



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

**EVALUACIÓN DEL USO DE POLICLORURO DE ALUMINIO COMO
COAGULANTE PRIMARIO, EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA
POTABLE EL CAMBRAY**

José Alberto Cáceres Rodríguez

Asesorado por el Ing. Víctor Manuel Paz Stubbs

Guatemala, mayo de 2009

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN DEL USO DE POLICLORURO DE ALUMINIO COMO
COAGULANTE PRIMARIO, EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA
POTABLE EL CAMBRAY**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR:

JOSÉ ALBERTO CÁCERES RODRÍGUEZ

ASESORADO POR EL ING. VICTOR MANUEL PAZ STUBBS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, MAYO DE 2009

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO:	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I:	Inga. Glenda Patricia García Soria
VOCAL II:	Inga. Alba Maritza Guerrero Spínola de López
VOCAL III:	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV:	Br. Milton De León Bran
VOCAL V:	Br. Isaac Sultan Mejía
SECRETARIA:	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO:	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR:	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR:	Ing. Alejandro Castañón López
EXAMINADOR:	Ing. Armando Fuentes Roca
SECRETARIA:	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

EVALUACIÓN DEL USO DE POLICLORURO DE ALUMINIO COMO COAGULANTE PRIMARIO, EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE EL CAMBRAY,

tema que fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, el 5 de febrero de 2009.

José Alberto Cáceres Rodríguez

ACTO QUE DEDICO A:

DIOS:

Por haberme regalado la vida y dado la sabiduría e inteligencia que me han permitido culminar esta etapa de mi vida.

MIS PADRES:

Eduardo y Yolanda, por su apoyo y comprensión incondicional en todo momento de mi vida.

MI ESPOSA E HIJA

Gabriela y Clarissa, por ser la razón de mi triunfo y esfuerzo.

MIS HERMANOS:

Por compartir conmigo esta meta alcanzada.

MI FAMILIA:

Por el apoyo y consejos brindados durante mi vida.

AGRADECIMIENTOS A:

DIOS:

Por permitirme alcanzar esta meta tan anhelada.

MIS PADRES:

Gracias, por haberme brindado la oportunidad de alcanzar tan anhelado sueño.

MI ESPOSA E HIJA:

Gracias por su amor, comprensión y apoyo incondicional, las amo.

MIS HERMANOS:

Por haber estado siempre a mi lado y por su apoyo.

MI FAMILIA:

Por su apoyo moral.

MIS AMIGOS:

Por estar a mi lado en todo momento y compartir con todos ustedes buenos momentos de mi vida.

MI ASESOR:

Ing. Victor Manuel Paz Stubbs, por su apoyo y conocimientos compartidos.

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA:

Máxima casa de estudios que me brindó la oportunidad adquirir los conocimientos que hoy me permiten culminar esta etapa de mi carrera.

PLANTA LO DE COY Y EL CAMBRAY:

Por el apoyo brindado en este trabajo de investigación.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
GLOSARIO	IX
RESUMEN	XI
OBJETIVOS	XIII
INTRODUCCIÓN	XV

1. ASPECTOS GENERALES DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE

1.1. Pre-cloración	1
1.2. Medición de caudal	2
1.3. Mezcla rápida	2
1.3.1. Adición de coagulantes	3
1.4. Floculadores	4
1.4.1. Floculadores hidráulicos	5
1.4.2. Floculadores mecánicos	6
1.5. Sedimentadores	7
1.5.1. Sedimentadores convencionales	8
1.5.2. Sedimentadores de flujo laminar	9
1.6. Filtros	11
1.7. Post-cloración	14

2. DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA EL CAMBRAY

2.1. Fuentes de abastecimiento	18
2.1.1. Presa Pinula	18
2.1.2. Estación de bombeo Hincapié	19
2.2. Líneas de conducción	22
2.3. Vertedero de entrada	22
2.4. Floculador	22
2.5. Sedimentadores	23
2.6. Filtros	23
2.7. Tanques de aguas claras	23

3. OPERACIÓN GENERAL DE LA PLANTA EL CAMBRAY

3.1. Sistema de dosificación de coagulante	25
3.1.1. Especificaciones y características	25
3.1.2. Operación del sistema de dosificación de coagulante	25
3.1.3. Operación	27
3.1.4. Mantenimiento	28
3.2. Sistema de dosificación de cal	30
3.2.1. Especificaciones y características	30
3.2.2. Operación del sistema de dosificación de cal	30
3.2.3. Operación	31
3.2.4. Mantenimiento	32
3.3. Operación de clorinación	33
3.3.1. Generalidades	33
3.3.2. Operación	33
3.3.3. Mantenimiento	34
3.4. Filtro rápido	34
3.4.1. Generalidades	34
3.4.2. Condiciones de diseño	35

3.4.3. Operación del filtro rápido	35
3.4.3.1. Arranque inicial	35
3.4.3.2. Lavado	36
3.4.3.2.1. Lavado de superficie	37
3.4.3.2.2. Retrolavado	37
3.4.4. Procedimientos de emergencia	38
3.4.4.1. Agua de relleno	38
3.4.4.2. Bajo caudal de agua	38
3.4.4.3. Mantenimiento de un filtro	38
3.4.5. Precauciones	39
3.4.5.1. Cuarto de bombas	39
3.4.5.2. Tanque de filtración durante la filtración	39
3.4.5.3. Tanque de filtrado durante el lavado	39
3.4.5.4. Llenado de la cama filtrante	39

4. GENERALIDADES DE COAGULANTES Y COMO REALIZAR LA PRUEBA DE JARRAS

4.1. Descripción de sulfato de aluminio	41
4.2. Descripción de policloruro de aluminio	43
4.3. Prueba de jarras	46
4.3.1. Generalidades de la prueba de jarras	46
4.3.2. Reacción agua-coagulante	47
4.3.3. Aspectos técnicos de la prueba	50
4.3.4. Aspectos a tomar en la prueba	51
4.3.5. Aspectos después de la prueba	53
4.3.6. Realización de la prueba de jarras	54

5. OBTENCIÓN DE RESULTADOS

5.1. Realización de prueba de jarras con sulfato de aluminio en comparación con policloruro de aluminio	59
5.2. Monitoreo de planta El Cambray durante la realización de la prueba de policloruro de aluminio	73
5.3. Gráficas del comportamiento de la planta El Cambray durante la aplicación de policloruro de aluminio	76
5.4. Análisis costo-beneficio	80
CONCLUSIONES	87
RECOMENDACIONES	89
BIBLIOGRAFÍA	91

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1. Tratamiento convencional	1
2. Floculadores hidráulicos de tabiques	7
3. Trayectoria ideal de partículas discretas	9
4. Incremento de la capacidad de sedimentación al aumentar el área superficial	10
5. Sedimentadores laminares	11
6. Filtro rápido por gravedad	13
7. Filtro rápido a presión	14
8. Presa Pinula	18
9. Estación de bombeo Hincapié	21
10. Bombas de impulsión	21
11. Turbiedad en planta El Cambray	77
12. Color en planta El Cambray	78
13. pH en planta El Cambray	79

TABLAS

I.	Clasificación de floculadores	5
II.	Análisis comparativo sulfato de aluminio vrs. PAX-WD con 35 UTN	59
III.	Análisis comparativo sulfato de aluminio vrs. PAX-WD con 24.7 UTN	60
IV.	Análisis comparativo sulfato de aluminio vrs. PAX-WD con 2300 UTN	61
V.	Análisis comparativo sulfato de aluminio vrs. PAX-WD con 133 UTN	62
VI.	Análisis comparativo sulfato de aluminio vrs. PAX-WD con 23.8 UTN	63
VII.	Análisis comparativo sulfato de aluminio vrs. PAX-WD con 40.1 UTN	64
VIII.	Análisis comparativo sulfato de aluminio vrs. PAX-WD con 30 UTN	65
IX.	Análisis comparativo sulfato de aluminio vrs. PAX-WD con 19 UTN	66
X.	Análisis comparativo sulfato de aluminio vrs. PAX-WD con 19.1 UTN	67
XI.	Análisis comparativo sulfato de aluminio vrs. PAX-WD con 14.6 UTN	68
XII.	Análisis comparativo sulfato de aluminio vrs. PAX-WD con 14.2 UTN	69
XIII.	Análisis comparativo sulfato de aluminio vrs. PAX-WD con 13.2 UTN	70
XIV.	Análisis comparativo sulfato de aluminio vrs. PAX-WD con 1300 UTN	71
XV.	Comparación de las características obtenidas utilizando los coagulantes	72

XVI.	Comportamiento de planta El Cambray durante la aplicación de policloruro de aluminio	74
XVII.	Dosificaciones óptimas de pruebas de jarras	80
XVIII.	Dosificaciones para cálculos de consumo	81
XIX.	Consumo anual utilizando sulfato de aluminio	82
XX.	Consumo anual utilizando policloruro de aluminio	82
XXI.	Cantidades a utilizar de coagulantes en sacos de 25 kg.	83
XXII.	Costo anual del sulfato de aluminio en sacos de 25 kg, en función del caudal máximo y mínimo	84
XXIII.	Costo anual del policloruro de aluminio en sacos de 25 kg, en función del caudal máximo y mínimo	85
XXIV.	Comparación de costos de coagulantes	86

GLOSARIO

Alcalinidad:	Capacidad para neutralizar un ácido. Usualmente, es un término genérico utilizado para describir el contenido de carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos presentes en una solución.
Coloide:	Partícula muy pequeña, típicamente entre 0.1-0.001 micras de diámetro, suspendida en solución o dispersa en un gas.
Color:	El color es la longitud de onda dominante reflejada por un objeto de color.
Potencial hidrógeno:	El pH es una medida de la concentración del ion hidrógeno, específicamente, el logaritmo negativo de esta concentración. El pH es medido en una escala de 0 a 14. Un pH menor a 7 es ácido y un pH mayor a 7 es alcalino. Un pH de 7 es neutro e indica el equilibrio entre el ion hidrógeno y el ion hidroxilo.
Polielectrolitos:	Son grandes moléculas orgánicas solubles en agua, formadas por bloques denominados monómeros, repetidos en una cadena larga, que incorporan en su estructura sitios para intercambio iónico, lo que da moléculas con una carga iónica.
Polímero:	Compuesto químico formado por unidades primarias más pequeñas llamadas monómeros, que se repiten en la estructura.
Sedimentación:	Es la eliminación de sólidos suspendidos en el agua por asentamiento gravitacional.
Turbiedad:	Material orgánico o inorgánico suspendido en el agua que causa una apariencia nublada y que no puede ser precipitado de manera rápida debido al pequeño tamaño de las partículas.

RESUMEN

Con este estudio se pretende determinar cuál sistema de coagulación utilizado en una planta de tratamiento de agua potable es más efectivo. Se comparan ventajas y desventajas, para establecer si es mejor el que consiste en utilizar sulfato de aluminio o policloruro de aluminio como coagulante, el cual es llamado PAX-WD.

Para lograr lo anterior, se evaluó el comportamiento real de dichos productos coagulantes por un período de siete días continuos para cada uno de ellos a través de la prueba de jarras y conjuntamente se puso en marcha la aplicación del policloruro de aluminio en la planta. Se estudiaron los parámetros más relevantes que deben mantenerse dentro de las especificaciones que se utiliza para la potabilización del agua, estos son: turbiedad, color y pH. Además, se realizó una evaluación costo-beneficio.

Al analizar los datos obtenidos se determinó que, tanto al utilizar el sulfato de aluminio, como al utilizar el policloruro de aluminio como coagulante, se obtuvieron resultados de los parámetros fisicoquímicos dentro de las especificaciones requeridas. Una ventaja la mostró el PAX-WD, y fue en la formación de flóculos, ya que produce flocs menos voluminosos, y por lo tanto, de más fácil disposición final.

Económicamente, el sulfato de aluminio tiene un costo más bajo pero al utilizarlo, el agua tratada requiere en ciertos casos la aplicación de hidróxido de calcio para su neutralización. El PAX-WD tiene un costo más elevado, pero no requiere consumo de hidróxido de calcio, por lo que al final, ambas opciones requieren la misma inversión, tomando en cuenta las diferencias en el posible consumo de hidróxido de calcio utilizado en la neutralización del agua final.

En cuanto a facilidad de manejo, se determinó que el coagulante PAX-WD es el más conveniente para la utilización por parte de los operadores.

A partir del estudio y análisis realizado, se determinó que es mejor el empleo del policloruro de aluminio en el sistema de tratamiento de agua potable; ya que no se necesita utilizar cal para su ablandamiento y disminución de alcalinidad.

OBJETIVOS

General

- Evaluar la aplicación del Policloruro de Aluminio como coagulante primario en el proceso de tratamiento de potabilización del agua en la planta El Cambray.

Específicos:

1. Aplicar la Norma COGUANOR NGO 29001, para determinar las características de los resultados obtenidos en las pruebas de jarras y los resultados obtenidos en la puesta en marcha de la planta.
2. Evaluar si la cantidad de Policloruro de Aluminio utilizada en la prueba de jarras es menor a la cantidad de Sulfato de Aluminio aplicada a la misma muestra.
3. Determinar si la aplicación de Policloruro de Aluminio tiene mejores resultados de calidad en comparación con el Sulfato de Aluminio.
4. Obtener resultados costo-beneficio de los coagulantes.

INTRODUCCIÓN

En el agua cruda, cada partícula se encuentra estabilizada por cargas eléctricas negativas sobre su superficie, haciendo que repela las partículas vecinas, lo cual impide el choque de las partículas y que se formen así masas mayores, llamadas flóculos, por lo que las partículas no se asientan.

Por medio de la coagulación se desestabilizan los coloides neutralizando las fuerzas que los mantienen separados. Esto se logra al añadir coagulantes químicos, sintéticos o naturales y al aplicar energía de mezclado. Las sustancias químicas de uso común son las sales de aluminio, las sales de hierro y los polímeros coagulantes.

Los coagulantes químicos cancelan las cargas eléctricas sobre la superficie del coloide, y permiten que las partículas coloidales se aglomeren formando flóculos. Estos flóculos, inicialmente pequeños, crean, al juntarse, aglomerados mayores que son capaces de asentarse. El proceso de desestabilización es la coagulación, lo cual implica neutralización de la carga, la etapa de formación de flóculos es la floculación.

En este estudio se evaluaron las ventajas y desventajas de la utilización del sulfato de aluminio como coagulante, en comparación con la utilización del policloruro de aluminio llamado PAX-WD, en el tratamiento de potabilización de agua.

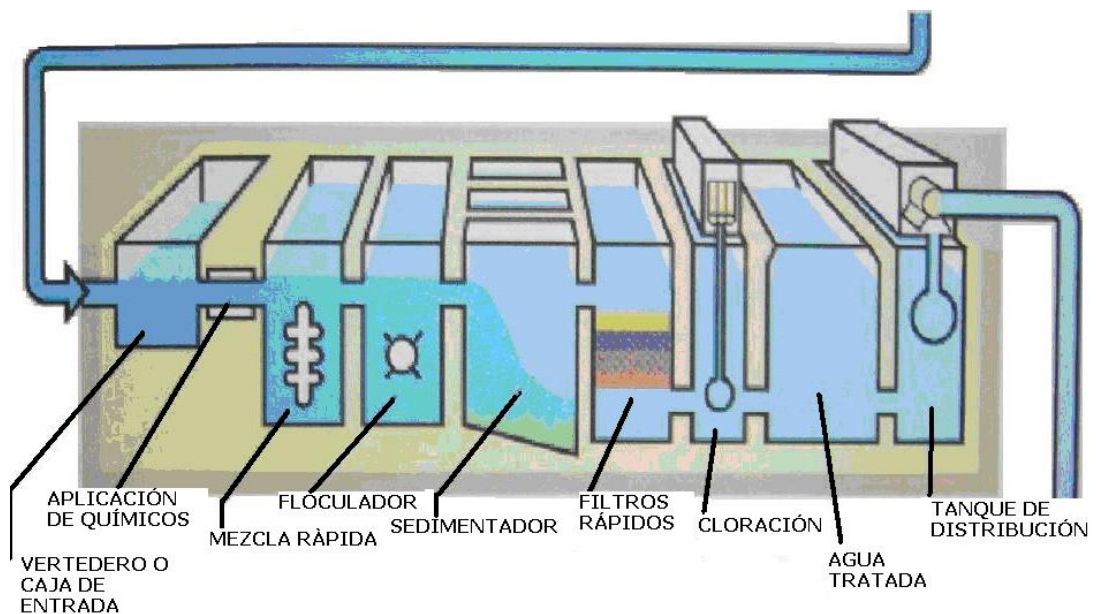
Se analizaron individualmente ambas alternativas, los beneficios y efectividad según la meta de alcanzar los parámetros requeridos: costos, menor dosificación y mejor calidad de agua. De tal manera que, al final, se está en capacidad de concluir y recomendar objetivamente el método más conveniente para el sistema más específico que se estudia.

Para comprender mejor el comportamiento de las dos opciones de coagulantes estudiados, se analizaron los fenómenos involucrados en la coagulación y floculación y los factores que los afectan, todo esto enfocado a obtener los mejores resultados que cumplan con las especificaciones de la norma COGUANOR NGO 29001, mínimas necesarias para la potabilización del agua.

1. ASPECTOS GENERALES DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE

Figura 1. Tratamiento convencional.

TRATAMIENTO DEL AGUA PARA CONSUMO HUMANO (POTABILIZACIÓN)



1.1 Pre-cloración

La pre-cloración es un proceso que consiste en la aplicación de cloro al agua antes de cualquier otro tratamiento. Los beneficios que se obtienen por este procedimiento son los siguientes:

- Reducción de materia orgánica en suspensión causante de sabor y olor por oxidación, retardando su descomposición en los sedimentadores.

- Ayudante en el proceso de la coagulación.

1.2 Medición de caudal

En la operación de los diferentes procesos de una planta de tratamiento uno de los parámetros más importantes, es el caudal, cuya determinación se efectúa por medio de aforos; de ahí la importancia que tienen estas unidades, en la operación de las plantas de tratamiento.

Las unidades de aforo, utilizadas en las plantas de tratamiento de agua se clasifican en:

- a. De contorno abierto
 - Vertederos
 - Canaleta Parshall
 - Palmer-Bowlus

- b. De contorno cerrado
 - Venturi
 - Toberas
 - Platina de orificio
 - Medidores de velocidad
 - Medidor de derivación (proporcional)

1.3 Mezcla rápida

Se denomina así a las condiciones de intensidad de agitación y tiempo de retención que debe reunir la masa de agua en el momento en que se dosifica el coagulante, con la finalidad de que las reacciones de coagulación se den en las condiciones óptimas que correspondan al mecanismo de coagulación predominante.

Se sabe que la desestabilización de las partículas se lleva a cabo principalmente, mediante dos mecanismos: adsorción o neutralización de las cargas y barrido. Investigaciones realizadas han demostrado que las condiciones de la mezcla rápida son importantes para optimizar el primer mecanismo, mientras que para la coagulación de barrido son indiferentes.

1.3.1 Adición de coagulantes

La coagulación con sales de aluminio o de hierro solo se realiza satisfactoriamente a un pH determinado, y en presencia de alcalinidad en una cantidad mínima para las reacciones químicas. Moffet¹ considera que una reacción adecuada del coagulante con el agua solamente ocurrirá si:

1. Todos los productos químicos que alteran el pH (cal, soda, ácido, cloro y otros) se aplican aguas arriba del punto de aplicación del sulfato de aluminio, a una distancia suficiente que asegure una completa disolución y mezcla.

El pH del agua cruda debe corregirse previamente de modo que éste sea el óptimo de coagulación, antes que la reacción del sulfato de aluminio se produzca.

2. La dosis de sulfato de aluminio debe añadirse a una tasa constante en la cámara de mezcla rápida, de forma tal que el mismo sea inmediato y uniformemente dispersado en el agua que llega a la planta de tratamiento.

¹ Amirtharajah, A. **Velocity gradients in rapid mixing**. Seminario nacional sobre coagulación y filtración directa. Universidad de Sao Pablo. Escuela de Ingeniería de San Carlos, Julio, 1989.

Estudios realizados por Moffet a nivel de prueba de jarras indicaron que “cuando el coagulante era vertido sobre la superficie de la jarra se necesitaba una dosis 27% mayor que la utilizada cuando se hacia la aplicación directa al impulsor, para lograr una eficiencia similar”.

Jeffcoat y Singley², en una serie de experiencias, “confirmaron la secuencia de la aplicación cal y sulfato de aluminio, y observaron mas aun, que si proporciona una mezcla adecuada, la adición simultanea, aunque independiente, de cal y sulfato de aluminio, produce resultados casi tan buenos como aquellos en los que la cal fue aplicada antes del sulfato de aluminio”.

El sistema de dosificación debe tener medios para proporcionar un caudal constante, aunque fácilmente regulable, de la solución de sulfato de aluminio.

1.4 Floculadores

La aglutinación de partículas no es más que el crecimiento del floc provocado por agitación lenta que se le da a la masa líquida por cualquiera de los siguientes métodos de floculación. Estos métodos dependen del tipo de energía que se requiera para producir la agitación y pueden ser hidráulicos y mecánicos.

² Amirtharajah, A. **The mechanisms of coagulation**. Seminario nacional sobre coagulación y filtración directa. Universidad de Sao Pablo, Escuela de Ingeniería de San Carlos. Julio 1989.

Los primeros se clasifican, según el sentido del flujo, en: de flujo horizontal, de flujo vertical y de flujo helicoidal. Los segundos, así mismo por el sentido del movimiento del agitador, se clasifican en giratorios y reciprocantes.

Tabla I. Clasificación de floculadores

Según la energía de agitación	Clasificación	Ejemplo
I Hidráulicos	1. Flujo horizontal	Tabiques intercalados lado a lado.
	2. Flujo vertical	Tabiques colocados arriba y abajo del tanque.
	3. Flujo helicoidal	
II Mecánicos	1. Rotatorios	Paletas giratorias de eje horizontal o vertical.
	2. Reciprocantes	Paletas o cintas oscilantes.

1.4.1 Floculadores hidráulicos

Estos derivan su energía para la agitación del líquido, de la carga de velocidad $V^2/2g$ que adquiere al pasar por un conducto. Pueden ser tabiques, los cuales consisten en tanques provistos de pantallas que permiten que el flujo circule en una vía y viene alrededor de los tabiques girando 180 grados al final de cada uno; o de flujo helicoidal que como lo indica la expresión existe un movimiento de rotación de la masa líquida impreso por un par mecánico creado por el flujo que entre por dos orificios diametralmente opuestos.

Los floculadores de tabiques más usados son los horizontales (de vuelta en punta) y los verticales (de arriba abajo). Los helicoidales son poco usados, ya que al pasar el floc, del floculador al sedimentador se presenta el problema de su ruptura, además en el medio se conoce poco o nada en forma técnica de los floculadores helicoidales.

1.4.2 Floculadores mecánicos

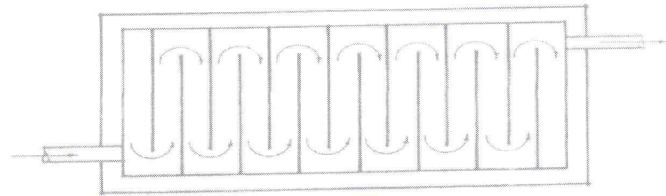
Éstos requieren de una fuente de energía externa que mueve un agitador (paleta o cinta oscilante) en donde el agua permanece un tiempo teórico.

Los agitadores mecánicos giratorios pueden ser de baja velocidad como las paletas y de alta velocidad como las turbinas.

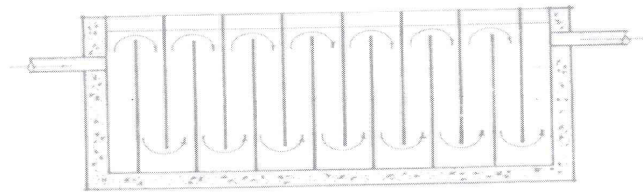
Las agitadores mecánicos reciprocantes son los que consisten en cintas oscilantes (ribbons floculator) o en parrillas de madera que suben y bajan alternativamente (walking beams).

Ambos agitadores mecánicos comunican una energía a la masa líquida, directamente proporcional a la energía con que se desplaza el elemento mecánico de cada caso mencionado.

Figura 2. Floculadores hidráulicos de tabiques



A) FLUJO HORIZONTAL (PLANTA)



B) FLUJO VERTICAL (ELEVACIÓN)

FLOCULADORES HIDRÁULICOS DE TABIQUES

1.5 Sedimentadores

Uno de los procesos más ampliamente usados en el tratamiento de agua es la sedimentación. Se entiende por sedimentación a la remoción, por efecto gravitacional, de las partículas en suspensión en un fluido, y que tengan peso específico mayor que el fluido.

En un determinado intervalo de tiempo no todas las partículas en suspensión sedimentan. A las que sedimentan en un tiempo de intervalo elegido se les llama “sólidos sedimentables”.

La sedimentación como tal, es en esencia un fenómeno netamente físico. Está relacionada exclusivamente con las propiedades de caída de las partículas en el agua. Cuando se produce sedimentación de una suspensión de partículas, el resultado final será siempre un fluido clarificado y una suspensión más concentrada. A menudo se utiliza para designar a la sedimentación los términos de: clarificación, cuando hay un especial interés en el fluido clarificado y espesamiento, cuando el interés está en la suspensión concentrada.

Las partículas en suspensión sedimentan en diferente forma, dependiendo de las características de las partículas así como de su concentración.

La sedimentación o decantación se realiza en reactores denominados sedimentadores o decantadores, de acuerdo al tipo de proceso que se realice en cada unidad. La clasificación más recomendable sería:

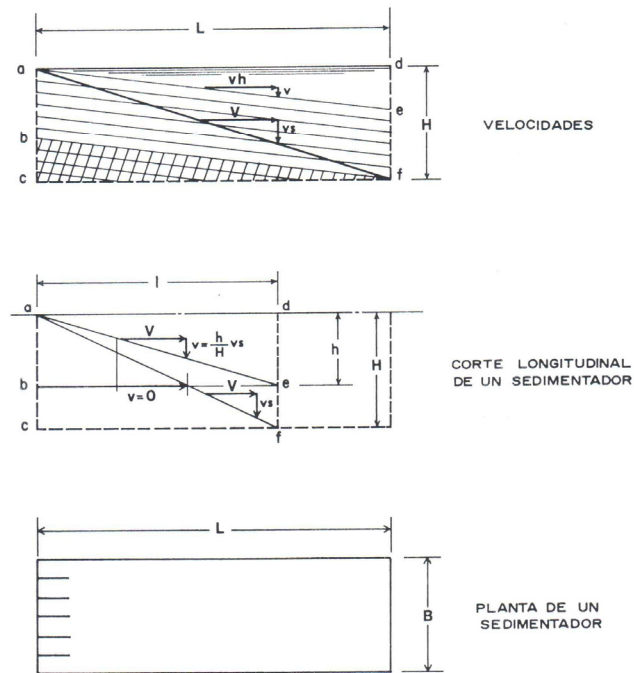
1. Sedimentadores o decantadores convencionales o estáticos
2. Decantadores laminares
3. Decantadores dinámicos

1.5.1 Sedimentadores convencionales:

En este tipo de unidades puede producirse sedimentación o decantación, normalmente con caída libre, en régimen laminar turbulento o de transición.

En estas unidades la masa líquida se traslada de un punto a otro con movimiento uniforme y velocidad V^H constante. Cualquier partícula que se encuentre en suspensión en el líquido en movimiento, se moverá según la resultante de dos velocidades componentes; la velocidad horizontal del líquido (V^H) y su propia velocidad de sedimentación (V^S), ver figura 2.

Figura 3. Trayectoria ideal de partículas discretas



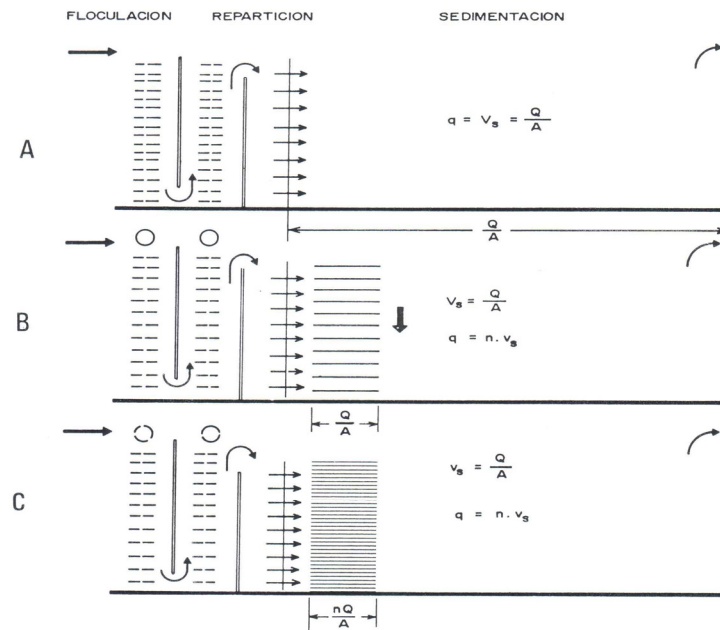
TRAYECTORIA IDEAL DE PARTÍCULAS DISCRETAS

En un sedimentador ideal de forma rectangular y con flujo horizontal la resultante será una línea recta. Asimismo, otras partículas discretas se moverán en lugares geométricos paralelos pudiendo establecer semejanza de los triángulos entre las velocidades y las dimensiones del sedimentador.

1.5.2 Sedimentadores de flujo laminar:

La eficiencia de los decantadores clásicos de flujo horizontal depende, principalmente, del área. De este modo, si se introduce un piso intermedio a una altura (h), a partir de la superficie, las partículas con una velocidad de sedimentación $V^{SC} < V^{SB}$ serían removidas, como lo demuestra la figura 1.5.2, cosa que antes no ocurría.

Figura 4. Incremento de la capacidad de sedimentación al aumentar el área superficial



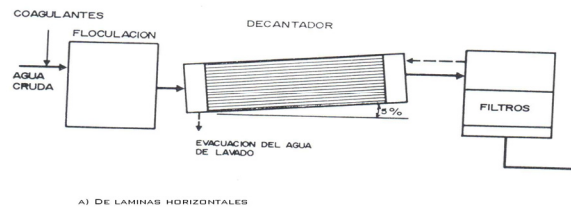
INCREMENTO DE LA CAPACIDAD DE SEDIMENTACION AL AUMENTAR EL AREA SUPERFICIAL

Se podría admitir que la capacidad de clarificación del decantador aumentaría con la duplicación del área horizontal. Hace más de 40 años se propuso inclusive un decantador con varios pisos horizontales, con un espaciamiento de 15 cm entre ellos y con remoción mecanizada del lodo.

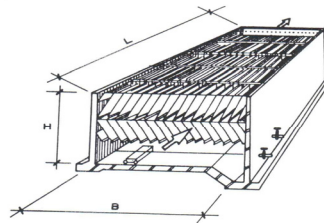
En realidad, son tres los efectos que favorecen la remoción de las partículas suspendidas; 1. aumento del área, 2. disminución de la altura de caída de la partícula y 3. régimen del flujo laminar.

Debido a las dificultades de mantenimiento, este tipo de unidad permaneció olvidada por mucho tiempo hasta que, a mediados de la década del 60, se empezó a investigar la sedimentación en tubos inclinados, donde el lodo depositado escurre hacia la parte inferior, no interfiriendo en las características de la instalación.

Figura 5. Sedimentadores laminares



A) DE LAMINAS HORIZONTALES



B) DE LAMINAS INCLINADAS

1.6 Filtros

La filtración consiste en la remoción de partículas suspendidas y coloidales presentes en una suspensión acuosa que escurre a través de un medio poroso. En general, la filtración es la operación final que se realiza en una planta de tratamiento de agua y, por consiguiente, es la responsable principal de la producción de agua de calidad coincidente con los patrones de potabilidad. Como las fuerzas que mantienen a las partículas removidas de la suspensión adheridas a las superficies de los granos del medio filtrante son

activadas para distancias relativamente pequeñas, la filtración es usualmente considerada como el resultado de dos mecanismos distintos, pero complementarios: transporte y adherencia. Inicialmente, las partículas a removerse son transportadas de la suspensión a la superficie de los granos del medio filtrante. Ellas permanecerán adheridas a los granos, siempre que resistan la acción de las fuerzas de cizallamiento debidas a las condiciones hidrodinámicas del escurrimiento.

El transporte de partículas es un fenómeno físico e hidráulico afectado principalmente, por los parámetros que gobiernan la transferencia de masas. La adherencia entre partículas y granos es básicamente un fenómeno de acción superficial, que es influenciado por parámetros físicos y químicos.

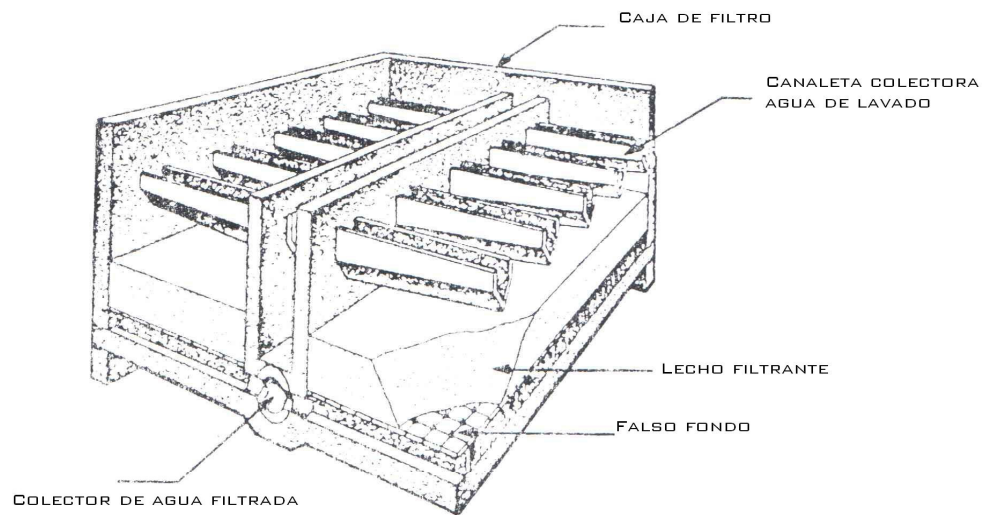
Estas unidades se clasifican en dos grupos:

1. Filtros rápidos por gravedad
2. Filtros rápidos a presión

1.6.1 Filtros rápidos por gravedad

En estas unidades el agua sedimentada llega a la caja del filtro por medio de canales o tuberías y se hace pasar gravitacionalmente por el medio filtrante, para que se retengan las partículas en suspensión, produciéndose pérdidas de carga hidráulica. El efluente es colectado por medio de canales o tubos que le conducen al tubo de salida, según se ilustra en la figura 6.

Figura 6. Filtro rápido por gravedad



FILTRO RAPIDO POR GRAVEDAD

1.6.2 Filtros rápidos a presión

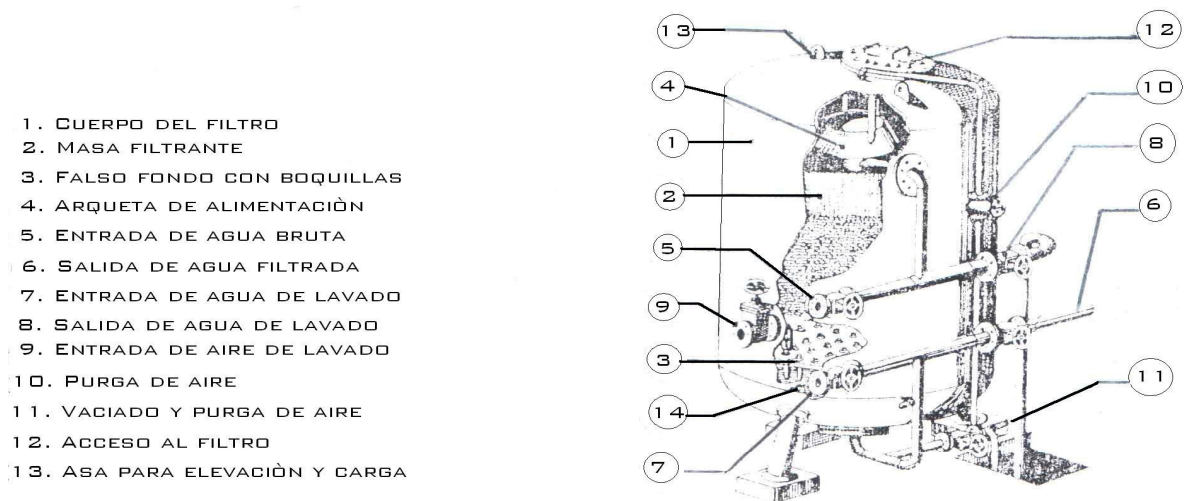
Son filtros generalmente para pequeños caudales construidos en tanques de acero, existen tres disposiciones constructivas:

1. Unidades combinadas verticales
2. Unidades combinadas horizontales
3. Unidades combinadas separadas

La instalación recibe agua cruda a presión y el efluente del filtro también sale a presión. La caja filtrante descansa sobre soporte, del lecho sucesivo de materiales de granulometría creciente hacia abajo. El

colector puede ser ramificado y perforado, embebido en la caja de granulometría mayor, o un falso fondo metálico perforado con boquillas metálicas o plásticas. En la mayoría de los casos, la capa filtrante es única, de arena o antracita. Ver figura 6

Figura 7. Filtro rápido a presión



FILTRO RAPIDO A PRESIÓN

1.7 Post-cloración

La post-cloración o desinfección del agua es un proceso unitario de tratamiento que tiene como objetivo garantizar la potabilidad de la misma desde el punto de vista microbiológico, asegurando la ausencia de microorganismos patógenos.

Se considera fundamental este proceso de tratamiento dentro de la tecnología del tratamiento del agua, debido a que es conocido el hecho de que los otros procesos de tratamiento, como la sedimentación y la filtración, no remueven el 100% de los microorganismos patógenos presentes en las aguas

sujetas al tratamiento. Las aguas de consumo pueden sufrir re-contaminación al ser distribuidas a la población, a causa de deterioro en los tanques de almacenamiento y redes de distribución, por lo que la desinfección también debe actuar como seguro contra estas situaciones posteriores al tratamiento.

Normalmente, el proceso de desinfección se utiliza como parte de una serie de operaciones de tratamiento que conforman una planta. En su forma más simple, la desinfección se aplica como único tratamiento para aguas naturales de excelente calidad (aguas subterráneas, manantiales, etc.).

Cuando la desinfección forma parte de un complejo proceso de tratamiento, su empleo normalmente se basa en los siguientes criterios:

- 1 Para reducir el contenido inicial de contaminantes microbiológicos en el agua cruda (pre-cloración). Este proceso se efectúa únicamente en casos especiales.
- 2 Como desinfectante final, luego del tratamiento principal efectuado al agua (post-cloración). Éste es el uso más importante.

En general, las aguas sujetas al tratamiento deben encontrarse libres de partículas coloidales causantes de turbiedad y color que pueden convertirse en obstáculos para la acción del agente desinfectante. Por esto, la desinfección alcanza su eficiencia mayor en aguas claras, por lo que es conveniente lograr altas eficiencias en los procesos previos de clarificación del agua.

2. DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA EL CAMBRAY

La planta de tratamiento de agua potable “El Cambray”, está ubicada al sur-orientado de la ciudad capital de Guatemala, en el kilómetro 7, Carretera al Municipio de Santa Catarina Pinula.

En el año 1773 se construyó el “Acueducto Pinula”, en el año 1888 “Las Minas” y en el año 1905 la “Caja Unión”.

En el año 1942 se construyó la Planta de Tratamiento de Agua Potable junto con su obra de captación “Presa Pinula”. En el año 1960 “Manantial Agua Bonita”. En el año 1968 se construyó la “Estación de Bombeo Hincapié” y en 1970 se construyó el Pozo Hincapié.

En el año 1998 se finalizó la rehabilitación del Sistema de Tratamiento de Agua Potable “El Cambray”, con fondos no reembolsables del gobierno de El Japón, por medio de la Agencia Internacional de Cooperación japonesa (JICA).

La planta de tratamiento de agua potable "El Cambray", está compuesta por un sistema convencional de tratamiento para la potabilización de agua, de manera que consta de los siguientes elementos:

- Presa Pinula
- Estación de bombeo Hincapié
- Líneas de conducción
- Vertedero de entrada
- Floculador
- Sedimentadores
- Filtros
- Tanques de aguas claras

2.1 Fuentes de abastecimiento

La planta el Cambray se abastece principalmente de dos fuentes de abastecimiento las cuales son la presa Pinula y la estación de bombeo Hincapié.

2.1.1 Presa Pinula

Está constituida simplemente de una pared colocada en un sitio determinado del cauce de la corriente natural con el objeto de almacenar parte del caudal que transporta la corriente.

La pared fue diseñada para que soporte las fuerzas generadas por la presión del agua y para que impida filtraciones a lo largo de su estructura y en las superficies de contacto entre la estructura y el terreno natural adyacente. La presa además cuenta con obras complementarias que permitan el paso del agua que no se embalsa y con estructuras de toma para captar y entregar el agua embalsada hacia la planta.

Figura 8. Presa Pinula



2.1.2 Estación de bombeo Hincapié

El diseño de la planta de bombeo se hizo con el criterio de lograr, con un mínimo de instalaciones, una máxima eficiencia en su funcionamiento, así como una adecuada protección de la planta contra las crecientes del río.

En tal forma la planta consta de los siguientes elementos:

- presa
- Canal desarenador
- Tanque de compensación y de contacto para la pre-cloración
- Fosa de succión
- Equipo
- Caseta de mandos
- Bodega y taller
- Canal de demasías
- Disipador
- Rectificación de cauce
- Protección de cauce
- Protecciones laterales
- Guardianía y urbanización

Presa

La presa fue proyectada en tal forma que llene la función de desviar el caudal a ser bombeado, elevando el nivel del agua a una altura que permita su ingreso al canal desarenador.

Canal desarenador

Para evitar la presencia de sedimentos en el tanque de succión se construyó un desarenador con tales características que logra la sedimentación de partículas hasta de 0.1 mm de diámetro.

Tanque de compensación y de contacto para la pre-cloración

Para poder bombear solo 19 horas del día es necesario almacenar 1,845 metros cúbicos, equivalentes al déficit total en 19 horas entre el caudal bombeado y el caudal mínimo aportado por el río. Para evitar que este tanque se vacíe por completo, se construyó un tanque con un volumen de 2400 m³ con 20 metros de ancho, 40 metros de largo y una profundidad variable entre 2.5 y 3.5 metros, lo que da un volumen de 2,400 metros cúbicos, el cual es mayor que el mínimo necesario, con el objeto de absorber cualquier variación horaria en el régimen del río.

Fosa de succión

El tanque de succión se dimensionó de acuerdo al tipo de bombas. Las dimensiones son: 20 metros de largo, 5 de ancho y 5 de profundidad, con bombas de 200 y 300 hp.

Caseta de mandos

Está localizada separadamente de donde se encuentran las bombas y motores con el objeto de evitar ruido. Consta de un módulo de 5 por 20 metros, ubicado en el área cubierta del tanque de compensación. En ella se encuentran los controles del equipo de bombeo.

Canal de demasías

Este canal debe conducir el caudal de avenida de $200 \text{ m}^3/\text{s}$, en régimen rápido hasta un disipador situado aguas abajo de la planta.

Disipador

Su objeto es el de cambiar el régimen del flujo, de rápido a lento, disipando la energía adicional mediante un salto hidráulico.

Figura 9. Estación de bombeo Hincapié

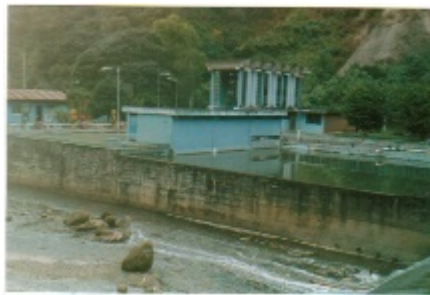


Figura 10. Bombas de Impulsión



2.2 Líneas de conducción

Es el tramo de tubería que transporta el agua desde la captación hasta la planta potabilizadora, siguiendo en lo posible el perfil del terreno y está ubicada de tal manera que puede inspeccionarse fácilmente.

Ésta trabaja de dos formas:

- una línea por gravedad (presa Pinula), con una longitud de 1Km.
- una línea por bombeo (estación de bombeo Hincapié), siendo está de hierro dúctil con una longitud aproximada de 4.5 Km.

2.3 Vertedero de entrada

Unidad utilizada para la medición de caudal y mezcla rápida. Compuesto de dos vertederos, uno que mide el caudal proveniente de la presa Pinula y el otro para medir el caudal proveniente de la estación de bombeo Hincapié.

El máximo caudal registrado por ambos vertederos es de 210 L/s, teniendo una producción máxima diaria de 18,144 m³/día.

2.4 Floculador

En esta parte es donde se efectúa la floculación a través del canal formando por pantallas que desvía y disipan el agua en forma serpenteada, con el fin de reducir la velocidad del caudal, siendo éste del tipo hidráulico de flujo horizontal.

Por la acción coagulante del sulfato de aluminio se desestabilizan y se aglutinan las partículas coloidales suspendidas en el agua formando lo que se conoce como floc, para que por su propio peso se depositen en el fondo de los tanques sedimentadores.

2.5 Sedimentadores

En estas unidades se depositaran los lodos formados en el floculador y el agua superficial que se encuentre al final del sedimentador, el agua será recolectada a través de canaletas y conducida hacia los filtros.

La planta consta de tres sedimentadores convencionales con capacidad de 2160 m³ cada uno los cuales operan en forma independiente lo que permite la realización de los respectivos mantenimientos (limpieza, inspecciones, etc.)

2.6 Filtros

El agua proveniente de la salida de los sedimentadores es pasada a través de 6 filtros rápidos por gravedad, compuestos por un lecho de arena silica y un lecho de grava utilizada como soporte. Cada filtro tiene la capacidad de filtrar hasta 2600 m³/día.

2.7 Tanques de aguas claras

El agua almacenada en este punto debe de cumplir con todos los parámetros recomendados por la norma COGUANOR NGO 29001.

El agua es almacenada en dos tanques con capacidades de 3000 y 3500 m³ cada uno.

3. OPERACIÓN GENERAL DE LA PLANTA EL CAMBRAY

3.1. Sistema de dosificación del sulfato de aluminio

3.1.1. Especificaciones y características

La planta El Cambray fue diseñada con una capacidad para procesar entre 15,000-16,000 m³/día de agua cruda, la cual entra con una turbiedad (dependiendo de la época de verano o invierno) dentro del rango de 20-4,000 UTN (unidades de turbiedad nefelometricas).

Los tanques de mezcla tienen capacidad operativa de 6 m³ cada uno.

Volumen de dosificación:

20 mg/L (promedio)

50 mg/L (máximo)

La calidad del sulfato de aluminio que recibe EMPAGUA tendrá que tener una pureza mínima de 17% (expresada como Al₂O₃).

3.1.2. Operación del sistema de dosificación de sulfato de aluminio

Preparación inicial de la solución:

- Cada uno de los dos tanques se alimentara con agua hasta aproximadamente la marca de 6 metros cúbicos.
- Seguidamente se agregarán 700 kilos de sulfato de aluminio.

- Se abre la válvula de alimentación de agua (que está localizada en la parte superior de cada uno de los tanques) y se completa con agua hasta la marca negra en el tubo transparente.
- Se arranca el agitador por espacio de 4 horas y se para. Pasado este tiempo el sulfato de aluminio debe de estar totalmente disuelto en el agua del tanque.
- Se toma una muestra del tanque y se mide la concentración utilizando el hidrómetro.
- La solución preparada de cada tanque durará aproximadamente 4 horas.

Preparación diaria de la solución:

- Cada uno de los tanques de dosificación de aluminio, estará en capacidad de poder dosificar 6 m^3 , en un periodo determinado de tiempo.
- Después que se active la alarma de bajo nivel en cualquiera de los tanques de aluminio, el operador tendrá aproximadamente 10 minutos para hacer cambio de tanques, de lo contrario se detendrá la bomba.
- Se agrega agua hasta la marca de 6 m^3 .
- Se agregan 600 kilos de sulfato de aluminio.
- Se agita durante 4 horas.
- Se toma una muestra y se mide la concentración utilizando el hidrómetro.

3.1.3. Operación:

Operación inicial en tanques de preparación:

- Se abre la válvula de salida del tanque que se va a utilizar.
- Se abren totalmente las válvulas de succión y se descargan de la bomba que se va a utilizar.
- Se abren totalmente las válvulas de entrada y salida del filtro. Cerrar la válvula bypass del filtro.
- Se abre la válvula de retorno (colocada en la parte superior del tanque), del tanque que se utilizará.
- Se abre la válvula de retorno del tanque elevado de sulfato de aluminio (ubicada en el tercer nivel).
- Se cierran las válvulas de entrada y salida del rotámetro (medidor de flujo) de sulfato de aluminio y se abre la válvula bypass (ubicada en el tercer nivel).
- Se abren las válvulas de entrada y salida del switch de flujo, cerrar la válvula bypass.
- Se arranca la bomba dosificadora de la solución de sulfato de aluminio A.
- Se cierra la válvula de retorno del tanque elevado, hasta que rebalse suficiente cantidad de líquido del vertedero.
- Se abren las válvulas de entrada y salida del rotámetro y cerrar la válvula bypass, se ajusta el volumen de alimentación con la válvula de entrada del rotámetro.

Cambio de tanques:

- Se abre la válvula de salida del tanque que se va a utilizar y seguidamente se cierra la válvula de salida del tanque que se está utilizando.

- Se abre la válvula de retorno del tanque que se va a utilizar y seguidamente se cierra la válvula de retorno del tanque en el panel de control.
- Se cambia el selector de tanques en el panel de control.
- Se arranca de nuevo la bomba que se estaba utilizando.

3.1.4 Mantenimiento

Inspección diaria del equipo:

- Se verifica que los motores y bombas no tengan ruidos extraños. Si existen reportarlo inmediatamente.
- Se revisa si el switch de flujo no está lleno de suciedad. Si es necesario se efectúa la limpieza.
- Se revisa si el rotámetro (medidor de flujo) no tiene suciedad.

Limpieza del filtro de sulfato de aluminio (cada 2 días):

- Se abre la válvula bypass y se cierran las válvulas de entrada y salida al filtro.
- Se remueven los tornillos de la tapadera.
- Se saca la canasta del filtro y se limpia toda la suciedad que pueda contener.
- Se coloca de nuevo la canasta y se ponen todos los tornillos.

Limpieza del switch de flujo (colocado a un costado del tanque):

- Se abre la válvula bypass y se cierran las válvulas de entrada y salida del switch de flujo.
- Se abre la válvula de drenaje situada en la parte inferior.
- Se limpia el interior del switch de flujo con agua si es necesario.
- Se abren las válvulas de entrada y salida del switch de flujo, cerrar el bypass.

Limpieza de los tanques de preparación (1 vez por semana):

- Se drena todo el contenido del tanque, abriendo la válvula de drenaje del tanque que se va a limpiar.
- Se saca todo el material que se halla sedimentado en el interior del tanque.
- Se limpia la pichacha interna.

Operación del elevador

- El equipo está provisto de dos controles. Uno de los controles tiene un selector en el cual está impreso 1F y 2F, que significa que será operado con el control del primer nivel o con el contorno del segundo nivel.
- El elevador parara automáticamente, tanto en su desplazamiento hacia arriba o hacia abajo.

3.2 Sistema de dosificación de cal

3.2.1. Especificaciones y características:

- el propósito de dosificar la solución de cal, es estabilizar el pH (potencial de hidrógeno), del agua que se está tratando. El pH disminuye debido a la aplicación del sulfato de aluminio.
- Los tanques de mezcla tienen capacidad operativa de 6 m³ cada uno.

3.2.2. Operación del sistema de dosificación de cal:

Preparación inicial de la solución:

- Cada uno de los tanques se alimentará con agua hasta aproximadamente la marca de 6 metros cúbicos.
- Seguidamente se agregaran 60 kilos de cal.
- Se abre la válvula de alimentación de agua (que está localizada en la parte superior de cada uno de los tanques), y completar con agua hasta la marca negra en el tubo transparente.
- Se arranca el agitador. Los agitadores de cal no se paran. Excepto durante el tiempo que se está agregando cal al tanque.

Preparación diaria de la solución:

- Cada uno de los tanques de dosificación de cal, estará en capacidad de poder dosificar 6 metros cúbicos, en un período determinado de tiempo.

- Después que se active la alarma de nivel bajo en cualquiera de los tanques de cal, el operador tendrá aproximadamente 10 minutos para hacer cambio de tanques, de lo contrario se parara la bomba.
- Se agrega agua hasta la marca de 6 metros cúbicos.
- Se arranca el agitador del tanque de cal.
- Se agrega 60 kilos de cal.

Operación:

Operación inicial en tanques de preparación:

- Se abre la válvula de salida del tanque que se va a utilizar.
- Se abren totalmente las válvulas de succión y descargar de la bomba que se va a utilizar.
- Se abre la válvula de retorno (colocada en la parte superior del tanque), del tanque que se utilizará.
- Se abren las válvulas de entrada y salida del alimentador de cal (ubicada en el tercer nivel).
- Se abre la válvula de agua de enfriamiento de la bomba de cal que se utilizará.
- Se arranca la bomba dosificadora de la solución de cal
- Se arranca el alimentador de cal.
- Se ajusta la dosificación de acuerdo a las características del pH del agua.

Cambio de tanques:

- Se abre la válvula de salida del tanque que se va a utilizar y seguidamente se cierra la válvula de salida del tanque que se está utilizando.
- Se abre la válvula de retorno del tanque que se va a utilizar y seguidamente se cierra la válvula de retorno del tanque en el panel de control.
- Se cambia el selector de tanques en el panel de control.
- Se arranca de nuevo la bomba que se estaba utilizando.

3.2.4. Mantenimiento

Mantenimiento diario de tanques:

- Se revisa a diario que los motores y bombas no tengan ruidos extraños.
- Se revisa la tensión de las fajas de los motores.
- Se revisa el nivel de aceite en la caja reductora de velocidad del alimentador de cal.
- Se asegura que está abierta la válvula de entrada de agua de enfriamiento a la bomba de cal.
- Se revisa si el dosificador de cal (ubicado en el tercer nivel) tiene suciedad acumulada en el interior.

NOTAS IMPORTANTES:

- Realizar pruebas de jarras por lo menos cada dos horas para determinar la dosis óptima de sulfato de aluminio.
- Comprobar la calibración del hidrómetro de sulfato de aluminio cada mes.

3.3 Operación de clorinación

3.3.1. Generalidades

Las nuevas instalaciones y equipos de clorinación de la planta El Cambray, están diseñadas para pre-clorar el agua cruda y para post-clorar el agua filtrada. Ambos procesos se podrán operar independientemente uno del otro.

El sistema de cloración (pre y post cloración) está compuesto de los siguientes elementos y equipos:

- Dos bombas (una en operación y una de repuesto).
- Dos filtros de línea.
- Dos inyectores de cloro gas.
- Cuatro manómetros.
- Dos rotámetros (medidor de flujo de cloro gas).
- Dos adaptadores para cilindros.

3.3.2. Operación

Arranque inicial: ambos sistemas (pre y post cloración) se arrancan utilizando la misma bomba.

- Se abre la válvula de succión y la válvula de descarga de la bomba que se va a utilizar.
- Se abren las válvulas de servicio que se encuentran en el cuarto de control de cloración.

- Se arranca la bomba de cloración. En el panel eléctrico que se encuentra dentro del cuarto de bombas.
- Se conectan los paneles remotos a los tanques de cloro. Ésta conexión se hace en el cuarto donde están localizados los tanques de cloro.
- Se conectan los calentadores, al tomacorriente.
- En el cuarto de control de cloración, se ajusta en el panel de cloración los rotámetros (medidor de flujo) a la cantidad de cloro que sea necesaria.

3.3.3. Mantenimiento

- Se revisa todos los días el nivel de aceite del motor que está funcionando. Se notifica si está bajo el nivel.
- Se revisa si hay algún ruido extraño en el motor o bombas de cloración.
- Se revisa todos los días el filtro en línea, se limpia si es necesario.
- Se revisa y se reparan las fugas de cloro en las líneas.

3.4. Filtro rápido

3.4.1 Generalidades

La instalación del filtro rápido es la última etapa del proceso de la planta de purificación y el objetivo es remover los componentes más pequeños que provocan turbiedad. El agua que ingresa al filtro ya ha pasado por una serie de instalaciones y procesos las cuales incluyen el canal de mezcla de químicos, floculador y los tanques de sedimentación. El agua que sale del filtro rápido tendrá que cumplir con las normas internacionales de calidad de agua potable, tanto como con la norma COGUANOR NGO 29001.

El agua proviene de los tanques de sedimentación es conducida al filtro rápido por medio de 2 tuberías (D= 350 mm.), a una fosa central localizada en la entrada del mismo, éste se divide en dos canales de distribución, los cuales distribuyen equitativamente el flujo de agua a cada uno de los filtros.

El agua que entra en cada uno de los filtros, pasa a través del lecho filtrante (cama de arena) de arriba hacia abajo. El agua que atraviesa la cama de arena se le denomina agua filtrada.

3.4.2. Condiciones de diseño

Flujo de agua tratada:	16,000 m ³ /día (185 L/s)
Método de filtración	Tipo de gravedad de filtración Rápida, filtración por arena.
Medio filtrante	Arena para filtración (600 mm.) Diámetro efectivo: 0.55 mm hasta 0.65 mm.
Área filtrante	18 m ² . Cama filtrante.
Número de unidades	6
Caudal de filtración	150 m ³ /m ² /minuto.
Flujo de agua de relleno	4.6 m ³ /minuto.

3.4.3. Operación del filtro rápido

3.4.3.1 Arranque inicial:

- Se abren las válvulas de salida de agua de los sedimentadores.

- Se espera a que el nivel de agua suba hasta la altura superior de las válvulas en los canales de distribución.
- Se asegura que las válvulas de drenaje (D= 450 mm) y de lavado de superficie (D= 250 mm), estén cerradas.
- Se abre totalmente la válvula de entrada al filtro (D= 250 mm.).
- Se abren parcialmente las dos compuertas de salida del filtro.
- Se espera a que el agua filtrada rebalse el vertedero de salida del tanque de recolección.
- Se espera a que el nivel de agua al otro lado del vertedero de salida alcance 2 metros de altura como mínimo.
- Se arranca la bomba de cloración.
- Se ajusta el manómetro de post-cloración.
- Se abren las 2 válvulas de mariposa (D= 350 mm.) de salida de agua filtrada, las cuales están localizadas en la fosa de las válvulas localizada en la parte de afuera del filtro rápido.

3.4.3.2. Lavado

Cada una de las 6 unidades de filtración que componen el filtro rápido, después de un periodo de tiempo de operación se hace necesario que se interrumpa el proceso de filtración y se proceda a regenerar la cama filtrante por medio de un lavado. Este proceso de lavado se deberá efectuar antes de que el proceso de filtración se detenga debido a la saturación de floculos en la cama de arena de la cama filtrante.

Las instalaciones del filtro rápido tienen todos los equipos necesarios para realizar las operaciones de lavado como de filtrado. El proceso de lavado consiste en 2 procesos: lavado de superficie y retrolavado.

3.4.3.2.1. Lavado de superficie

- Se abre la válvula de lavado de superficie (D= 250 mm) del filtro que se está lavando.
- Se cierra la válvula de entrada de agua cruda.
- Se abre la válvula de drenaje hasta la marca (aproximadamente $\frac{1}{4}$).
- Se arranca la bomba de lavado de superficie A o B, en el panel que está colocado en la parte superior del filtro rápido. La bomba de lavado de superficie está instalada en el cuarto de bombas, se verifica que las válvulas de succión y descarga de la bomba que se utilizará estén abiertas.
- Se espera que la bomba de lavado de superficie pare automáticamente (aproximadamente 6 minutos).
- Se cierra la válvula de lavado de superficie.
- Se abre la válvula de fondo (D= 300 mm) del tanque de relleno.

3.4.3.2.2. Retrolavado

- Se abre totalmente la válvula de drenaje.
- Se esperan 6 minutos o hasta que el agua que sale de la cama de arena filtrante esté limpia.
- Se cierra la válvula de drenaje.
- Se abre la válvula de entrada de agua cruda.

3.4.4. Procedimiento de emergencia

3.4.4.1. Agua de relleno

Esta instalación de filtración fue diseñada para mantener un flujo de agua de 16,000 m³ por día. Las condiciones de filtración del agua varían constantemente, dependiendo generalmente de la turbiedad del agua de entrada, por lo que entre mayor sea la cantidad de turbiedad en el agua, más agua será utilizada en el proceso de retrolavado.

Es muy importante durante la operación del filtro rápido mantener el nivel de agua, dentro del tanque colector de agua filtrada, en ciertas ocasiones tales como períodos largos de retrolavado o bajo caudal de agua, será necesario utilizar el contenido del tanque de relleno para mantener el nivel.

3.4.4.2. Bajo caudal de agua

Si el caudal de alimentación de agua es menor de 8,000 m³ por día, no será posible realizar el proceso de retrolavado, aunque se utilice el contenido de agua del tanque de relleno.

3.4.4.3. Mantenimiento de un filtro

Si es necesario darle mantenimiento a cualquiera de los filtros, va a ser necesario que se le extraiga toda el agua del interior del mismo. El procedimiento deberá ser el siguiente:

- Se cierra la válvula de entrada al filtro.
- Se cierran las 2 compuertas de salida que corresponden al filtro.

- Se abre la válvula de drenaje (D=250 mm).
- Se abre la válvula de drenaje de la cama filtrante (D= 100 mm), que se encuentra localizada dentro de los “valve pit” en ambos lados del filtro rápido.

3.4.5. Precauciones

3.4.5.1. Cuarto de bombas

- Fugas de agua ya sea en la tubería o en los estoperos de bomba (aproximadamente 1 gota/segundo).
- Vibración o ruido anormal de algún motor o bomba durante el funcionamiento.

3.4.5.2. Tanque de filtración durante la filtración

- Tanques de filtración no deberán tener un bajo nivel de agua.
- Remover piezas de madera o piezas de plástico que se encuentren dentro del filtro.

3.4.5.3. Tanque de filtrado durante el lavado

- El volumen de agua que se utiliza en el lavado de superficie, deberá ser equivalente al agua que se está drenando.
- El tiempo de retrolavado no deberá ser más de 6 minutos.

3.4.5.4. Llenado de la cama filtrante

- Necesita llenarse la cama filtrante (con arena) cuando se reduzca su espesor en un porcentaje mayor del 10%.

4. GENERALIDADES DE COAGULANTES Y CÓMO REALIZAR LA PRUEBA DE JARRAS

4.1. Descripción de sulfato de aluminio

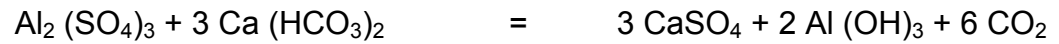
Se utiliza en forma sólida o líquida. La fórmula sólida se presenta en placas compactas, en forma granulada de diversos tamaños, o en polvo, de fórmula teórica $\text{Al}_2 (\text{SO}_4)_3 18 \text{H}_2\text{O}$. Este producto se define, en general, por su contenido en alúmina, expresada en Al_2O_3 , es decir un 17% aproximadamente. La densidad aparente del sulfato de aluminio en polvo es del orden de 1000 Kg/m^3 .

La forma líquida se define, lo mismo que la forma sólida, por su contenido en alúmina Al_2O_3 , ésta concentración se sitúa, generalmente entre 8 y 8.5%, es decir 48 a 49% en equivalente polvo, o también 630 a 650 gramos de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 18 \text{H}_2\text{O}$ por litro de solución acuosa.

El sulfato de aluminio está constituido por la sal de una base débil (hidróxido de aluminio) y de un ácido fuerte (ácido sulfúrico), por lo que sus soluciones acuosas son muy ácidas, su pH varía entre 2 y 3.8 según su relación molar sulfato/alúmina. Ésta acidez debe tenerse en cuenta al proceder a su almacenamiento, preparación y distribución.

Las reacciones principales del sulfato de aluminio con la alcalinidad natural del agua o con adición de alcalinizantes son las siguientes:

Sulfato de aluminio (forma líquida o sólida)



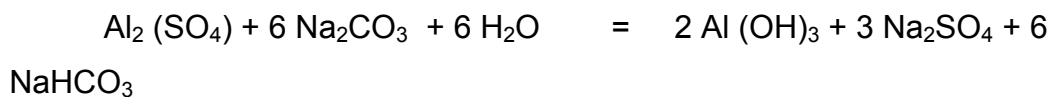
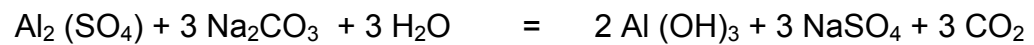
Sulfato de aluminio + Cal



Sulfato de aluminio + Soda cáustica



Sulfato de aluminio + Carbonato sódico



Se emplean también otras sales de aluminio como el cloruro de aluminio y el aluminato sódico.

El cloruro de aluminio AlCl_3 se presenta en forma sólida o líquida, utilizándose preferentemente ésta última (masa volúmica 1.29 Kg/dm^3 , contenido en Al_2O_3 : 11.4%).

Debido a la acidez de la solución, es necesario utilizar materiales plásticos para su preparación y distribución.

4.2. Descripción de policloruro de aluminio

El policloruro de aluminio (abreviado generalmente como PAC) es el resultado de un proceso de fabricación complejo bajo condiciones de trabajo controladas.

Denominaciones: policloruro de aluminio o Polihidroxiclورو de aluminio. Otras menos frecuentes: cloruro de polialuminio, cloruro de aluminio polibásico, cloruro básicos de aluminio, clorhidróxido de aluminio, oxiclورو de aluminio.

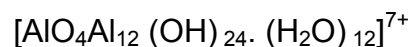
Composición

El PAC es una sal básica del cloruro de aluminio, un polímero de hidroxiclورو de aluminio con fórmula:



Donde $0 < m < 3n$.

Es esencialmente un polímero inorgánico catiónico.



En solución, y dependiendo del proceso empleado, tiene un contenido en Al_2O_3 de 10 a 23 g/100 g. Sólido, puede alcanzar un contenido de 44 g/100 g de Al_2O_3 .

Usos

Es usado como coagulante en el proceso de potabilización de las aguas para consumo humano, en el tratamiento de aguas residuales, en la industria del papel y en la industria del cuero, entre otros.

Es un producto corrosivo, por eso se almacena en tanques de PRFV.

Está alistado como coagulantes provenientes de sales de aluminio junto con el tradicional sulfato de aluminio. Sin embargo, tiene algunas ventajas frente a éste:

- Mayor potencia de coagulación.
- Mayor velocidad de coagulación y floculación.
- Menor gasto de coagulante (especialmente a altas turbiedades).
- No aporta aluminio disuelto al agua.
- Menor turbiedad final en el proceso.
- Disminuye el TOC.
- Menor consumo de álcalis.
- Efectividad en un amplio rango de pH.
- Igual rendimiento con distintas temperaturas.
- Remoción de color.

Fabricación

La materia prima para su fabricación es el hidróxido de aluminio y el ácido clorhídrico. Ambos productos son colocados en el reactor y mantenidos a determinadas temperaturas y presiones, mientras son agitados producen el PAC al cabo de cierto tiempo. Las características tecnológicas de cada fabricante pueden variar. Generalmente el producto resultante es sometido a un filtro de bandas y luego almacenado para su uso. Algunos fabricantes ofrecen diferentes tipos de PAC, según sea su contenido de óxidos útiles o su basicidad. La alternativa a usar hidróxido de aluminio es usar bauxita natural.

Puede también ser fabricado en reactores atmosféricos con lingotes de aluminio sólidos y ácidos clorhídrico, la reacción se caracteriza por ser exotérmica y su temperatura de reacción ideal se encuentra cerca de los 98 °C, por lo cual es necesario ir agregando agua hasta obtener la densidad deseada

Métodos de análisis del producto.

- Normas AWWA, ANSI/AWWA B408-98
- Norma IRAM 41106:2004
- Norma mexicana NMX-AA-130-SCFI-2006.
- Norma española UNE- EN 883:2005.
- European Standard EN EN 883:1997.

Polielectrolitos catiónico

Según el tipo, los polielectrolitos pueden usarse como coagulantes primarios o como ayudantes de coagulación. Como coagulantes primarios, la concentración empleada generalmente es entre 1-5 mg/L, mientras que como ayudante de coagulación la concentración empleada es generalmente entre 0.1 y 2 mg/L.

Un polímero especial que se ha utilizado en el tratamiento de agua por algún tiempo es la sílice activada. La sílice activada se prepara neutralizando soluciones comerciales de silicato de sodio (pH cerca de 12 en concentraciones en exceso de $2 \cdot 10^{-3}$ molar) con ácido hasta alcanzar un pH menor que 9.

Para evitar la precipitación se diluye la solución a una concentración de aproximadamente $2 \cdot 10^{-3}$ M (120 mg/L como SiO_2). Los polímeros aniónicos formados en este proceso son dosificados al agua a ser tratada.

En recientes investigaciones se ha obtenido la siguiente evidencia experimental (Stumm, Huper y Champlin, 1964):

- Bajo condiciones apropiadas, la sílice activada puede funcionar como único coagulante para coloides con carga positiva o negativa.
- La concentración de sílice activada que se requiere para desestabilizar un coloide está en relación directa con la concentración del coloide.

En consecuencia, la desestabilización por medio de sílice activada parece ser el resultado de la absorción específica acompañada por la formación del puente.

4.3. Prueba de jarras

La dosis de coagulante (sulfato de aluminio y polímero), ayudante de coagulación (polímeros), curva de demanda de cloro, etc. pueden ser determinadas por este simple proceso, el cual consiste en un aparato con 6 recipientes y agitadores, donde son aplicados por variantes de los químicos destinados a las determinaciones anteriores. Es más aplicada a la determinación de dosificación de sulfato de aluminio y polímeros.

4.3.1. Generalidades de la prueba de jarras

Antes de iniciar el proceso de tratamiento del agua en la planta, es necesario que el encargado de la misma efectúe la prueba de jarras, con el propósito de conocer las dosificaciones de los productos químicos que deberá aplicar en el agua cruda (sin tratar) para obtener una buena floculación-coagulación, sedimentación y filtración y lograr al final del proceso un agua de buena calidad.

4.3.2. Reacción agua-coagulante

El sulfato de aluminio ($\text{Al}_2 (\text{SO}_4)_3$) es una sal ácida, es decir, que en una solución acuosa, se hidroliza en hidróxido de aluminio $\text{Al} (\text{OH})_3$ y ácido sulfúrico (H_2SO_4).

La reacción se describe así:



Esta reacción no se da sin que haya suficiente alcalinidad en el agua, ya sea natural o provocada (para aumentar la alcalinidad del agua, se le agrega carbonato de sodio o cal para que, reaccione con el ácido sulfúrico liberado).

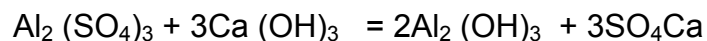
Dentro de determinado rango de pH, el ácido sulfúrico liberado, reacciona con la alcalinidad natural o artificial del agua para formar sulfato de calcio o sodio, hidróxido de aluminio y bióxido de carbono.

Las reacciones son las siguientes:

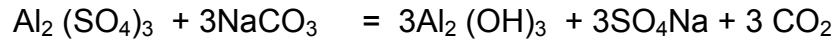
- Con alcalinidad natural en el agua se tiene:



- Con alcalinidad artificial agregando cal:



- Con alcalinidad artificial, agregando carbonato de sodio:



Estas reacciones son teóricamente ciertas, pero no representan las cantidades de álcalis que reaccionan en la práctica, con el sulfato de aluminio en cualquier agua, debido a la interferencia de otros factores.

Por tanto, los valores teóricos dan una directriz en las siguientes reacciones.

Cantidad en mg/L de sulfato de aluminio	Cantidad en mg/L alcalinidad que reacciona
10	4.5 natural CaCO_3
10	3.5 cal al 80% de CaO
10	3.7 $\text{Ca} (\text{OH})_2$ al 90%
10	4.8 carbonato de sodio en Na_2CO_3

Se observa que las de alcalinidad natural y artificial con carbonato de sodio, liberan bióxido de carbono. La alcalinidad artificial agregando cal no libera CO_2 .

Por tanto, la cantidad total de reactivo alcalino utilizado en el tratamiento del agua, no es solamente la necesaria para la reacción con el sulfato de aluminio, si no que también la necesaria para neutralizar el bióxido de carbono producido por la reacción, aumentando todavía la que el agua pudiese contener, independiente de las reacciones resultantes del tratamiento del agua.

Las cantidades de reactivos alcalinos mencionados, son teóricos y las cantidades realmente exigidas son determinadas por los ensayos prácticos ejecutado en los laboratorios de las plantas de tratamiento de agua.

En la coagulación del agua de baja alcalinidad y alta coloración y cuya floculación se procesa en pH bajo, es indispensable la adición de álcalis, hasta cierto límite de dosis de sulfato de aluminio, por tanto, cuando las dosis se elevan más allá de cierto límite, la adición de álcalis se hace necesaria para satisfacer las exigencias de la reacción.

Para la eficiencia del tratamiento de agua con empleo de coagulantes, especialmente con sulfatos de aluminio, el control del pH de floculación, es condición indispensable.

En las aguas poco alcalinas, de mucho color y de baja turbiedad, la floculación se procesa en pH bajo, entre 5 y 6.5 excepcionalmente puede ser más bajo. En las aguas más alcalinas y turbias, el pH de floculación puede llegar hasta 7.4 unidades.

Cada agua tiene un pH óptimo de floculación y ese pH, puede variar para la misma agua, de acuerdo con las variaciones de su composición. La deficiencia del control de pH, puede comprometer el proceso de tratamiento, provocando:

- Mayor consumo de coagulante
- Dificultades en la remoción de turbiedad y color
- Fallas en la sedimentación
- Incremento a la labor de los filtros
- Aumento del aluminio residual en el agua a distribuir

Los desvíos grandes del punto óptimo del pH, determinan la disolución completa de los flóculos.

4.3.3. Aspectos técnicos de la prueba

Hay varios aspectos que deben tomarse en consideración antes de realizar una prueba de jarras.

- Equipo
- Reactivos (coagulantes)
- Gradientes de floculación (mecánica hidráulica)

Equipo:

- Aparato agitador para prueba de jarras
- Vasos de precipitación o beakers, capacidad 1000 ml ó 2000 ml
- Deflectores
- Vasos de precipitación o beakers, capacidad 100 ml
- Recolector de muestra (después de la prueba)
- Almacenador y preparador de muestra

Reactivo

Solución estándar de coagulante (sulfato de aluminio), preferentemente el utilizado en la planta de tratamiento. Pueden utilizarse concentraciones del 1, 2, 5, 10, 15, 20% respectivamente. Para mayor eficiencia se puede determinar la concentración óptima de coagulante.

Gradiente de floculación

Aspecto de importancia vital en lo concerniente a la prueba de jarras, ya que dependiendo de las condiciones o la mecánica hidráulica del diseño de la planta de tratamiento así se realizará la prueba en el laboratorio.

Determinación del gradiente en la planta:

- Seleccionar la unidad a analizar
- Determinar el caudal
- Determinar el volumen de cada cámara o tramo de la unidad.
- Si el floculador es hidráulico: determinar la pérdida de carga en cada tramo nivelando la superficie del agua.
- Si el floculador es mecánico: determinar las características de las paletas, número, ancho, largo, radio de giro, determinar la velocidad de trabajo del floculador R.P.M.
- Determinar el tiempo real de retención (prueba de trazadores) de cada tramo o cámara
- Determinación de potencia unitaria

4.3.4. Aspectos a tomar en la prueba

Para realizar la prueba se deben de considerar los siguientes aspectos:

- Toma de muestra
- Características de la muestra
- Cálculo de dosificaciones

- Gradiente y tiempos de floculación y sedimentación

Toma de muestra:

Es necesario tener al alcance un envase en el cual se pueda almacenar momentáneamente gran cantidad de agua no tratada, así como para el respectivo muestreo, se debe también considerar y tomar como datos la hora de captación de la muestra y la fecha de la toma de muestra y también la hora y fecha de inicio de la prueba, así como también los datos de planta: dosificación y caudal.

Características de la muestra:

Es importante tomar en cuenta las características de la muestra para la determinación de curvas de turbiedad contra dosificación, así como para determinar el rango de dosificación en las jarras.

Las características importantes a considerar son: turbiedad, color, pH, temperatura, alcalinidad y dureza.

Cálculo de dosificación:

Dependiendo de la turbiedad, así se aplicarán y variarán las dosificaciones de coagulante a las respectivas jarras. Si la persona tiene la experiencia para determinar las dosificaciones con el solo hecho de saber la turbiedad le será de mucha facilidad el continuar con la prueba.

Gradiente y tiempo de floculación y sedimentación:

Gradiente de floculación:

Es el cambio o variación del volumen de agua respecto a un nivel de referencia en un tiempo determinado por la cantidad de agua a tratar (caudal = volumen/tiempo)

Tiempo de floculación:

Depende directamente del gradiente y la prueba de trazadores.

Tiempo de sedimentación:

Este tiempo será determinado por la prueba de trazadores en el sedimentador, la velocidad dada en la prueba será siempre de 0 R.P.M.

4.3.5. Aspectos después de la prueba

Terminando el tiempo de sedimentación es necesario tomar en cuenta los siguientes aspectos para analizar la prueba y así llegar a una conclusión:

- Recolección de la muestra
- Determinación de las características de la muestra
- Conclusiones

Recolección de muestra:

Debe realizarse a una profundidad no máxima y no mínima de 6 cm. de la superficie en la jarra.

Determinación de características:

Turbiedad, color, pH, temperatura, alcalinidad y dureza, son las principales características de la muestra.

Análisis y conclusiones:

Con base a los datos proporcionado por la determinación de las características de la muestra da cada jarra se podrá deducir que la que tenga menor turbiedad, menor color, permanezca estable el pH y no varié demasiado la alcalinidad, será la muestra respectiva a la jarra de mejor dosificación aplicable a la planta.

4.3.6. Realización de la prueba de jarras

Cada prueba de jarras tiene su metodología a seguir y es indistintamente variable entre cada una realizada en plantas de tratamiento distintas, eso quiere decir que la prueba de jarras es diferente en la planta Lo de Coy comparada con Santa Luisa, El Cambray, La Brigada y en las Ilusiones. Se debe esto a que la mecánica hidráulica de cada planta hace variar los gradientes y por consiguiente también los tiempos de la prueba de jarras.

Metodología a seguir en la planta de tratamiento de agua El Cambray en una prueba de jarras:

- Toma de agua para tratar en el laboratorio.
- Distribución homogénea del agua recolectada en los seis beackers.

- Colocar dentro de cada beacker su respectivo deflector.
- En cada beacker de 100 ml, agregar la dosificación que se requiera para el grado de turbiedad existente y así poder obtener la dosificación óptima. Por ejemplo, si se tiene una turbiedad de 100 UTN se tendrá un rango de aplicación de coagulante variable entre más y menos cerca de los mg/L (miligramos por litro) de sulfato de aluminio, se coloca en el primer beacker la dosificación más baja y a las siguientes se agregará una cantidad mayor a la anterior en múltiplos de 2, 5, 10 ó 20 mg.
- Tener a la mano una piseta llena con agua destilada.
- Colocar el indicador de velocidad del aparato (jar test) a 100 R.P.M., en un tiempo de 1 minuto, durante ese tiempo hay que vaciar cada uno de los beackers de 100 ml en el beacker de 2,000 ml y agregar al beacker pequeño un poco de agua destilada (aproximadamente 10 ml) y verterlos en el beacker grande.
- Trascurrido el minuto de mezcla rápida (100 R.P.M.) se procederá a disminuir la velocidad de agitación a 65 R.P.M. y se le da un tiempo de 6 minutos. Durante este tiempo, se podrán preparar los otros 6 beackers para la toma de muestra terminada la prueba de jarras.
- Terminado el tiempo de los 6 minutos, se podrá disminuir la velocidad de agitación a 30 R.P.M. dándole un tiempo de mezcla de 9 minutos.
- Finalizado el tiempo de floculación de 15 minutos se detendrá la agitación y se procederá a dar el tiempo de sedimentación que es de 15 minutos.
- Trascurrido el tiempo de sedimentación se procederá a la recolección de la muestra de cada uno de los beackers. La cantidad de muestra oscilará entre los 25 y 50 ml.

- Teniendo ya en cada uno de los beakers la cantidad de muestra, se procederá a la toma de características de la misma: turbiedad, color, pH, temperatura y conductividad. Si se cuenta con una gran cantidad de muestra puede determinársele también alcalinidad y dureza.

Si se realizan pruebas de jarras para determinar dosificación de polímeros, es necesario seguir la siguiente metodología:

- Determinar la dosificación óptima de sulfato de aluminio (seguir toda la metodología descrita anteriormente).
- Determinar la dosificación de coagulante, se procederá a seguir los pasos de la metodología anterior, de la siguiente manera:
 - colocar en cada uno de los beakers de 100 ml la misma cantidad de coagulante (mantener la dosificación en cada uno de ellos).
 - Agregar variantes de polímeros en cada uno de los otros beakers.
 - Colocar el indicador de velocidad del aparato (jar test) a 100 R.P.M., en un tiempo de 1 minuto, durante ese tiempo hay que vaciar cada uno de los beakers de 100 ml en el beaker de 2,000 ml y agregar al beaker pequeño un poco de agua destilada (aproximadamente 10 ml) y verterlos en el beaker grande y agregar a esto el polímero.
 - Trascorrido el minuto de mezcla rápida (100 R.P.M.) se procederá a disminuir la velocidad de agitación a 65 R.P.M. y se le da un tiempo de 6 minutos. Durante este

tiempo, se podrán preparar los otros 6 beackers para la toma de muestra terminada la prueba de jarras.

- Terminado el tiempo de los 6 minutos, se podrá disminuir la velocidad de agitación a 30 R.P.M. dándole un tiempo de mezcla de 9 minutos.
- Finalizado el tiempo de floculación de 15 minutos se detendrá la agitación y se procederá a dar el tiempo de sedimentación de 15 minutos.
- Transcurrido el tiempo de sedimentación se procederá a la recolección de la muestra de cada uno de los beackers. La cantidad de muestra oscilará entre los 25 y 50 ml.
- Teniendo ya en cada uno de los beackers la cantidad de muestra, se procederá a la toma de características de la misma: turbiedad, color, pH, temperatura y conductividad. Si se cuenta con una gran cantidad de muestra puede determinársele también alcalinidad y dureza.

5. OBTENCIÓN DE RESULTADOS

5.1. Realización de prueba de jarras con sulfato de aluminio en comparación con policloruro de aluminio.

En la realización de las pruebas de jarras y en la operación de la planta El Cambray, se utilizó el sulfato de aluminio, químico empleado en la producción diaria de la planta de origen jamaicano y el policloruro de aluminio utilizado fue de origen europeo denominado por la empresa que lo proporciona como PAX-WD.

Análisis comparativo sulfato de aluminio vrs. PAX-WD

Tabla II. Análisis comparativo sulfato de aluminio vrs. PAX-WD con 35 UTN

Prueba 1 con sulfato de aluminio

Prueba 2 con PAX-WD

Prueba	Fecha	Turbiedad UTN	Color	pH	Fe	Mn	Conc. Solución
1 y 2	8 de Septiembre de 2008	35	350	7.68	0.61	0.087	1%

Velocidad 1: 100 rpm
Velocidad 2: 40 rpm

Jarra	mg/L Al	mg/L PAX-WD	Turbiedad Sulfato	pH Sulfato	Color Sulfato	Turbiedad PAX-WD	pH PAX-WD	Color PAX-WD
1	25	5	12.10	7.08	62	14.00	7.71	127
2	30	8	5.87	7.06	22	6.77	7.69	34
3	35	11	3.76	7.05	0	4.08	7.68	60
4	40	14	3.15	7.00	0	1.95	7.62	70
5	45	17	2.28	6.95	0	2.18	7.59	6
6	50	20	1.75	6.92	0	1.81	7.58	0

Tiempo 1: 1 min.
Tiempo 2: 15 min.
Sedimentación: 15 min.

Como se observa en la tabla I la dosis óptima de sulfato de aluminio es la jarra No. 6 con 50 mg/L, en la cual se obtuvieron los siguientes resultados:

Turbiedad 1.75 UTN
 pH 6.92
 Color 0 Pt-Co

La dosis óptima de PAX-WD es la jarra No. 6 con 20 mg/L, obteniendo los siguientes resultados:

Turbiedad 1.81 UTN
 pH 7.58
 Color 0 Pt-Co

Tabla III. Análisis comparativo sulfato de aluminio vrs. PAX-WD con 24.7 UTN

Prueba 3 con sulfato de aluminio

Prueba 4 con PAX-WD

Prueba	Fecha	Turbiedad	Color	pH	Fe	Mn	Conc Solución	
3 y 4	8 de Septiembre de 2008	24.7	181	7.86	0.55	0.087	1%	Velocidad 1: 100 rpm Velocidad 2: 40 rpm

Jarra	mg/L Al	mg/L PAX-WD	Turbiedad Sulfato	pH Sulfato	Color Sulfato	Turbiedad PAX-WD	pH PAX-WD	Color PAX-WD	
1	35	11	3.75	7.07	8	5.04	7.74	41	Tiempo 1: 1 min. Tiempo 2: 15 min.
2	40	13	3.35	7.04	0	4.22	7.72	30	
3	45	15	2.96	6.97	7	2.98	7.70	25	Sedimentación: 15 min.
4	50	17	2.16	6.92	13	2.92	7.07	5	
5	55	19	1.78	6.87	11	1.96	7.60	0	
6	60	21	1.95	6.82	0	1.75	7.58	0	

Como se observa en la tabla II la dosis óptima de sulfato de aluminio es la jarra No. 5 con 55 mg/L, en la cual se obtuvieron los siguientes resultados:

Turbiedad 1.78 UTN
 pH 6.87
 Color 11 Pt-Co

La dosis óptima de PAX-WD es la jarra No. 6 con 21 mg/L, obteniendo los siguientes resultados:

Turbiedad 1.75 UTN
 pH 7.58
 Color 0 Pt-Co

Tabla IV. Análisis comparativo sulfato de aluminio vrs. PAX-WD con 2300 UTN

Prueba 5 con sulfato de aluminio

Prueba 6 con PAX-WD

Prueba	Fecha	Turbiedad	Color	pH	Fe	Mn	Conc Solución	
5 y 6	8 de Septiembre de 2008	2,300	2,500	7.25			1%	Velocidad 1: 100 rpm Velocidad 2: 40 rpm

Jarra	mg/L Al	mg/L PAX-WD	Turbiedad Sulfato	pH Sulfato	Color Sulfato	Turbiedad PAX-WD	pH PAX-WD	Color PAX-WD	
1	170	45	3.40	6.31	4	5.19	7.74	5	Tiempo 1: 1 min. Tiempo 2: 15 min.
2	180	50	2.70	6.16	3	2.26	7.64	4	
3	190	55	4.06	5.71	4	1.72	7.52	2	Sedimentación: 15 min.
4	200	60	2.02	5.68	3	2.40	7.53	2	
5	210	65	5.33	5.45	6	2.30	7.48	2	
6	220	70	5.93	5.33	6	1.80	7.47	2	

Como se observa en la tabla III la dosis óptima de sulfato de aluminio es la jarra No. 4 con 200 mg/L, en la cual se obtuvieron los siguientes resultados:

Turbiedad 2.02 UTN
 pH 5.68
 Color 3 Pt-Co

La dosis óptima de PAX-WD es la jarra No. 3 con 55 mg/L, obteniendo los siguientes resultados:

Turbiedad 1.52 UTN
 pH 7.52
 Color 2 Pt-Co

Tabla V. Análisis comparativo sulfato de aluminio vrs. PAX-WD con 133 UTN

Prueba 7 con sulfato de aluminio

Prueba 8 con PAX-WD

Prueba	Fecha	Turbiedad	Color	pH	Fe	Mn	Conc Solución	
7 y 8	9 de Septiembre de 2008	133	1,075	7.57	1.41	0.282	1%	Velocidad 1: 100 rpm Velocidad 2: 40 rpm

Jarra	mg/L Al	mg/L PAX-WD	Turbiedad Sulfato	pH Sulfato	Color Sulfato	Turbiedad PAX-WD	pH PAX-WD	Color PAX-WD	
1	40	15	8.39	6.78	57	5.57	7.32	56	Tiempo 1: 1 min. Tiempo 2: 15 min.
2	45	17	6.29	6.70	45	3.94	7.23	51	
3	50	19	4.97	6.68	37	3.82	7.33	42	Sedimentación: 15 min.
4	55	21	4.43	6.65	42	3.26	7.35	23	
5	60	23	3.88	6.65	29	2.81	7.35	38	
6	65	25	5.08	6.68	19	2.58	7.33	19	

Como se observa en la tabla IV la dosis óptima de sulfato de aluminio es la jarra No. 5 con 60 mg/L, en la cual se obtuvieron los siguientes resultados:

Turbiedad 3.88 UTN
 pH 6.65
 Color 29 Pt-Co

La dosis óptima de PAX-WD es la jarra No. 6 con 25 mg/L obteniendo los siguientes resultados:

Turbiedad 2.58 UTN
 pH 7.33
 Color 19 Pt-Co

Tabla VI. Análisis comparativo sulfato de aluminio vrs. PAX-WD con 23.8 UTN

Prueba 9 con sulfato de aluminio

Prueba 10 con PAX-WD

Prueba	Fecha	Turbiedad	Color	pH	Fe	Mn	Conc Solución
9 y 10	9 de Septiembre de 2008	23.8	41	7.88			1%

Velocidad 1: 100 rpm
 Velocidad 2: 40 rpm

Jarra	mg/L Al	mg/L PAX-WD	Turbiedad Sulfato	pH Sulfato	Color Sulfato	Turbiedad PAX-WD	pH PAX-WD	Color PAX-WD
1	30	11	6.08	7.28	13	3.27	7.81	19
2	35	13	3.52	7.25	8	2.96	7.79	14
3	40	15	2.73	7.23	7	2.69	7.76	10
4	45	17	2.35	7.20	7	1.82	7.74	9
5	50	19	2.23	7.16	5	1.63	7.73	6
6	55	21	2.72	7.08	8	1.32	7.71	8

Tiempo 1: 1 min.
 Tiempo 2: 15 min.
 Sedimentación: 15 min.

Como se observa en la tabla V la dosis óptima de sulfato de aluminio es la jarra No. 5 con 50 mg/L, en la cual se obtuvieron los siguientes resultados:

Turbiedad 2.23 UTN
 pH 7.16
 Color 5 Pt-Co

La dosis óptima de PAX-WD es la jarra No. 6 con 21 mg/L obteniendo los siguientes resultados:

Turbiedad 1.32 UTN
 pH 7.71
 Color 8 Pt-Co

Tabla VII. Análisis comparativo sulfato de aluminio vrs. PAX-WD con 40.1 UTN

Prueba 11 con sulfato de aluminio

Prueba 12 con PAX-WD

Prueba	Fecha	Turbiedad	Color	pH	Fe	Mn	Conc Solución
11 y 12	10 de Septiembre de 2008	40.1	283	7.86	0.74	0.112	1%

Velocidad 1: 100 rpm
 Velocidad 2: 40 rpm

Jarra	mg/L Al	mg/L PAX-WD	Turbiedad Sulfato	pH Sulfato	Color Sulfato	Turbiedad PAX-WD	pH PAX-WD	Color PAX-WD
1	30	12	7.98	7.10	16	4.14	7.56	11
2	35	14	5.12	7.06	11	3.59	7.55	10
3	40	16	4.03	7.05	10	2.69	7.53	8
4	45	18	3.36	7.04	8	2.31	7.51	7
5	50	20	3.27	7.01	7	2.08	7.50	7
6	55	22	2.82	6.96	0	1.90	7.48	6

Tiempo 1: 1 min.
 Tiempo 2: 15 min.
 Sedimentación: 15 min.

Como se observa en la tabla VI la dosis óptima de sulfato de aluminio es la jarra No. 6 con 55 mg/L, en la cual se obtuvieron los siguientes resultados:

Turbiedad 2.82 UTN
 pH 6.96
 Color 0 Pt-Co

La dosis óptima de PAX-WD es la jarra No. 6 con 22 mg/L obteniendo los siguientes resultados:

Turbiedad 1.90 UTN
 pH 7.48
 Color 6 Pt-Co

Tabla VIII. Análisis comparativo sulfato de aluminio vrs. PAX-WD con 30 UTN

Prueba 13 con sulfato de aluminio

Prueba 14 con PAX-WD

Prueba	Fecha	Turbiedad	Color	pH	Fe	Mn	Conc Solución
13 y 14	10 de Septiembre de 2008	30	50	7.7			1%

Velocidad 1: 100 rpm
 Velocidad 2: 40 rpm

Jarra	mg/L Al	mg/L PAX-WD	Turbiedad Sulfato	pH Sulfato	Color Sulfato	Turbiedad PAX-WD	pH PAX-WD	Color PAX-WD
1	40	12	3.03	7.02	7	2.98	7.57	9
2	45	14	2.73	7.00	6	2.42	7.54	8
3	50	16	2.35	6.98	6	2.11	7.50	7
4	55	18	1.92	6.96	5	1.85	7.47	7
5	60	20	1.85	6.93	5	1.77	7.44	6
6	65	22	1.73	6.85	4	1.60	7.43	5

Tiempo 1: 1 min.
 Tiempo 2: 15 min.
 Sedimentación: 15 min.

Como se observa en la tabla VII la dosis óptima de sulfato de aluminio es la jarra No. 6 con 65 mg/L, en la cual se obtuvieron los siguientes resultados:

Turbiedad 1.73 UTN
 pH 6.85
 Color 4 Pt-Co

La dosis óptima de PAX-WD es la jarra No. 6 con 22 mg/L obteniendo los siguientes resultados:

Turbiedad 1.60 UTN
 pH 7.43
 Color 5 Pt-Co

Tabla IX. Análisis comparativo sulfato de aluminio vrs. PAX-WD con 19 UTN

Prueba 15 con sulfato de aluminio

Prueba 16 con PAX-WD

Prueba	Fecha	Turbiedad	Color	pH	Fe	Mn	Conc Solución
15 y 16	11 de Septiembre de 2008	19	35	7.83	0.39	0.077	1%

Velocidad 1: 100 rpm
 Velocidad 2: 40 rpm

Jarra	mg/L Al	mg/L PAX-WD	Turbiedad Sulfato	pH Sulfato	Color Sulfato	Turbiedad PAX-WD	pH PAX-WD	Color PAX-WD
1	25	14	7.47	7.38	15	1.93	7.51	6
2	30	16	4.30	7.27	10	2.16	7.57	6
3	35	18	3.19	7.09	7	1.64	7.60	5
4	40	20	2.36	7.07	7	1.30	7.58	5
5	45	22	1.76	6.96	5	1.27	7.58	5
6	50	24	1.93	6.82	5	1.15	7.55	4

Tiempo 1: 1 min.
 Tiempo 2: 15 min.
 Sedimentación: 15 min.

Como se observa en la tabla VIII la dosis óptima de sulfato de aluminio es la jarra No. 5 con 45 mg/L, en la cual se obtuvieron los siguientes resultados:

Turbiedad 1.76 UTN
 pH 6.96
 Color 5 Pt-Co

La dosis óptima de PAX-WD es la jarra No. 6 con 24 mg/L, obteniendo los siguientes resultados:

Turbiedad 1.15 UTN
 pH 7.55
 Color 4 Pt-Co

Tabla X. Análisis comparativo sulfato de aluminio vrs. PAX-WD con 19.1 UTN

Prueba 17 con sulfato de aluminio

Prueba 18 con PAX-WD

Prueba	Fecha	Turbiedad	Color	pH	Fe	Mn	Conc Solución
17 y 18	11 de Septiembre de 2008	19.1	36	7.87			1%

Velocidad 1: 100 rpm
 Velocidad 2: 40 rpm

Jarra	mg/L Al	mg/L PAX-WD	Turbiedad Sulfato	pH Sulfato	Color Sulfato	Turbiedad PAX-WD	pH PAX-WD	Color PAX-WD
1	35	16	2.84	7.43	7	2.12	7.57	6
2	40	18	1.97	7.23	6	1.76	7.55	6
3	45	20	1.80	7.12	6	1.50	7.51	5
4	50	22	1.74	7.00	5	1.22	7.50	5
5	55	24	1.44	6.92	5	1.19	7.48	5
6	60	26	1.14	6.84	4	0.97	7.48	4

Tiempo 1: 1 min.
 Tiempo 2: 15 min.
 Sedimentación: 15 min.

Como se observa en la tabla IX la dosis óptima de sulfato de aluminio es la jarra No. 6 con 60 mg/L, en la cual se obtuvieron los siguientes resultados:

Turbiedad 1.14 UTN
 pH 6.84
 Color 4 Pt-Co

La dosis óptima de PAX-WD es la jarra No. 6 con 26 mg/L, obteniendo los siguientes resultados:

Turbiedad 0.97 UTN
 pH 7.48
 Color 4 Pt-Co

Tabla XI. Análisis comparativo sulfato de aluminio vrs. PAX-WD con 14.6 UTN

Prueba 19 con sulfato de aluminio

Prueba 20 con PAX-WD

Prueba	Fecha	Turbiedad	Color	pH	Fe	Mn	Conc Solución	
19 y 20	12 de Septiembre de 2008	14.6	28	7.7			1%	Velocidad 1: 100 rpm Velocidad 2: 40 rpm

Jarra	mg/L Al	mg/L PAX-WD	Turbiedad Sulfato	pH Sulfato	Color Sulfato	Turbiedad PAX-WD	pH PAX-WD	Color PAX-WD	
1	35	15	3.08	7.30	6	1.81	7.66	5	Tiempo 1: 1 min. Tiempo 2: 15 min.
2	40	17	2.03	7.27	5	1.54	7.63	5	
3	45	19	1.88	7.04	5	1.13	7.61	5	Sedimentación: 15 min.
4	50	21	1.84	6.80	5	0.98	7.60	4	
5	55	23	1.80	6.70	4	0.91	7.58	4	
6	60	25	1.52	6.60	3	1.06	7.55	4	

Como se observa en la tabla X la dosis óptima de sulfato de aluminio es la jarra No. 6 con 60 mg/L, en la cual se obtuvieron los siguientes resultados:

Turbiedad 1.52 UTN
 pH 6.60
 Color 3 Pt-Co

La dosis óptima de PAX-WD es la jarra No. 5 con 23 mg/L, obteniendo los siguientes resultados:

Turbiedad 0.91 UTN
 pH 7.58
 Color 4 Pt-Co

Tabla XII. Análisis comparativo sulfato de aluminio vrs. PAX-WD con 14.2 UTN

Prueba 21 con sulfato de aluminio

Prueba 22 con PAX-WD

Prueba	Fecha	Turbiedad	Color	pH	Fe	Mn	Conc Solución	
21 y 22	12 de Septiembre de 2008	14.2	27	7.88			1%	Velocidad 1: 100 rpm Velocidad 2: 40 rpm

Jarra	mg/L Al	mg/L PAX-WD	Turbiedad Sulfato	pH Sulfato	Color Sulfato	Turbiedad PAX-WD	pH PAX-WD	Color PAX-WD	
1	40	16	2.65	6.96	6	1.28	7.46	6	Tiempo 1: 1 min. Tiempo 2: 15 min.
2	45	18	2.19	6.93	5	1.08	7.42	5	
3	50	20	2.00	6.89	5	1.07	7.39	5	Sedimentación: 15 min.
4	55	22	1.31	6.79	4	1.05	7.36	5	
5	60	24	1.57	6.74	4	0.78	7.30	4	
6	65	26	1.79	6.71	4	1.17	7.28	8	

Como se observa en la tabla XI la dosis óptima de sulfato de aluminio es la jarra No. 4 con 55 mg/L, en la cual se obtuvieron los siguientes resultados:

Turbiedad 1.31 UTN
 pH 6.79
 Color 4 Pt-Co

La dosis óptima de PAX-WD es la jarra No. 5 con 24 mg/L, obteniendo los siguientes resultados:

Turbiedad 0.78 UTN
 pH 7.30
 Color 4 Pt-Co

Tabla XIII. Análisis comparativo sulfato de aluminio vrs. PAX-WD con 13.2 UTN

Prueba 23 con sulfato de aluminio

Prueba 24 con PAX-WD

Prueba	Fecha	Turbiedad	Color	pH	Fe	Mn	Conc Solución
23 y 24	13 de Septiembre de 2008	13.2	25	7.75			1%

Velocidad 2: 40 rpm

Jarra	mg/L Al	mg/L PAX-WD	Turbiedad Sulfato	pH Sulfato	Color Sulfato	Turbiedad PAX-WD	pH PAX-WD	Color PAX-WD
1	40	15	1.80	7.18	5	1.52	7.72	5
2	45	16	1.75	7.14	5	1.33	7.80	5
3	50	17	1.67	7.09	5	1.29	7.84	5
4	55	18	1.56	7.02	4	1.14	7.84	5
5	60	19	1.49	6.98	4	1.32	7.85	5
6	65	20	1.70	6.93	4	1.45	7.86	5

Tiempo 1: 1 min.
 Tiempo 2: 15 min.

Sedimentación: 15 min.

Como se observa en la tabla XII la dosis óptima de sulfato de aluminio es la jarra No. 5 con 60 mg/L, en la cual se obtuvieron los siguientes resultados:

Turbiedad 1.49 UTN
 pH 6.98
 Color 4 Pt-Co

La dosis óptima de PAX-WD es la jarra No. 5 con 19 mg/L, obteniendo los siguientes resultados:

Turbiedad 1.32 UTN
 pH 7.85
 Color 5 Pt-Co

Tabla XIV. Análisis comparativo sulfato de aluminio vrs. PAX-WD con 1300 UTN

Prueba 25 con sulfato de aluminio

Prueba 26 con PAX-WD

Prueba	Fecha	Turbiedad	Color	pH	Fe	Mn	Conc Solución	
25 y 26	13 de Septiembre de 2008	1,300	1,800	7.88			1%	Velocidad 1: 100 rpm Velocidad 2: 40 rpm

Jarra	mg/L Al	mg/L PAX-WD	Turbiedad Sulfato	pH Sulfato	Color Sulfato	Turbiedad PAX-WD	pH PAX-WD	Color PAX-WD	
1	130	30	3.97	6.56	8	2.16	7.86	12	Tiempo 1: 1 min. Tiempo 2: 15 min.
2	140	35	4.52	6.47	8	1.98	7.76	11	
3	150	40	5.18	6.38	9	1.85	7.73	10	Sedimentación: 15 min.
4	160	45	5.64	6.24	10	1.52	7.67	9	
5	170	50	5.69	6.13	12	1.63	7.60	6	
6	180	55	5.74	6.04	14	1.75	7.55	5	

Como se observa en la tabla XIII la prueba realizada con el sulfato de aluminio no es representativa debido a que los datos no manifiestan un comportamiento adecuado.

La dosis óptima de PAX-WD es la jarra No. 4 con 45 mg/L, obteniendo los siguientes resultados:

Turbiedad 1.52 UTN
 pH 7.67
 Color 9 Pt-Co

Tabla XV. Comparación de las características obtenidas utilizando los coagulantes

Características iniciales				Características finales utilizando sulfato de aluminio				Características finales utilizando policloruro de aluminio		
Turbiedad	Color	pH	Dosificación mg/L	Turbiedad	Color	pH	Dosificación mg/L	Turbiedad	Color	pH
35 UTN	350	7.68	50 mg/L	1.75 UTN	0 Pt-Co	6.92	20 mg/L	1.81 UTN	0 Pt-Co	7.58
24.7 UTN	181	7.86	55 mg/L	1.78 UTN	11 Pt-Co	6.87	21 mg/L	1.75 UTN	2 Pt-Co	7.58
2,300 UTN	2,500	7.25	200 mg/L	2.02 UTN	3 Pt-Co	5.68	55 mg/L	1.52 UTN	8 Pt-Co	7.52
133 UTN	1,075	7.57	60 mg/L	3.88 UTN	29 Pt-Co	6.65	25 mg/L	2.58 UTN	19 Pt-Co	7.33
23.8 UTN	41	7.88	50 mg/L	2.23 UTN	5 Pt-Co	7.16	21 mg/L	1.32 UTN	0 Pt-Co	7.71
40.1 UTN	283	7.86	55 mg/L	2.82 UTN	0 Pt-Co	6.96	22 mg/L	1.90 UTN	9 Pt-Co	7.48
30 UTN	50	7.7	65 mg/L	1.73 UTN	4 Pt-Co	6.85	22 mg/L	1.60 UTN	5 Pt-Co	7.43
19 UTN	35	7.83	45 mg/L	1.76 UTN	5 Pt-Co	6.96	24 mg/L	1.15 UTN	4 Pt-Co	7.55

19.1 UTN	36	7.87	60 mg/L	1.14 UTN	4 Pt-Co	6.84	26 mg/L	0.97 UTN	4 Pt-Co	7.48
14.6 UTN	28	7.7	60 mg/L	1.52 UTN	3 Pt-Co	6.60	23 mg/L	0.91 UTN	4 Pt-Co	7.58
14.2 UTN	27	7.88	55 mg/L	1.31 UTN	4 Pt-Co	6.79	24 mg/L	0.78 UTN	4 Pt-Co	7.30
13.2 UTN	25	7.88	60 mg/L	1.49 UTN	4 Pt-Co	6.98	19 mg/L	1.32 UTN	5 Pt-Co	7.67
1,300 UTN	1,800	7.75		-----	-----	-----	45 mg/L	1.52 UTN	6 Pt-Co	7.85

5.2. Monitoreo de planta El Cambray durante la realización de la prueba de policloruro de aluminio.

Después de realizar cada prueba de jarras con sulfato de aluminio para obtener la dosis óptima, se llevaba a cabo una prueba de jarras con policloruro de aluminio tomando como referencia la tercera parte de la dosis óptima de sulfato de aluminio, con la cual se obtenía la dosis óptima de policloruro de aluminio, la cual era la aplicada en la planta.

Se llevó a cabo un monitoreo de 24 horas realizando pruebas de jarras, así como también tomando muestras periódicas de diferentes puntos de los procesos unitarios de la planta, para conocer el comportamiento de la planta con la aplicación del policloruro de aluminio, para tener al final del proceso un control de calidad que cumpla con la norma COGUANOR NGO 29001.

Los puntos de control analizados durante la prueba fueron: el vertedero de entrada hacia la planta, la unión de la salida de los sedimentadores y la unión de la salida de los filtros, tomando como parámetros de control la turbiedad en unidades UTN (unidades de turbiedad nefelométricas), el color en unidades Pt-Co (platino-cobalto) y

el pH (potencial de hidrogeno). La tabla 5.1 describe la hora de toma de muestra, el caudal y la dosis aplicada.

Al comienzo de la prueba se aplicó sulfato de aluminio y se determinó un tiempo prudencial de una hora para emplear el policloruro de aluminio, tiempo durante el cual si no se mostraban resultados satisfactorios; se regresaba al proceso normal de la planta, aplicando el sulfato de aluminio.

Tabla XVI. Comportamiento de planta El Cambray durante la aplicación de policloruro de aluminio

FECHA	HORA	Dosis mg/l	CAUDAL L/s.	ENTRADA (agua cruda)			Salida Sedimentadores			Salida Filtros			OBSERVACIONES	
				UTN	Color	Ph	UTN	Color	pH	UTN	Color	pH		
08/09/2008	12:00	47.00	175	23.00	187	7.45	2.00	60	6.92	0.00	9	7.52	Se inicia aplicando Sulfato de Aluminio	
	14:30	47.00	175	36.00	297	7.61	4.00	36	7.03	0.00	7	6.92		
	16:00	47.00	175	32.00	243	7.65	3.02	31	6.84	0.00	2	6.84		
	20:30	57.00	175	194.00	200	7.54	6.74	12	6.89	0.41	1	6.46		
	22:00	57.00	175	101.00	118	7.41	5.22	12	6.46	0.83	4	6.56		
09/09/2008	00:00	57.00	175	66.50	95	7.67	3.48	8	6.38	0.38	1	6.37	Inicia PAX-WD a las 00:30	
	02:00	16.60	175	39.00	60	7.16	6.40	13	6.80	0.50	4	6.78		
	04:00	16.60	175	25.00	45	7.20	4.66	13	7.09	1.12	2	7.12		
	06:00	16.60	175	21.00	41	7.50	4.00	9	7.30	0.09	2	7.45		
	08:00	16.80	175	20.10	40	7.65	2.80	7	7.35	0.74	4	7.66		
	10:00	16.80	175	20.20	36	7.55	2.45	9	7.04	2.57	4	6.83		
	15:00	13.00	175	21.00	37	7.86	1.37	4	7.71	0.87	3	7.50		Cambio de dosificación a 13.9 mg/L se aprecia floc ligero
	17:00	15.50	175	23.70	38	8.32	1.13	5	7.53	0.21	3	7.57		Cambio de dosificación de 17.10 a 16.5 mg/L
	19:00	16.50	175	21.00	35	8.20	0.97	4	7.60	0.45	3	7.53		
	21:00	35.00	140	820.00	589	8.10	3.18	9	7.69	0.85	2	7.50		
23:00	35.00	175	418.00	600	7.10	5.00	7	7.14	0.99	3	7.20			
10/09/2008	01:00	22.00	175	226.00	330	7.68	2.85	7	7.55	0.58	4	7.47		

	03:00	22.00	175	149.00	190	7.30	2.72	7	7.30	0.35	4	7.37		
	05:00	20.00	175	63.00	120	8.05	2.67	7	7.76	0.38	4	7.74		
	07:00	18.00	175	57.00	90	7.87	2.56	6	7.66	0.45	5	7.62		
	08:00	14.70	175	40.00	70	7.71	2.08	5	7.49	0.72	4	7.48		
	09:00	14.70	175	42.00	66	7.70	1.38	5	7.47	0.18	4	8.04		
	10:00	12.90	175	38.00	64	7.68	1.93	5	7.45	0.82	4	7.49		Cambio de dosificación a 12.9 mg/L
	12:00	16.20	175	41.00	74	7.93	3.51	8	7.64	0.54	4	7.60		
	14:00	14.80	175	30.00	52	7.49	2.31	7	7.43	0.88	3	7.41		
	16:30	16.30	175	27.10	48	7.46	1.90	5	7.38	0.71	4	7.40		
	18:00	16.30	175	25.50	47	7.60	1.92	5	7.49	0.67	3	7.51		
	20:00	17.00	175	26.00	41	7.75	1.78	5	7.45	0.59	3	7.63		
22:00	17.00	175	20.00	38	7.65	1.53	5	7.50	0.38	3	7.42			
11/09/2008	00:00	16.00	175	18.50	38	7.93	1.50	5	7.73	0.46	4	7.78		
	02:00	16.00	175	18.50	38	7.76	1.54	6	7.46	0.39	4	7.71		Cambio de dosificación a 15 mg/L
	04:00	15.00	175	18.50	36	7.84	0.99	6	7.67	0.23	4	7.67		
	06:00	15.00	175	18.20	36	7.92	0.97	5	7.87	0.35	3	7.74		
	08:00	16.15	175	19.60	34	7.74	1.92	4	7.59	1.49	3	7.55		
	10:00	16.15	175	18.00	34	7.82	1.91	4	7.56	1.05	2	7.58		
	11:00	16.15	175	32.00	58	7.57	1.06	4	7.61	0.58	2	7.56		
	12:00	16.15	175	19.00	37	7.92	1.35	4	7.61	0.58	2	7.56		
	14:00	18.40	175	18.00	33	7.92	2.82	6	7.51	0.68	2	7.71		
	15:00	16.50	175	19.10	36	7.87	2.33	6	7.57	1.61	4	7.63		
	16:00	16.50	175	18.60	34	7.83	2.31	5	7.76	1.62	4	7.71		
17:00	16.50	175	18.10	32	7.87	1.58	5	7.81	1.04	3	7.77			
18:00	16.50	175	19.10	30	7.72	1.19	5	7.52	0.51	3	7.51			
20:00	18.17	175	19.20	29	7.74	0.97	4	7.61	0.49	3	7.56	Cambio de dosificación a 17 mg/L a las 21:00		
23:00	17.00	175	13.00	28	7.50	1.07	4	7.23	0.31	3	7.30	Cambio de dosificación a 16.3 mg/L a las 22:30		
12/09/2008	01:00	16.22	175	13.50	28	7.63	1.14	4	7.60	0.35	2	7.54		
	03:00	16.22	175	13.00	27	7.82	1.04	3	7.80	0.32	1	7.70		
	05:00	16.00	175	12.40	27	7.81	0.97	2	7.55	0.24	2	7.56		
	07:00	14.95	175	12.40	29	8.06	1.07	4	7.93	0.41	3	7.88		
	09:30	14.95	175	14.00	28	7.80	1.64	3	7.61	0.62	2	7.44		
	11:00	14.95	175	15.00	27	7.70	1.20	3	7.62	1.12	2	7.53		
	12:00	16.77	163	15.50	28	7.73	1.05	3	7.70	0.56	1	7.60		
	13:00	16.77	163	15.70	29	7.80	2.08	3	7.72	1.95	2	7.71		
	17:00	16.77	163	14.30	33	7.85	0.80	4	7.66	0.40	3	7.40		Cambió de dosificación a 16.8 mg/L.
	18:00	16.77	163	13.50	28	7.83	1.09	3	7.70	0.50	2	7.60		
	19:00	16.77	163	14.20	27	7.88	0.85	4	7.70	0.57	3	7.58		
21:00	16.77	175	13.00	45	7.80	1.32	5	7.82	0.78	4	7.75			
23:00	16.77	175	14.00	36	7.78	1.53	5	7.69	0.72	4	7.75			
13/09/2008	01:00	16.77	163	15.00	42	7.72	1.37	4	7.52	0.81	3	7.72		
	03:00	16.77	163	14.00	51	7.66	1.12	4	7.43	0.67	3	7.34		
	05:00	16.77	163	14.00	47	7.60	1.09	3	7.35	0.51	2	7.22		
	07:00	16.77	163	12.00	32	7.55	1.10	2	7.30	0.58	1	7.13		

	08:00	16.77	175	12.00	25	7.75	0.96	4	7.62	0.47	2	7.68	
	13:30	16.77	175	12.50	24	7.96	1.16	3	7.56	0.54	1	7.48	Termina la aplicación de PAX-WD a las 13:30.

Luego del monitoreo de la planta el Cambray aplicando policloruro de aluminio se puede observar que uno de los parámetros más notorios es que con la aplicación del PAX-WD se logra mantener un pH más estable, que con el sulfato de aluminio, ya que éste deja valores por debajo de 7 lo cual implica hacer uso de hidróxido de calcio (cal hidratada), para estabilizar el agua.

La cantidad de remoción de turbiedad y color son muy parecidas aplicando policloruro de aluminio, que utilizando sulfato de aluminio, pero una de las diferencias utilizando policloruro de aluminio es que además de aplicar menor dosificación, el polímero puede trabajar en rangos más altos de pH, valores incluso por arriba de 10, algo que no se puede lograr con el sulfato de aluminio y además de eso el policloruro de aluminio forma flóculos más grandes y estables, de mejor tamaño y forma lo que significa una mejor sedimentación y una carrera más larga en cada lavado de filtros.

5.3. Gráficas del comportamiento de la planta El Cambray durante la aplicación del policloruro de aluminio.

Las siguientes gráficas describen el comportamiento del uso de policloruro de aluminio, durante la prueba realizada en la planta de tratamiento de agua potable El Cambray, durante 24 horas del 08/09/08 al 13/09/08.

(Datos obtenidos de la tabla 5.1).

Figura 11. Turbiedad en planta El Cambray

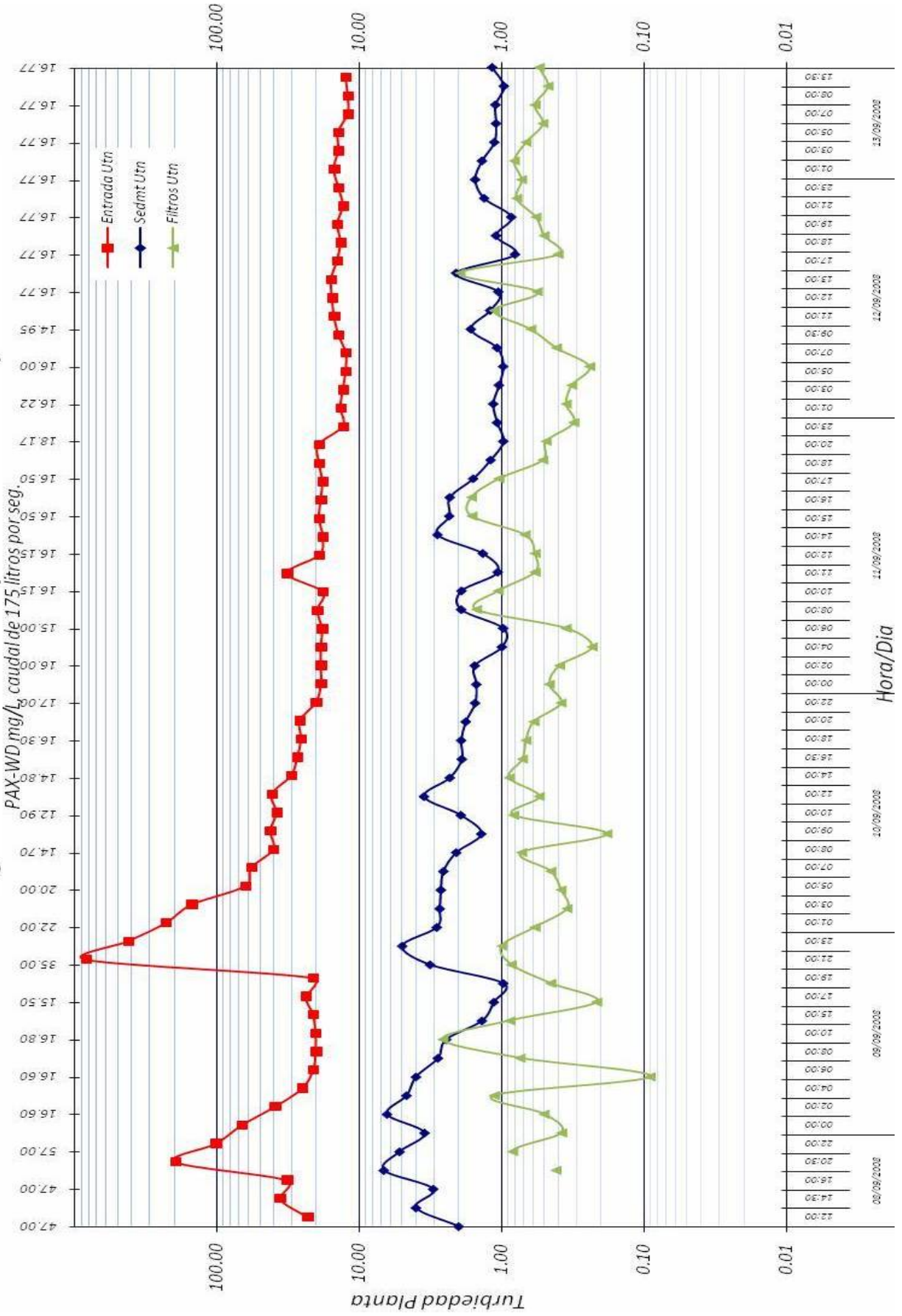


Figura 12. Color en planta El Cambray

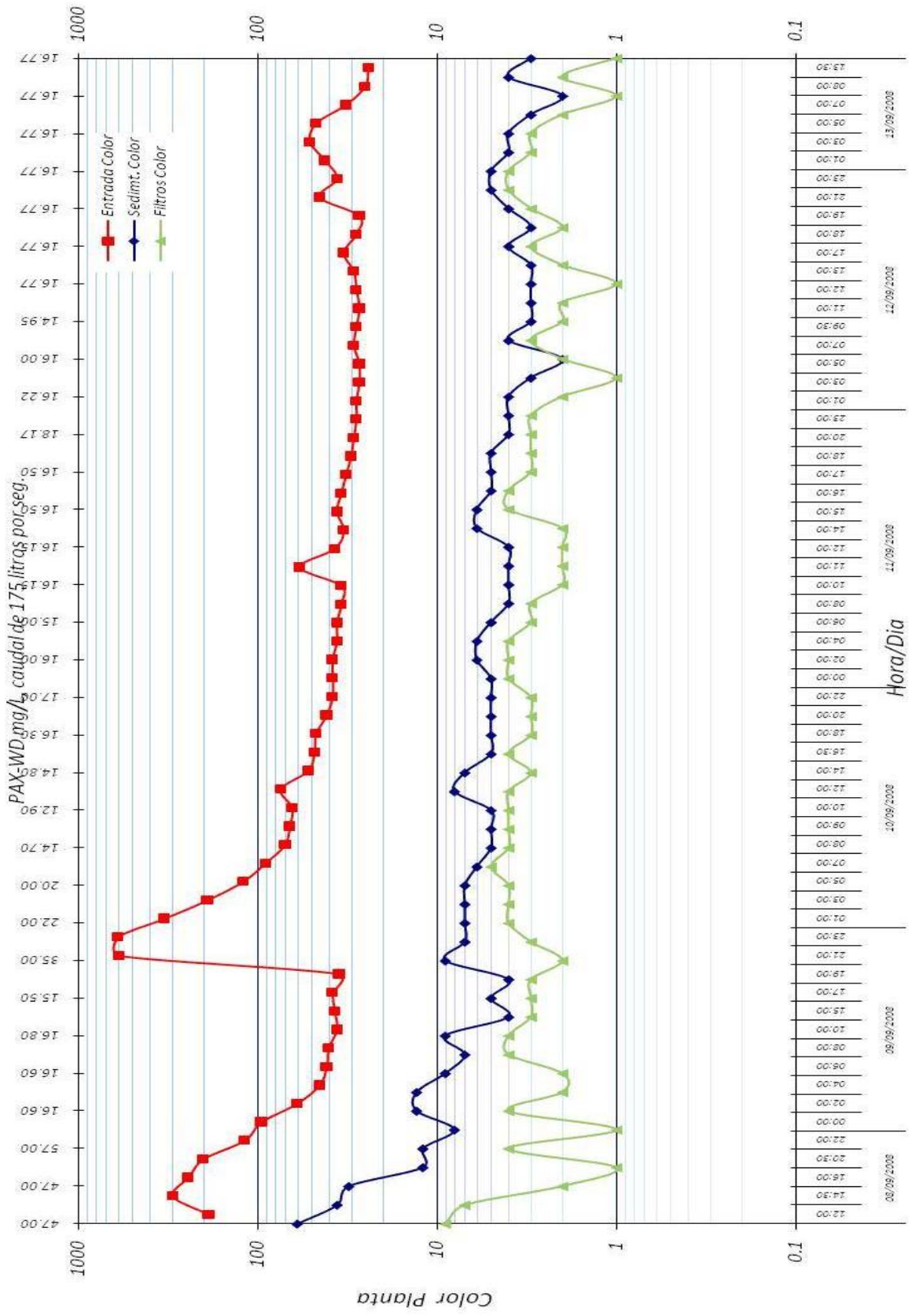
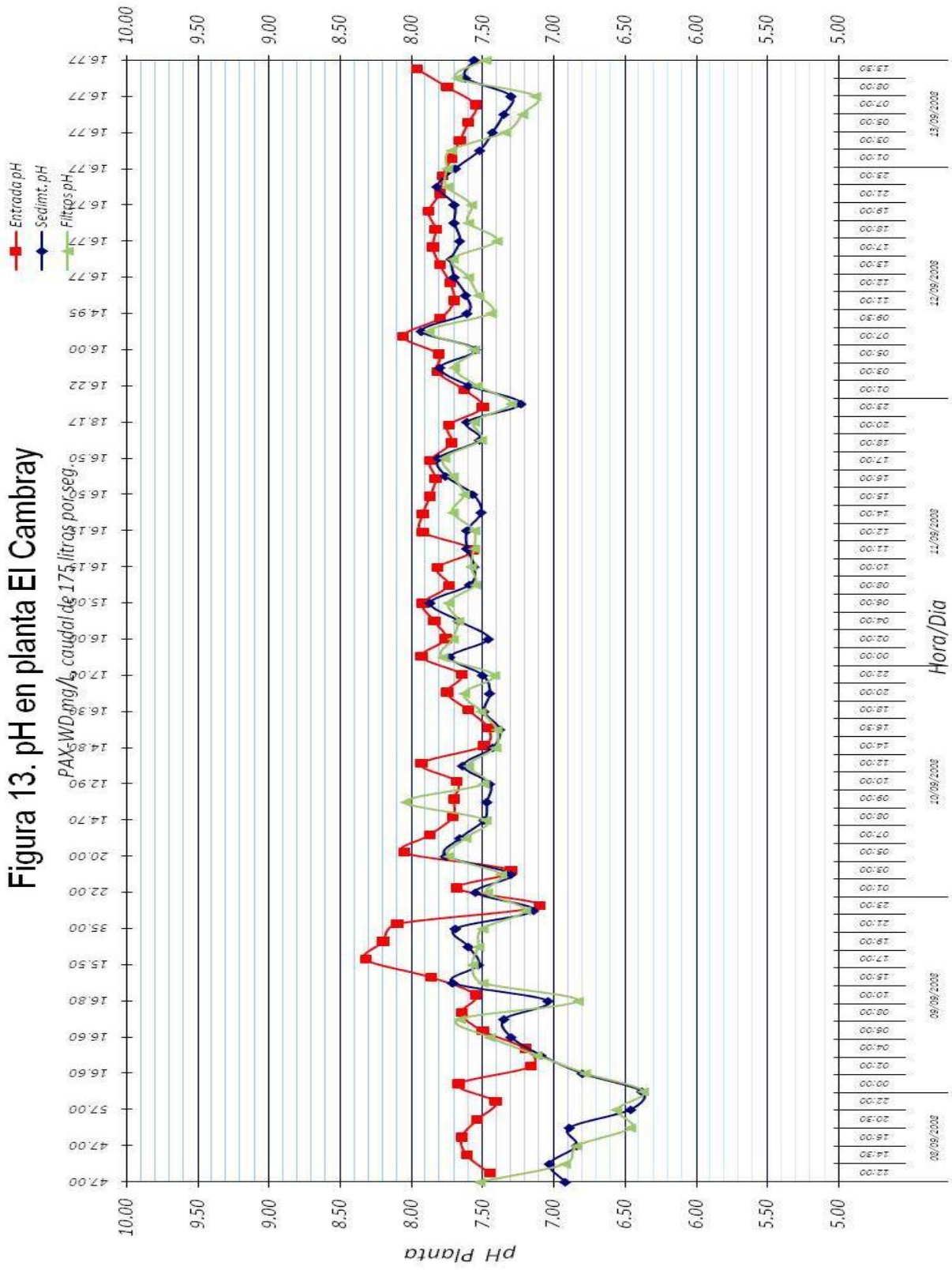


Figura 13. pH en planta El Cambray



La remoción tanto de turbiedad (en promedio 0.65 UTN) como de color (en promedio 3 unidades Pt-Co) se encuentra dentro de los límites máximos aceptables establecidos en la norma COGUANOR NGO 29001.

Manteniendo un potencial de hidrógeno muy estable (en promedio 7.46), lo cual no implica la aplicación de un estabilizador como el hidróxido de calcio, siendo esto una característica importante del policloruro de aluminio haciendo más favorable su aplicación.

5.4. Análisis costo-beneficio

A continuación se presentan los resultados obtenidos al realizar el análisis económico de los costos del agua tratada, tomando como base las dosificaciones de los diferentes químicos:

Tabla XVII. Dosificaciones óptimas de prueba de jarras

Sulfato de aluminio (dosificación)	Policloruro de aluminio (dosificación)	Relación de dosificación en función del sulfato de aluminio
50 mg/L	20 mg/L	0.4
55 mg/L	21 mg/L	0.4
200 mg/L	55 mg/L	0.3
60 mg/L	25 mg/L	0.4
50 mg/L	21 mg/L	0.4
55 mg/L	22 mg/L	0.4
65 mg/L	22 mg/L	0.3

45 mg/L	24 mg/L	0.5
60 mg/L	26 mg/L	0.4
60 mg/L	23 mg/L	0.4
55 mg/L	24 mg/L	0.4
60 mg/L	19 mg/L	0.3
-----	45 mg/L	-----
Relación promedio		0.4

Tabla XVIII. Dosificaciones para cálculos de consumos

	Dosificación promedio	Dosificación máxima	Dosificación mínima
Sulfato de aluminio	68	200	45
Policloruro de aluminio	27	55	19

Tomando en cuenta los caudales máximos y mínimos registrados en la planta y los datos de la **Tabla XVIII.**, se procederá a calcular el consumo anual que necesitaría la planta con cada uno de los coagulantes.

El máximo caudal registrado por ambos vertederos es de 210 L/s y el mínimo es de 75 L/s, teniendo una producción máxima diaria de 18,144 m³/día.

Si se toma en cuenta el caudal en litros por segundo, multiplicado por la dosificación en miligramos por litro, y este resultado así mismo se multiplica por las 24 horas del día y los 365 días del año, se obtiene el consumo promedio, máximo y mínimo, necesario para cada coagulante.

Tomando en cuenta hacer las correspondientes conversiones para obtener un resultado final en Kg/año.

Tabla XIX. Consumo anual utilizando el sulfato de aluminio

	Consumo anual promedio (Kg/año)	Consumo anual máximo (Kg/año)	Consumo anual mínimo (Kg/año)
Caudal máximo 210 L/s	450,334.08	1,324,512	29,8015.2
Caudal mínimo 75 L/s	160,833.6	473,040	106,434

Tabla XX. Consumo anual utilizando el policloruro de aluminio

	Consumo anual promedio (Kg/año)	Consumo anual máximo (Kg/año)	Consumo anual mínimo (Kg/año)
Caudal máximo 210 L/s	178,809.1	364,240.8	125,828.6
Caudal mínimo 75 L/s	63,860.4	130,086	44,938.8

Utilizando los valores de las tablas **Tabla XIX.**, y **Tabla XX.**, podrá determinarse el costo de los coagulantes por año en función de su valor.

El valor del saco de 25 Kg. de sulfato de aluminio se estima se encuentra en Q.78.13 y el de policloruro de aluminio en Q 101.35

Tabla XXI. Cantidades a utilizar de coagulantes en sacos de 25 kg.

Sulfato de aluminio

Cantidad promedio de sacos de 25 Kg	Cantidad máxima de sacos de 25 Kg	Cantidad mínima de sacos de 25 Kg
18,013.36	52,980.48	11,920.61
6,433.34	18,921.6	4,257.36

Policloruro de aluminio

Cantidad promedio de sacos de 25 Kg	Cantidad máxima de sacos de 25 Kg	Cantidad mínima de sacos de 25 Kg
7,152.36	14,569.63	5,033.15
2,554.42	5,203.44	1,797.6

Tabla XXII. Costo anual del sulfato de aluminio en sacos de 25 kg, en función del caudal máximo y mínimo

Caudal máximo	Cantidad promedio Sacos de 25 Kg	Cantidad máxima Sacos de 25 Kg	Cantidad mínima Sacos de 25 Kg
	18,013.36	52,980.48	11,920.61
Precio en Q	78.13	78.13	78.13
Costo en Q	1,407,383.8	4,139,364.9	931,357.3

Caudal Mínimo	Cantidad promedio Sacos de 25 Kg	Cantidad máxima Sacos de 25 Kg	Cantidad mínima Sacos de 25 Kg
	6,433.34	18,921.6	4,257.36
Precio en Q	78.13	78.13	78.13
Costo en Q	502,636.85	1,478.344.6	332,627.5

Tabla XXIII. Costo anual del policloruro de aluminio en sacos de 25 kg, en función del caudal máximo y mínimo

Caudal máximo	Cantidad promedio Sacos de 25 Kg	Cantidad máxima Sacos de 25 Kg	Cantidad mínima Sacos de 25 Kg
	7,152.36	14,569.63	5,033.15
Precio en Q	101.35	101.35	101.35
Costo en Q	724,891.7	1,476,632.0	510,109.8

Caudal Mínimo	Cantidad promedio Sacos de 25 Kg	Cantidad máxima Sacos de 25 Kg	Cantidad mínima Sacos de 25 Kg
	2,554.42	5,203.44	1,797.6
Precio en Q	101.35	101.35	101.35
Costo en Q	258,890.5	527,368.6	182,186.8

Tabla XXIV. Comparación de costos de coagulantes

Sulfato de aluminio	Costo promedio anual en Q	Costo máximo anual en Q	Costo mínimo anual en Q
Caudal máximo	1,407,383.8	4,139,364.9	931,357.3
Caudal mínimo	502,636.85	1,478.344.6	332,627.5

Policloruro de aluminio	Costo promedio anual en Q	Costo máximo anual en Q	Costo mínimo anual en Q
Caudal máximo	724,891.7	1,476,632.0	510,109.8
Caudal mínimo	258,890.5	527,368.6	182,186.8

CONCLUSIONES

1. De acuerdo a las características iniciales del agua cruda, se determinó que en función a las pruebas de comparación realizadas en el laboratorio, el coagulante que removía mayor cantidad de turbiedad y mantenía un potencial de hidrógeno más estable, según norma COGUANOR NGO 29001, era el policloruro de aluminio, no obstante la remoción de color en la mayoría de los casos era casi la misma.
2. La puesta en marcha del policloruro de aluminio en la planta, demostró al igual que las pruebas de laboratorio que existía una alta remoción de turbiedad, color y un potencial de hidrógeno estable, lo cual significa una mejor operación, menor acumulación de lodos y carreras de filtros más prolongadas.
3. Se determinó que la relación que existía entre las dosificaciones de los coagulantes era de 2/5, en función de la dosificación del sulfato de aluminio, lo cual implica menor cantidad de químico a emplear y también obteniendo mejores resultados de calidad.
4. El uso de policloruro de aluminio representa un gasto económico menor, que al usar el sulfato de aluminio, ya que anualmente el PAC representará un menor costo de operación.

RECOMENDACIONES

1. Para lograr los resultados adecuados en el laboratorio será necesario contar con equipo debidamente calibrado y deberá contarse con la supervisión de un profesional en la rama, para verificar que los resultados sean lo más exactos posible, ya que la mala operación del equipo podría dar resultados no satisfactorios.
2. Deberán realizarse trabajos de mantenimiento de la planta, para que la evacuación de los lodos sea lo más rápido posible y para que los filtros trabajen eficientemente.
3. La supervisión de la dosificación deberá hacerse de manera constante, realizando pruebas de jarras, para verificar que cumpla con la relación que existe entre los coagulantes.
4. Deberá contarse con un equipo de dosificación que se encuentre en buenas condiciones de operación, para no tener problemas de desperdicio de coagulante, ya que esto representaría un aumento en los gastos de operación.

BIBLIOGRAFÍA

1. Manuales del Centro de Estudios Panamericanos de Ingeniería Sanitaria -CEPIS-, Lima, Perú, Abril 1992.
2. Manual de Operación Planta El Cambray, 1998
3. Norma COGUANOR NGO 29001, Guatemala, Guatemala.
4. Calidad y tratamiento del agua - American Waterworks Association, New York, N.Y. U.S.A., 1969.
5. http://es.wikipedia.org/wiki/Sulfato_de_aluminio, diciembre 2008
6. http://es.wikipedia.org/wiki/Policloruro_de_aluminio, diciembre 2008