valor de entrada (UNT o UPC)

Tabla 27. Eficiencia de las estructuras de filtración

Batería de filtros					
Entrada		Salida		Eficiencia (%)	
Turbiedad media (UNT)	Color promedio (UPC)	Turbiedad media(UNT)	Color promedio (UPC)	De turbiedad	De color
0.94	33.8	0.82	29.28	12	13

Fuente: Autor.

La batería de filtros de la PTAP presenta una baja eficiencia, esto es debido a que la turbiedad media que entra ya es un valor bastante bajo y resulta muy difícil mejorarlo considerablemente y por el lado del color se debe a que los filtros no son

diseñados para remover gran cantidad de color, y el valor que entra proveniente de la sedimentación es alto por lo que es más un problema de los procesos anteriores. La norma colombiana exige que el valor de color sea <15 UPC (Res. 2115 2007).

2.4.2 Características del proceso de lavado

Se hace necesario retirar las el material atrapado en el lecho cuando ocurre el proceso de filtración, se suministra agua de manera ascendente a través del lecho removiendo la suciedad de los filtros la cual es llevada a un canal de desagüe por las canaletas de lavado; el agua utilizada para realizar el lavado es filtrada y simplemente es devuelta al lecho para efectuar la remoción.

2.4.2.1 Velocidad y caudal de lavado

Los datos se obtuvieron midiendo el nivel de agua utilizado en un determinado tiempo. Se cerraban todas las salidas de agua filtrada que llegaban a la tanquilla de control, se vaciaba el filtro para dar inicio al suministro el agua de manera opuesta a la dirección de filtración para efectuar el lavado. Utilizando las siguientes ecuaciones se hallan los resultados presentados en la tabla 28:

Ecuación 15. Caudal de lavado

$$Q_{lav} = \frac{At * h}{t}$$

Donde:

Q_{lav} = Caudal de lavado (m^3/s)

At = Área de la tanquilla de control (m^2)

h = Altura de lámina de agua (m)

t = Tiempo (s)

Ecuación 16. Velocidad de lavado

$$V_{lav} = \frac{Q_{lav}}{Alav} * 60$$



Donde:

V_{lav} = Velocidad de lavado (m/s)

Q_{lav} = Caudal de lavado (m³/s)

A_{lav} = Área de lavado (m²)

Tabla 28. Caudal y velocidad de lavado

Filtro	Área de lavado (m ²)	Área de tanquilla (m ²)	Δh (m)	Tiempo (s)	Caudal (m ³ /s)	Vel. de lavado (m/min)
1			0.85	246	0.02153	0.44
2			0.90	260	0.02157	0.44
3	2.914	6.23	0.80	317	0.01572	0.32
4			0.50	219	0.01422	0.29
5			0.70	314	0.01389	0.29
6			1.00	321	0.01941	0.40

Fuente: Autor.

Según la bibliografía el caudal de lavado en cada filtro debe ser menor al caudal de funcionamiento de la PTAP, tres filtros cumplen esta condición pero ninguno cumple con el rango de velocidad de lavado (0.6 a 0.8 m/min).

2.4.2.2 Duración del proceso de lavado

Los operarios realizan el proceso de lavado de cada filtro en un tiempo de 10 minutos, sin embargo se debe verificar cual es el tiempo óptimo para llevar a cabo esta tarea. Se tomaron muestras de agua proveniente del lavado de los filtros, con intervalo de toma de un minuto.

Se midieron los valores de turbiedad y color de cada muestra; para determinar el lapso de tiempo donde el filtro este limpio y permita una buena filtración. En la tabla 29 se muestran los resultados:

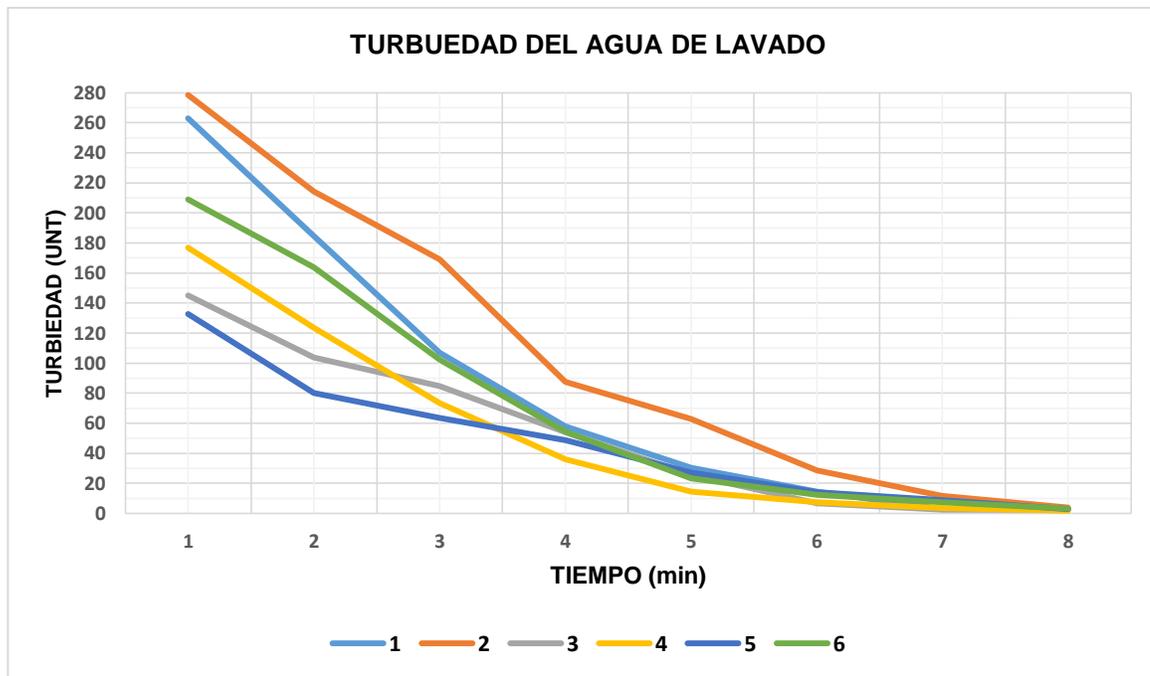
Tabla 29. Duración del proceso de lavado

Filtro		Tiempo (min)							
		1	2	3	4	5	6	7	8
1	Turbiedad (UNT)	263.0	184.7	107.0	58.0	30.3	14.4	2.7	2.9
	Color (UPC)	5045	3330	2359	1184	635	307	116	44
2	Turbiedad (UNT)	278.5	214.2	169.0	87.4	62.8	28.7	11.7	4.0
	Color (UPC)	5256.0	3618.7	2592.8	998.6	542.8	332.0	139.3	36.0
3	Turbiedad (UNT)	145.2	103.7	84.6	53.8	25.8	6.8	2.5	2.4
	Color (UPC)	2785.3	1869.6	1865.2	1302.4	748.2	358.7	236.8	37.9
4	Turbiedad (UNT)	176.9	123.4	73.4	35.9	14.3	7.2	3.4	1.7
	Color (UPC)	3385.1	2224.8	1621.2	732.9	291.7	205.6	188.7	37.1
5	Turbiedad (UNT)	132.7	80.1	63.5	48.8	27.1	14.0	8.6	2.9
	Color (UPC)	2540.5	1449.7	1394	996.2	567.9	298.9	373.5	44
6	Turbiedad (UNT)	209.0	163.7	102.5	54.2	23.3	12.4	7.4	3.2
	Color (UPC)	4009.1	2951.4	2259.8	1106.4	488.3	265.3	311.6	45.4

Fuente: Autor.

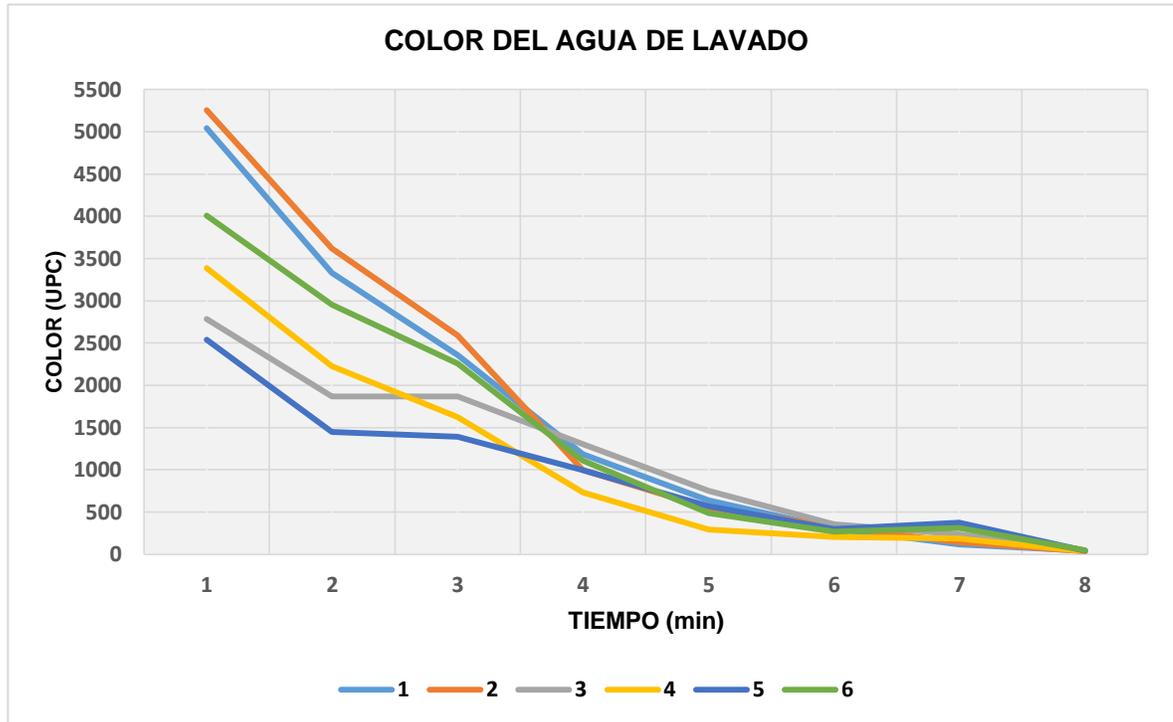
Las figuras 17 y 18 muestran el comportamiento grafico de los datos obtenidos para la duración del tiempo de lavado.

Figura 17. Comportamiento de la turbiedad en el proceso de lavado



Fuente: Autor.

Figura 18. Comportamiento del color en el proceso de lavado



Fuente: Autor.

Según las gráficas el tiempo adecuado de lavado esta alrededor de los 7 a 8 minutos, se tiene en cuenta en este caso la turbiedad como valor de referencia para saber en qué punto se presenta un comportamiento asintótico

2.4.2.3 Características del lecho

Cada lecho está formado por tres materiales ubicados en capas teóricamente, pero debido a su larga utilización las capas se han mezclado siendo imposible determinar las proporciones de cada material. La grava se utiliza como soporte de la arena y la antracita, estas últimas son las encargadas de realizar la filtración.

Determinar la expansión del lecho resulto imposible debido a que no se tiene idea de cuál es el valor de la altura de arena, antracita y grava que forman cada lecho y las alturas totales de dicho lecho dentro de cada filtro son diferentes. Los lechos están completamente colmatados de barro, siendo la principal causa de las bajas tasas de filtración y lavado.

La tabla 30 muestra la altura del lecho en cada filtro, y suponiendo una altura de seguridad de 0.3 metros se halla un valor límite de expansión.

Tabla 30. Alturas dentro del filtro

Filtro	Altura útil (m)	Altura del lecho + soporte (m)	Altura de seguridad (m)	Altura de expansión (m)
1		0.6		0.40
2		0.7		0.30
3		0.84		0.16
4	4.2	0.92	0.3	0.08
5		0.9		0.10
6		0.76		0.24

Fuente: Autor.

La altura mínima de un lecho filtrante mixto de arena y antracita con tasas de filtración media entre 180 y 300 m³/m²*día debe estar entre 0.6 y 0.75 metros (RAS 2000).

2.5 DESINFECCION

Es el proceso donde a través de agentes químicos se eliminan todos microorganismos presentes en el agua y que pueden causar problemas de salud a la población que consume el agua. Para garantizar un buen proceso de desinfección se debe tener en cuenta parámetros como tiempo de contacto del cloro y la dosis óptima que garantice un residual de cloro permitido por la norma.

2.5.1 Tiempo de contacto

Es el tiempo que requiere el cloro para actuar de manera adecuada como agente desinfectante al momento de hacer contacto con el agua. La aplicación del cloro se realiza de manera errónea en lo que respecta al punto de aplicación, el agua que se almacena debe ser totalmente desinfectada; por lo que se debe trasladar el punto de cloración de la tubería de salida del tanque al serpentín. Esta estructura está diseñada para dar un tiempo de contacto óptimo para que el cloro realice su trabajo y se estima de la siguiente manera:

Ecuación 17. Tiempo de contacto del cloro

$$Tc = \frac{Vs}{Qh + Qe}$$

Donde:

Tc= Tiempo de contacto (s)

Vs= Volumen útil del serpentín (m³)

Qh= Caudal de agua hiperclorada (m³/s)

Qe= Caudal de agua filtrada (m³/s)

Como resultado se obtiene que el tiempo de contacto es de 587 segundos o 9.8 minutos, se recomienda que el tiempo para aguas con temperaturas entre 20 y 25 °C y pH entre 7 y 7.5 este en un rango de 10 a 30 minutos (RAS 2000).

2.5.2 Dosis óptima de cloro

Para hablar de dosis debe estar claro de donde se obtiene esa concentración final que se adiciona al agua para tratarla. La pureza del cloro utilizado es de 99% y se mezcla con un caudal de 0.91 L/s para obtener la solución hiperclorada aplicada finalmente al caudal de trabajo. La cantidad de gas gastado se obtiene en gr/hora y es gracias a un medidor ubicado a la salida del cilindro que lo contiene.

Tabla 31. Dosificación de cloro

Cantidad gastada (gr/hora)	Caudal de gas(L/s)	Concentración solución hiperclorada (mg/L)	Dosis aplicada (mg/L)
100	0.0001852	20.15	0.92
140	0.0002593	28.20	1.29
160	0.0002963	32.23	1.47
180	0.0003333	36.26	1.66
200	0.0003704	40.29	1.84
220	0.0004074	44.32	2.02

Fuente: Autor.

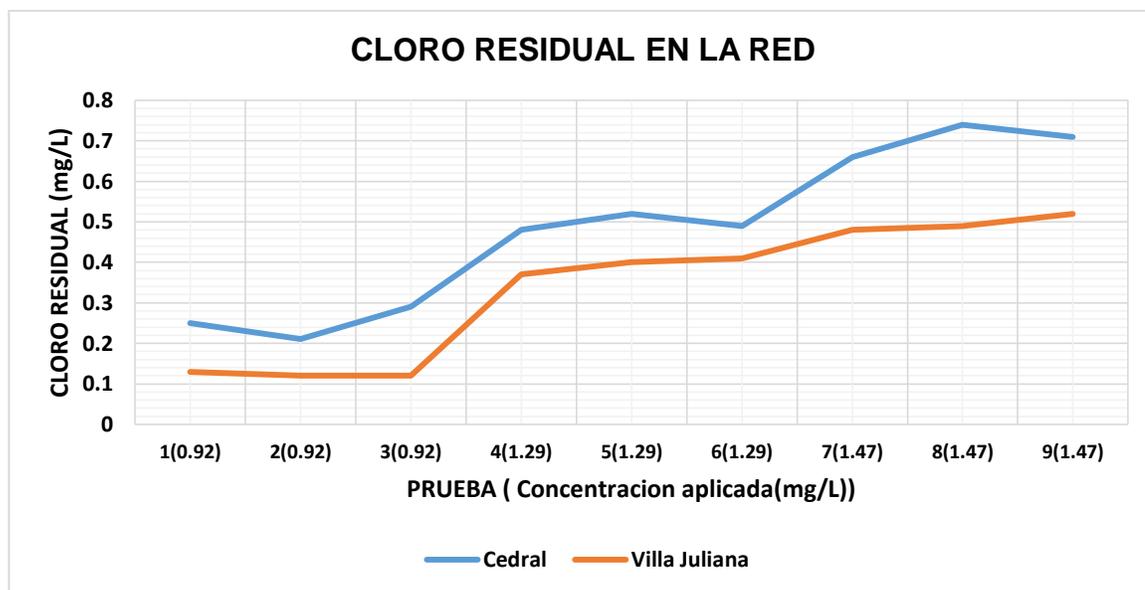
En la PTAP se adiciona en la tubería de salida del tanque de almacenamiento una dosis de 1.29 mg/L de cloro que arroja un residual de cloro en la primera caseta de inspección ubicada en la vereda el Cedral de 0.51 mg/L y 0.46 mg/L en la caseta más lejana a la planta, ubicada en el barrio Villa Juliana, lo que quiere decir que se está cumpliendo con la norma que indica que el valor de residual de cloro en la red debe ser mínimo de 0.3 mg/L y máximo de 2 mg/L. Sin embargo se debe verificar que siga cumpliendo después de realizar el cambio del punto de aplicación, para lo que se hizo nuevas tomas de cloro residual en las casetas anteriores y se obtuvieron los datos presentados en la tabla 32.

Tabla 32. Cloro residual en la red, Vereda el Cedral y barrio Villa Juliana

Prueba N°	Dosis aplicada (mg/L)	Cloro residual (mg/L)	
		Cedral	Villa Juliana
1	0.92	0.25	0.13
2	0.92	0.21	0.12
3	0.92	0.29	0.12
4	1.29	0.48	0.37
5	1.29	0.52	0.4
6	1.29	0.49	0.41
7	1.47	0.66	0.48
8	1.47	0.74	0.49
9	1.47	0.71	0.52

Fuente: Autor.

Figura 19. Variación de la concentración



Fuente: Autor.



¡Estoy comprometida!

Se selecciona como dosis optima el valor antiguo de aplicación de 1.29 mg/L, genera un cloro residual no muy bajo y esto evita estar por debajo del límite y no muy alto que me permite ahorrar sustancia y estar por debajo del límite.

2.5.3 Corrección de pH

Establecer un buen pH permite evitar la supervivencia de microorganismos en el agua, en la planta se realiza a través de la adición de soda caustica disuelta en la entrada al serpentín. Este aspecto se encontraba muy bien en la planta pues el valor promedio en el tanque de almacenamiento es de 7.15, está dentro de los valores permitidos (6.5 a 9); pero en consecuencia del cambio del punto de cloración el pH disminuyo a 6.8 en promedio. El caudal que se adiciona es de 0.32 L/min con concentración de 1%.

2.5.4 Calidad de agua tratada

Se realizó la medición en la red de los parámetros fisicoquímicos del agua que se suministra a la población, y se comparan con el rango o valor permitido por la norma.

Tabla 33. Calidad del agua suministrada

Parámetro	Red	Referencia
Turbiedad (UNT)	0.53	<2
Color (UPC)	22	<15
pH	7.15	6.5-9
Temperatura (°C)	23.9	-
Cloro residual (mg/L)	0.48	0.3-2

Fuente: Autor.

De los parámetros analizados el color del agua resulta ser el único valor que no está cumpliendo con lo permitido en lo que respecta a los valores máximos permisibles de la resolución 2115 del 2007 y RAS 2000, por lo tanto se debe a través de las optimizaciones lograr corregir este valor y garantizar que todos los parámetros sigan cumpliendo con la normatividad.



3. ANALISIS Y OPTIMIZACIONES

Teniendo como base el diagnóstico realizado a cada etapa del tratamiento de potabilización de agua que se realiza en la PTAP del municipio de Hato corozal y las pruebas correspondientes para hallar valores óptimos, se realiza una comparación para determinar exactamente cada punto a mejorar del tratamiento.

3.1 PROCESO DE COAGULACION

Tabla 34. Comparación de parámetros

Turb. Inc. (UNT)	Dosis de sulfato (mg/L)		Concentración de sulfato (%)		pH óptimo de coagulación		Turb. de agua clarificada (UNT)		Color de agua clarificada (UPC)		pH de agua clarificada	
	Planta	Prueba	Planta	Prueba	Planta	Prueba	Planta	Prueba	Planta	Prueba	Planta	Prueba
0-3	10	16	1	1.5	-	6.5	0.61	0.57	27	11	4.4	4.9
3.01-6	21	23	1.5	1.5	-	6.5	0.68	0.87	35	12	4.3	4.6
6.01-9	35	27	2	1.5	-	6.6	0.81	0.69	34	13	4.3	4.9
9.01-12	42	33	2	2	-	6.6	1.64	1.62	39	19	4.4	4.7

Fuente: Autor.

Como se puede observar de la tabla anterior los valores de color obtenidos de las pruebas son mucho menores que los que se dan en el proceso normal de la planta, con respecto a las turbiedades en ambos casos se logra estar en los valores permisibles, son relativamente baja en ambos casos por lo cual no tiene relevancia para elegir que dosis aplicar.

Se recomienda realizar la operación de la planta con los caudales determinados tomando en cuenta los parámetros óptimos encontrados gracias a las pruebas de jarras, los caudales fueron establecidos en las tablas 9 y 10, preparando el coagulante y la cal a la debida concentración establecida para cada turbiedad.

La preparación de cal se recomienda realizarla con concentración de 0.5%, debido a que aplicarla al 1% la llave de paso presenta taponamiento por la cal que no se disuelve completamente.

3.2 PROCESO DE FLOCULACION

Existen dos problemas que tienen una relación, dentro de los floculadores el tiempo de retención hidráulico es muy alto y los gradientes de mezcla son bajos, son inversamente proporcionales; esto se explica debido a que la planta está diseñada para funcionar con un caudal de 50 L/s, es decir 25 L/s en cada unidad de floculación. Existen dos maneras de solucionar el problema, la primera sería reduciendo las dimensiones de las cámaras de floculación manejando el mismo caudal, pero sería bastante costoso y además después de algún tiempo la demanda crecerá y se necesitará más capacidad; por lo que realizar esta opción es básicamente una contradicción. La segunda es la salida más fácil, y se basa en utilizar solo un floculador con el caudal de funcionamiento actual, reduciendo así el tiempo de retención y aumentando el gradiente, el cual se controla modificando los orificios y elementos de entrada en cada cámara de floculación.

Las modificaciones de los orificios se realizan buscando llegar a los valores de gradientes óptimos arrojados por las pruebas de jarras.

Tabla 35. Condiciones óptimas de floculación

Compartimentos	Floculador		Área de orificios (m ²)	Pérdidas totales(m)	Gradiente real (s ⁻¹)
	Volumen útil (m ³)	Tiempo de retención (min)			
1	3.33	2.92	0.078	0.0164	31.5
2	3.35	2.93	0.090	0.0124	27.4
3	3.36	2.95	0.096	0.0109	25.6
4	3.38	2.96	0.102	0.0096	23.9
5	3.40	2.98	0.109	0.0085	22.4
6	3.41	2.99	0.109	0.0085	22.4
7	3.43	3.01	0.123	0.0067	19.8
8	3.45	3.02	0.130	0.0060	18.7
9	3.46	3.04	0.160	0.0039	15.1
Tiempo de retención total		26.79	Gradiente real promedio (s⁻¹)		23

Fuente: Autor.

Realizar las debidas modificaciones me garantiza estar en el valor óptimo establecido, lo que garantizara una excelente floculación y por lo tanto la eficiencia de sedimentación será la mayor posible.

3.3 PROCESO DE SEDIMENTACION

Tabla 36. Comparación de eficiencias de sedimentación

Entrada		Planta		Prueba	
Turbiedad (UNT)	Color (UPC)	Eficiencia (%)		Eficiencia (%)	
		De turbiedad	De color	De turbiedad	De color
0-3	80-135	59	74	78	90
3.01-6	80-180	85	73	82	97
6.01-9	180-220	89	83	91	98
9.01-12	220-280	84	84	86	98

Fuente: Autor.

Sin duda esta etapa del proceso de potabilización es de buen funcionamiento dentro de la planta, la eficiencia de sedimentación es buena, la carga hidráulica bastante optima, sin embargo las eficiencias adoptando los parámetros óptimos son mucho más altas; por lo que realizar la modificación de las dosis a aplicar es bastante útil. Los tiempos de retención en los sedimentadores son altos debido a que operan bajo un caudal inferior al de diseño pero dicho aumento del tiempo resulta beneficioso pues permite mayor tiempo para que decante el floc.

A pesar de que se plantea manejar un solo floculador, esto no va a afectar el desempeño de la sedimentación debido a que se empleara el mismo caudal de operación actual.

Según (Sette, Rubens. 2003) el tiempo de percolación para lechos de secado oscila entre 1 a 3 días dependiendo de factores como la evaporación y la turbiedad del lodo, por lo que se recomienda construir más estructuras con esta función, que garanticen el doble de almacenamiento actual, es decir que soporte el caudal tanto de los lodos del sedimentador como del agua proveniente del lavado de los filtros, pero y además teniendo en cuenta no olvidar realizar frecuentemente el desagüe de dichos sedimentadores, evitando así excesos que deban ser vertidos a la fuente hídrica aguas abajo de la PTAP.

3.4 PROCESO DE FILTRACION

Teniendo en cuenta que la batería de filtros tiene tasas medias de filtración bajas consecuencia de la colmatación de los lechos y además velocidad de lavado insuficiente que puede ser debido a que el vertedero de control no cumpla con la altura que proporcione una velocidad adecuada. Se rediseñan los lechos para verificar si se cumple con las alturas dentro del filtro y del vertedero de control. Se recomienda que el lecho esté compuesto por grava como material de soporte y arena y antracita como material filtrante.

En la tabla 37 se establecen las características que deben tener los materiales que se encargaran de realizar la filtración.

Tabla 37. Características del material filtrante

Característica	Antracita	Arena
Tamaño efectivo	0.75	0.55
Coefficiente de uniformidad	1.6	1.6
Porosidad	0.4	0.4
Gravedad especifica	1.4	2.65
Coefficiente de esfericidad	0.73	0.82

Fuente: Autor.

Con las características de la tabla 37 y las dimensiones de los filtros se establecen las nuevas medidas para cada material del lecho, y se verifican todas las alturas que intervienen en el la definición tanto de la altura total del filtro como del vertedero de control.

Tabla 38. Condiciones del lecho filtrante

Condición	Diseño	Valor(Q=19.02 L/s)	Valor(Q=50 L/s)	Unidades
Caudal de diseño	0.0083	0.0032	0.0083	m ³ /s
Largo del filtro	2.35	2.35	2.35	m
Ancho del filtro	1.24	1.24	1.24	m
Área de filtración y lavado	2.91	2.91	2.91	m ²
Caudal requerido para el lavado	No conocida	19	33.4	L/s
Tasa de filtración	247.1	94.0	247.1	m ³ /m ² *día
Velocidad de lavado	No conocida	0.39	0.69	m/min
Altura de gravas	No conocida	0.4	0.40	m
Altura de Arena	No conocida	0.34	0.34	m
Altura de Antracita	No conocida	0.4	0.40	m
Altura de expansión	No conocida	0.13	0.27	m
Altura de seguridad	No conocida	0.30	0.16	m
Perdidas por filtración	No conocida	0.22	0.22	m
Perdidas por lavado	No conocida	0.5	0.59	m
Altura lamina vertedero de control	0.043	0.022	0.043	m
Altura de vertedero	1.65	2.43	2.68	m
Altura de mantenimiento	1.2	1.2	1.2	m
altura canaleta de lavado	0.44	0.44	0.44	m
Borde libre	0.6	0.6	0.6	m
Altura total del filtro	4.8	4.55	4.67	m

Fuente: Autor.



¡Estoy comprometida!

Los valores no conocidos se deben a que no se tuvo acceso a las memorias de cálculo del diseño inicial.

Como base en los cálculos de la tabla 38 se recomienda realizar una modificación a la altura de la cresta del vertedero de control, debido a que para que cumpla con la velocidad de lavado debe tener una altura de 2.68 metros manejando un caudal de 50 L/s, es decir para que un futuro funcione de manera adecuada; teniendo en cuenta las demás medidas establecidas. La modificación consiste en aumentar la altura del tanque de control y a través de un vertedero de lámina móvil ubicar la altura óptima establecida, se recomienda móvil para que se pueda adaptar a las necesidades de operación dentro de la PTAP, es decir funcione con los cambios de caudales que puedan presentarse.

Para la operación con el caudal de 19.02 L/s se debe suministrar por medio de una bomba un caudal de 14.4 L/s para conseguir llegar a 33.4 L/s, el cual es el caudal requerido para realizar correctamente el lavado de los filtros.

Exceder el tiempo óptimo de lavado significa un gasto de agua innecesario puesto que los valores de los parámetros controlados no mejoran notablemente, entonces se recomienda adoptar el tiempo de lavado a 8 minutos y no los 10 minutos que demoraba realizar el proceso normalmente.

3.5 PROCESO DE DESINFECCION

Básicamente el traslado del punto de cloración era el cambio que debía realizarse y se efectuó de manera inmediata para poder continuar con las siguientes pruebas pertinentes requeridas en la evaluación, el tiempo de contacto en el serpentín no estaba dentro del rango pero se complementa en el tanque de almacenamiento y se establece como optima la dosis de cloro suministrada normalmente en la planta.

Después de observar la disminución del pH en el tanque debido al cloro, se recomienda aumentar el caudal de soda caustica de 0.32 L/min a 0.44 L/min para evitar estar tan cerca del límite inferior permitido.



¡Estoy comprometida!

3.6 AGUA TRATADA

Después de aplicar algunas de las mejoras planteadas, se midieron los parámetros en la red de distribución del agua tratada para realizar una comparación con los valores anteriores.

Tabla 39. Características del agua tratada

Parámetro	Red (Inicial)	Red (Final)	Referencia
Turbiedad (UNT)	0.53	0.43	<2
Color (UPC)	22	13	<15
pH	7.15	7.23	6.5 - 9
Temperatura (°C)	23.9	24.5	-
Cloro residual (mg/L)	0.48	0.45	0.3 - 2

Fuente: Autor.

Todos los parámetros presentan una modificación, pero se han conservado dentro de la norma y además resalta el mejoramiento del color del agua a un punto admisible aunque bastante cercano al valor máximo permitido por la resolución 2115 de 2007 y RAS 2000; por lo que se sugiere la utilización de un ayudante de floculación que genere una remoción de color más adecuada.





4. CONCLUSIONES

El muestreo realizado ha dado como resultado que el agua proveniente de la quebrada las guamas es de buena calidad, se puede clasificar como una fuente regular (RAS 2000).

La canaleta parshall como estructura de aforo presenta buen funcionamiento, permite determinar exactamente el caudal de entrada a la planta.

La mezcla rápida que se realiza en la canaleta parshall genera un gradiente hidráulico de acuerdo a lo reglamentado por el RAS 2000.

El proceso de coagulación las dosis de sulfato de aluminio no se aplicaban en los valores óptimos, debido a la falta de capacitación del operador.

Los gradientes de floculación obtenidos no son los óptimos para el proceso de tratamiento.

La sedimentación es el proceso que mejor comportamiento presenta porque las unidades actualmente se operan con caudales menores a los de diseño, lo que beneficioso para el proceso dado que se aumentan los tiempos de retención dando como resultado mejora en la calidad del agua clarificada.

El proceso de filtración es el punto crítico de la operación de la planta, lo que ha llevado a la actual colmatación de los filtros; generado por las bajas velocidades de lavado y por ende bajas expansión de los lechos durante el lavado.

El vertedero de control a la salida de los filtros se encuentra mal ubicado.

En la cloración el punto de aplicación no se da en el sitio técnicamente recomendado, lo que conlleva al almacenamiento de agua filtrada sin desinfección; la cloración se realiza a la salida de esta unidad.

Los lodos tienen sistema de deshidratación en lechos de secado, pero el material filtrante se encuentra colmatado lo que induce tiempo de infiltración mayores a tres días.

A partir de los resultados obtenidos se permite afirmar que la planta de potabilización presenta un funcionamiento aceptable, pero que tiene algunas deficiencias operativas y constructivas que ameritan mejoras.



RECOMENDACIONES

Para optimizar la planta se recomienda realizar mejoras operativas, técnicas y constructivas indicadas anteriormente.

Realizar las mejoras operativas en lo inherente a la dosificación de los químicos (Coagulante y cloro), previa capacitación de operadores.

Realizar las adecuaciones planteadas en este estudio, en los floculadores, en los filtros y en los lechos de secado.

Se recomienda operar un solo floculador mientras aumenta la producción de agua potable a 50 L/s (Caudal de diseño).

Se recomienda cambiar el material de los lechos filtrantes y el material de soporte porque se encuentran entremezclados y colmatados.

Mientras la planta trabaja a capacidad plena (50 L/s) se debe suministrar agua de lavado bombeada desde el tanque de almacenamiento, a la fecha para un caudal de operación de 19.02 L/s se requiere un caudal adicional de lavado de 14.4 L/s.

Deben operarse simultáneamente solo tres filtros mientras los otros tres permanecen en stand By, entrando en operación uno a uno y de manera secuencial en reemplazo de los filtros que entran a lavado.

Se recomienda construir cuatro lechos de secado adicionales antes de que entre en operación la planta a capacidad plena (50 L/s).

Finalmente se recomienda cambiar la arena en los lechos de secado existentes.



BIBLIOGRAFIA

DE VARGAS, Lidia. Manual I: Teoría, Capítulo. 6: Floculación p. 236-278

MINISTERIO DE LA PROTECCIÓN SOCIAL, MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Resolución 2115 (22 de Junio de 2007) Por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano. Bogotá D.C.

CARBOTECNIA. Desinfección con cloro, (En línea) (20 de mayo del 2015), México. Disponible en: (<https://www.carbotecnia.info/desinfeccion-con-cloro/>).

MARTÍNEZ, Gloria & BETANCOURTH, Laina. Evaluación de la planta de potabilización de agua, Empresas públicas de Armenia-Quindío. Ingeniero químico, Universidad nacional de Colombia. (2003) Manizales, Colombia.

MINISTERIO DE DESARROLLO ECONOMICO, Dirección General de Agua Potable y Saneamiento Básico. Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico RAS. (2000) Bogotá.

DIAZ BAUTISTA, Wendy. Evaluación y optimización de la planta de tratamiento de agua potable del municipio de tena en el departamento de Cundinamarca. Ingeniero Civil, Universidad Católica. (2017) Bogotá.

ICONTEC, NORMA TÉCNICA COLOMBIANA-NTC 1486. Documentación, Presentación de tesis, trabajos de grado y otros trabajos de investigación. Bogotá.

RESTREPO, Hernán. Evaluación del proceso de coagulación – floculación de una planta de tratamiento de agua potable. Universidad nacional de Colombia, Sede Medellín, Facultad de minas. (2009) Medellín.

ALCALDIA DE HATO COROZAL, “Nuestro Municipio” (En línea) (21 de marzo del 2018)
Disponible en :(http://www.hatocorozalcasanare.gov.co/informacion_general.shtml)

CARBOTECNIA. Filtros de grava, arena sílica y antracita. (En línea) (24 de abril del 2018). (2004) Disponible en: (<https://carbotecnia.info/PDF/boletines/AG-009.pdf>)





¡Estoy comprometida!

MENDEZ, Rafael & ORTEGA, Marcela. Canaleta parshall. Universidad tecnológica de Bolívar. (2012) Cartagena de indias.

BRINSA QUIMICA. Cloro. (En línea) (2018) Medellín. Disponible en: (<http://www.brinsaquimica.com.co/?producto=cloro>).

YACTAYO, Víctor. Manual I: Teoría. Capítulo 7: Sedimentación. (En línea) (2009). Disponible en: (www.ingenieroambiental.com/4014/nueve.pdf)

SETTE, Rubens. Tratamiento de aguas residuales. Cap. 7. p. 571. (2003) Laval University. Quebec, Canadá.



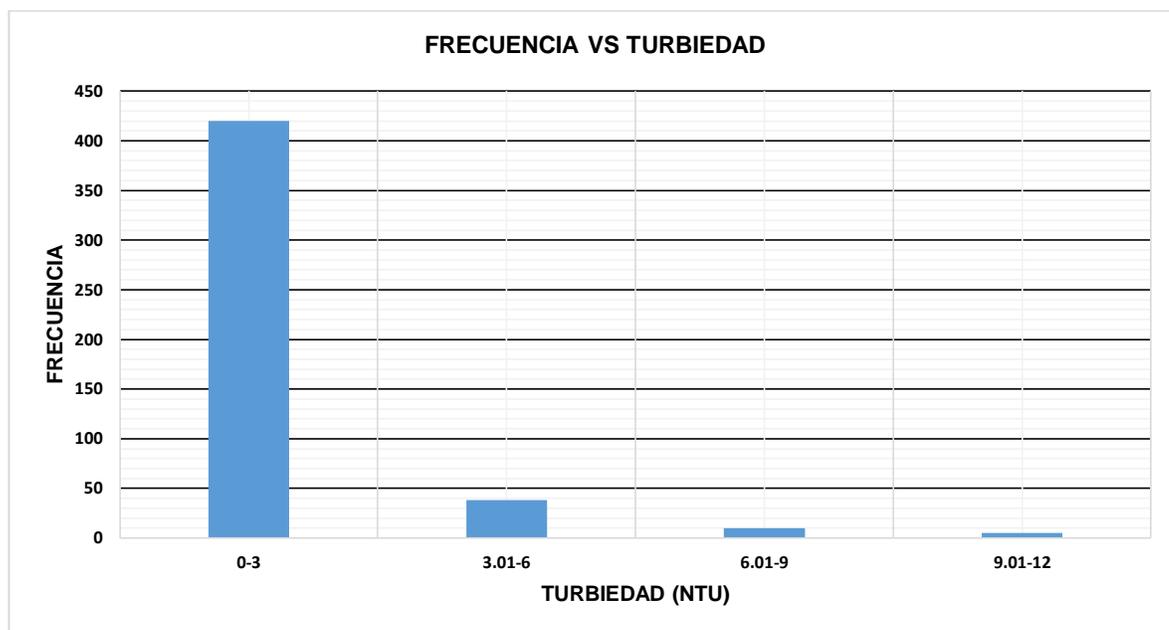
ANEXOS

ANEXO A. ENSAYO DE JARRAS

ANALISIS ESTADISTICO DE LOS DATOS DEL MUESTREO

Distribución de frecuencias

Intervalo de clase Turbiedad (UNT)	Frecuencia de clase	Punto medio de clase Turbiedad (UNT)	Frecuencia acumulada	Frecuencia acumulada relativa
0-3	420	1.5	420	0.89
3.01-6	38	4.5	458	0.97
6.01-9	10	7.5	468	0.99
9.01-12	5	11.5	473	1.00



La tabla de distribución de frecuencia permite observar que la mayoría de los datos se encuentra en el intervalo de 0 a 3, pero los valores tienden a subir cuando se presentan precipitaciones en consecuencia de que el muestreo se realizó en verano los demás intervalos no presentan un mayor número de datos.



¡Estoy comprometida!

RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE JARRAS

INTERVALO DE TURBIEDAD DE 0-3

Propiedades del agua cruda

Propiedades de agua cruda	
Turbiedad (UNT)	2.55
Color (UPC)	106
PH	6.2
Temperatura (°C)	24.3

Dosis optima

- Mezcla rápida: 15 segundos a 200 RPM
- Mezcla lenta: 20 minutos a 40 RPM
- Sedimentación: 10 minutos.
- Coagulante de coagulante: 1%.

AGUA CRUDA			AGUA TRATADA			
Vaso	Volumen (ml)	Dosis(mg/L)	Turbiedad(UNT)	Color (UPC)	Temperatura(°C)	PH
1	1	10	1.47	29	24.4	4.9
2	2	20	1.53	26	24.5	4.8
3	3	30	2	42	24.4	4.7
4	4	40	1.8	42	24.4	4.5
5	5	50	2.1	39	24.4	4.4

AGUA CRUDA			AGUA TRATADA			
Vaso	Volumen (ml)	Dosis(mg/L)	Turbiedad(UNT)	Color (UPC)	Temperatura(°C)	PH
1	1	6	1.78	33	24.7	5
2	2	8	1.38	31	24.8	4.9
3	3	12	1.48	28	24.7	4.9
4	4	16	1.2	22	24.7	4.8
5	5	22	1.6	32	24.8	4.7



¡Estoy comprometido!

Concentración óptima de coagulante

- Mezcla rápida: 15 segundos a 200 RPM
- Mezcla lenta: 20 minutos a 40 RPM
- Sedimentación: 10 minutos.
- Dosis óptima de coagulante: 16 mg/L

AGUA CRUDA			AGUA TRATADA			
Vaso	Dosis(mg/L)	Concentración (%)	Turbiedad(UNT)	Color (UPC)	Temperatura(°C)	PH
1	16	0.5	1.1	46	24.7	4.9
2	16	1	0.96	31	24.7	4.8
3	16	1.5	0.72	22	24.7	4.8
4	16	2	0.83	46	24.7	4.8
5	16	2.5	0.88	55	24.8	4.7

PH óptimo de coagulación

- Mezcla rápida: 15 segundos a 200 RPM
- Mezcla lenta: 20 minutos a 40 RPM
- Sedimentación: 10 minutos.
- Dosis óptima de coagulante: 16 mg/L a 1.5 %

AGUA CRUDA			AGUA TRATADA			
Vaso	Concentración (%)	PH	Turbiedad(UNT)	Color (UPC)	Temperatura(°C)	PH
1	1.5	4.5	1.47	58	24.8	4.1
2	1.5	5.3	1.36	43	24.8	4.5
3	1.5	5.9	1.19	32	24.8	4.8
4	1.5	6.5	0.55	12	24.7	4.8
5	1.5	7.4	1.47	38	24.8	5.1

Tiempo óptimo de mezcla lenta

- Mezcla rápida: 15 segundos a 200 RPM
- Mezcla lenta: 40 RPM
- Sedimentación: 10 minutos.
- Dosis óptima de coagulante: 16 mg/L a 1.5 %
- pH óptimo de coagulación: 6.5





AGUA CRUDA			AGUA TRATADA			
Vaso	PH	Tiempo de mezcla	Turbiedad(UNT)	Color (UPC)	Temperatura(°C)	PH
1	6.5	10	1.86	58	24.6	4.8
2	6.5	15	1.25	41	24.7	4.7
3	6.5	20	0.84	19	24.8	4.8
4	6.5	25	0.62	7	24.8	4.8
5	6.5	30	0.97	23	24.8	4.8

Gradiente óptimo de mezcla lenta

- Mezcla rápida: 15 segundos a 200 RPM
- Mezcla lenta: 25 minutos a 40 RPM
- Sedimentación: 10 minutos.
- Dosis optima de coagulante: 16 mg/L a 1.5 %
- pH óptimo de coagulación: 6.5

AGUA CRUDA			AGUA TRATADA			
Vaso	Tiempo de mezcla	Gradiente de mezcla	Turbiedad(UNT)	Color (UPC)	Temperatura(°C)	PH
1	25	10	1.14	53	24.7	4.9
2	25	20	0.84	32	24.7	4.7
3	25	30	0.63	24	24.6	4.7
4	25	35	0.57	11	24.6	4.9
5	25	40	0.58	14	24.7	4.8

INTERVALO DE TURBIEDAD DE 3.01-6

Propiedades del agua cruda

Propiedades de agua cruda	
Turbiedad (UNT)	4.8
Color (UPC)	126
PH	5.9
Temperatura (°C)	24.1



¡Estoy comprometida!

Dosis optima

- Mezcla rápida: 15 segundos a 200 RPM
- Mezcla lenta: 20 minutos a 40 RPM
- Sedimentación: 10 minutos.
- Concentración de coagulante: 1%

AGUA CRUDA			AGUA TRATADA			
Vaso	Volumen (ml)	Dosis(mg/L)	Turbiedad(UNT)	Color (UPC)	Temperatura(°C)	PH
1	1	10	1.95	60	24.2	5
2	2	20	1.13	44	24.2	4.8
3	3	30	0.59	44	24.2	4.7
4	4	40	1.35	56	24.2	4.6
5	5	50	1.41	60	24.3	4.6

AGUA CRUDA			AGUA TRATADA			
Vaso	Volumen (ml)	Dosis(mg/L)	Turbiedad(UNT)	Color (UPC)	Temperatura(°C)	PH
1	1	18	1.78	55	24.4	4.8
2	2	22	0.34	36	24.4	4.7
3	3	25	0.42	38	24.4	4.7
4	4	28	0.87	48	24.4	4.7
5	5	33	0.66	43	24.4	4.7

Concentración optima de coagulante

- Mezcla rápida: 15 segundos a 200 RPM
- Mezcla lenta: 20 minutos a 40 RPM
- Sedimentación: 10 minutos.
- Dosis optima de coagulante: 23 mg/L

AGUA CRUDA			AGUA TRATADA			
Vaso	Dosis(mg/L)	Concentración (%)	Turbiedad(UNT)	Color (UPC)	Temperatura(°C)	PH
1	23	0.5	1.65	56	24.1	4.8
2	23	1	1.32	35	24.1	4.7
3	23	1.5	0.98	28	24.1	4.7
4	23	2	1.54	51	24.1	4.7
5	23	2.5	2.32	72	24	4.8



¡Estoy comprometida!

PH óptimo de coagulación

- Mezcla rápida: 15 segundos a 200 RPM
- Mezcla lenta: 20 minutos a 40 RPM
- Sedimentación: 10 minutos.
- Dosis optima de coagulante: 23 mg/L a 1.5 %

AGUA CRUDA			AGUA TRATADA				
Vaso	Concentración (%)	PH	Turbiedad(UNT)	Color (UPC)	Temperatura(°C)	PH	
1	1.5	4.5	2.11	69	24.1	4.4	
2	1.5	5.8	1.68	41	24.1	4.8	
3	1.5	6.5	0.74	16	24.2	5	
4	1.5	6.9	1.39	24	24.1	5	
5	1.5	7.3	1.6	43	24.1	5.6	

Tiempo óptimo de mezcla lenta

- Mezcla rápida: 15 segundos a 200 RPM
- Mezcla lenta: 40 RPM
- Sedimentación: 10 minutos.
- Dosis optima de coagulante: 23 mg/L a 1.5 %
- pH óptimo de coagulación: 6.5

AGUA CRUDA			AGUA TRATADA			
Vaso	PH	Tiempo de mezcla	Turbiedad(UNT)	Color (UPC)	Temperatura(°C)	PH
1	6.5	10	2.11	69	24.4	4.7
2	6.5	15	1.68	41	24.4	4.8
3	6.5	20	1.39	24	24.5	4.9
4	6.5	25	0.74	16	24.5	4.7
5	6.5	30	1.6	22	24.5	4.8

Gradiente óptimo de mezcla lenta

- Mezcla rápida: 15 segundos a 200 RPM
- Mezcla lenta: 25 minutos a 40 RPM
- Sedimentación: 10 minutos.
- Dosis optima de coagulante: 23 mg/L a 1.5 %
- pH óptimo de coagulación: 6.5





AGUA CRUDA			AGUA TRATADA			
Vaso	Tiempo de mezcla	Gradiente de mezcla	Turbiedad(UNT)	Color (UPC)	Temperatura(°C)	PH
1	25	10	1.58	56	24.8	4.7
2	25	20	1.13	47	24.6	4.8
3	25	30	1.1	36	24.6	4.8
4	25	35	0.87	12	24.6	4.6
5	25	40	0.84	18	24.5	4.7

INTERVALO DE TURBIEDAD DE 6.01-9

Propiedades del agua cruda

Propiedades de agua cruda	
Turbiedad (UNT)	7.59
Color (UPC)	191
PH	5.9
Temperatura (°C)	23.5

Dosis optima

- Mezcla rápida: 15 segundos a 200 RPM
- Mezcla lenta: 20 minutos a 40 RPM
- Sedimentación: 10 minutos.
- Coagulante de coagulante: 1%.

AGUA CRUDA			AGUA TRATADA			
Vaso	Volumen (ml)	Dosis(mg/L)	Turbiedad(UNT)	Color (UPC)	Temperatura(°C)	PH
1	1	10	1.98	42	23.5	5.1
2	2	20	1.78	42	23.5	4.9
3	3	30	1.37	33	23.5	4.9
4	4	40	1.56	42	23.5	4.8
5	5	50	1.72	47	23.5	4.6



AGUA CRUDA			AGUA TRATADA			
Vaso	Volumen (ml)	Dosis(mg/L)	Turbiedad(UNT)	Color (UPC)	Temperatura(°C)	PH
1	1	22	1.63	37	23.5	4.9
2	2	24	1.54	35	23.5	4.9
3	3	27	1.31	27	23.6	4.8
4	4	32	1.37	36	23.4	4.8
5	5	35	1.36	38	23.5	4.8

Concentración óptima de coagulante

- Mezcla rápida: 15 segundos a 200 RPM
- Mezcla lenta: 20 minutos a 40 RPM
- Sedimentación: 10 minutos.
- Dosis óptima de coagulante: 27 mg/L

AGUA CRUDA			AGUA TRATADA			
Vaso	Dosis(mg/L)	Concentración (%)	Turbiedad(UNT)	Color (UPC)	Temperatura(°C)	PH
1	27	0.5	1.48	63	23.5	4.8
2	27	1	1.45	47	23.6	4.9
3	27	1.5	1.21	33	23.6	4.9
4	27	2	1.73	35	23.5	4.8
5	27	2.5	2.14	52	23.6	4.8

PH óptimo de coagulación

- Mezcla rápida: 15 segundos a 200 RPM
- Mezcla lenta: 20 minutos a 40 RPM
- Sedimentación: 10 minutos.
- Dosis óptima de coagulante: 27 mg/L a 1.5 %

AGUA CRUDA			AGUA TRATADA			
Vaso	Concentración (%)	PH	Turbiedad(UNT)	Color (UPC)	Temperatura(°C)	PH
1	1.5	4.6	2.78	74	23.6	4.3
2	1.5	5.2	1.45	59	23.6	4.6
3	1.5	5.8	1.21	35	23.6	4.8
4	1.5	6.6	0.86	14	23.5	4.9
5	1.5	7.3	1.69	26	23.6	5.6





¡Estoy comprometida!

Tiempo óptimo de mezcla lenta

- Mezcla rápida: 15 segundos a 200 RPM
- Mezcla lenta: 40 RPM
- Sedimentación: 10 minutos.
- Dosis optima de coagulante: 27 mg/L a 1.5 %
- pH óptimo de coagulación: 6.6

Vaso	AGUA CRUDA		AGUA TRATADA			
	PH	Tiempo de mezcla	Turbiedad(UNT)	Color (UPC)	Temperatura(°C)	PH
1	6.6	10	2.78	74	23.6	4.9
2	6.6	15	1.45	59	23.5	4.9
3	6.6	20	1.21	35	23.5	4.9
4	6.6	25	0.63	14	23.6	4.9
5	6.6	30	1.69	26	23.6	4.8

Gradiente óptimo de mezcla lenta

- Mezcla rápida: 15 segundos a 200 RPM
- Mezcla lenta: 25 minutos a 40 RPM
- Sedimentación: 10 minutos.
- Dosis optima de coagulante: 27 mg/L a 1.5 %
- pH óptimo de coagulación: 6.6

Vaso	AGUA CRUDA		AGUA TRATADA			
	Tiempo de mezcla	Gradiente de mezcla	Turbiedad(UNT)	Color (UPC)	Temperatura(°C)	PH
1	25	10	1.75	64	23.6	4.9
2	25	20	0.95	37	23.6	4.8
3	25	30	0.81	28	23.5	4.9
4	25	35	0.74	14	23.6	4.9
5	25	40	0.69	13	23.5	4.9

INTERVALO DE TURBIEDAD DE 9.01-12

Propiedades del agua cruda

Propiedades de agua cruda	
Turbiedad (UNT)	11.54
Color (UPC)	247
PH	5.8
Temperatura (°C)	23.9

Dosis optima

- Mezcla rápida: 15 segundos a 200 RPM
- Mezcla lenta: 20 minutos a 40 RPM
- Sedimentación: 10 minutos.
- Coagulante de coagulante: 1%.

AGUA CRUDA			AGUA TRATADA			
Vaso	Volumen (ml)	Dosis(mg/L)	Turbiedad(UNT)	Color (UPC)	Temperatura(°C)	PH
1	1	10	1.54	48	23.9	4.7
2	2	20	1.41	52	23.9	4.8
3	3	30	1.48	39	24	4.8
4	4	40	1.68	49	24	4.7
5	5	50	1.59	49	24.1	4.7

AGUA CRUDA			AGUA TRATADA			
Vaso	Volumen (ml)	Dosis(mg/L)	Turbiedad(UNT)	Color (UPC)	Temperatura(°C)	PH
1	1	34	1.23	32	24.1	4.8
2	2	37	1.36	36	24.1	4.7
3	3	43	1.62	56	24.1	4.7
4	4	46	1.55	55	24.1	4.7
5	5	49	1.54	48	24.1	4.6

Concentración óptima de coagulante

- Mezcla rápida: 15 segundos a 200 RPM
- Mezcla lenta: 20 minutos a 40 RPM
- Sedimentación: 10 minutos.
- Dosis óptima de coagulante: 35 mg/L

AGUA CRUDA			AGUA TRATADA			
Vaso	Dosis(mg/L)	Concentración (%)	Turbiedad(UNT)	Color (UPC)	Temperatura(°C)	PH
1	35	0.5	2.08	81	24.1	4.8
2	35	1	2.02	55	24.1	4.8
3	35	1.5	1.93	49	24.1	4.8
4	35	2	1.79	31	24.1	4.7
5	35	2.5	2.6	57	24	4.8

PH óptimo de coagulación

- Mezcla rápida: 15 segundos a 200 RPM
- Mezcla lenta: 20 minutos a 40 RPM
- Sedimentación: 10 minutos.
- Dosis óptima de coagulante: 35 mg/L a 2 %

AGUA CRUDA			AGUA TRATADA			
Vaso	Concentración (%)	PH	Turbiedad(UNT)	Color (UPC)	Temperatura(°C)	PH
1	2	4.7	2.53	102	24.4	4.1
2	2	5.1	1.72	85	24.4	4.8
3	2	5.9	1.19	46	24.4	4.8
4	2	6.6	0.72	18	24.3	4.9
5	2	7.8	1.66	37	24.4	5.5

Tiempo óptimo de mezcla lenta

- Mezcla rápida: 15 segundos a 200 RPM
- Mezcla lenta: 40 RPM
- Sedimentación: 10 minutos.
- Dosis óptima de coagulante: 35 mg/L a 2 %
- pH óptimo de coagulación: 6.6



AGUA CRUDA			AGUA TRATADA			
Vaso	PH	Tiempo de mezcla	Turbiedad(UNT)	Color (UPC)	Temperatura(°C)	PH
1	6.6	10	4.25	102	25.4	4.7
2	6.6	15	2.22	57	25.4	4.7
3	6.6	20	0.94	29	25.5	4.7
4	6.6	25	0.99	14	25.5	4.7
5	6.6	30	1.13	35	25.5	4.7

Gradiente óptimo de mezcla lenta

- Mezcla rápida: 15 segundos a 200 RPM
- Mezcla lenta: 25 minutos a 40 RPM
- Sedimentación: 10 minutos
- Dosis optima de coagulante: 35 mg/L a 2 %
- pH óptimo de coagulación: 6

AGUA CRUDA			AGUA TRATADA			
Vaso	Tiempo de mezcla	Gradiente de mezcla	Turbiedad(UNT)	Color (UPC)	Temperatura(°C)	PH
1	25	10	2.52	75	25.8	4.7
2	25	20	2.24	56	25.6	4.7
3	25	30	1.74	23	25.6	4.6
4	25	35	1.78	24	25.6	4.6
5	25	40	1.62	19	25.5	4.7

ANEXO B. COAGULACION

Análisis hidráulico de la canaleta parshall

- Condiciones de entrada

Ecuación 18. Caudal de entrada

$$Q = k * ha^n$$

K y n constantes, dependientes del ancho de la garganta del canal. (k=0.381; n=1.58)

Ecuación 19. Ancho de la canaleta en la sección de medida

$$D' = \frac{2}{3} * (D - W) + W$$

Ecuación 20. Velocidad en la sección de medida

$$V_1 = \frac{Q}{ha * D'}$$

Ecuación 21. Energía específica en la sección de medida

$$E_1 = \frac{V_1}{2 * g} + ha + N$$

- Condiciones en la garganta

Ecuación 22. Velocidad antes del resalto

$$V_2^3 - 2 * g * V_2 * E_1 = - \frac{2 * Q * g}{W}$$

Ecuación 23. Altura lámina de agua antes del resalto

$$h_2 = \frac{Q}{V_2 * W}$$

Ecuación 24. Numero de froude

$$F = \frac{V_2}{\sqrt{h_2 * g}}$$

- **Condiciones de salida**

Ecuación 25. Altura de la lámina de agua en la cresta del resalto

$$h_3 = \frac{h_2}{2} * (\sqrt{1 + 8 * F^2} - 1)$$

Ecuación 26. Velocidad en la cresta del resalto

$$V_3 = \frac{Q}{h_3 * W}$$

Ecuación 27. Sumergencia

$$S = \frac{h_3 - N}{h_a}$$

Ecuación 28. Perdida de carga

$$h_f = h_a + N - h_3$$

Ecuación 29. Altura de la lámina de agua después del resalto

$$h_4 = h_a - N + K$$

Ecuación 30. Velocidad después del resalto

$$V_4 = \frac{Q}{h_4 * C}$$

Ecuación 31. Velocidad media

$$Vm = \frac{V_2 + V_3 + V_4}{3}$$

Ecuación 32: Longitud del resalto

$$L_R = 6 * (h_3 - h_2)$$

Ecuación 33. Tiempo de mezcla rápida

$$TMR = \frac{L_R}{Vm}$$

Ecuación 34. Energía específica después del resalto

$$E_4 = \frac{V_4^2}{2 * g} + h_4 + (N - K)$$

Ecuación 35. Perdida por carga total

$$\Delta h = E_1 - E_4$$

Ecuación 36. Gradiente de mezcla

$$G = \sqrt{\frac{\Delta h * \rho}{TRM * \mu}}$$

Donde:

ρ = Densidad del agua (T=24.3 °C; 997.3 Kg/m³)

μ = Viscosidad absoluta (T=24.3 °C; 0.93x10⁻⁴ Kg/m*s)

ANEXO C. REGISTRO FOTOGRAFICO

CAPTACION



Rejilla de captación



Cámara de recolección



Válvula de control (Captación-desarenador)

PLANTA DE TRATAMIENTO

DESARENADOR



COAGULACION



Cámara de entrada- Vertedero de excesos



Canaleta parshall- resalto hidráulico- Dosificación de sustancias



Preparación de sulfato de aluminio y cal

FLOCULACION



Floculador hidráulico izquierdo



Válvula de entrada flocculador derecho



Cámara de floculación

SEDIMENTACION



Sedimentador izquierdo



Canaletas de recolección de agua clarificada- Floculador derecho



Canal de recolección de agua clarificada



Lechos de secado

FILTRACION



Batería de filtros



Válvulas de lavado de filtros



Tanque de equilibrio- recolección de agua filtrada

DESINFECCION



Serpentín



Mezcla de cloro



Aplicación de cloro y soda caustica

OTRAS INSTALACIONES Y EQUIPOS



Tanque de almacenamiento



Válvula de salida del tanque de almacenamiento



Caseta de desinfección



Laboratorio



Equipo de prueba de jarras



Equipos de medición de parámetros



Almacenamiento de sustancias químicas



Dosificador de cloro