

EVALUACION DE LA CALIDAD DEL AGUA DE CONSUMO HUMANO Y
SOLUCIONES PARA MEJORAR EL FUNCIONAMIENTO DE LA PLANTA DE
TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE DEL MUNICIPIO DEL HATO
(SANTANDER)

RODRIGO JOSE RODRIGUEZ LOPEZ

FRANCY LORENA ROJAS BAUTISTA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUIMICAS

ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA

BUCARAMANGA

2012

EVALUACION DE LA CALIDAD DEL AGUA DE CONSUMO HUMANO Y
SOLUCIONES PARA MEJORAR EL FUNCIONAMIENTO DE LA PLANTA DE
TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE DEL MUNICIPIO DEL HATO
(SANTANDER)

RODRIGO JOSE RODRIGUEZ LOPEZ

FRANCY LORENA ROJAS BAUTISTA

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de:

Ingeniero Químico

Director:

CRISÓSTOMO BARAJAS FERREIRA

Msc. INGENIERIA QUÍMICA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUIMICAS
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA
BUCARAMANGA

2012

AGRADECIMIENTOS

A la Corporación de Tecnologías Ambientales Sostenibles, por darnos la oportunidad de conocer, aprender y compartir vivencias durante el tiempo de prácticas, por enseñarnos el valor del medio ambiente para la sociedad y para cada uno de nosotros.

Al Biólogo Juan Agustín Gualdrón y al Químico Salomón Gualdrón, por guiarnos en esta aventura y darnos las pautas para realizar bien nuestro trabajo.

A la Escuela de Ingeniería Química, por permitirnos crecer como profesionales y por instruirnos para enfrentarnos al mundo laboral.

Al profesor Crisóstomo Barajas por su labor como Director de nuestro Proyecto de grado.

Al profesor Luis Javier López por ayudarnos en momentos críticos de nuestro proyecto y darnos una mano amiga cuando lo necesitamos, Gracias por su conocimiento y por sus indicaciones, fueron de gran ayuda.

Al Profesor Jesús Mendoza por su colaboración en nuestras prácticas de laboratorio, y a Eduardo Carreño y Wilson Carreño técnicos de laboratorio, por su ayuda, enseñanzas y orientación durante la ejecución de las pruebas experimentales.

A nuestra alma máter la UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER, por hacernos dignos representantes del orgullo que representa ser estudiante UIS.

DEDICATORIA

A **DIOS**, porque sin Él nada soy, porque con su ayuda puedo crecer en todos los aspectos de mi vida, para convertirme en una mejor persona cada día.

A mis papitos, **Álvaro y Nohemí**, por sus sacrificios, entrega, motivación, por llevarme en sus oraciones diarias, por entregar sus mejores años a mi cuidado, por fundamentarme de la manera que lo hicieron, porque con sus enseñanzas reí, lloré pero sobre todo viví y crecí, la vida no me alcanzará para agradecerles todo lo que hacen por mí; este triunfo no es sólo mío, es el de ustedes... Los Amo.

A mi prometido, **Nelson Barajas**, mi chocolatico, tu has sido partícipe de todos mis momentos tanto buenos como malos, has sido mi paño de lágrimas pero también el artífice de mis alegrías, mi motor, mi gran amor... Este triunfo también es tuyo, sin ti nada de esto habría sido posible, Tu me diste ese último empujoncito que siempre necesitaba y eso te hace acreedor de mi mayor agradecimiento, Te Amo inmensamente.

A mi **Abuelita Socorrito**, mi Tita, mi gran ejemplo a seguir... Tus oraciones y tu comunión con Dios me hacen desear algún día llegar a ser como tú, mujer guerrera y valiente, Te Adoro mi tita hermosa.

A mi Sister del alma, **Silvis Rojas**, porque con todos esos detalles y poemas y escenas de celos me sacabas una sonrisa aún en los momentos más difíciles.

A mi compañero de tesis, **Rodrigo**, mi Yoshi, porque a pesar de nuestras diferencias sacamos este proyecto adelante y demostramos que somos capaces de lo que sea.

Al **Ministerio Juvenil FVI**, al **Ministerio de alabanza Nueva Vida** y a la **Iglesia Cuadrangular la 27** por llevarme constantemente en sus oraciones.

A todos mis familiares en especial a mi **Tía Nelly** quien se convirtió en mi segunda madre, a mis abuelos, a mis primos Moncho, Ronald, Edward; a todos los llevo en mi corazón.

A mis colegas **Erika, Lina, Johanna, Lilibeth, Lorena, Yoelis, Lida, Viviana, Carolina, Leal, Emilio, Rosa, Montes** y todos los que se me escapan fue un placer haber vivido esta experiencia con ustedes, fue inolvidable y a mis amiguitos **Theo, Carito Estevez Hey** y los que me faltaron por mencionar GRACIAS por su apoyo incondicional.

FRANCY LORENA

DEDICATORIA

A dios por darme salud y por ser mi guía a lo largo de este recorrido.

A mi hermosa madre Aida López que la amo y que ha sido de gran apoyo en mi vida.

A mi padre Rodrigo Rodríguez por ser un buen padre y apoyarme durante todo el desarrollo de mi vida.

A mis hermanas Angélica y Yuli por siempre estar a mi lado y a mi futuro sobrino Matías que llenara de amor a nuestra familia.

A mis tíos especialmente Sol María por ser de gran apoyo en mi familia.

A rosita y a don Javier niño los cuales se han convertido en parte de mi familia.

A mis amigos: Lizeth, Liliana, Yoshimar, Javier, Yaritza, Marlis, Silvia, Yoelis, Jesica, Carlos, Lorena, Gisel, Ronald, Felipe, Marcela y demás personas los cuales siempre han deseado lo mejor para mí y han llenado mi vida de alegría con su compañía.

A la Universidad Industrial de Santander especialmente a la escuela de Ingeniería Química por darme la formación integral que me ayudara a asumir los nuevos retos de mi vida profesional.

Gracias

Rodrigo José Rodríguez López

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	17
1. CONCEPTOS TEÓRICOS.....	18
1.1 TRATAMIENTO CONVENCIONAL	18
1.1.1 COAGULANTES QUIMICOS	19
1.1.1.1 SULFATO DE ALUMINIO	19
1.1.1.2 POLIHIDROXICLORURO DE ALUMINIO.....	20
1.2 PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE DEL HATO.....	20
1.2.1 FUENTE ABASTECEDORA.....	20
1.2.2 PLANTA DE TRATAMIENTO	21
1.3 NORMAS DE CALIDAD PARA EL AGUA POTABLE EN COLOMBIA.....	23
1.3.1 INDICE DE RIESGO PARA LA CALIDAD DEL AGUA (IRCA)	23
2. DESARROLLO EXPERIMENTAL	24
2.1 TOMA Y PRESERVACIÓN DE LAS MUESTRAS.....	24
2.1.1 SEGURIDAD, CONTROL Y ANÁLISIS DE LAS MUESTRAS.....	25
2.1.1.1 Almacenamiento de las muestras	25
2.1.1.2 Rotulación	25
2.1.1.3 Localización	25
2.1.1.4 Observaciones	25
2.1.1.5 Análisis microbiológicos.....	25
2.1.2 METODOLOGÍA PARA MEDICIONES PUNTUALES (Fisicoquímicos).....	26
2.1.2.1 Temperatura	26
2.1.2.2 pH.....	26
2.1.2.3 Cloro residual libre.....	26
2.1.2.4 Porcentaje de saturación de oxígeno disuelto	26
2.2 EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA SEGÚN LA NORMATIVIDAD	
COLOMBIANA	26
2.2.1 CÁLCULO DEL ÍNDICE DE RIESGO DE CALIDAD DE AGUA PARA CONSUMO	
HUMANO IRCA.....	27
2.3 OBSERVACIONES DE LA PTAP.....	27
2.4 METODOLOGÍA PARA LA SELECCIÓN DE LOS PARÁMETROS DE	
FUNCIONAMIENTO	28
2.4.1 SELECCIÓN Y DOSIS ÓPTIMA DE COAGULANTE.....	28
2.5 ACCIONES DE MEJORAMIENTO.....	29
2.6 MANUAL DE OPERACIONES Y MANTENIMIENTO.....	29
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	30
3.1 CÁLCULO DEL IRCA.....	30
3.2 PARÁMETROS ÓPTIMOS, SELECCIÓN DE COAGULANTE	31
3.2.1 DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS ÓPTIMOS DE LAS ETAPAS DE	
COAGULACIÓN Y FLOCULACIÓN.....	31
3.2.2 SELECCIÓN DEL COAGULANTE.....	32

3.2.3	DIMENSIONAMIENTO DE LAS ETAPAS	34
3.2.3.1	Mezcla Rápida (Coagulación)	34
3.2.3.2	Floculación	35
3.2.3.3	Filtración.....	36
	CONCLUSIONES.....	38
	RECOMENDACIONES.....	39
	BIBLIOGRAFÍA.....	40
	ANEXOS.....	42

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Concesiones otorgadas por la CAS al municipio del Hato.....	22
Tabla 2. Calculo del IRCA y nivel de riesgo municipio del HATO.....	30
Tabla 3. Parámetros óptimos para las etapas de coagulación y floculación.....	32
Tabla 4. Comparación Económica PAC vs Sulfato de Aluminio.....	33
Tabla 5. Relación de dosis óptima de coagulante diaria vs costo.....	33
Tabla 6. Dimensiones del mezclador vertedero triangular.....	34
Tabla 7. Dimensiones para el Floculador Hidráulico Horizontal.....	35
Tabla 8. Características del material del lecho filtrante.....	36
Tabla B1. Valores aceptables de los parámetros físicos, Químicos y biológicos del agua para consumo humano.....	46
Tabla B2. Puntaje de riesgo asignado a las características para el cálculo del IRCA.....	47
Tabla B3. Clasificación del nivel de riesgo en la salud según el IRCA y consideraciones a tener en cuenta.....	47
Tabla D1. Valores de dosis, volumen de coagulante y turbidez $Al_2(SO_4)_3$	52
Tabla D2. Valores de dosis, volumen de coagulante y turbidez PAC.....	53
Tabla D3. Turbiedad Remanente para cada Gradiente de velocidad y Tiempo de retención.....	55
Tabla D4. Gradiente de Velocidad óptimo para cada tiempo de retención.....	56
Tabla D5. Gradiente de velocidad óptima para cada tramo.....	58

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de flujo planta de tratamiento de agua convencional.....	18
Figura 2. Bocatoma Quebrada la chirigua.....	20
Figura 3. Sistema de Captación.....	21
Figura 4. Orden cronológico de las actividades realizadas durante el estudio....	24
Figura 5. Observaciones en la PTAP.....	28
Figura 6. Gráfica y curva de tendencia para el sulfato de aluminio tipo B.....	31
Figura 7. Gráfica y curva de tendencia para el polihidroxiclورو de aluminio (PAC).....	32
Figura 8. Vertedero Triangular.....	34
Figura 9. Esquema del filtro grueso dinámico.....	37
Figura A1. Mapa Sistema Hídrico del Hato.....	43
Figura D1. Dosis óptima del Sulfato de Aluminio tipo B.....	52
Figura D2. Dosis óptima de PAC.....	53
Figura D3. Gráfico que relaciona el gradiente de velocidad con las rpm de un equipo de prueba de jarras con recipientes de 2 litros (jarra de sección circular).....	54
Figura D4. Tiempo total de Floculación.....	55
Figura D5. Tf versus G.....	56
Figura D6. Correlación del Tiempo de Retención y el Gradiente de Velocidad....	57

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. DESCRIPCIÓN DE LA LOCALIDAD.....	42
ANEXO B. MARCO LEGAL.....	46
ANEXO C. CONCESIÓN DE AGUAS SUPERFICIALES.....	49
ANEXO D. DETERMINACIÓN DE LA DOSIS ÓPTIMA DE COAGULANTE.....	51
ANEXO E. DIMENSIONAMIENTO DEL MEZCLADOR HIDRÁULICO VERTEDERO TRIANGULAR.....	59
ANEXO F. DIMENSIONAMIENTO DE UN FLOCULADOR HIDRÁULICO HORIZONTAL.....	61
ANEXO G. DIMENSIONAMIENTO DE UN FILTRO GRUESO DINÁMICO.....	63
ANEXO H. MANUAL DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO.....	65

RESUMEN

TÍTULO: EVALUACION DE LA CALIDAD DEL AGUA DE CONSUMO HUMANO Y SOLUCIONES PARA MEJORAR EL FUNCIONAMIENTO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE DEL MUNICIPIO DEL HATO (SANTANDER)*.

AUTORES: RODRIGO JOSÉ RODRÍGUEZ LÓPEZ, FRANCY LORENA ROJAS BAUTISTA.**

PALABRAS CLAVES: Agua para consumo humano, Tratamiento de agua potable, IRCA, Turbiedad, Sulfato de Aluminio, Polihidroxiclورو de Aluminio.

DESCRIPCIÓN

El agua es uno de los recursos más importantes para los seres vivos. Con el paso del tiempo ha incrementado el acceso al agua potable, sin embargo estadísticas consideran que próximamente muchos países tendrán deficiencias para acceder al preciado líquido como se puede comprobar en el descenso de los caudales y en el mal uso que hacemos del agua.

Nuestro país no está alejado de esta realidad, lo que observamos en las zonas rurales, donde no existen tratamientos para potabilizar el agua y el consumo se hace directo desde la fuente hídrica, exponiendo a quien la consume a enfermedades sanitarias y brotes epidémicos. Esto genera preocupación en algunos entes gubernamentales, en profesionales, estudiantes y entidades dedicadas a su tratamiento de manera que se solucione el problema de potabilización y se contribuya con su uso eficiente.

En este trabajo se evaluó la calidad del agua de la Planta de Tratamiento de Agua Potable — (PTAP) del municipio del Hato, departamento de Santander. Con este fin se recolectaron muestras de agua en la PTAP, las cuales fueron caracterizadas fisicoquímica y microbiológicamente por el laboratorio del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales —(IDEAM). Con los resultados de estos análisis, se calculó el índice de riesgo de la calidad del agua para consumo humano —(IRCA) contemplado en la resolución 2115 del 2007; los cuales indican que la PTAP se clasifica de alto riesgo, evidenciando la necesidad de cambiar el proceso de tratamiento y por ende la calidad del agua a consumir.

Por tal razón, se hizo necesario mejorar la PTAP, desarrollar un manual de operaciones para cumplir las regulaciones ambientales vigentes, se calculó la dosis óptima de coagulante, realizando un análisis entre dos coagulantes: sulfato de aluminio tipo B y polihidroxiclورو de aluminio, se rediseñó el filtrador, y los sistemas de coagulación y floculación.

*Proyecto de grado

**Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: M.sc. Crisóstomo Barajas Ferreira. Codirector: Juan Agustín Gualdrón.

SUMMARY

TITLE: EVALUATION OF THE QUALITY OF WATER FOR HUMAN CONSUMPTION AND SOLUTIONS TO OPTIMIZE THE PERFORMANCE OF THE DRINKING WATER TREATMENT PLANT IN THE MUNICIPALITY OF HATO (SANTANDER)*.

AUTHORS: RODRIGO JOSÉ RODRÍGUEZ LÓPEZ. FRANCY LORENA ROJAS BAUTISTA. **

KEY WORDS: Water to human consumption, drinking water treatment, risk index for water quality (RIWQ), turbidity, aluminum sulfate, Polyhydroxy Aluminum Chloride.

DESCRIPTION

Water is considered one of the most important resources for all living species. Over time, it has been possible to demonstrate that the access to drinking water has increased; however, statistics estimate that soon many countries will have limited access to this precious liquid. This can be proved through the decline of water flow and the misuse of them.

Our country is not far from this reality and we can observe this in the rural areas, where there are no purification treatments and consumption is directly from the hydric source, which exposes the human being who consumes it to diseases and epidemic outbreaks.

This has raised concerns in some government agencies, in professionals, students and organizations dedicated to its treatment so that a solution to this problem can be given, and to contribute to the efficient use of water.

This study evaluated the quality of water in the treatment plant of drinking water (TPDW) of the municipality of Hato, an area corresponding to Santander State. For this purpose, water samples were collected at the TPDW, which were characterized physicochemical and microbiologically by the IDEAM laboratory. With the results of these analyses the risk of water quality for human consumption was also calculated, which was referred in the resolution 2115 in 2007. The results indicate that the TPDW is classified as sanitarily non-viable, which proved the need to improve the treatment process and therefore the quality of water to consume.

For this reason, it became necessary to develop an operation manual and improve the treatment plant so that they both comply with the current environmental regulations. It was calculated the optimal dose of coagulant by performing a sensitivity analysis of two coagulants, aluminum sulfate B and Polyhydroxy Aluminium Chloride. The filter, coagulation and flocculation system were redesign as well.

* Project Grade

** Physicochemical Engineering Faculty. School of Chemical Engineering. Director: M.Sc. Barajas Crisóstomo Ferreira. Co-Director: Juan Agustín Gualdrón.

INTRODUCCIÓN

El agua es un componente vital para los organismos vivos y constituye un gran porcentaje del planeta tierra; sin embargo el desarrollo de la sociedad humana ha traído consigo deterioros al medio y aumentos en la demanda, por lo cual es deber de los gobiernos generar políticas de protección y uso eficiente del recurso.

Colombia es un país que se caracteriza por tener gran disponibilidad de agua, la cual se interviene para su aprovechamiento usando las PTAP, las cuales deben seguir etapas básicas tales como: coagulación, floculación, sedimentación, filtración y desinfección. La legislación colombiana propone mecanismos de aprovechamiento del recurso, permitiendo a la comunidad tramitar concesiones para legalizar su uso, así mismo se estipulan valores permisibles de parámetros físicos, químicos y microbiológicos del agua para garantizar la calidad del recurso.

La corporación de tecnologías ambientales sostenibles (CTAS), realizó análisis fisicoquímicos y microbiológicos en las bocatomas y plantas de tratamiento a lo largo de la cuenca del río Suárez (departamento de Santander) con el fin de organizar las fuentes hídricas que desembocan en el mismo y evaluar las condiciones en las que se encuentran.

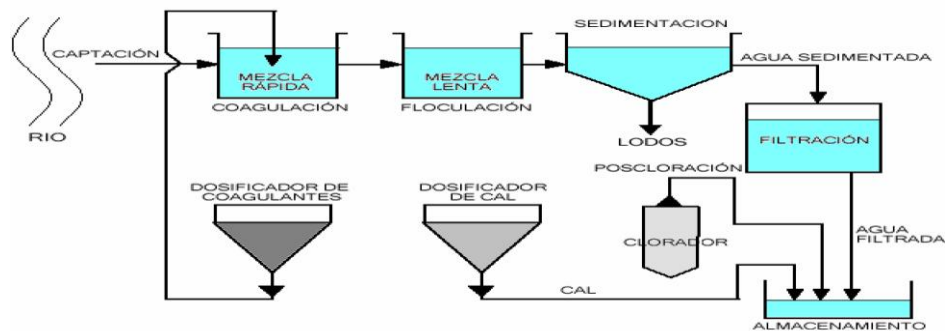
En el desarrollo de labores de recolección de muestras, el municipio del Hato presenta deficiencias visibles en la calidad del agua, por lo que se hace necesario realizar observaciones de la PTAP, indagar sobre las concesiones que tiene el municipio y realizar un análisis de calidad mediante lo propuesto en la resolución nacional 2115 de junio del 2007. El objetivo de este proyecto es favorecer a la población mediante un documento que sirva como soporte e indique la calidad del agua que consumen, en donde se analizan las posibles soluciones a los problemas del sistema de agua potable aprovechando los equipos existentes; y se estudian dos coagulantes, sulfato de aluminio tipo B frente al polihidroxiclorigenato de aluminio (PAC) teniendo en cuenta las ventajas y desventajas de cada uno.

1. CONCEPTOS TEÓRICOS

1.1 TRATAMIENTO CONVENCIONAL

El proceso de tratamiento de agua potable se compone básicamente de 6 etapas en donde el agua cruda sufre cambios físicos, químicos y biológicos, las cuales se describen a continuación (véase figura 1):

Figura 1. Diagrama de flujo planta de tratamiento de agua potable convencional.



Fuente: Módulo Recurso del Agua III. Mónica Mendoza/William Ibáñez.

- Captación: consiste en obras hidráulicas que permiten disponer de un caudal de agua específico para el consumo de una población.
- Coagulación: es el proceso más importante en el tratamiento del agua, aquí se agrega coagulante para desestabilizar las cargas eléctricas de las partículas causantes del color y la turbiedad que se encuentran en suspensión fina, estado coloidal o en solución.
- Floculación: durante el proceso se aglutinan las impurezas presentes en el agua formando coloides llamados floc o floculos los cuales tienen un peso específico superior al del agua y se pueden remover rápidamente por sedimentación.
- Sedimentación: este proceso se emplea para remover los sólidos formados del proceso de floculación. Es netamente físico, utiliza la diferencia de densidades de las partículas y el agua.

- Filtración: consiste en hacer pasar el agua a través de un medio poroso, normalmente de arena, su eficiencia depende de las características de la suspensión (agua más partículas) y del medio poroso.
- Desinfección: es un proceso físico y/o químico, no biológico, utilizado para la destrucción de los microorganismos patógenos, o sea aquellos que pueden causar enfermedades [10].

1.1.1 COAGULANTES QUIMICOS

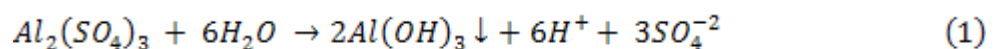
Los coagulantes son sustancias químicas, las cuales al agregarse al agua inducen la formación de coloides de partículas finas presentes en el agua, estos se polimerizan y a continuación se realiza la adsorción por parte de los coloides.

Los coagulantes se clasifican en metálicos y polielectrolíticos. Los metálicos se polimerizan al entrar en contacto con el agua, y luego se da la adsorción por parte de los coloides. En los polielectrolíticos las cadenas ya están formadas antes de agregarlos al agua. Algunos coagulantes usados son: sulfato de aluminio, sulfato ferroso, sulfato férrico, aluminato de sodio, cloruro férrico y polihidroxiclорuro de aluminio.

1.1.1.1 SULFATO DE ALUMINIO

Su fórmula es $Al_2(SO_4)_3 \cdot 14H_2O$, es el coagulante más utilizado en la industria de tratamiento de aguas. Se considera que el proceso de coagulación con alumbre consta de tres etapas [7].

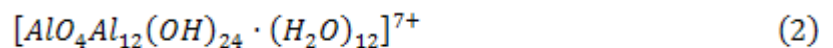
- El alumbre es ionizado en el agua y produce Al^{+3} y SO_4^{-2} . El Al^{+3} se puede combinar con coloides de carga negativa para neutralizar parte de la partícula coloidal, de manera que se pueda dar una unión entre ellas.
- La mayoría de los iones Al^{+3} se combinan con iones OH^- (acuosos) para formar $Al(OH)_3$ coloidal que actúa absorbiendo los iones positivos de la solución (véase ecuación 1):



- En la solución, el $\text{Al}(\text{OH})_3$ con carga positiva neutraliza los coloides negativos, y el exceso lo neutraliza por el SO_4^{-2} lo que produce un precipitado de $\text{Al}(\text{OH})_3$ y sulfatos adsorbidos. El exceso de H^+ formado en la etapa anterior hace que disminuya el pH, lo que impediría que se forme el $\text{Al}(\text{OH})_3$ debido a la dependencia de éste. Por ello se hace necesario adicionar cal $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$, carbonato de sodio (Na_2CO_3) o sosa (NaOH) [8].

1.1.1.2 POLIHIDROXICLORURO DE ALUMINIO

En el mercado es conocido como PAC, es una sal básica del cloruro de aluminio, un polímero inorgánico de carga catiónica, en el mercado se puede conseguir en dos presentaciones, polvo o líquido; fórmula química de la presentación líquida se muestra en la ecuación 2:



Dentro de sus propiedades están: modifica poco la alcalinidad y el pH del agua, desestabiliza los coloides rápidamente, produce menos volumen de lodos comparando con otros coagulantes. Posee una rápida velocidad de sedimentación para eliminar coloides y sólidos suspendidos.

1.2 PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE DEL HATO

1.2.1 FUENTE ABASTECEDORA

La fuente que abastece el acueducto urbano se toma de la quebrada la Chirigua (véase figura 2).

Figura 2. Bocatoma Quebrada la chirigua.



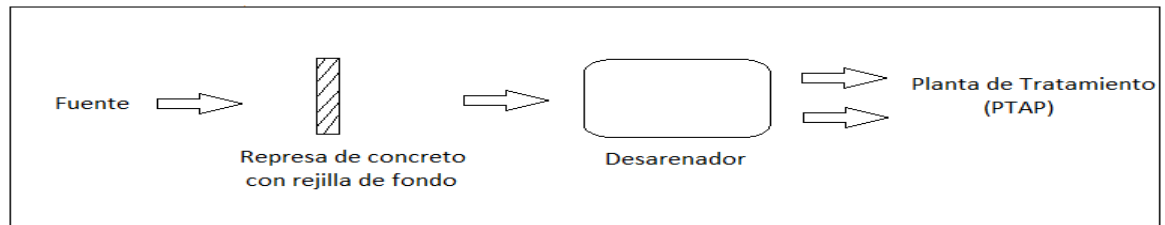
Fuente: Pomca del Río Suárez. CAS/ANP [5].

El caudal presenta el siguiente comportamiento:

- Caudal en época normal: 17.521.920 L/día
- Caudal en época de verano: 13.478.400 L/día
- Caudal captado por el acueducto municipal: 518.400 L/día

La bocatoma presenta lecho rocoso, con gran cobertura vegetal en un bosque nativo; terreno con gran inclinación montañosa. La captación está conformada por una represa de concreto a lo ancho del cauce, tiene 6 m de longitud, 1 m de ancho, 1,50 m de alto con rejilla de fondo de 3 m de largo y 40 cm de ancho. El afluyente es conducido hasta un desarenador por tubería de p.v.c de 0,1524 m en una distancia de 1,360 m. Este consta de una estructura de 1 m de ancho, 6 m de largo y 2 m de profundidad, de ahí es conducida por 2 tubos; uno de 0,0762 m de diámetro y otro de 0,127 m de diámetro hasta la planta de tratamiento a 3000 m de distancia; entrando un caudal de 5 L/s mediante sistema de gravedad. En la figura 3 se presenta el esquema del sistema de captación, para otros aspectos de la localidad ver Anexo A.

Figura 3. Sistema de Captación



Fuente: Los Autores.

1.2.2 PLANTA DE TRATAMIENTO

El acueducto municipal inicia su captación en la quebrada la Chirigua, de allí es llevada hasta la planta de tratamiento de manera constante para luego ser suministrada al 100 % de las viviendas, 160 en el casco urbano y 130 en las veredas, este servicio es administrado por la alcaldía del municipio.

Los análisis fisicoquímicos del agua se llevan a cabo una vez al año. Según información suministrada por la CAS, el municipio del Hato no posee concesiones de agua para ninguna de las bocatomas (véase tabla 1), solo existe una concesión pero no para la cantidad de agua captada actualmente.

Tabla 1. Concesiones otorgadas por la CAS en el municipio del Hato

CONCESIONES DE AGUA MUNICIPIO DE HATO					
EXPEDIENTE	CAUDAL L/s	FUENTE	INTERESADO	VEREDA	PREDIO
50-06	0,0092	RECODO	ANA DOLORES DOMINGUEZ	RONCANCIO	LA BELLEZA

Fuente: Pomca del río Suárez [5].

La planta de tratamiento es de tipo convencional trata un caudal de 3,5 L/s y se localiza en la vereda Páramo a 1500 m del casco urbano. Se puede acceder a ella por la carretera que conduce a la vereda Hoya Grande; consta de un área de 1200 m² y de las siguientes operaciones básicas de tratamiento [5].

- **Floculación:** primer tanque de la planta, posee un cono de mezcla localizado en la parte superior, donde se realiza un vórtice (remolino) con una entrada para el agua cruda, allí recibe el sulfato de aluminio para efectuar la floculación. El floculador se encuentra diseñado con una velocidad de floculación de 4,5 m³/m²-h. El tanque es de Poliéster Reforzado en Fibra de Vidrio (P.R.F.V), las dimensiones son de 2,2 m de altura y de 2,5 m de diámetro.
- **Decantación:** segundo tanque, esta zona consta de un tanque de 2,2 m de altura por 2,5 m de diámetro. El tanque es de P.R.F.V, en esta etapa se utiliza la gravedad para permitir la decantación de los sólidos suspendidos. Este tanque se encuentra diseñado con una velocidad de descenso de 5,5 m³/m²-h.
- **Filtración:** tercer tanque, equipado con una red de tubos que llevan adheridos boquillas en polietileno con aberturas tan pequeñas que solo

permiten la entrada del agua filtrada no dejando penetrar los lechos filtrantes. Estos filtros terminan en un cono central que conduce el agua filtrada a un tanque de almacenamiento. Todo el espacio del filtro está lleno de gravas y arenas sílices de diferente granulometría. El filtro se encuentra diseñado con una rata de filtración de $7,5 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{-h}$; consta de un tanque P.R.F.V. con 2 m de diámetro y 3 m de altura en cuyo interior se encuentra un falso fondo a 1 m de altura, sistema de colectores y boquillas, tubo de cargue, sifón de retrolavado y la tubería de regulación.

- Adicional a estos equipos, la planta cuenta con una caseta de 8 m de ancho por 4 m de longitud construida en ladrillo y placa, en donde se encuentra una bala de cloro (no funciona), equipos para medir: dureza, alcalinidad y turbidez. Sobre la estructura se encuentra un dosificador gravinométrico el cual adiciona el sulfato de aluminio al tanque de floculación (no funciona).

1.3 NORMAS DE CALIDAD PARA EL AGUA POTABLE EN COLOMBIA

La calidad del agua es un parámetro de gran importancia que se debe aplicar en todos los sistemas de tratamiento de agua para consumo humano, es por ello que se establecen normas que promuevan las condiciones de calidad de la misma. En Colombia se cuenta con la resolución nacional 2115 de junio de 2007 [2], la cual señala características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua de consumo humano; acompañada del reglamento técnico del sector de agua potable RAS 2000 [4].

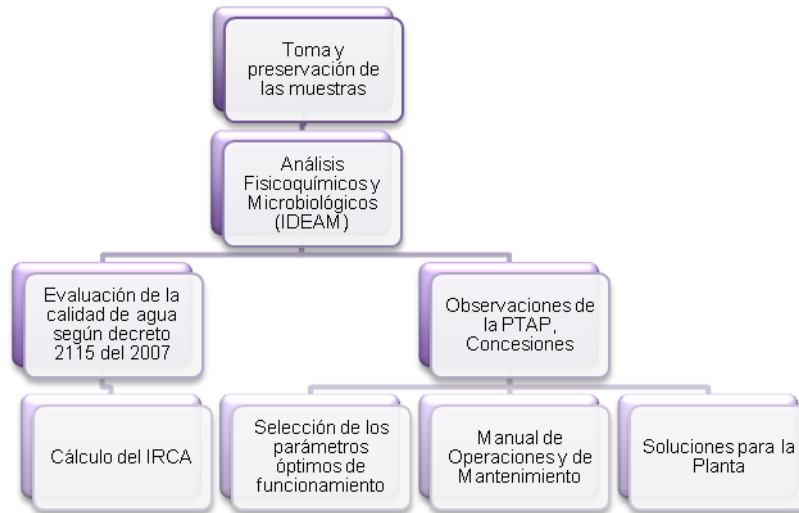
1.3.1 INDICE DE RIESGO PARA LA CALIDAD DEL AGUA (IRCA)

El IRCA calcula el porcentaje de riesgo que tiene una fuente de agua para el consumo humano, teniendo en cuenta parámetros físicos, químicos y biológicos. Con el fin de determinar la calidad del agua de la PTAP del Hato, se hace uso de este parámetro cuyos valores aceptables se encuentran contemplados en la resolución nacional 2115 de junio de 2007 (ver anexo B) [2].

2. DESARROLLO EXPERIMENTAL

En este capítulo se describe la metodología empleada para la toma de las muestras y los pasos realizados durante el desarrollo del estudio. En la figura 4 se muestran en orden cronológico las actividades realizadas.

Figura 4. Orden cronológico de las actividades realizadas durante el estudio.



Fuente: Los Autores.

Seguido se proporcionará una breve descripción de los diferentes lineamientos establecidos por la norma y que fueron utilizados en el momento de la recolección de las muestras.

2.1 TOMA Y PRESERVACIÓN DE LAS MUESTRAS

Las acciones realizadas durante el desarrollo del proyecto en materia de la recolección de los respectivos muestreos en los acueductos y las bocatomas, se rigieron bajo la Norma Técnica Colombiana NTC-ISO 5667-5 y 5667-6.

De acuerdo con el programa de uso eficiente y ahorro de agua (AYUEDA) contemplado en la ley colombiana 373 de 1997, se ubicaron los puntos en los cuales se iban a realizar los respectivos muestreos para la PTAP y para la bocatoma del municipio del Hato. El muestreo que se realizó fue de tipo puntual, es decir, sólo se tomó una muestra en la bocatoma y en la PTAP.

Posteriormente preservan las muestras tomadas en neveras (cavas) con hielo como método refrigerante a 5°C, siguiendo lo establecido por la Norma Técnica Colombiana NTC-ISO 5667-3, para luego ser enviadas al laboratorio del IDEAM en Bogotá, para realizar análisis fisicoquímicos y microbiológicos. En el momento de los muestreos se deben tener ciertas consideraciones para no alterar el contenido de las muestras, para ello se realizó una purga del recipiente (aproximadamente 2 veces) momentos previos a su recolección sin llenarlo en su totalidad acorde a lo establecido por la norma.

2.1.1 SEGURIDAD, CONTROL Y ANÁLISIS DE LAS MUESTRAS

Durante la recolección de las muestras, se adopta una metodología que permitiera tener una vigilancia total sobre las muestras. A continuación se describe la metodología utilizada:

2.1.1.1 Almacenamiento de las muestras: para preservar las muestras se utilizaron recipientes de plástico de 1 L de volumen.

2.1.1.2 Rotulación: a manera de prevención, se rotuló cada muestra tomada con la siguiente información: lugar en que se había tomado la muestra (municipio), fecha, hora y número de la muestra.

2.1.1.3 Localización: con el fin de tener precisión del lugar en análisis para referencias futuras, se determinaron las coordenadas exactas de la zona donde se estaba realizando el muestreo con un GPS.

2.1.1.4 Observaciones: se debe consignar toda la información observada, por lo que se registra en una bitácora las inspecciones realizadas, con el fin de tener un soporte escrito del procedimiento efectuado.

2.1.1.5 Análisis microbiológicos: los parámetros microbiológicos fueron determinados por el IDEAM.

2.1.2 METODOLOGÍA PARA MEDICIONES PUNTUALES (Fisicoquímicos)

Los parámetros calculados en el desarrollo del estudio y la metodología utilizada para desarrollarlo se especifican como sigue:

2.1.2.1 *Temperatura:* la medición se realizó con un termómetro que trabaja por acción de mercurio fabricado en vidrio con una escala de 0°C a 50°C, utilizado en los lugares de recolección de la muestra.

2.1.2.2 *pH:* para determinar el valor del pH de las zonas estudiadas, se empleó papel indicador. Luego se procede a comparar el color con los que se encuentran pre-establecidos para obtener en números el valor de la medición.

2.1.2.3 *Cloro residual libre:* la medición de este parámetro se basa en los cambios de color que sufre el analito (en este caso agua) causado por la presencia de un indicador (OTO (o-tolidina)). Luego se compara el color obtenido con los que se encuentran pre-establecidos obteniéndose un resultado numérico del parámetro.

2.1.2.4 *Porcentaje de saturación de oxígeno disuelto:* el cálculo de este parámetro se efectuó mediante la ley de Henry. Este valor fue calculado usando tablas de solubilidad de oxígeno en agua con aire a 760 mm Hg y factores de corrección de la presión parcial y la saturación relativa a diferentes alturas [1].

2.2 EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA SEGÚN LA NORMATIVIDAD COLOMBIANA

Los valores calculados por el laboratorio del IDEAM se comparan con los reportados en la resolución nacional 2115 de junio de 2007, donde establece los valores permisibles de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos para la calidad del agua de consumo humano.

2.2.1 CÁLCULO DEL ÍNDICE DE RIESGO DE CALIDAD DE AGUA PARA CONSUMO HUMANO IRCA

En la actualidad se han planteado diferentes índices que evalúan la calidad del agua para consumo humano. Uno de ellos es el IRCA el cual asigna a cada característica física, química y microbiológica un puntaje de riesgo, el cual se determina partiendo del no cumplimiento de los valores aceptables asignados en la resolución nacional 2115 de Junio de 2007.

Para proceder a evaluar el IRCA de una fuente hídrica se debe contar con los análisis fisicoquímicos y microbiológicos correspondientes a las características consignadas en la tabla B1, posteriormente se analizan los resultados y se asignan los puntajes de riesgo de acuerdo a los valores estipulados en la tabla B2 (véase anexo B). Finalmente se realiza el cálculo del IRCA empleando la ecuación 3.

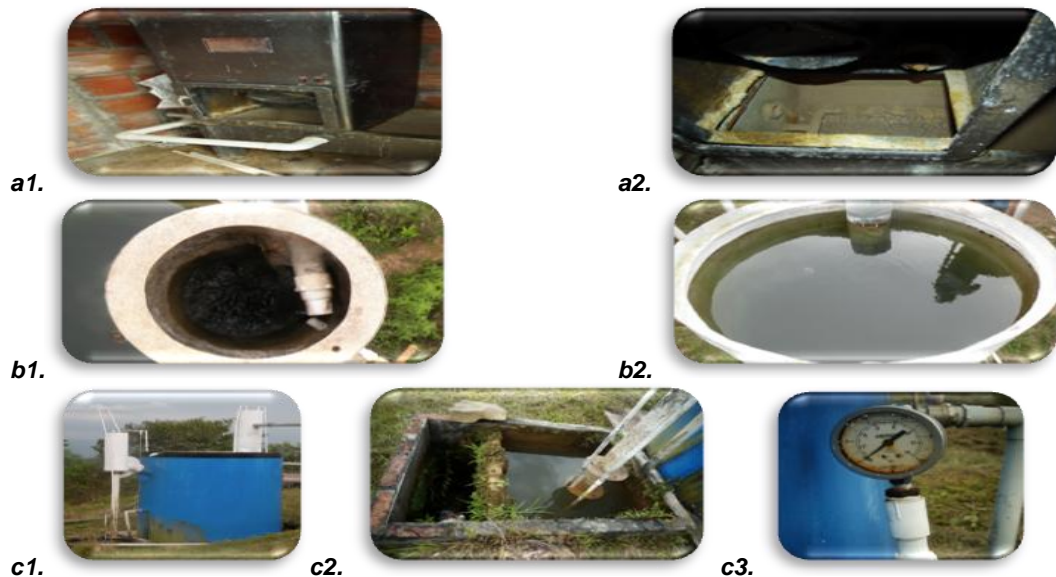
$$IRCA(\%) = \frac{\sum \text{Puntaje de riesgo asignado a las características no aceptables}}{\sum \text{Puntaje de riesgo asignados a todas las características analizadas}} \quad (3)$$

Una vez obtenido este valor se determina el nivel de riesgo de la fuente hídrica comparando el porcentaje con los valores consignados en la tabla B3.

2.3 OBSERVACIONES DE LA PTAP

Pese a que la PTAP posee los equipos básicos para garantizar la potabilización del agua, la planta no se encuentra en funcionamiento y sus unidades se encuentran en deterioro físico debido a la falta de mantenimiento y a la falta de los materiales para los procesos de floculación (no adicionan coagulante), de filtración (no funciona) y de desinfección (no adicionan cloro). Así mismo no posee personal capacitado para efectuar las actividades operacionales, por lo que el municipio del Hato se ha declarado en emergencia sanitaria, y el servicio de agua potable prestado a los usuarios no garantiza el cumplimiento de los requerimientos básicos de calidad. En la figura 5 se presenta el estado de algunos equipos de la PTAP.

Figura 5. Observaciones en la PTAP.



a1, a2. Dosificador. b1, b2. Mezclador y floculador. c1, c2 y c3. Filtro y sistema de retrolavado. Fuente: Los Autores.

Como ya se había mencionado anteriormente, el municipio del Hato no posee concesión de aguas, por lo tanto se hace necesario solicitarlo para legalizar la captación de agua del municipio (ver Anexo C).

2.4 METODOLOGÍA PARA LA SELECCIÓN DE LOS PARÁMETROS DE FUNCIONAMIENTO

Los parámetros de funcionamiento de la planta se determinaron mediante una prueba de jarras, la cual consiste en simular a escala laboratorio el proceso de floculación, coagulación y sedimentación que se realiza en las PTAP.

2.4.1 SELECCIÓN Y DOSIS ÓPTIMA DE COAGULANTE

Es común la utilización de sulfato de aluminio tipo B en las plantas de tratamiento de agua potable, esto se debe a la disponibilidad en el mercado y a su eficiencia. Sin embargo frente a la necesidad de mejorar las condiciones operacionales de la planta, se hace necesario evaluar otro coagulante en este caso el polihidroxicloruro de aluminio (PAC) y observar el comportamiento de las variables principales de la etapa de coagulación.

La determinación de la dosis óptima de los coagulantes, se realiza con la prueba de jarras. Se prepara una solución de 1000 ppm de los coagulantes en agua destilada, se escoge la cantidad a agregar variando las dosis según lo planteado en el anexo D. El equipo inicialmente trabaja a 100 rpm durante 1 min agregándose de manera simultánea las cantidades de coagulante; luego se reduce la velocidad de los agitadores a 40 rpm y se deja trabajando por un período de 30 min. Al finalizar se detiene el equipo y se dejan en reposo las muestras simulando la etapa de sedimentación; finalmente se toma una muestra de agua de cada jarra y se mide la turbidez con un turbidímetro marca Hach 2100Q01.

Luego se procede a graficar los valores de turbidez de cada coagulante con relación a las dosis agregadas, se halla la gráfica de tendencia en cada caso con su respectiva ecuación, la cual es utilizada para calcular la dosis de coagulante mínima necesaria, para un valor mínimo de turbidez.

2.5 ACCIONES DE MEJORAMIENTO

De acuerdo con las dosis de coagulante calculadas en el punto anterior, se realiza un análisis de costos comparando las dos alternativas y se escoge la mejor opción para la PTAP. Teniendo en cuenta las observaciones de la PTAP y los valores de riesgo obtenidos en el IRCA, el municipio del Hato posee 3 equipos en deterioro: mezclador de la etapa de coagulación (con dosificador), floculador y filtro, por lo tanto se decide proponer un diseño preliminar. De manera adicional se planteará un manual de operaciones y de mantenimiento, para uso del personal encargado de operar la planta, esto con el fin de tener un mejor desempeño de los equipos que intervienen en el proceso.

2.6 MANUAL DE OPERACIONES Y MANTENIMIENTO

Buscando mantener la eficiencia en los equipos de la planta se propone cumplir con un manual de operaciones y mantenimiento (Ver Anexo H).

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 CÁLCULO DEL IRCA

Los resultados de los parámetros fisicoquímicos y biológicos del agua en la PTAP, se presenta en la tabla 2. Utilizando el IRCA se determina el nivel de riesgo del agua que distribuye el acueducto municipal.

Tabla 2. Calculo del IRCA y nivel de riesgo municipio del HATO

Características y compuestos	Valor máximo aceptable	Puntaje de riesgo	ACUEDUCTO HATO
Color aparente [UPC]	15	6	16,2
Turbiedad [UNT]	2	15	3,0
pH	6,5-9	1,5	5,5
Alcalinidad total [mg de CaCO ₃ /L]	200	1	5
Calcio [mg de Ca/L]	60	1	4,5
Magnesio [mg de Mg/L]	36	1	9
Cloruros [mg de Cl/L]	250	1	0,52
Dureza total [mg de CaCO ₃ /L]	300	1	13
Coliformes totales [UFC/100 ml]	0	15	1000
Escherichia coli [UFC/100 ml]	0	25	0
IRCA (%)			55,5
NIVEL DE RIESGO			ALTO RIESGO

Fuente: Los Autores

Según el resultado del IRCA (55,5 %), la población del Hato consume agua de baja calidad y el nivel de riesgo de la población es alto, ya que según la resolución nacional 2115 de junio de 2007 las aguas con estas características no se deben utilizar para el consumo humano. Este nivel de riesgo es causado principalmente por sobrepasar los niveles permisibles de las siguientes características: color aparente, turbiedad, pH y Coliformes totales.

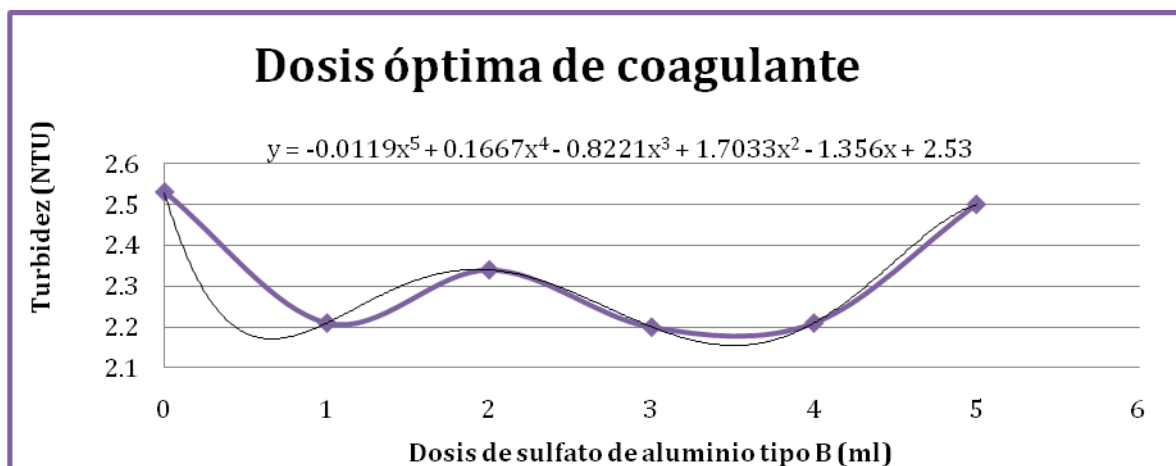
3.2 PARÁMETROS ÓPTIMOS, SELECCIÓN DE COAGULANTE

3.2.1 DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS ÓPTIMOS DE LAS ETAPAS DE COAGULACIÓN Y FLOCULACIÓN

Debido a que unos de los equipos a modificar son los de coagulación y floculación (ya que los que actualmente posee la planta no están en funcionamiento), se hace necesario determinar los parámetros óptimos en laboratorio, para esto se realizó la prueba de jarras acorde al procedimiento descrito en el anexo D.

Siguiendo lo descrito en la metodología para selección de coagulante, en las figuras 6 y 7 se muestra la gráfica de la turbidez frente a la dosis de coagulante, con sus respectivas gráficas y ecuación de tendencia, encontrándose la dosis óptima para cada coagulante.

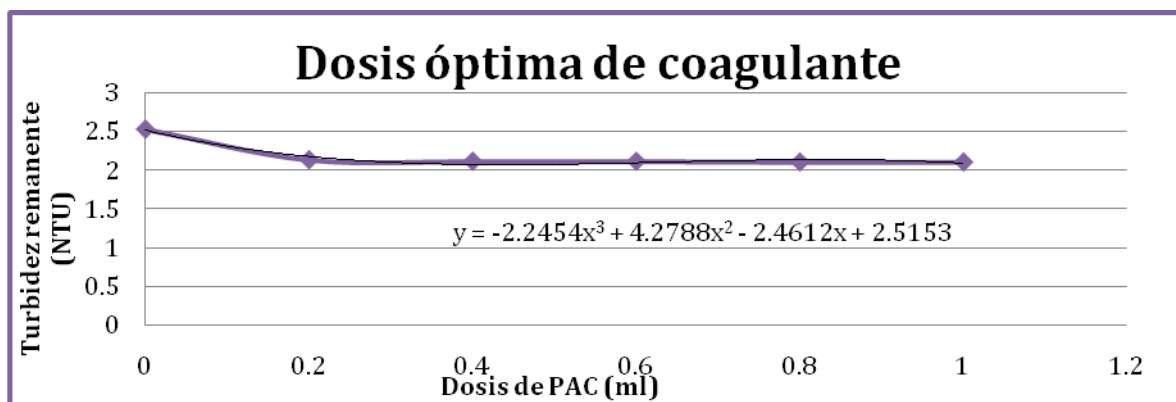
Figura 6. Gráfica y curva de tendencia para el sulfato de aluminio tipo B.



Fuente: Los Autores

Para ambos casos se resuelven las ecuaciones mostradas en cada gráfico, obteniéndose los valores de coagulante que se deben adicionar para el valor mínimo encontrado en el desarrollo experimental.

Figura 7. Gráfica y curva de tendencia para el polihidroxicloruro de aluminio (PAC).



Fuente: Los Autores

En la tabla 3 se presentan los parámetros obtenidos mediante las ecuaciones resultantes de la curva de tendencia, y los gradientes de velocidad obtenidos para cada tramo del equipo de floculación, siguiendo los modelos teóricos propuestos en el anexo D.

Tabla 3. Parámetros óptimos para las etapas de coagulación y floculación.

ETAPA	PARÁMETROS ÓPTIMOS	
COAGULACIÓN	Dosis óptima de Sulfato de Aluminio tipo B	15,2 mg/L
	Dosis óptima de PAC	1,5 mg/L
	pH	El natural del agua
Unidad de Tratamiento	Tiempo de Retención (min)	Gradiente de Velocidad (s ⁻¹)
FLOCULACIÓN	7,7	109
	7,7	72
	7,7	46

Fuente: Los Autores

3.2.2 SELECCIÓN DEL COAGULANTE

El Sulfato de Aluminio es considerado como un excelente coagulante, debido a que presenta buenos resultados a bajo costo. Sin embargo al usar este coagulante se debe tener en cuenta la modificación en el pH, por lo que se debe adicionar cal, lo que disminuye la calidad del agua. Por otro lado el PAC

es relativamente nuevo, no modifica el pH, la velocidad de coagulación y floculación es mayor, y permite mejorar la eficiencia y la calidad del proceso. Comparando las cantidades adicionadas se puede observar que se requiere menor dosis de PAC para disminuir la turbidez del agua, y que el valor de turbidez obtenido es menor comparado con la del sulfato de aluminio. Otra ventaja del PAC es que al usarlo no deja residuos de aluminio en el agua [9]. En la tabla 4 se muestra una comparación de costos y en la tabla 5 se compara la cantidad diaria adicionada de cada uno de los coagulantes.

Tabla 4. Comparación Económica PAC vs Sulfato de Aluminio.

Coagulante	Costo Unitario (\$/Kg)	IVA (16%)	Costo Total (\$/Kg)
Sulfato de Aluminio Tipo B	456	72,96	528,96
PAC	710	113,6	823,6

Fuente: Insuquim Ltda.

Tabla 5. Relación de dosis óptima de coagulante diaria vs costo.

Coagulante	Costo Unidad (\$/mg)	Dosis óptima (mg/L)	Precio dosis óptima (\$/L)	Litros diarios (L/día)	Costo día (\$/día)
Sulfato de Aluminio	$5,2896 \cdot 10^{-4}$	15,2	$8,0402 \cdot 10^{-3}$	302400	2431,35
PAC	$8,236 \cdot 10^{-4}$	1,5	$1,2354 \cdot 10^{-3}$	302400	373,585

Fuente: Los Autores.

Conforme a lo planteado en la tabla 7 se deduce que para cierta turbidez, se debe agregar una dosis de coagulante que varía dependiendo de la sustancia analizada, igual que el precio, demostrando que para la turbidez manejada en el municipio del Hato y acorde a la dosis de coagulante a adicionar, el producto que mejor se comporta es el PAC, lo que supone un gran ahorro diario tanto en la cantidad de producto como en el dinero a invertir, lo que a largo plazo mejoraría en gran proporción la calidad del agua y la economía de la región.

3.2.3 DIMENSIONAMIENTO DE LAS ETAPAS

3.2.3.1 Mezcla Rápida (Coagulación)

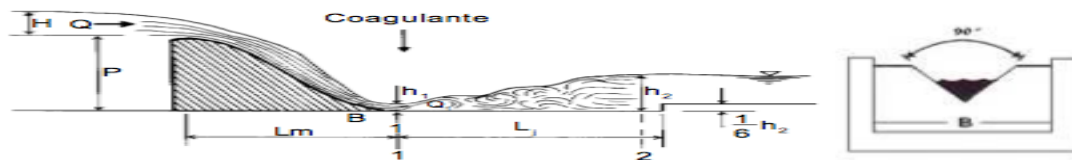
Se escogió un mezclador hidráulico tipo vertedero triangular de 90° (figura 8), ya que es recomendado para caudales menores a 30 L/s [3]. El vertedero se construye con una altura P (medida desde el vértice del vertedero al fondo del canal) de 0,7 m, y con un ancho de canal de $B = 2L$ debido a que L es demasiado pequeña al igual que el caudal. En la tabla 6 se observa el dimensionamiento y los valores de los parámetros diseñados para el mezclador seleccionado (ecuaciones en anexo E).

Tabla 6. Dimensiones del mezclador vertedero triangular

PARÁMETROS	VALOR	UNIDADES
Caudal (Q)	0,0035	m ³ /s
Altura de la lámina de agua sobre el vertedero (h)	0,09102821	m
Ancho de la lámina vertiente (L)	0,18205642	m
Ancho del canal (B)	0,364112841	m
Altura crítica (h _c)	0,021125776	m
Altura desde el vértice del vertedero hasta el fondo del canal (P)	0,7	m
Altura al inicio del resalto (h ₁)	0,004985731	m
Número de Froude (F ₁)	8,722194165	-
Altura de agua después del resalto (h ₂)	0,018479461	m
Longitud del resalto (L _m)	0,080962382	m
Distancia del vertedero a la sección 1 (L')	0,128916844	m
Velocidad promedio en el resalto (V _m)	1,224074985	m/s
Tiempo de mezcla (T)	0,066141685	s
Gradiente de velocidad (G)	963,5050761	s ⁻¹

Fuente: Los Autores.

Figura 8. Vertedero Triangular



Fuente: Manual II: Diseño de Plantas de Tecnología apropiada, Capítulo 2 [3].

3.2.3.2 Floculación

Se eligió un floculador de pantallas (asbesto-cemento), por economía y eficiencia, asumiendo flujo horizontal, apropiado para caudales menores de 50 L/s, y se dividió en 3 tramos siendo este el número mínimo requerido [3].

Para el dimensionamiento se sigue el modelo planteado en el anexo F donde se tuvo en cuenta el mejor tiempo de retención para el tramo diseñado. Luego se hizo un procedimiento de prueba y error hasta que el gradiente de velocidad cumpla con el óptimo hallado en laboratorio teniendo en cuenta los valores de velocidad de floculación (0,1 a 0,6 m/s) según lo reportado en la literatura, realizándose para todos los tramos (véase tabla 7).

Tabla 7. Dimensiones para el floculador hidráulico horizontal.

PARÁMETROS	VALOR			Unidades
	Tramo 1	Tramo 2	Tramo 3	
Caudal (Q)	0,0035	0,0035	0,0035	m ³ /s
Tiempo de retención (T _i)	7,7	7,7	7,7	min
Velocidad (v _i)	0,153	0,106	0,1	m/s
Longitud de canales (l _i)	70,686	48,972	46,2	m
Ancho de canales (a _i)	0,000454	0,000757	0,000757	m
Ancho de vueltas (d _i)	0,001136	0,001136	0,001136	m
Ancho de la Unidad (B _i)	2,6861	2,6861	2,6861	m
Número de canales (N _i)	26	18	17	-
Longitud del tramo (L _i)	0,1212	0,1212	0,1212	m
Perdida de carga total (hf _i)	0,6043	0,2006	0,1684	m
Gradiente de velocidad (G _i)	109,75	63,24	57,94	s ⁻¹

Fuente: Los Autores.

El gradiente de velocidad en el último tramo hallado en el laboratorio se modificó de 46,48s⁻¹ a 57,94 s⁻¹ ya que este es el correspondiente para una velocidad mínima de floculación permitida de 0,1 m/s.

La longitud del tramo se iguala para los tres tramos del floculador de manera que los floculadores se construyan de manera equitativa. Estos datos permiten que se construyan tres tanques iguales de 2,7 m de ancho, longitud de 0,1212 m y 1 m de profundidad.

3.2.3.3 Filtración

Se escogió un filtro grueso dinámico, debido al caudal que maneja. En este caso se va a utilizar un caudal $Q=3,5 \text{ L/s} = 12,6 \text{ m}^3/\text{h}$. Se utilizarán 2 unidades de filtros.

El área total del filtro se calcula mediante la relación del caudal del filtro y la tasa de filtración.

$$\text{Área total del filtro (m}^2\text{)} = \frac{Q_{\text{filtro}} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right)}{\text{Tasa de filtración} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \text{ h}} \right)} \quad (4)$$

La tasa de filtración recomendada en los filtros dinámicos es entre 2 y 3 $\text{m}^3/\text{m}^2/\text{h}$, por lo cual para propósitos del diseño se escoge la tasa de 3 $\text{m}^3/\text{m}^2/\text{h}$. De lo anterior se obtiene un área total del filtro de $4,2 \text{ m}^2$, por lo cual cada unidad tendrá un área de $2,1 \text{ m}^2$. La estructura de entrada consta de una cámara para remoción de material grueso y una cámara de disipación.

La cámara de remoción será de 0,4 m de largo y 1 m de ancho; la cámara de disipación será de 1 m de largo y 1 m de ancho, y ambas contarán con un espesor de pared de 0,15 m. La altura del lecho filtrante es de 0,6 m, por lo cual cada capa tendrá una altura de 0,2 m, en la tabla 8 se especifica el tamaño de grava de las tres capas.

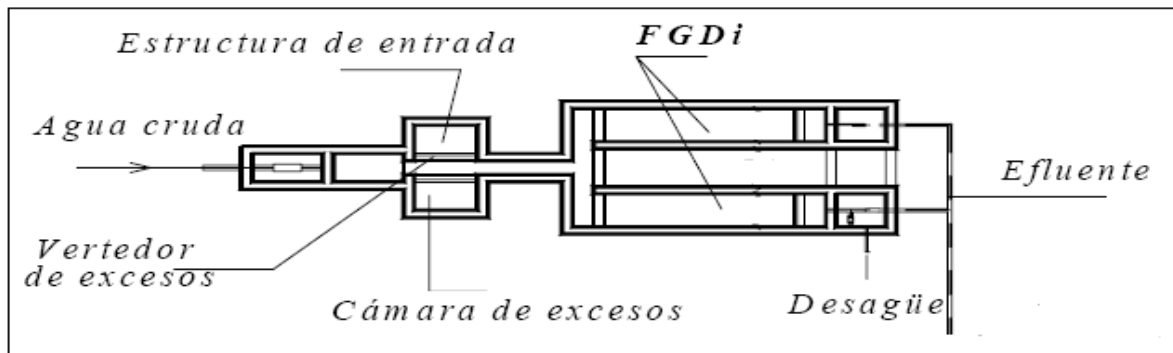
Tabla 8. Características del material del lecho filtrante.

Posición en la unidad	Tamaño de grava (mm)
Superior	3 - 6
Intermedio	6 - 13
Interior, fondo	13 - 25

Fuente: Evaluación de la Planta de Tratamiento de Agua Potable del municipio Valle de San Juan Tolima.

Siguiendo consideraciones de diseño la altura de soporte del lecho se define en 0,3 m y la altura del borde libre 0,2 m. La altura total del filtro es 1,5 m y el área del filtro de $2,1 \text{ m}^2$, por lo cual teniendo en cuenta la ecuación de mínimo costo (ver anexo F), se propone construirla de 1,67 m de largo por 1,2574 m de ancho. El sistema de drenaje consiste en una tubería perforada que cumple la función de recolección de agua filtrada. Se recomienda utilizar una tubería principal de 0,254 m y 80 orificios [6]; cada orificio tendrá un diámetro de $2,8 * 10^{-2} \text{ m}$ separados 0,15 m centro a centro (véase figura 9).

Figura 9. Esquema del filtro grueso dinámico.



Fuente: Teoría y práctica de la purificación de agua [6].

CONCLUSIONES

- El agua que consumen los habitantes del hato según el índice calculado, en este caso el IRCA tiene un alto riesgo para la salud humana; por lo cual la alcaldía debe tomar acciones que garanticen la reducción de este nivel de riesgo.
- Las obras civiles del sistema de captación en la bocatoma de la quebrada la chirigua se encuentran en buen estado sin embargo el municipio debe realizar el trámite de concesiones en la CAS para legalizar la toma de agua que hace del afluente.
- El coagulante polihidroxiclورو de aluminio presenta mejor comportamiento frente al sulfato de aluminio tipo B; por lo cual se propone el cambio de coagulante en el acueducto municipal, sin embargo se pueden realizar estudios para tener en cuenta coagulantes líquidos ya que presentan menos riesgos para la salud.
- Los equipos de la PTAP se encuentran en deterioro físico, por lo tanto se propone cambiar el coagulador, floculador y el filtro de la planta, para la cual se realiza en el presente documento los diseños preliminares.
- La planta de tratamiento debe adquirir equipos de laboratorio de aguas que permitan realizar pruebas diarias en el acueducto, entre ellos se deben tener: Turbidímetro, Equipo de jarras, pH-metro, colorímetro, vasos de precipitado, agitadores.
- Existe una dosis óptima de coagulante y una vez es excedida se produce el efecto contrario, se incrementa la turbiedad a medida que se incrementa la dosis de coagulante.

RECOMENDACIONES

- Llevar a cabo muestreos del agua una vez al día y determinar constantemente la dosis de coagulante a utilizar para mejorar la eficiencia del proceso de potabilización.
- Realizar mantenimiento de los equipos y capacitar a los operarios del acueducto en el tratamiento de agua potable.
- Hacer uso eficiente de los manuales de operación y mantenimiento adjuntos en el presente documento.
- Establecer indicadores de desempeño a los empleados que permitan la mejora continua de los procesos.
- Conseguir un dosificador gravimétrico por pérdida de peso y una bala de cloro líquido para iniciar el proceso de coagulación y de desinfección respectivamente.

BIBLIOGRAFÍA

- [1]** ROLDÁN. Gabriel A y RAMÍREZ John Jairo. Fundamentos de limnología tropical. Segunda edición. Colombia. Editorial de la Universidad de Antioquia. 2008. p.183-186.
- [2]** MINISTERIO DE LA PROTECCIÓN SOCIAL, MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Resolución 2115 de 2007. Capítulo II, art. 2, art. 5, art. 6, art. 7, art. 9. Capítulo III, art. 11. Capítulo IV, art. 13, art. 14, art.15. Bogotá D.C. Junio 22 de 2007.
- [3]** CEPIS/OPS/OMS. Tratamiento de agua para consumo humano: Plantas de filtración rápida; Manual I. Tomo I Cap. 3, Tomo II Cap. 11. 2004. Manual II. Cap. 2, Cap. 3, Cap. 4. 2006. Disponible en internet en Portal Ingeniería Sanitaria: <http://www.ingenieriasanitaria.com>.
- [4]** MINISTERIO DE DESARROLLO ECONÓMICO, DIRECCIÓN DE AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO BÁSICO. Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico RAS 2000. Sección I; Título A. Sección II; Título B, Título C. Bogotá D.C. Noviembre de 2000.
- [5]** CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE SANTANDER, CORPORACIÓN AREAS NATURALES PROTEGIDAS. Plan de ordenación y manejo de la cuenca Hidrográfica, POMCH del río Suárez. Capítulo 1.3.25. Mayo del 2011.
- [6]** Arboleda Valencia Jorge, Teoría y práctica de la purificación del agua, tercera edición, tomo 1, editorial Mc Graw Hill.
- [7]** Camacho Uribe Carlos Andrés, Estudio preliminar del uso del sulfato de aluminio líquido en el proceso de clarificación de la planta de tratamiento del acueducto de Piedecuesta, trabajo de grado ingeniero químico. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química, 2010.

[8] Henry, J. Glynn ; Heinke, Gary W. Ingeniería Ambiental. 2 ed. México: Prentice Hall, 1999. p. 395-401.

[9] Galeano Espíndola Yuli Andrea, Estudio de factibilidad técnica para la utilización de polihidroxiclورو de aluminio en la potabilización del agua en la planta “La Colina” de la Empresa Piedecuestana de Servicios Públicos E.S.P., trabajo de grado ingeniera química. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química, Bucaramanga, 2012.

[10] Ibañez Pinedo William; Mendoza Gomez Monica Marcela, Recurso del agua III “Tratamiento de agua potable, operación, procesos, talleres y monitoreo”. Monografía Especialización Ingeniería Ambiental. Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Química. Especialización de Ingeniería Ambiental, Bucaramanga, 2007.

[11] Sitio oficial municipio del Hato, Santander
(<http://www.hato-santander.gov.co/index.shtml>).

[12] Portal del Estado Colombiano, Trámites y pasos a seguir para conseguir una concesión. (<http://www.gobiernoenlinea.gov.co>).

ANEXOS

ANEXO A

DESCRIPCIÓN DE LA LOCALIDAD

El Hato, es un municipio ubicado en el departamento de Santander a 120 km de la ciudad de Bucaramanga, perteneciente a la provincia comunera. Su extensión total es de 180,3 Km², la altura promedio en la cabecera municipal es de 1370 m sobre el nivel del mar, la temperatura media es de 21 °C. Limita al norte con el municipio de Galán, al oeste con el municipio de Carmen de Chucurí, al sur con Simacota y al este con el Palmar.

El clima del municipio se caracteriza por presentar tres variaciones: semihúmedo en la parte norte, húmedo en la parte central y superhúmedo en la zona sur. Las variaciones del clima corresponden a la diferente topografía la cual es abrupta con pendientes altamente pronunciadas y a su vegetación. Las precipitaciones tomando como base la estación del Palmar según el IDEAM tienen un valor medio de 1847,1 milímetros al año.

La población en el año 2011, se estimó en 2373 habitantes según el Departamento Nacional de Planeación (DNP), de los cuales el 34,13 % (810) viven en el casco urbano y el 65,87% (1563) viven en la zona rural, compuesta por las veredas: Santo Domingo, El Salitre, Vega de San Juan, El Centro, La Primavera, El Rocancio, El Paramito, El Páramo y Hoya Negra. La población del municipio presenta variaciones decrecientes desde el 2005 presentando una reducción del 1,17 %, esto se debe a la emigración que realizan los habitantes hacia otros municipios en busca de mejores oportunidades [5].

El municipio hace parte de la serranía de los Yariguíes, con un gran porcentaje del área municipal dentro de este ecosistema. El municipio cuenta con un área de protección en el nacimiento de la microcuenca la Chirigua que abastece el

ASPECTOS SOCIOECONÓMICOS

El Hato fue fundado el 25 de abril de 1825. La mayor parte de la población pertenece a los estratos 1 y 2. Los servicios públicos presentan deficiencias referentes a la cobertura y calidad de los mismos; en cuanto al tema del agua el 71,3% de la población recibe el servicio con problemas que no aseguran la potabilidad del líquido; del sistema de alcantarillado se suponen problemas en el transporte por tubería; la energía eléctrica presenta inconvenientes en el área del alumbrado público debido a que el municipio sostiene un pasivo con la ESSA; el servicio de gas natural domiciliario no se ha implementado por lo cual el servicio se presta mediante pipetas; el servicio de telefonía fija es precario, la comunicación generalmente se realiza mediante celulares con preferencias en el operador comcel ya que posee mejor cobertura así mismo la conectividad en el servicio de internet [11].

La planta de tratamiento de agua potable actualmente no se encuentra prestando el servicio como tal, ya que muchos de los equipos no se encuentran en buenas condiciones lo que impide su funcionamiento, lo que ha llevado a la alcaldía del municipio y a la entidad de servicios públicos a declararse en emergencia sanitaria.

HIDROLOGIA

La hidrografía del municipio se caracteriza por presentar varias microcuencas que luego son drenadas en el río Suárez.

- Microcuenca Cinco Mil: localizada al sur del municipio, su cauce principal sirve de lindero con el municipio de Simacota; la extensión dentro del municipio es de 2701,24 hectáreas; su longitud promedio es 18900 m y la pendiente promedio es del 11 %.
- Microcuenca La Vega: localizada en la parte central, ocupa las veredas Hoya Negra, Primavera, Páramo y Santo Domingo. La extensión es de

11991,86 hectáreas; la longitud promedio es de 21500 m; la pendiente promedio es de 10%.

- Microcuenca Orozco: localizada en la parte central del municipio, haciendo parte de las veredas El Centro y Paramito. La extensión es de 988 hectáreas; la longitud promedio es de 5400 m; la pendiente promedio es de 20 %.
- Microcuenca Chirigua: localizada hacia el norte del Municipio, entre las Microcuenca Witoca y Orozco; formando parte de las veredas Paramito y Rocancio. La extensión es de 1436 hectáreas; la longitud promedio es de 5600 m; la pendiente promedio es de 21%.
- Microcuenca La Witoca: localizada al norte del Municipio y su cauce principal forma lindero con el Municipio de Galán; conforma parte de la vereda Rocancio. La extensión es de 915,92 hectáreas; la longitud promedio es de 7400 m; la pendiente promedio es de 20% [5].

CAUDAL DISTRIBUIDO

De la bocatoma de captación se derivan de la fuente hídrica 6 L/s, llegan a la planta de tratamiento 5 L/s, se tratan 3.5 L/s y la población consume 1.3 L/s. El caudal distribuido es de aproximadamente 2 L/s, sin embargo por la distancia y fricción de las tuberías este no llega en su totalidad presentándose pérdidas no puntuales.

Así el caudal distribuido es de 172800 L/día

El caudal consumido por la población es de 112320 L/día

ANEXO B

MARCO LEGAL

En la tabla B1 se exponen los valores permisibles o aceptados por la normatividad colombiana para el consumo de agua potable.

Tabla B1. Valores aceptables de los parámetros físicos, químicos y biológicos del agua para consumo humano.

CARACTERÍSTICAS Y COMPUESTOS	EXPRESADA COMO	VALOR MÁXIMO ACEPTABLE
COLOR APARENTE	UPC	15
TURBIEDAD	UNT	2
PH	Unidades pH	6,5-9
ALCALINIDAD TOTAL	mg de CaCO ₃ /L	200
CALCIO	mg de Ca/L	60
MAGNESIO	mg de Mg/L	36
CLORUROS	mg de Cl/L	250
DUREZA TOTAL	mg de CaCO ₃ /L	300
COLIFORMES TOTALES	UFC/100 ml	0
ESCHERICHIA COLI	UFC/100 ml	0

Fuente: Resolución nacional 2115 de junio de 2007 [2].

Así como se pueden obtener valores permisibles, también existen una serie de valores que determinan cuando el agua puede tener valores que ponen en riesgo la salud de la comunidad y que afectan la calidad no sólo del recurso, sino del servicio que se está prestando.

Para esto se asignaron unos valores llamados: Valores de Riesgo, que son los que vamos a tomar como base para poder calcular el IRCA, en la tabla B2 se

indican estos valores y en la tabla B3 se clasifican de acuerdo al porcentaje hallado mediante el IRCA.

Tabla B2. Puntaje de riesgo asignado a las características para el cálculo del IRCA.

CARACTERÍSTICA	PUNTAJE DE RIESGO
Color Aparente	6
Turbiedad	15
pH	1,5
Alcalinidad Total	1
Calcio	1
Magnesio	1
Dureza Total	1
Cloruros	1
Coliformes Totales	15
EscherichiaColi	25

Fuente: Resolución nacional 2115 de junio de 2007 [2]

Tabla B3. Clasificación del nivel de riesgo en la salud según el IRCA y consideraciones a tener en cuenta.

CLASIFICACIÓN	NIVEL DE RIESGO	CONSIDERACIONES
IRCA (%)		
70,1-100	INVIABLE SANITARIAMENTE	Agua no apta para el consumo humano y requiere una vigilancia máxima, especial y detallada.
35,1-70	ALTO	Agua no apta para consumo humano y requiere una vigilancia especial.
14,1-35	MEDIO	Agua no apta para consumo humano, gestión directa de la persona prestadora.
5,1-14	BAJO	Agua no apta para consumo humano, susceptible de mejoramiento.
0-5	SIN RIESGO	Agua apta para consumo humano. Continuar la vigilancia.

Fuente: Resolución 2115 de 2007[2]

El valor del IRCA es cero (0) puntos cuando cumple con los valores aceptables para cada una de las características físicas, químicas y microbiológicas y cien puntos (100) para el más alto riesgo cuando no cumple ninguno de ellos [2].

ANEXO C

CONCESIÓN DE AGUAS SUPERFICIALES

En el decreto 1541/78 se establecen los pasos a seguir para obtener una concesión de aguas tanto superficiales como subterráneas, sin embargo allí hacen mención del INDERENA que era el encargado de otorgar las concesiones, debido a que ya no existe se recurre a realizar todos los trámites con la CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL, en este caso del Departamento de Santander, para lo cual se deben seguir los siguientes pasos [12]:

- a. Descargar el formulario único nacional de solicitud de concesión de aguas superficial, o solicitarlo en la oficina de la CAS.
- b. Diligenciar el formulario y radicarlo ante la CAS con los documentos requeridos.
- c. Notificarse el acto administrativo que da inicio al trámite de concesión de aguas superficiales.
- d. Cancelar la tarifa de evaluación establecida por la CAS, o resultado de la autodeclaración.
- e. Enviar a la CAS copia del recibo de pago de la tarifa de evaluación para que se programe la visita.
- f. Atender la visita de los técnicos de la CAS.
- g. Presentar información adicional en caso de que sea requerida por la CAS.
- h. Notificarse del acto administrativo que otorgue o niegue la concesión de aguas superficiales.
- i. Publicación del acto administrativo que define el trámite.

Documentos Requeridos:

- a. Cédula de ciudadanía
- b. Certificado de existencia y representación legal con vigencia no mayor a 90 días o certificado que acredite la representación legal de la entidad (Original

y copia).

- c. Formulario único de concesión de aguas superficiales diligenciado (Original).
- d. Certificado de libertad o tradición no mayor a 90 días (Original y copia).
- e. Prueba adecuada de la posesión o tenencia (Original y copia).
- f. Documento con la información sobre los sistemas de captación, derivación, conducción, restitución de sobrantes, distribución y drenaje, inversiones, cuantía de las mismas y término en el cual se van a realizar (Original).
- g. Censo de usuarios de la fuente superficial de la cual se pretende obtener la concesión de aguas (Original).
- h. Autorización sanitaria favorable, emitida por parte de la autoridad sanitaria departamental para personas prestadoras del servicio (Original y copia).
- i. Recibo de pago del trámite (Original y copia).

ANEXO D

DETERMINACIÓN DE LA DOSIS ÓPTIMA DE COAGULANTE

Los parámetros óptimos de las etapas de coagulación y floculación se determinaron mediante una prueba de jarras realizada en el laboratorio, siguiendo el procedimiento descrito en el Capítulo 11 del Manual I del Título “Tratamiento de agua para consumo humano: Plantas de Filtración Rápida” [3].

Dosis óptima de coagulante

Como primera medida se determinó la temperatura, el pH y la turbidez de la muestra de agua cruda. Después se agregó 1 litro de esta agua a cada uno de los vasos del equipo de jarras.

Se preparó una solución acuosa de Sulfato de Aluminio ($Al_2(SO_4)_3$) con una concentración del 1%, se tomaron diferentes dosis, 5 en total (una en cada vaso) para calcular la dosis de coagulante óptima. Los valores de coagulante se calcularon mediante la ecuación 5:

$$D * Q = q * C \quad (5)$$

Donde:

D= Dosis de coagulante

Q= Capacidad del vaso (L)

q= Volumen de solución a aplicar (L)

C= Concentración de la solución (mg/L)

En la tabla D1 y D2 se muestran las dosis de coagulante, junto con los mililitros de solución de cada uno de los coagulantes ($Al_2(SO_4)_3$ y PAC) respectivamente y en las figuras D1 Y D2 podemos ver las gráficas donde se identifica la dosis óptima

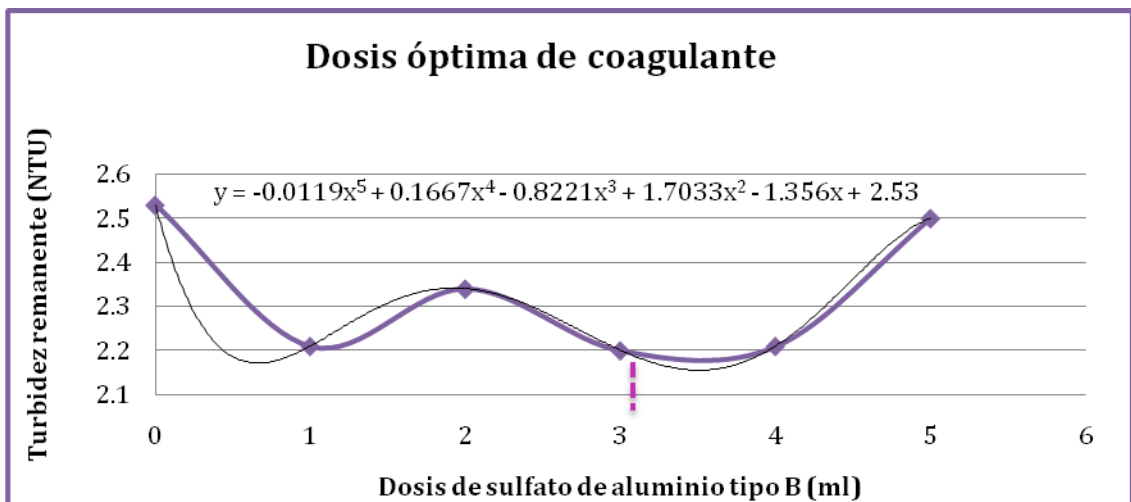
para cada coagulante.

Tabla D1. Valores de dosis, volumen de coagulante y turbidez $Al_2(SO_4)_3$.

Turbidez Inicial = 2,73 NTU		
Dosis (mg/L)	Volumen de solución a aplicar (ml)	Turbidez (NTU)
5	1	2,21
10	2	2,34
15	3	2,2
20	4	2,21
25	5	2,5

Fuente: Los Autores.

Figura D1. Dosis óptima del Sulfato de Aluminio tipo B



Fuente: Los Autores.

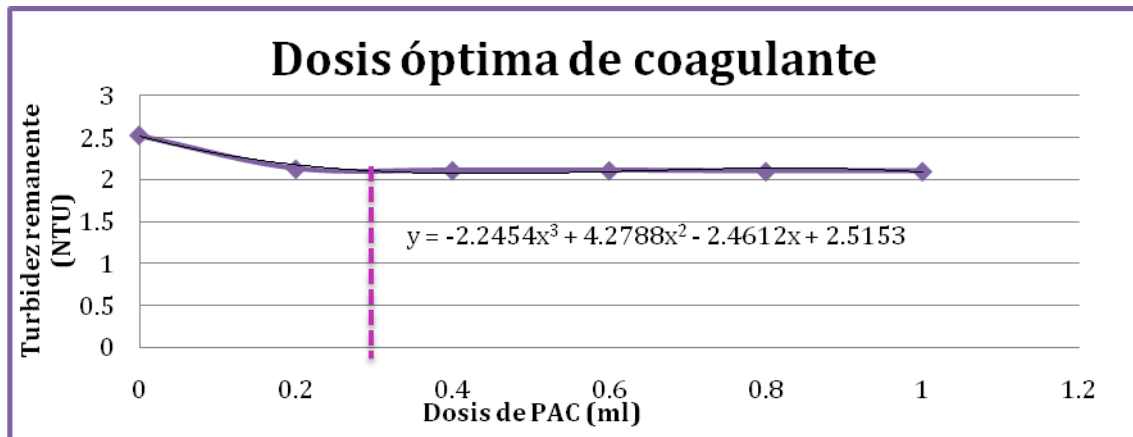
Resolviendo la ecuación de la curva de tendencia el valor mínimo de turbidez para el sulfato de aluminio es de 3,04 ml (15,2 mg/L) para un valor mínimo de turbidez hallado.

Tabla D2. Valores de dosis, volumen de coagulante y turbidez PAC.

Turbidez Inicial = 2,73 NTU		
Dosis (mg/L)	Volumen de solución a aplicar (ml)	Turbidez (NTU)
1	0,2	2,13
2	0,4	2,11
3	0,6	2,1
4	0,8	2,1
5	1	2,1

Fuente: Los Autores.

Figura D2. Dosis óptima de PAC.



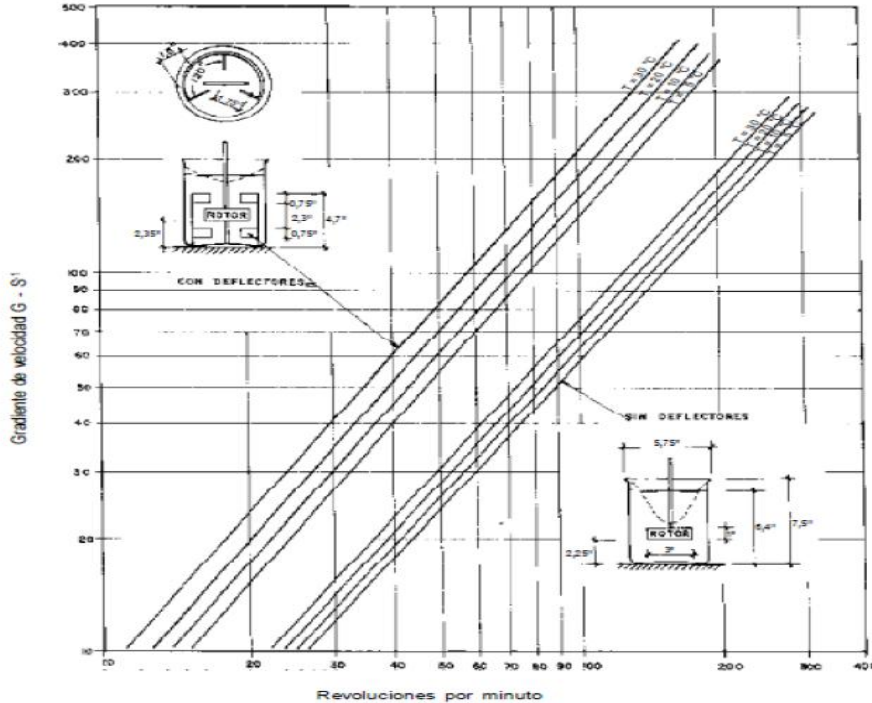
Fuente: Los Autores.

Los resultados que arroja el PAC, reflejan una continuidad en la turbidez resolviendo la ecuación de la curva de tendencia mostrada en la figura D2 el valor de dosis óptima de PAC es 0,3 ml (1,5 mg/L) para el valor mínimo de turbidez hallado.

Gradiente de Velocidad y tiempo de retención para la floculación

Para obtener estos valores se tomó una muestra de agua cruda y se llenaron los 6 vasos del equipo de jarras. Luego se aplicó a cada uno de los vasos la dosis óptima de coagulante mientras se realizaba la agitación a 100 rpm por 5 segundos (simulando la etapa de coagulación). Luego se realizó la floculación ajustando las revoluciones de acuerdo a los gradientes de velocidad seleccionados (figura D3). El rango de gradientes óptimos fluctúa entre 120 y 30 s^{-1} . Como el caudal de agua es pequeño se tomaron intervalos de 30 s^{-1} . A los 5 minutos de haber iniciado la floculación se retira la primera jarra; después de 10 minutos se retiró la segunda; luego de 15 minutos se retiró la tercera; y así sucesivamente hasta retirar la última jarra a los 30 minutos. Para cada jarra se dejó sedimentar el agua por 10 minutos y luego se midió la turbiedad remanente.

Figura D3. Gráfico que relaciona el gradiente de velocidad con las rpm de un equipo de prueba de jarras con recipientes de 2 litros (jarra de sección circular)



Fuente: CEPIS/OMS [3]

En la tabla D3 se muestran los datos de turbiedad para cada gradiente y tiempo.

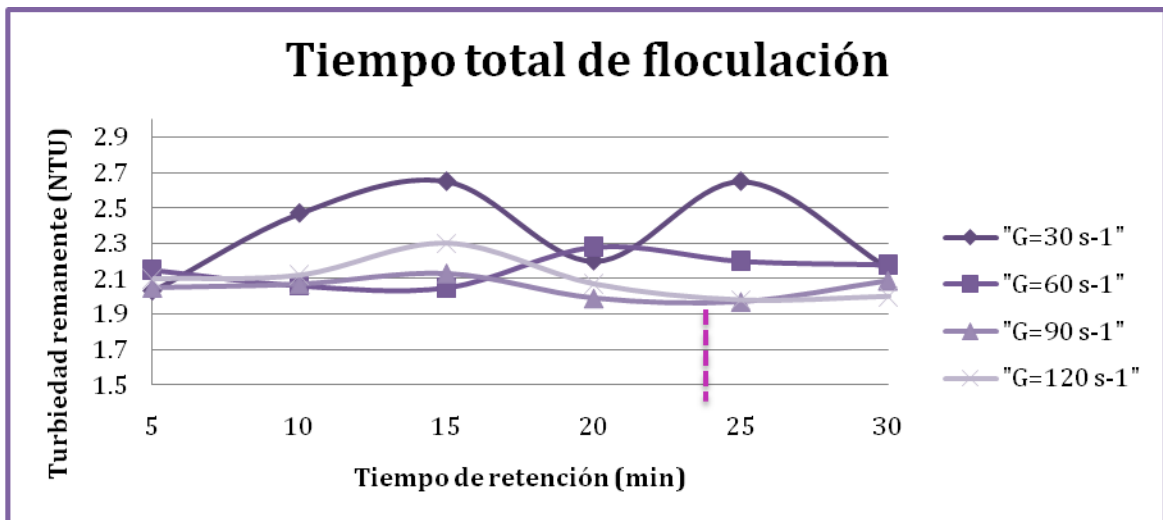
Tabla D3. Turbiedad Remanente para cada Gradiente de velocidad y Tiempo de retención.

Gradientes de Velocidad (s^{-1})	Tiempos de Retención (min)					
	5	10	15	20	25	30
30	2,1	2,12	2,3	2,07	1,98	2
60	2,05	2,07	2,13	1,99	1,97	2,09
90	2,15	2,06	2,05	2,28	2,2	2,18
120	2,03	2,47	2,65	2,2	2,65	2,16

Fuente: Los Autores

Se graficó la turbiedad remanente (T_f) versus el tiempo de retención (t) para cada uno de los gradientes de velocidad (G) (ver figura D4) y se determinó el tiempo total de floculación el cual corresponde al punto donde el valor de T_f es menor.

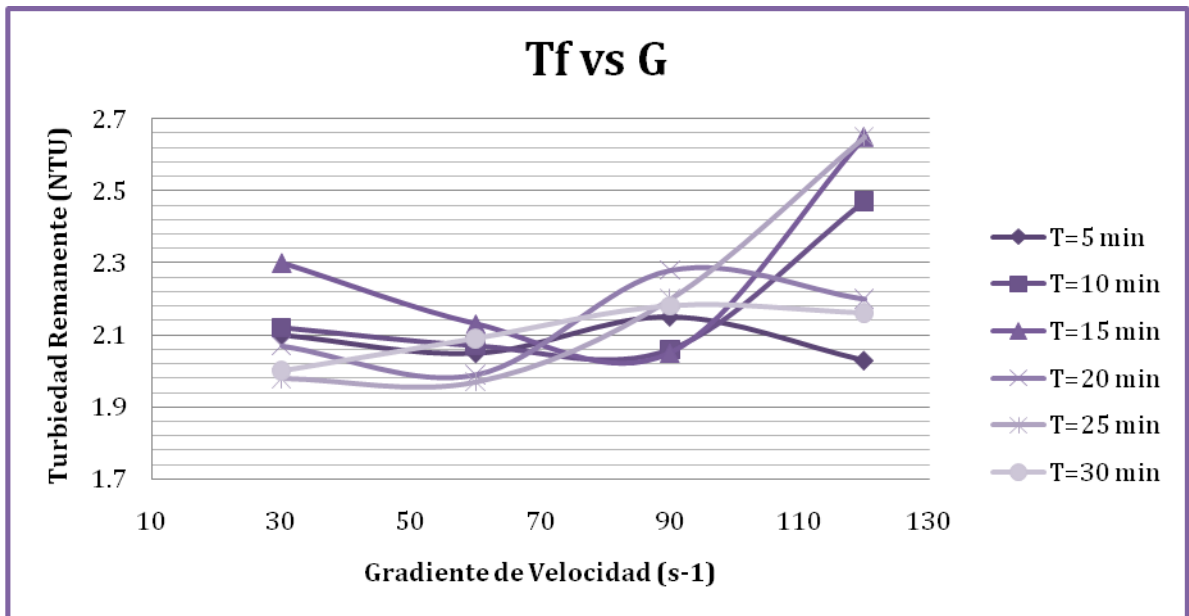
Figura D4. Tiempo total de Floculación.



Fuente: Los Autores.

Luego se graficó la Turbiedad Remanente (T_f) versus el Gradiente de velocidad (G) para cada tiempo de floculación.

Figura D5. Tf versus G.



Fuente: Los Autores.

Para cada curva se produjo un punto mínimo, la cual correspondía al gradiente de velocidad que optimiza con ese tiempo de retención (ver tabla D4).

Tabla D4. Gradiente de Velocidad óptimo para cada tiempo de retención.

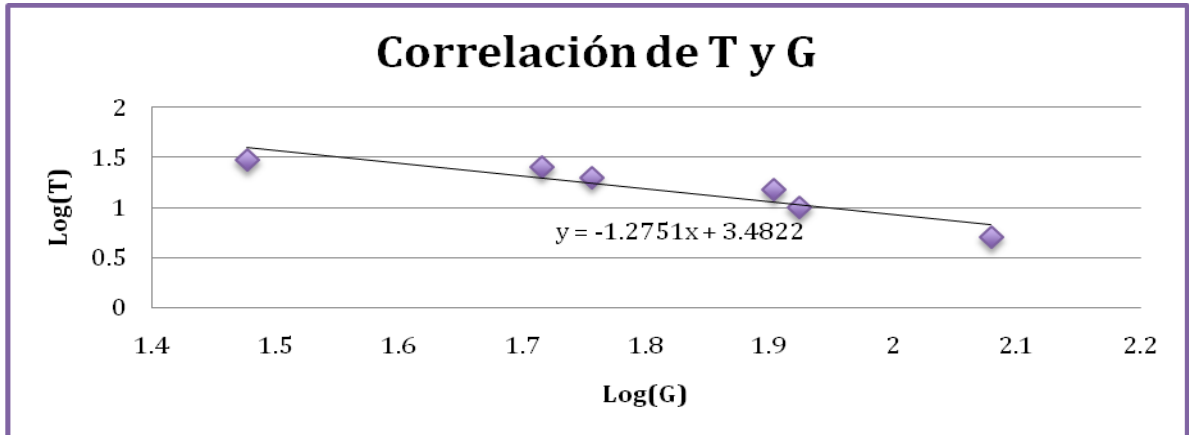
T(min)	Log(T)	G(s-1)	Log (G)
5	0,698970004	120	2,079181246
10	1	84	1,924279286
15	1,176091259	80	1,903089987
20	1,301029996	57	1,755874856
25	1,397940009	52	1,716003344
30	1,477121255	30	1,477121255

Fuente: Los Autores.

Con los valores de Log(Tf) y Log(G) realizamos una gráfica (ver figura D6), y se usó una regresión lineal que se ajustara a los puntos obtenidos, con esto se determinó una ecuación y el grado de correlación de T y G. Con esta ecuación se

pudo calcular las constantes n y K del modelo teórico de Villegas y Letterman $GT^n=K$ [3].

Figura D6. Correlación del Tiempo de Retención y el Gradiente de Velocidad.



Fuente: Los Autores.

El procedimiento matemático para el cálculo de las constantes del modelo de Villegas y Letterman se muestra a continuación.

$$y = 3,4822 - 1,2751x \quad (6)$$

$$\text{Log}(T) = a - b \text{Log}(G) \quad (7)$$

$$\text{Log}(G) + \frac{1}{b} \text{Log}(T) = \frac{a}{b} \quad (8)$$

$$G * T^{\frac{1}{b}} = 10^{\frac{a}{b}} \quad (9)$$

Donde:

$$n = \frac{1}{b} = 0,78$$

$$K = 10^{\frac{a}{b}} = 538,17$$

Obteniéndose

$$G * T^{0,78} = 538,17 \quad (10)$$

Teniendo ya el tiempo total de floculación determinado en la figura D4, se procedió a dividirlo en el número de tramos que va a tener el floculador (en este caso serán 3 ya que es el mínimo requerido [3]), y con cada tiempo se determinó el gradiente de velocidad usando la ecuación 10 (ver Tabla D5).

Tabla D5. Gradiente de velocidad óptima para cada tramo.

TRAMO	Tiempo de retención (min)		Gradiente de Velocidad (s-1)
	Parcial	Total	
1	7,7	7,7	109,51
2	7,7	15,4	63,77
3	7,7	23,1	46,48

Fuente: Los Autores.

ANEXO E. DIMENSIONAMIENTO DEL MEZCLADOR HIDRÁULICO VERTEDERO TRIANGULAR

Paso	Datos	Cantidad	Unidades	Cálculos	Resultados	Unidad
1	Caudal de diseño	$Q = 0,0035$	m^3/s	$h = [Q / 1,4]^{0,4}$ $h = [0,0035 / 1,4]^{0,4}$ $h = 0,091$	Altura de la lámina de agua sobre el vertedero	m
2				$L = 2 h$ $L = 2 (0,091)$ $L = 0,182$	Ancho de la lámina vertiente y ancho del canal	m
3	Ancho del canal $B = 2 L$	$B = 0,3641$	m	$q = Q/B$ $q = 0,0035 / 0,3641$ $q = 0,0096$	Caudal unitario promedio	m^3/sxm
4	Aceleración de la gravedad	$g = 9,8$	m/s^2	$h_c = \sqrt[3]{q^2/g}$ $h_c = \sqrt[3]{(0,0096)^2/9,8}$ $h_c = 0,0211$	Altura crítica	m
5	Altura desde el vértice del vertedero hasta el fondo del canal aguas abajo	$P = 0,7$	m	$h_1 = 1,41h_c / \sqrt{2,56 + P/h_c}$ $h_1 = 1,41 (0,0211) / \sqrt{2,56 + (1,0/0,0211)}$ $h_1 = 0,0049$	Altura al inicio del resalto	m
6				$V_1 = q / h_1$ $V_1 = 0,0096 / 0,0049$ $V_1 = 1,9279$	Velocidad al inicio del resalto	m/s
7				$F1 = V_1 / \sqrt{gh_1} = 1,9279 / \sqrt{9,8(0,0049)}$ $F1 = 8,722$	Número de Froude	
8				$h_2 = h_1/2[\sqrt{1 + 8F_1} - 1]$ $h_2 = (0,0049/2)[\sqrt{1 + 8(8,722)} - 1]$ $h_2 = 0,0185$	Altura de agua después del resalto	m

**ANEXO E. DIMENSIONAMIENTO DEL MEZCLADOR HIDRÁULICO VERTEDERO TRIANGULAR
(CONTINUACIÓN)**

Paso	Datos	Cantidad	Unidades	Cálculos	Resultados	Unidad
9				$V_2 = q / h_2$ $V_2 = 0,0096 / 0,0185$ $V_2 = 0,5202$	Velocidad al final del resalto	m/s
10				$h_p = (h_2 - h_1)^3 / 4h_1 h_2$ $h_p = (0,0185 - 0,0049)^3 / 4 (0,0185) (0,0049)$ $h_p = 0,0066$	Energía disipada en el resalto	m
11				$L_m = 6(h_2 - h_1)$ $L_m = 6 (0,0185 - 0,0049)$ $L_m = 0,0809$	Longitud del resalto	m
12				$L' = 4,3 P (h_c / P)^{0,9}$ $L' = 4,3 (0,7) (0,0211 / 0,7)^{0,9}$ $L' = 0,1289$	Distancia del vertedero a la sección 1	m
13				$V_m = (V_1 + V_2) / 2 = (1,9279 + 0,5202) / 2$ $V_m = 1,224$	Velocidad promedio en el resalto	m/s
14				$T = L_m / V_m ; T = 0,0809 / 1,224 ; T = 0,066$	Tiempo de mezcla	s
15		$\sqrt{\gamma/\mu} = 3034,8$ T = 18 °C		$G = \sqrt{\gamma/\mu} \sqrt{h_p/T}$ $G = 3034,8 \sqrt{(0,0066 / 0,066)} ; G = 963,505$	Gradiente de velocidad	s ⁻¹

ANEXO F. DIMENSIONAMIENTO DE UN FLOCULADOR HIDRÁULICO HORIZONTAL

<i>Paso</i>	<i>Datos</i>	<i>Unidad</i>	<i>Criterios</i>	<i>Cálculos</i>	<i>Resultados</i>	<i>Unidad</i>
1	<i>Caudal $Q=0,0035$</i>	m^3/s	$I_1 = V_1 \times T_1 \times 60$	$I_1 = (0,153)(7,7) (60)$	<i>Longitud de canales del tramo 1</i> $I_1 = 70,686$	m
	<i>Tiempo de retención $T_1=7,7$</i>	min				
	<i>Velocidad $V_1= 0,153$</i>	m/s				
2			$A = Q / V_1$	$A = 0,0035 / 0,153$	<i>Sección de canales del tramo 1</i> $A_1 = 0,0004545$	m^2
3	<i>Altura de agua en la unidad</i> $H = 0,6$	m	$a_1 = A_1 / H$	$a_1 = 0,0004545 / 0,6$	<i>Ancho de canales del tramo 1</i> $a_1 = 0,0007575$	m
4			$d_1 = 1,5 a_1$	$d_1 = 1,5 * 0,0007575$	<i>Ancho de vueltas del tramo 1</i> $d_1 = 0,001136$	m
5	<i>Ancho útil de la lámina de asbesto-cemento $b=0,895$</i>	m	$B = 3b + d_1$	$B = 3 (0,895) + 0,001136$	<i>Ancho del floculador</i> $B=2,687$	m
6			$N_1 = I_1 / B$	$N_1 = 70,686 / 2,687$	<i>Número de canales en el tramo 1</i> $N_1 = 26$	<i>unidades</i>
7	<i>Espesor de las láminas de asbesto-cemento $e=0,004$</i>	m	$L_1 = N_1 a_1 + (N_1 - 1) * e$	$L_1 = 26 * 0,0007575 + (26 - 1) * 0,004$	<i>Longitud del tramo 1</i> $L_1 = 0,1212$	m

ANEXO F. DIMENSIONAMIENTO DE UN FLOCULADOR HIDRÁULICO HORIZONTAL (CONTINUACIÓN).

<i>Paso</i>	<i>Datos</i>	<i>Unidad</i>	<i>Criterios</i>	<i>Cálculos</i>	<i>Resultados</i>	<i>Unidad</i>
8	<i>Coeficiente de pérdida de carga en las vueltas K=2</i>	<i>unidades</i>	$h_1 = KV_1^2 (N-1) / 2g$	$h_1 = (2)(0,153)^2 * (26-1) / 2(9,8)$	<i>Pérdida de carga en las vueltas de primer tramo</i> $h_1 = 0,0604$	<i>m</i>
9	<i>Aceleración de la gravedad g=9,8</i>	<i>m/s²</i>				
10			$P_1 = 2H + a_1$	$P_1 = 2(0,6) + 0,0007575$	<i>Perímetro mojado de las secciones del tramo 1</i> $P_1 = 1,20075$	<i>m</i>
11	<i>Coeficiente de rugosidad n=0,03</i>	<i>unidades</i>	$h_2 = [NV_1^2 / r^{2/3}] * I_1$	$h_2 = [0,03 (0,153)^2 / (0,00037)^{2/3} * (70,686)]$	<i>Perdida de carga en los canales del tramo 1</i> $h_2 = 0,5438$	<i>m</i>
	<i>Radio hidráulico del canal r=A₁/P₁</i>	<i>m</i>				
12			$hf_1 = h_1 + h_2$	$hf_1 = 0,0604 + 0,5438$	<i>Pérdida de carga total en el primer tramo</i> $hf_1 = 0,6043$	<i>m</i>
13	$\sqrt{\gamma/\mu} = 3034,8$ $T = 18 \text{ } ^\circ\text{C}$		$G = \sqrt{\gamma/\mu} \cdot \sqrt{hf/t}$	$G_1 = 3034,8 \cdot \sqrt{(0,6043 / 7,7)}$	<i>Gradiente de velocidad en el tramo 1</i> $G_1 = 109,758$	<i>s⁻¹</i>

ANEXO G. DIMENSIONAMIENTO DE UN FILTRO GRUESO DINÁMICO.

PASO	DATOS	CANTIDAD	UNIDAD	CALCULO	RESULTADOS	UNIDAD
1	Caudal	Q=12,6	m ³ /h	$A_T = \frac{Q}{V_s}$	Área total de filtración	m ²
	Tasa de filtración	V _s = 3	m ³ /m ² /h	A _T = 4,2		
2	Número de unidades	N=2		$A_f = \frac{A_T}{N}$ A _f = 2,1	Área del filtro	m ²
3	Ecuación para la longitud y el ancho con el mínimo costo	$\frac{a}{b} = \frac{N + 1}{2N}$		$b = \sqrt{4 * \frac{A_f}{3}}$ b = 1,67	Longitud de cada filtro	m
				$a = \frac{A_f}{b}$ a = 1,25	Ancho de cada filtro	m
4	Ecuación para las dimensiones de la caja del filtro	L=1,67	m	$b = \sqrt{\left(\frac{A_f}{N}\right)}$ b=1,024	Ancho de la caja de filtro	m
				Lf=L*1.2 Lf=1,56	Largo de la caja de filtro	

ANEXO G. DIMENSIONAMIENTO DE UN FILTRO GRUESO DINÁMICO (CONTINUACIÓN).

5	Altura de la pared de la caja	$H_F = 0.4$	m	$H_t = H_F + H_{is} + H_{iF} + H_{bl}$ $H_t = 1.5$	Altura de cada filtro	m
	Altura del lecho de soporte	$H_{is} = 0.3$	m			
	Altura del lecho de arena	$H_{iF} = 0.6$	m			
	Altura borde libre	$H_{bl} = 0.2$	m			
6	Densidad de la arena	$\rho_s = 2.65$	$\frac{g}{m^3}$	$hf = (1 - \varepsilon) \left(\frac{\rho_s - \rho_a}{\rho_a} \right)$ $hf = 0,957$	Perdida de carga en la arena	m
	Densidad del agua	$\rho_a = 1$	$\frac{g}{m^3}$			
	Altura de la capa de arena	$H_{iF} = 0,6$	m			
	Porosidad de la arena	$\varepsilon = 0,42$				

ANEXO H

MANUAL DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

Desarenador

Puesta en marcha

- a. Limpiar bien la unidad extrayendo residuos.
- b. Cerrar la válvula o compuerta de desagüe.
- c. Abrir válvulas o compuertas de entrada y salida.
- d. Establecer un punto de observación para medir el nivel que va alcanzando la arena almacenada (en el punto más profundo).

Operación Normal

- a. Controlar el nivel de depósito.
- b. Cuando el depósito de material almacenado alcance el nivel máximo, se procederá a la limpieza manual.

Operación de Parada

- a. Cerrar compuertas de entrada y salida.
- b. Como no existen más unidades de desarenación, se abrirá el paso al canal de desviación. La limpieza debe tener un tiempo mínimo de ejecución.

Coagulación

Recepción de Sustancias Químicas

- a. Verificar que la cantidad total coincida con la cantidad solicitada.
- b. Chequear el estado de los envases y descartar los que estén en mal estado.
- c. Verificar la presentación del producto (sólido, líquido o gas) que sea el solicitado.

Almacenamiento

- a. Almacenar las sustancias químicas sobre tarimas de madera (nunca en contacto con el piso o la pared).
- b. No depositar sustancias químicas nuevas sobre las existentes.
- c. Altura máxima de apilamiento para acarreo manual: 2 metros.
- d. Mantener la bodega seca y ventilada.
- e. No almacenar sustancias reaccionantes entre sí en la misma bodega.

Manejo de Sustancias Químicas

Para el PAC es necesario contar con guantes de hule, máscara contra polvo y protector de piel; para manejar el Cloro Gaseoso se requiere guantes de hule, protector de ojos, detector de fugas y respirador de oxígeno.

Dosificación

Puesta en marcha

- a. Asegurar el brazo de la balanza mediante el dispositivo de seguridad situado debajo de este.
- b. Mover el contrapeso a un peso menor que el deseado para evitar exceder la cantidad requerida.
- c. Cerrar la compuerta inferior de salida. Accionar la palanca que previene que se derrame el material.
- d. Liberar el brazo de la balanza para permitir funcionamiento libre.
- e. Mover el contrapeso en el sentido indicado, hasta que la alarma deje de sonar, lo que significa que llegó a su posición.
- f. Llenar lentamente la tolva, accionando el volante situado en la parte superior hasta que suene la alarma del dosificador.
- g. Abrir la compuerta inferior de salida, accionando la palanca en el sentido indicado para dejar pasar la sustancia química hasta el tanque de solución.

- h. Fijar la carga de dosificación colocando el selector del dosificador en la cantidad requerida (habiendo realizado calibración previa del equipo).
- i. Abrir la válvula de alimentación de agua a la cámara de solución, hasta la apertura indicada, a fin de obtener la concentración requerida del coagulante para la dosis aplicada.
- j. Arrancar el agitador mecánico del tanque de solución.

Operación normal

- a. Verificar el afluente y el efluente de la cámara de solución.
- b. Encender el dosificador.
- c. Verificar que se está efectuando la aplicación en la cámara de mezcla rápida.

Operación de Parada

- a. Accionar el interruptor del motor a la posición de parada.
- b. Cerrar la válvula de alimentación de agua a la cámara de solución.
- c. Parar el agitador mecánico.

Mezcladores

Puesta en marcha

- a. Abrir la compuerta o válvula de entrada.
- b. Comprobar si el resalto está ubicado en el punto de aplicación del coagulante. De no ser así, reubicar la dosificación de manera que se distribuya de manera uniforme sobre el inicio del resalto.

Operación normal

- a. Comprobar el inicio de la dosificación observando la salida de la solución a lo ancho del resalto.
- b. Constatar que la solución se esté aplicando de manera uniforme en el punto

de máxima turbulencia.

- c. Verificar que la planta esté operando con el caudal proyectado, para que se cumpla el gradiente de velocidad.
- d. Si no se cumple lo anterior, comprobar el gradiente de velocidad determinando la pérdida de carga. Se recomienda tener dos reglas fijas y niveladas, haciendo coincidir los ceros de ambas, facilitando la medición de la pérdida de carga.
- e. Verificar que no se produzcan grandes turbulencias, ocasionadas por caídas o restricciones después del punto de aplicación del coagulante.

Operación de Parada

- a. Cerrar la estructura de entrada al mezclador.
- b. Suspender la dosificación.

Floculadores

Puesta en marcha

- a. Abrir completamente la compuerta de entrada de agua coagulada. No estrangular la compuerta para mantener el nivel de la unidad, ya que se incrementa el gradiente de velocidad y se malogra el microflóculo.
- b. Verificar que la dosificación y la mezcla rápida estén operando satisfactoriamente.
- c. Constatar que el nivel de agua en los canales llegue a la altura de operación.

Operación normal

- a. Determinar el gradiente de velocidad en cada tramo del floculador.
- b. Comparar el gradiente de velocidad con el óptimo obtenido, si es necesario ajustar.

Operación de Parada

- a. Cerrar la compuerta de entrada a la unidad.

Decantadores

Puesta en marcha

- a. Cerrar la válvula de desagüe.
- b. Abrir la compuerta de entrada y dar inicio al llenado de la unidad.
- c. Una vez llena la unidad, cerrar la entrada y dejar en reposo por 15 minutos.
- d. Abrir la compuerta de entrada

Operación normal

- a. Determinar la turbiedad y/o color del agua decantada por lo menos cada cuatro horas.
- b. Comprobar si los flóculos son arrastrados hacia la salida.
- c. Retirar el material flotante con una espumadera.
- d. Comprobar si hay desprendimiento de burbujas de aire por fermentación de lodos.
- e. Verificar semanalmente si hay crecimiento de algas.
- f. Medir el nivel de lodo depositado en el equipo.
- g. Cuando se compruebe que los lodos llegaron al nivel máximo del equipo, drenar la unidad y realizar limpieza de lodos.

Operación de Parada

- a. Cerrar la compuerta de entrada.
- b. Reducir el caudal de entrada.

Filtración

Puesta en marcha

- a. Comprobar que las Válvulas o compuertas de entrada-salida y drenaje del filtro estén cerradas para evitar la salida del agua.
- b. Abrir lentamente la válvula de agua de lavado y llenar la unidad en forma ascendente hasta que el agua alcance una altura de 80 centímetros sobre el medio filtrante.
- c. Cerrar la válvula de lavado y esperar el tiempo necesario para que todo el aire retenido en el lecho filtrante sea desalojado.

Operación normal

- a. Abrir la válvula de entrada de agua decantada, para evitar turbulencias y agitación del medio filtrante durante el llenado.
- b. Restringir la válvula de salida de agua filtrada para que el nivel de agua en la caja del filtro se mantenga por encima del medio filtrante, e ir la abriendo lentamente para mantener el nivel.
- c. Cuando el nivel del agua coincida con el nivel máximo de la unidad y la válvula este completamente abierta, se habrá consumido toda la carga disponible en la instalación y será el momento de lavar el filtro. Si la calidad de agua límite se alcanza antes, deberá lavarse el filtro aunque no se haya consumido toda la carga hidráulica disponible.

Operación de Lavado

- a. Comprobar que haya suficiente agua en el tanque de lavado.
- b. Registrar la hora de inicio de la operación.
- c. Cerrar la válvula de entrada al filtro.
- d. Cerrar la válvula de salida del agua filtrada, cuando el nivel del agua este a 0,2 metros sobre el medio filtrante.

- e. Poner a funcionar el lavado superficial, accionando la válvula reguladora del sistema.
- f. Abrir la compuerta o válvula de desagüe.
- g. Después de operar por un minuto, detener el lavado y cerrar la válvula reguladora.
- h. Abrir la válvula de control de ingreso de agua de lavado al filtro accionando la palanca correspondiente a la posición de lavado.
- i. Medir la expansión del medio filtrante y altura del lecho por lo menos una vez al mes.
- j. Cada seis meses sacar una muestra del medio filtrante y mandar a hacer un análisis granulométrico, y comparar con el registro anterior para diagnosticar el estado del medio filtrante.
- k. Concluir el lavado de acuerdo al tiempo determinado, dejando una capa de agua sobre el medio filtrante.
- l. Cerrar la válvula de salida del tanque.
- m. Anotar el tiempo de lavado.

Operación de Parada

- a. Cerrar lentamente la válvula o compuerta de entrada.
- b. Cerrar la válvula de salida del efluente.

Desinfección

Puesta en marcha

- a. Manipular el cilindro de cloro y colocarlo en la balanza para determinar el peso del cloro líquido.
- b. Observar en la balanza el peso bruto del cilindro, más el peso del cloro líquido.
- c. Restar el peso bruto, para fijar el peso neto del gas cloro licuado que contiene el cilindro.

- d. Anotar el peso obtenido en formato de control
- e. Quitar la tapa de protección del cilindro, usando las herramientas adecuadas.
- f. Colocar un nuevo empaque en la válvula auxiliar.
- g. Hacer coincidir la tuerca de la válvula auxiliar con la rosca ubicada en la válvula del cilindro y afirmar la unión.
- h. Abrir lentamente la válvula del cilindro accionándola según el giro de las manecillas del reloj.
- i. Verificar si existen fugas, usando una solución de amoníaco.
- j. Abrir la válvula de conexión.

Operación normal

- a. Ajustar la dosificación de cloro a la requerida.
- b. Determinar el residual de cloro en el efluente de la planta. Preferiblemente cada hora.
- c. Verificar la existencia de fugas diariamente.
- d. Determinar el peso de cloro consumido durante el día.

Operación de Parada

- a. Cerrar el suministro de cloro, accionando la válvula de control.
- b. Cuando el rotámetro marque cero, rotar la perilla hasta la posición de cerrado.