

ESTUDIO DE APLICABILIDAD E IMPLEMENTACIÓN DEL POLICLORURO
DE ALUMINIO COMO COAGULANTE PRIMARIO EN LA PLANTA LA FLORA
DEL AMB. S.A. E.S.P.

CHRISTIAN CAÑAS ROJAS

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERIA QUÍMICA
BUCARAMANGA
2005

ESTUDIO DE APLICABILIDAD E IMPLEMENTACIÓN DEL
POLICLORURO DE ALUMINIO COMO COAGULANTE PRIMARIO EN LA
PLANTA LA FLORA DEL AMB. S.A. E.S.P.

CHRISTIAN CAÑAS ROJAS

Trabajo de grado presentado como requisito parcial
Para optar al título de ingeniero químico

Director

LUZ YOLANDA VARGAS FIALLO
Químico. Msc

Codirectores

CARLOS FERNANDO GUERRA
Ingeniero químico

JAVIER QUIROGA
Ingeniero químico

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERIA QUÍMICA
BUCARAMANGA
2005

**Al señor Jesucristo, la razón
Y fuente de mi vida por su
Infinito amor hacia mí.
A el sea todo honor y gloria.**

**A mis padres por su increíble
Ejemplo de vida, por su esfuerzo
Y Por su amor.**

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa sus agradecimientos a:

El acueducto metropolitano de Bucaramanga S.A E.S.P. por permitir la realización de este estudio.

A la profesora Luz Yolanda vargas Fiallo, Directora del laboratorio de consultas industriales por su Dirección y ayuda técnica.

A los ingenieros Javier Quiroga, Yolanda Arboleda y Diana Calderón y a los Químicos Carlos Parra, Uriel Barragán y John Barreneche del acueducto metropolitano de Bucaramanga, por su valiosa colaboración y asesoría.

A los profesores Edgar Castillo y Aristóbulo Centeno de la escuela de ingeniería Química de la UIS, por la aceptación y revisión de este estudio.

A los empleados de la planta la flora, del laboratorio de control calidad del amb y del laboratorio de consultas industriales de la UIS, Por su colaboración en la realización de este estudio.

RESUMEN

TITULO: ESTUDIO DE APLICABILIDAD E IMPLEMENTACIÓN DEL POLICLORURO DE ALUMINIO COMO COAGULANTE PRIMARIO EN LA PLANTA LA FLORA DEL AMB. S.A. E.S.P*

AUTOR: CHRISTIAN CAÑAS ROJAS**

PALBRAS CLAVES: Sulfato de aluminio, policloruro de aluminio (Pac), tratamiento de agua, coagulación, coagulante, planta la flora.

DESCRIPCIÓN

Este trabajo tiene como objetivos establecer la viabilidad del cambio del sulfato de aluminio como coagulante primario en la planta la flora del acueducto metropolitano de Bucaramanga (amb), por el policloruro de aluminio y evaluar el comportamiento de estos dos coagulantes en el proceso de potabilización del agua. Se realizó un estudio técnico, un estudio ambiental y un análisis económico para el sulfato y el policloruro de aluminio, con el fin de lograr lo objetivo propuestos .

El estudio técnico fue desarrollado mediante pruebas de laboratorio, en las que se determinaron los parámetros operacionales óptimos para cada coagulante y las ventajas y desventajas del policloruro de aluminio sobre el sulfato de aluminio el proceso de potabilización. El estudio ambiental se desarrollo a la par con el estudio técnico, en este se hicieron determinaciones de metales pesados, cloruros, aluminio residual, color, turbiedad, alcalinidad y pH en el agua tratada con ambos coagulantes para determinar la factibilidad ambiental del uso del policloruro de aluminio en la planta. Por último se realizó un análisis económico en el que se determinaron los costos de tratamiento de agua para los dos coagulantes, estos costos se determinaron teniendo solamente en cuenta el consumo de productos químicos (coagulante, cal y polielectrolito).

Los resultados obtenidos demostraron que el policloruro de aluminio trabaja mejor que el sulfato de aluminio en el proceso de coagulación-floculación, y presenta algunas otras ventajas adicionales sobre el sulfato de aluminio; a partir de estos resultados se comprobó la factibilidad de la implementación del pac en la planta la flora desde el punto de vista técnico, ambiental y económico.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, Escuela de Ingeniería Química
Director: L. Yolanda Vargas Fiallo

SUMMARY

TITLE: Applicability and implementation study for poly aluminum chloride as a primary coagulant at the "la flora" plant owned by AMB.S.A

AUTHOR: CHRISTIAN CAÑAS ROJAS

KEY WORDS: aluminum sulfate, poly aluminum chloride (Pac), water treatment, coagulation, coagulant, "la flora" plant.

DESCRIPTION

The objectives of this work are establishing the feasibility of the use of poly aluminum chloride instead of aluminum sulfate at the "la flora" plant owned by "Acueducto Metropolitano de Bucaramanga" (amb), and evaluating the behavior of both of these coagulants in the river water treatment for drinking water. A technical study, an environmental study and an economic analysis were carried out for both aluminum sulfate and poly aluminum chloride in order to fulfill the proposed objectives.

The technical study was performed through laboratory tests in which the optimum operational parameters in the coagulation-flocculation process for each coagulant and the advantages and disadvantages of using poly aluminum chloride at the plant were established. The environmental study was made simultaneously with the technical, in this one, examinations of heavy metals, chloride, residual aluminum, color, turbidity, alkalinity and pH in samples of water treated with each coagulant were made that the feasibility of the use of Pac could be evaluated. The study was finished with an economic analysis in which the water treatment costs for both aluminum sulfate and poly aluminum chloride were calculated. These costs were estimated on the basis of the consumption of chemical products (coagulant, lime and flocculant aids).

The obtained results showed that poly aluminum chloride works better in the coagulation-flocculation process than aluminum sulfate does, and that it has some additional advantages over aluminum sulfate. These results proved technically, environmentally and economically that the use of Pac at plant la flora is feasible.

CONTENIDO

	Pág.
1. INTRODUCCIÓN	1
2. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL	4
2.1 PROCESOS UNITARIOS EN EL TRATAMIENTO DE AGUA	6
2.1.1 Aereación	6
2.1.2 Coagulación	7
2.1.2.1 Mecanismos De Coagulación	8
2.1.2.1.1 Adsorción-Neutralización De Carga	9
2.1.2.1.2 Barrido O Inmersión	9
2.1.2.2 Tipos De Coagulantes	10
2.1.3 Floculación	10
2.1.4 Sedimentación	12
2.1.5 Filtración	13
2.1.6 Corrección del pH	13
2.1.7 Desinfección	14
2.2 DESCRIPCIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO LA FLORA	14
2.2.1 Presedimentadores	15
2.2.1.1 Descripción.	16
2.2.1.2 Funcionamiento	16
2.2.2 Edificio De Dosificación	16
2.2.2.1 Localización	16
2.2.2.2 Componentes	17

2.2.2.3 Funcionamiento	17
2.2.3 Floculadores	18
2.2.3.1 Descripción	18
2.2.3.2 Funcionamiento	19
2.2.4 Sedimentadores	19
2.2.4.1 Localización	19
2.2.4.2 Descripción	19
2.2.4.3 Funcionamiento	20
2.2.5 Filtros	20
2.2.5.1 Localización	20
2.2.5.2 Descripción	21
2.2.6 Tanque De Almacenamiento	21
3. DESARROLLO EXPERIMENTAL	22
3.1 ETAPAS METODOLÓGICAS	22
3.1.1 Revisión Bibliográfica	22
3.1.2 Etapa experimental	22
3.1.3 Evaluación técnica del policloruro de aluminio	24
3.1.4 Análisis económico	24
3.2 EQUIPOS y MATERIALES	25
3.3 REACTIVOS	25
3.4 PROCEDIMIENTO EMPLEADO	26
3.4.1 Determinación de la dosis óptima de coagulante	26
3.4.2 Parámetros Operacionales	27
3.4.3 Volumen de lodos producidos	30

3.4.4 Análisis de metales	30
3.4.5 Determinación De Aluminio Residual y Cloruros	31
3.4.6 Determinación de la influencia de la dosis de coagulante en el pH y la alcalinidad final	32
3.4.7 Determinación de la Influencia del pH en la coagulación	32
3.4.8 Determinación de la influencia de la concentración de la Solución de coagulante en la coagulación	33
3.4.9 Determinación de La velocidad de sedimentación de las partículas	34
3.4.10 Determinación de parámetros óptimos de coagulación-floculación	35
3.4.10.1 Tiempo óptimo de mezcla rápida	35
3.4.10.2 Determinación de tiempos y gradientes óptimos de floculación	36
3.4.11 Evaluación de la eficiencia de los ayudantes de coagulación	38
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	40
4.1 RESULTADOS EXPERIMENTALES	40
4.1.1 Determinación de la dosis óptima	40
4.1.2 Determinación de la concentración del coagulante	44
4.1.3 Determinación de parámetros óptimos de coagulación-floculación	47
4.1.3.1 Tiempo óptimo de mezcla rápida	47
4.1.3.2 Determinación de tiempos y gradientes óptimos de floculación	48
4.1.4 Evaluación de la eficiencia de los ayudantes de coagulación	50
4.1.5 Determinación de la velocidad de sedimentación de las partículas	50
4.1.6 Determinación de la Influencia del pH en la coagulación	51
4.1.7 Determinación de la influencia de la dosis de coagulante en el pH y la alcalinidad final	52

4.1.8 Volumen De Lodos Producidos	53
4.1.9 Determinación de aluminio residual y cloruros	54
4.1.10 Análisis de metales	55
4.2 EVALUACIÓN TÉCNICA DEL POLICLORURO DE ALUMINIO	56
4.2.1 Almacenamiento	56
4.2.2 Forma de dosificación	56
4.2.3 Parámetros operacionales para cada coagulante	56
4.2.4 Reducción en el consumo de coagulante	57
4.2.5 Reducción en consumo de cal y de polielectrolito	57
4.2.6 Efectividad en el rango de pH	57
4.2.7 Carreras de filtración	57
4.2.8 Parámetros de calidad del agua tratada	57
4.2.9 Producción de lodos	57
4.2.10 Corrosión	58
4.3 ANÁLISIS ECONÓMICO	58
5. CONCLUSIONES	60
RECOMENDACIONES	61
BIBLIOGRAFÍA	62
ANEXOS	64

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Parámetros de operación para las pruebas de jarras	27
Tabla 2. Secuencia de pruebas para la determinación De parámetros óptimos	28
Tabla 3. Secuencia para los ensayos de tiempo y gradiente De floculación	38
Tabla 4. Dosis óptimas para diferentes turbiedades y coagulantes	42
Tabla 5. Dosis de reemplazo de sulfato de aluminio de acuerdo A la turbiedad	43
Tabla 6. Razón de reemplazo de coagulante de acuerdo a La turbiedad	44
Tabla 7. Tiempos y gradientes óptimos para sulfato y policloruro De aluminio	49
Tabla 8. Porcentajes de reemplazo de coagulante usando Poliectrolito	50
Tabla 9. Intervalos de pH óptimos de coagulación para Cada coagulante	51
Tabla 10. Concentración de cloruros en agua tratada y agua cruda	54
Tabla 11. Costos anuales de tratamiento para sulfato y Policloruro de aluminio	59

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Presedimentadores de la planta la flora	16
Figura 2. Canaleta parshall de la planta la flora	18
Figura 3. Floculador No 1. Planta la flora	18
Figura 4. Sedimentadores de la planta la flora	19
Figura 5. Galería de filtros de la planta la flora	21
Figura 6. Curva de turbiedad residual Vs. dosis de coagulante	41
Figura 7. Curva de color residual Vs. dosis de coagulante	42
Figura 8. Determinación de la concentración óptima del pac-Férrico	45
Figura 9. Determinación de la concentración óptima del pac-PQP Y del Quiprahc-Q4c	45
Figura 10. Determinación de la concentración óptima según el color	46
Figura 11. Determinación del tiempo de mezcla rápida de acuerdo A la turbiedad	47
Figura 12. Determinación del tiempo de mezcla rápida de acuerdo Al color	48
Figura 13. Velocidad de sedimentación para todos los coagulantes	51
Figura 14. Determinación del volumen de lodos producidos utilizando conos Imhoff	53

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo 1. Fichas técnicas del policloruro de aluminio	64
Anexo 2. Determinación de gradientes en jarras cuadradas de 2 lt.	68
Anexo 3. Criterios organolépticos, físicos y químicos de la calidad del agua potable según el decreto 475 de 1998	70
Anexo 4. Determinación de dosis óptimas	73
Anexo 5. Razones de reemplazo de sulfato de aluminio para cada coagulante	83
Anexo 6. Determinación de tiempos óptimos de mezcla rápida	85
Anexo 7. Determinación de tiempos y gradientes óptimos de floculación.	89
Anexo 8. Determinación de de la eficiencia de los ayudantes de coagulación	97
Anexo 9. Evaluación de la velocidad de sedimentación	102
Anexo 10. Influencia del pH en la coagulación	105
Anexo 11. Influencia de la dosis de coagulante en el pH y la alcalinidad	108
Anexo 12. Datos diarios de operación de la planta la flora	114
Anexo 13. Costos de tratamiento para los años 2003, 2004 y 2005 debidos al consumo de productos químicos en la planta la flora	115
Anexo 14. Volumen de lodos producidos y aluminio residual	121
Anexo 15. Determinación de metales en el agua tratada con cada coagulante	124
Anexo 16. Concentraciones de sustancias de interés sanitario en vertimientos según el decreto 1594	127

1. INTRODUCCIÓN

El suministro de agua potable en cantidad suficiente es un problema que viene siendo afrontado en Colombia de una manera deficiente, de acuerdo a un estudio realizado por Fabiola Beron⁽⁷⁾ con base en el ministerio de desarrollo económico (1996), de 936 sistemas de potabilización de agua existentes en 1068 municipios encuestados, solo el 71% suministraba agua potable. Este problema no se resuelve solo con la implementación de obras hidráulicas⁽⁸⁾, sino que este depende en gran manera de los métodos y etapas utilizados para su potabilización.

El costo de la producción de agua de buena calidad es un componente del costo total de prestación de servicio de un acueducto, indispensable y de mucho peso ya que va a ser pagado por el usuario. De ahí la importancia de que sea mínimo y que se busquen los medios técnicos, humanos y materiales mas económicos y mas eficientes, para que este costo se sitúe en valores al nivel de la capacidad de pago del usuario.

El factor anterior, sumado al crecimiento poblacional en el país indica que en un futuro cercano habrá necesidad de una ampliación en los sistemas de potabilización, así como la optimización de sus procesos de tratamiento y la implementación de nuevas tecnologías que no solo mejoren la calidad del agua suministrada sino que reduzca los costos de producción de la misma.

El proceso de coagulación-floculación es considerado como el componente básico y esencial de un sistema de tratamiento de agua convencional, que determina en gran parte las condiciones de operación de la planta de tratamiento⁽⁵⁾. De este depende en gran medida la mayor o menor eficiencia de los procesos siguientes a este y los costos totales de tratamiento.

En el proceso de coagulación se pueden emplear diferentes tipos de coagulantes, los cuales pueden favorecer o no, la eficiencia del proceso y la reducción de costos.

El policloruro de aluminio es un coagulante inorgánico de tipo polimérico que puede mejorar notablemente el proceso de potabilización y reducir costos de tratamiento⁽¹⁰⁾, con respecto al sulfato de aluminio (también conocido como alumbre), el cual es el coagulante mas usado en Colombia.

El policloruro de aluminio también conocido como PAC por sus siglas en inglés, tiene algunas ventajas sobre el sulfato de aluminio, pero solo unas pocas plantas en Colombia lo utilizan. Este coagulante está patentado en Japón, Inglaterra, Francia, Alemania, Italia, USA y otros países.

De esta manera, en este trabajo se persiguieron dos objetivos los cuales fueron evaluar el comportamiento del sulfato de aluminio y del policloruro de aluminio en el proceso de potabilización del agua y determinar la viabilidad del cambio del sulfato de aluminio en la planta la flora del acueducto metropolitano de Bucaramanga (amb), por el policloruro de aluminio.

Los resultados obtenidos en este trabajo demostraron que para el caso de la planta la flora, el policloruro de aluminio tiene una eficiencia mayor en la remoción de turbiedad y color en el agua cruda, a demás presenta ventajas sobre el sulfato de aluminio en el proceso de potabilización como son: comportamiento eficaz en un rango mas amplio de pH del agua cruda, mayor velocidad de sedimentación de los flocs producidos lo cual aumenta el tiempo de las carreras de filtración, reducción en las dosis de coagulante y reducción en el consumo de alcalinizante y ayudante de coagulación.

En el estudio, se tuvo en cuenta el impacto ambiental debido al uso de policloruro de aluminio el cual se utilizó en forma sólida y líquida. Los resultados fueron positivos ya que el agua tratada con este coagulante cumplió

con los parámetros establecidos por el ministerio de salud en el decreto 475 de 1998, y las concentraciones de metales en los lodos producidos cumplieron con lo establecido en el artículo 74 del decreto 1594 de 1984.

La implementación del policloruro de aluminio sólido en la planta la flora es viable desde el punto de vista técnico, ambiental y económico, mientras que el policloruro de aluminio líquido no lo es ya que este aumenta los costos de tratamiento, esto se debe al costo alto de este coagulante con respecto al sulfato de aluminio.

El estudio fue realizado con el agua del río tona durante el periodo de enero a junio de 2005, en este tiempo las condiciones del agua cruda fueron variables, lo cual permitió trabajar con muestras de agua diferentes para que el estudio fuera representativo y ajustable a las características del río tona a lo largo del año.

2. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

A continuación se presentan algunos aspectos y fundamentos básicos que serán necesarios abordados a medida que se desarrolla este trabajo.

Agua Cruda: Es aquella que no ha sido sometida a ningún proceso de tratamiento.

Agua Potable: Es aquella que por reunir los requisitos organolépticos, físicos, químicos y microbiológicos (requisitos que pueden variar dependiendo del tipo de norma al que se haga referencia), puede ser consumida por la población humana sin producir efectos adversos a su salud⁽¹³⁾

Alcalinizante: Sustancia que se aplica a un fluido con el fin de incrementar su valor de pH.

Aluminio Residual: Aluminio presente en el agua tratada debido principalmente a la coagulación con sales de aluminio.

Captación: Estructura que tiene como fin extraer una determinada cantidad de agua de una fuente.

Carrera De Filtración: Es el periodo de tiempo que existe entre dos lavados consecutivos del filtro.

Coagulante: agente químico o natural encargado de desestabilizar las partículas suspendidas en el agua, con el fin de promover su aglomeración para su posterior eliminación por sedimentación.

Color: Es una medida de la concentración de partículas coloidales en una suspensión, y se debe a la absorción selectiva por el coloide de una

determinada longitud de onda, a pesar de que los coloides son principalmente incoloros.

La aparición del color en agua potable, se debe fundamentalmente a la presencia de materia orgánica de suelos y de productos de descomposición de maderas, estos compuestos reciben el nombre de sustancias húmicas. (christman y Ghassemi, 1961)⁽⁵⁾

Las unidades que se utilizaran en este trabajo son las unidades platino-cobalto (UPC)

Dosis Óptima: es la dosis de coagulante que produce la mas rápida desestabilización de las partículas coloidales, forma un floc pesado y compacto que se elimine rápidamente por sedimentación y que deje la menor turbiedad, color y aluminio residuales, así como la menor cantidad posible de metales en el agua ^(5,9)

Gradiente: es el principal parámetro de diseño de los floculadores, es la diferencia de velocidades en distintos puntos del agua en un tanque de floculación, debido a la agitación producida allí .El gradiente representa la intensidad con que el agua es agitada en la unidad de floculación.

Planta De Tratamiento: Es el conjunto de estructuras, equipos y materiales necesarios para acondicionar el agua, produciendo en ella los cambios físicos, químicos, y bacteriológicos para convertir el agua cruda en agua potable .Los objetivos principales de una planta de tratamiento son: Suministrar agua en cantidad suficiente y en calidad óptima, para satisfacer las necesidades de consumo de la población con el menor costo posible, aprovechando al máximo los recursos disponibles; suministrar al consumidor agua potable con las siguientes características: cristalina, incolora, inodora e insabora, libre de microorganismos patógenos y con un alto contenido de oxígeno.

Pérdida De Carga: es el aumento en la caída de presión en el filtro, lo cual disminuye la capacidad de filtración del lecho.

Polielectrolito: es un tipo de coagulante polimérico, llamado también ayudante de coagulación, por lo general tienen cargas eléctricas positivas en su estructura molecular y debido a sus largas cadenas, estas pueden ser lineales o ramificadas y pueden presentar una gran cantidad de grupos ionizables⁽⁹⁾ estos polímeros ayudan a atrapar los coloides que han sido desestabilizados.

En las plantas de tratamiento se usan pequeñas dosis de polielectrolito, debido a su alto costo, y solo cuando el agua cruda presenta valores altos de turbiedad y color.

Turbiedad: Es una medida de la concentración de las partículas coloidales en un líquido, ya que esta se define como el decrecimiento en la transparencia de un líquido, causado por la diseminación de los rayos luminosos al pasar a través de una suspensión. La diseminación es proporcional al tamaño de las partículas.

Las unidades de turbiedad usadas en este trabajo son las unidades nefelométricas de turbidez (NTU)

2.1 PROCESOS UNITARIOS EN EL TRATAMIENTO DE AGUA

A continuación se describen los procesos que se dan en una planta de tratamiento convencional:

2.1.1 Aereación

La aereación puede lograrse agitando vigorosamente o pasando el agua por una caída de forma que se produzca turbulencia. La aereación aumenta el contenido de aire del agua, elimina las sustancias volátiles tales como el sulfuro de hidrógeno, que afectan al olor y el sabor, y oxida el hierro y el

manganeso a fin de que formen precipitados que puedan eliminarse mediante sedimentación o filtración.

2.1.2 Coagulación

Las aguas naturales contienen sustancias tanto disueltas como en suspensión, las cuales pueden ser orgánicas o inorgánicas, estas partículas pueden tener un tamaño y densidad tal que puedan eliminarse del agua por simple sedimentación, pero algunas de ellas tienen una carga eléctrica superficial que las hace repelerse continuamente, impidiendo su aglomeración y evitando su sedimentación. Estas partículas tienen un tamaño que suele estar entre 0.2 y 1µm, y se denominan coloides; Estas especies coloidales halladas en el agua cruda incluyen arcillas, sílice, hierro y otros metales pesados, color y sólidos orgánicos como los residuos de organismos muertos⁽¹²⁾.

Los coloides en una suspensión están sometidos a factores estabilizantes y destabilizantes. Los factores destabilizantes son aquellas fuerzas que provocan repulsión entre las partículas como lo son las fuerzas electrostáticas y la propia hidratación, y los factores estabilizantes son las fuerzas de atracción que dan lugar a la unión, entre estas figuran el movimiento Browniano y las fuerzas de menor grado como la fuerza de gravedad; de tal manera que lo que se busca es que los factores estabilizantes predominen sobre los destabilizantes, para lograr juntar estas partículas y de esta forma crear una partícula de mayor tamaño que pueda ser removida por sedimentación y/o filtración. Esto solo se puede lograr con la ayuda de un agente químico bajo condiciones de mezcla adecuadas.

La coagulación, es un proceso para incrementar la tendencia de estas partículas a agregarse, mediante la adición de un agente químico llamado coagulante, el cual produce especies químicas capaces de destabilizar las partículas coloidales suspendidas en el agua.

La coagulación comienza en el mismo instante en que se agregan los coagulantes al agua y dura fracciones de segundo. Básicamente consiste en una serie de reacciones químicas y físicas entre los coagulantes, la superficie de las partículas, la alcalinidad del agua y el agua misma. Debido a esto, éste proceso se efectúa en unidades de mezcla rápida donde se busca la dispersión rápida y efectiva del coagulante en el agua.

El proceso de coagulación consta esencialmente de tres pasos fundamentales: formación del coagulante, desestabilización de la partícula e interacción del material orgánico natural (NOM) con el coagulante⁽³⁾ que ocurre durante e inmediatamente después de la dispersión en la mezcla rápida; las colisiones entre partículas que producen agregación o formación de flóculos ocurren principalmente en el proceso de floculación.

La coagulación es un proceso complejo que se ve afectado por los siguientes factores:

- Características del agua
- Tipo de coagulante
- Dosis de coagulante
- pH de coagulación
- Condiciones de mezcla
- Temperatura⁽⁷⁾

2.1.2.1 Mecanismos De Coagulación⁽¹⁵⁾

La desestabilización de las partículas suspendidas se puede lograr mediante cuatro mecanismos de coagulación:

- Compresión de la doble capa
- Adsorción y neutralización de carga

- Adsorción y formación de puente químico
- Incorporación o de barrido

En el tratamiento de agua, la coagulación con sales de hierro y aluminio se da fundamentalmente por dos mecanismos: adsorción de especies insolubles hidrolizadas del coagulante sobre el coloide y subsecuente desestabilización (adsorción-neutralización), e inmersión del coloide en un precipitado de hidróxido (barrido) (Jonson et al, 1983).

2.1.2.1.1 Adsorción-Neutralización De Carga

Este mecanismo ocurre cuando especies hidrolizadas de aluminio, hierro o polímeros sintéticos catiónicos son adsorbidos en la superficie de los coloides al darse la interacción entre los coagulantes y los coloides.

La desestabilización del coloide por las especies hidrolizadas puede ocurrir debido a interacciones químicas tales como: intercambio iónico, enlaces covalentes, reacciones de coordinación y puentes de hidrogeno. Debido a que las interacciones químicas son mayores que las electrostáticas, si hay exceso o sobredosis de coagulante, ocurrirá la reestabilización de las cargas del coloide.

2.1.2.1.2 Barrido O Inmersión

Este mecanismo consiste en la remoción de contaminantes a través de la formación de un precipitado sólido. Este mecanismo se da cuando la cantidad de coagulante es tan alta que se excede el límite de solubilidad de este compuesto, dando lugar a la formación de un precipitado de hidróxido de aluminio o hidróxido de hierro. Al reaccionar el coagulante con la alcalinidad del agua y el agua misma se induce la producción de una masa esponjosa

llamada floc de barrido, que atrapa a las partículas coloidales mientras desciende, obligándolas a decantar inmersas en el precipitado que desciende.

Las condiciones en que se da este mecanismo están limitadas por la cantidad de coagulante, el pH de la mezcla y la concentración de algunos tipos de iones en el agua.

Este es el tipo de coagulación que se da en las plantas de tratamiento convencionales, para producir un floc de gran tamaño que precipite con una velocidad relativamente alta en comparación con el floc obtenido por el mecanismo de adsorción-neutralización.

2.1.2.2 Tipos De Coagulantes

En el proceso de coagulación se utilizan dos diferentes tipos de coagulantes, los cuales son: coagulantes metálicos y polielectrolíticos (llamados también ayudantes de coagulación). Los coagulantes metálicos se pueden dividir en tres tipos: sales de aluminio, sales de hierro y compuestos varios.

Las sales de aluminio son la más conocidas y usadas en Colombia; entre estas se encuentran el sulfato de aluminio, el sulfato de aluminio amoniacal y el policloruro de aluminio, de las cuales el sulfato de aluminio conocido como alumbre es el más usado en Colombia por su bajo costo y disponibilidad en el mercado. Este se encuentra en forma granular o líquida y hay dos tipos (tipo A y B)

2.1.3 Floculación

Después de que las partículas coloidales han sido desestabilizadas, estas tienen que trasladarse dentro del líquido para hacer contacto unas con otras y aglutinarse. A este proceso se le denomina FLOCULACIÓN. La rapidez con que esto ocurra va a depender del tamaño de las partículas en relación con el

grado de turbulencia del líquido, la concentración de partículas y el grado de desestabilización (coagulación), que es lo que permite que las condiciones sean efectivas para producir adherencia.

Este proceso se lleva a cabo con una agitación suave y continua del agua, con el propósito de que se vayan formando los flocs que luego serán removidos por sedimentación.

Los contactos entre partículas pueden por tres mecanismos diferentes o su combinación:

- Contactos por el movimiento térmico (Browniano) del líquido, que solo influye en las partículas menores a $1\mu\text{m}$, a este mecanismo se le conoce como *floculación pericinética*⁽¹⁵⁾.
- Contactos por turbulencia del líquido efectivo solo con partículas mayores a $1\mu\text{m}$, este mecanismo se denomina *floculación ortocinética*
- contactos ocurridos durante la caída de los flocs sedimentables, entre partículas de diferente tamaño, densidad y velocidad de sedimentación, lo cual ocurre con flocs macroscópicos partículas primarias mayores de $50\mu\text{m}$, a lo cual se le conoce como *floculación de barrido*.

De las tres formas de contacto para la formación de los flocs, la más significativa es la ortocinética, o sea la que se produce debido al grado de turbulencia del agua; Esta turbulencia es inducida por la energía comunicada al líquido por fuerzas externas como las provocadas por paletas giratorias por ejemplo.

La turbulencia es el factor responsable de la mayor parte de la floculación, y debido a esto se debe definir un nuevo factor que afecta la frecuencia de contactos ortocinéticos, este es el gradiente de velocidad laminar (du/dy) y se representa como G, este término se refiere a la diferencia en la velocidad en distintos puntos del seno del agua, debido a la agitación de la misma.

Von smoluchowski, quien en 1916 presentó la teoría de la floculación pericinética, demostró que el gradiente de velocidad es directamente proporcional a la frecuencia de los choques.

El concepto de gradiente de velocidad du/dy fue utilizado por Von smoluchowski como parámetro para caracterizar la turbulencia y su influencia en la intensidad de colisiones.

En la práctica actual el gradiente de velocidad (G), es el único parámetro de diseño para los floculadores reales.

2.1.4 Sedimentación

Después de que ha ocurrido la floculación en el agua, el siguiente paso es separar los sólidos del líquido, es decir los flocs formados y que están suspendidos en el agua.

La sedimentación es un proceso de separación sólido-líquido utilizado en el tratamiento de agua para bajar la concentración de sólidos en el agua, aprovechando su diferencia de densidad, con una velocidad de caída tal que estos pueden llegar al fondo del tanque sedimentador en un tiempo económicamente aceptable.

Como resultado los filtros pueden operarse mas fácilmente y a buen costo para producción de agua filtrada de buena calidad.

Existen muchos procesos de sedimentación y variantes de estos, y cada una tiene ventajas y desventajas. El proceso mas apropiado para una aplicación particular dependerá del agua a tratar así como de las circunstancias y exigencias locales.

2.1.5 Filtración

El objetivo de la filtración es separar las partículas y microorganismos que no se eliminaron en los procesos anteriores, debido a esto, la filtración depende en gran manera de la eficiencia que tengan los procesos de coagulación-floculación-sedimentación. La filtración incluye el tamizado mecánico, la absorción y la adsorción y, en particular, en filtros de arena lentos, los procesos bioquímicos. Según el tamaño, el tipo y la profundidad del filtro, y la tasa de flujo y las características físicas del agua sin tratar, los filtros pueden extraer los sólidos en suspensión, los patógenos y ciertos productos químicos, sabores y olores.

La filtración puede efectuarse de varias maneras:

- con baja carga superficial (filtros lentos)
- con alta carga superficial (filtros rápidos)
- en medios porosos (lonas, papel de filtro, etc)
- en medios granulares (arena, grava, antracita)
- con flujo ascendente o descendente y mixtos

Los filtros que se usan en las plantas de tratamiento convencionales son filtros rápidos de lecho granular, los cuales constan de un tanque rectangular, en el cual se coloca un lecho de grava, arena y antracita sobre un sistema de drenaje.

2.1.6 Corrección Del pH

La finalidad de este proceso es alcalinizar el agua que ha sido sometida al proceso de coagulación-floculación-sedimentación-filtración, elevando su pH hasta un valor de 7 a 8 unidades, con el fin de controlar la corrosión en válvulas, equipos metálicos y canalizaciones.

Al reaccionar el coagulante con el agua, se forma un ión aluminio hidratado $[Al(H_2O)_6]^{+3}$, el cual al reaccionar con las moléculas que conforman la alcalinidad del agua, hace descender el pH del agua.⁽⁵⁾

Este proceso se realiza mediante la adición de cal apagada ($Ca(OH)_2$), aplicada en solución, la cual es preparada en un tanque mezclador de cal y aplicada por medio de un dosificador de cal.

2.1.7 Desinfección

El proceso de desinfección, tiene como objetivos la eliminación de agentes patógenos presentes en el agua tales como bacterias, virus y protozoarios, los cuales pueden producir enfermedades o infecciones en el organismo, y dificultar su desarrollo en los sistemas de distribución y las instalaciones domiciliarias.

Este proceso se lleva a cabo mediante la aplicación de cloro gaseoso (debido a su gran poder biocida) u otro agente desinfectante como por ejemplo hipoclorito de sodio, en dosis apropiadas al agua filtrada, para cumplir con los objetivos de este proceso.

En el caso del cloro, este puede aplicarse antes de que el agua entre a la planta de tratamiento, a lo cual se le conoce como precloración o después de la filtración, lo cual se denomina postcloración, si se aplica en ambos puntos, a esto se le conoce como doble cloración

2.2 DESCRIPCIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO LA FLORA⁽¹⁾

El agua que llega a esta planta para ser tratada proviene de tres captaciones a través de bocatomas de fondo las cuales son: el río tona, las quebradas arnania y golondrinas.

Estos tres caudales se aforan en canaleta parshall, y así el caudal total captado es de 1400 L.p.s; el cual llega a la parte alta de la planta la flora en donde se bifurca de tal manera que una parte del caudal (400 L.p.s) va hacia la planta morrorico para ser tratada; la otra parte (1000 L.p.s) es el caudal que recibe la planta la flora para su tratamiento.

La planta la flora trata anualmente 30'000.000 m³ de agua, y posee una capacidad nominal de 1100 litros por segundo.

La planta de tratamiento la flora es el tipo convencional y se compone de las siguientes unidades:

- Una cámara de aereación
- Dos presedimentadores
- Canaleta parshall para mezcla rápida y aforo
- Dos floculadotes mecánicos
- Dos sedimentadotes acelerados de placas paralelas
- Nueve filtros de lecho filtrante de arena y antracita.
- Tanque de almacenamiento con una capacidad de almacenamiento de 4430 m³.

2.2.1 Presedimentadores

El sistema de presedimentación esta localizado entre el sistema de admisión de agua cruda y la conducción de agua a los floculadores.



Figura 1. Presedimentadores de la planta la flora.

2.2.1.1 Descripción

Dos tanques presedimentadores, cada uno de 56.85 m de longitud, 18.82 m de ancho, 4.00 m de profundidad útil y 4280 m³ de volumen útil, provistos en sus fondos de tolvas para el almacenamiento de lodos, Figura 1.

2.2.1.2 Funcionamiento

El caudal de agua cruda luego de ser medido en la canaleta parshall, entra a los tanques y mientras esta va pasando a baja velocidad, se va produciendo la sedimentación de las partículas y materiales pesados, los cuales se depositan en el fondo para luego ser sacados como lodos por los conductos de desagüe.

2.2.2 Edificio De Dosificación

2.2.2.1 Localización

Está localizado frente al canal de aforo y al extremo de entrada de los tanques de floculación y sedimentación.

2.2.2.2 Componentes

- Dosificadores de coagulante granular:

1 Marca Wallace & Tiernan, de banda sinfín y cámara de solución con capacidad de dosificación de 1.0 hasta 6.0 kilogramos por minuto.

1 Marca Permutit, de tipo de placa oscilante, con capacidad de dosificación de 0.5 kilogramos por minuto.

- Equipo dosificador de cloro, marca Wallace & Tiernan tipo A -741 V-notch, utilizado para prefloración y con alimentación de cloro gaseoso.
- Equipo de dosificación de polielectrolito líquido, con dos bombas dosificadoras, con capacidad para aplicar hasta 250 cm³ por minuto.

2.2.2.3 Funcionamiento

El agua proveniente de la presedimentación se recibe en una cámara de llegada y esta pasa a la canaleta parshall que se muestra en la figura 2., en la cual ocurre la dosificación del coagulante (sulfato de aluminio tipo B) debido a la mezcla que ocurre debido a la turbulencia producida en el resalto hidráulico. Aquí ocurre también la dosificación de polielectrolito, la cual depende de las características del agua a tratar.

Este proceso se conoce como MEZCLA RÁPIDA y tiene por finalidad poner en contacto íntimo y mezclar de forma homogénea y continua, el coagulante

aplicado con la masa de agua en tratamiento, para que la coagulación y floculación sean lo mejor posible.



Figura 2. Canaleta parshall de la planta la flora.

2.2.3 Floculadores

2.2.3.1 Descripción

Dos tanques de floculación de paletas horizontales con cámaras de paso inferior, cada uno de 14.48 m de ancho, 13.80 m de longitud y 4.00 m de profundidad. Están divididos longitudinalmente en tres compartimientos separados por tabiques de madera, figura 3.

La velocidad de rotación de los agitadores es proporcionada por dos motores mediante cadenas de transmisión de movimiento.



Figura 3. Floculador No 1. Planta la flora

2.2.3.2 Funcionamiento

El caudal de agua a ser tratada, luego de la aplicación y mezcla rápida de los coagulantes en la canaleta parshall, pasa a los canales de entrada de cada uno de los tanques de floculación, regulado por vertederos y compuertas.

En su paso por los compartimientos, el agua es agitada lentamente por la rotación de las paletas agitadoras para producir la floculación de las partículas suspendidas en el agua. Al final el agua pasa a los sedimentadores.

2.2.4 Sedimentadores

2.2.4.1 Localización

Se encuentran ubicados inmediatamente después de los tanques de floculación.



Figura 4. Sedimentadores de la planta la flora

2.2.4.2 Descripción

Los dos sedimentadores de la planta la flora son del tipo acelerados de flujo ascendente con placas paralelas, con sistema de evacuación de lodos continua. Ver figura 4. Las dimensiones son:

Sedimentador No 1.

Ancho: 16.00 m

Longitud: 24.10 m

Sedimentador No 2.

Ancho: 17.00 m

Longitud: 24.10 m

2.2.4.3 Funcionamiento

El agua floculada es distribuida por tres canales localizados a lo largo del sedimentador y el agua fluye ascendentemente mientras ocurre la sedimentación.

El agua sedimentada es recogida por la parte superior en unos canales recolectores, los cuales llevan el caudal recogido a un canal transversal localizado al final de los de los sedimentadores, encargado de conducir el agua hasta el canal de repartición de los filtros.

2.2.5 Filtros

2.2.5.1 Localización

Los filtros están ubicados a un lado de los sedimentadores, y están distribuidos en dos hileras (Figura 5a), una de 4 filtros y otra de 5.

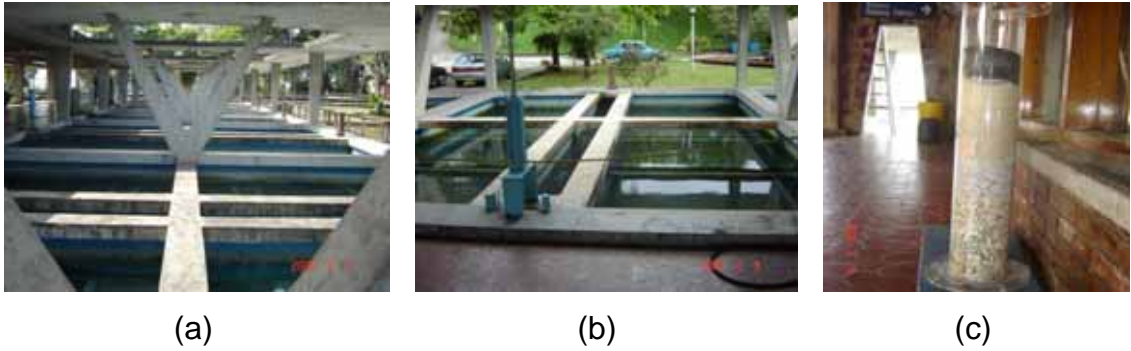


Figura 5. (a) Galería de filtros de la planta la flora; (b) Filtro planta la flora; (c) filtro modelo para ver el lecho filtrante.

2.2.5.2 Descripción

Cada filtro esta dividido en dos celdas de iguales dimensiones como se muestra en la figura 5b, las cuales tienen como lecho filtrante una capa de grava, una de arena, y en la parte superior una capa de antracita, ver figura 5c; estas tres capas están montadas sobre un fondo falso.

Las dimensiones de cada celda son:

Ancho: 3.05 m

Longitud: 8.86 m

Altura desde el fondo falso: 2.77 m

Altura total: 3.48 m

2.2.6 Tanque De Almacenamiento

El tanque de almacenamiento de la planta la flora tiene un volumen aproximado de 5000 m³ Y posee una tubería de salida de 24 pulgadas de diámetro. Se encuentra localizado debajo de la galería de filtros.

3. DESARROLLO EXPERIMENTAL

Este trabajo consta de un estudio técnico y económico para la decisión del cambio de coagulante en la planta la flora, el cual fue realizado a nivel de laboratorio en las instalaciones de la planta de tratamiento la flora y en el laboratorio de consultas industriales de la UIS. Para la realización de este trabajo se siguieron cuatro etapas metodológicas.

3.1 ETAPAS METODOLÓGICAS

3.1.1 Revisión Bibliográfica: Esta etapa involucró el conocimiento de las pruebas y ensayos de las principales variables que influyen en los costos de tratamiento en una planta de potabilización y en la calidad del agua tratada y por último se consultaron las leyes del ministerio de salud que establecen los criterios de calidad para el agua potable y vertimientos, obtenidos durante el proceso de potabilización; igualmente se planificó el desarrollo experimental a seguir para la realización de este trabajo.

3.1.2 Etapa experimental: De acuerdo a lo planeado en la etapa anterior, se inició el desarrollo experimental de este trabajo, este fue realizado a nivel de laboratorio y consta de diversos ensayos que son realizados en un sistema de simulación del proceso de coagulación-floculación y de análisis fisicoquímicos.

Estos ensayos se realizaron simultáneamente para el sulfato de aluminio, coagulante usado actualmente en la planta y el policloruro de aluminio. En este trabajó se utilizaron 3 policloruros de aluminio de diferentes proveedores: uno de ellos en forma granular y los otros dos en presentación líquida. Ver anexo 1

Los sistemas de simulación del proceso de coagulación-floculación consisten en simular en vasos de precipitado o jarras el proceso que se produce en la

planta de tratamiento y evaluar distintos parámetros durante y/o al final de los ensayos para caracterizar su funcionamiento.

Las pruebas de jarras pueden utilizarse tanto para controlar el proceso de coagulación-floculación de una planta existente como para obtener los datos de diseño de nuevas unidades.

Para la realización de este trabajo y mediante este sistema de simulación del proceso de coagulación-floculación se hicieron las siguientes determinaciones:

1. determinación de dosis óptima mediante evaluación de:
 - Determinaciones físicas: Turbiedad y color residuales.
 - Determinaciones químicas: pH, alcalinidad, aluminio residual.
 - Tamaño del floc producido.
 - Tiempo inicial de formación del floc.
2. Determinación de la velocidad de sedimentación del floc.
3. Determinación de la influencia del pH en la coagulación.
4. Determinación de la influencia de la dosis de coagulante en el pH y la alcalinidad final.
5. Determinación de parámetros óptimos de coagulación-floculación:
 - Tiempo óptimo de mezcla rápida.
 - Tiempo óptimo de floculación.
 - Gradiente óptimo de floculación.
6. Evaluación de la eficiencia de los ayudantes de coagulación.
7. Determinación de la cantidad de lodos producidos en la sedimentación.

Los análisis fisicoquímicos juegan un papel importante en este estudio ya que estos son el criterio de decisión final para muchas de las pruebas realizadas; y los análisis que se hicieron fueron:

- Turbiedad
- Color real
- pH

- alcalinidad
- aluminio residual
- cloruros
- metales pesados: As, Cd, Cu, Cr, Fe, Hg, Mn, Pb, Se, Zn⁽¹¹⁾

3.1.3 Evaluación técnica del policloruro de aluminio: En esta etapa se hizo el análisis de los resultados obtenidos en las pruebas comparativas, y se determinó la viabilidad del cambio de coagulante en la planta desde del punto de vista técnico, igualmente se obtuvieron los parámetros operacionales óptimos para cada coagulante.

Los factores que se analizaron en esta evaluación fueron:

- Forma de dosificación
- Reducción en consumo de cal y de polielectrolito
- Reducción en el consumo de coagulante
- Efectividad en el rango de pH
- Carreras de filtración
- Parámetros de calidad del agua tratada⁽¹³⁾ (turbiedad, color, pH, aluminio residual, cloruros, metales pesados)
- Parámetros operacionales para cada coagulante
- Producción de lodos
- Almacenamiento
- Corrosión.

3.1.4 Análisis económico: está fue la última etapa de este trabajo, aquí se determinó la viabilidad del cambio de coagulante en la planta desde el punto de vista económico.

El análisis económico se realizó con base en los resultados obtenidos a nivel de laboratorio y en los datos diarios de operación de la planta la flora para los años 2003, 2004 y 2005. Su principal componente fue el costo anual de

productos químicos⁽¹⁰⁾ para el tratamiento en la planta (coagulante, cal, polielectrolito).

Luego de haberse determinado el consumo de productos químicos con el uso de los otros coagulantes se calculó el costo anual que involucra este consumo y se comparó con el costo anual del sulfato de aluminio. Por último se analizaron los impactos que tienen los factores evaluados en la etapa anterior en el costo total de tratamiento.

3.2 EQUIPOS y MATERIALES

Los materiales y equipos que se usaron en este trabajo son:

- Espectrofotómetro de absorción atómica PERKIN ELMER
- Conos IMHOFF
- pH-metro METTLER TOLEDO sevenEasy GmbH 8603
- Turbidímetro HACH 2100P
- Espectrofotómetro HACH, DR/2000
- Equipo de jarras PHIPPS & BIRD modelo 7790-400
- Mufla

3.3 REACTIVOS

- Acido nítrico concentrado
- Acido sulfúrico 0.1 N
- Hidróxido de sodio 0.1 N
- Sulfato de aluminio
- Policloruro de aluminio: $Al_n(OH)_mCl_{3n-m}$
- Polielectrolito

Los coagulantes empleados en este trabajo son sulfato de aluminio y tres policloruros de aluminio de diferentes casas proveedoras:

- Sulfato de aluminio tipo B.
- Proveedor: Productos Químicos Panamericanos

- Pac-Férrico (sólido)
- Proveedor: purificadores para agua.

- Pac-PQP (líquido)
- Proveedor: Productos QuímicosPanamericanos

- Quiprahc-Q4c (líquido)
- Proveedor: Soamco

3.4 PROCEDIMIENTO EMPLEADO

3.4.1 Determinación De La Dosis Óptima De Coagulante

El objetivo de este ensayo es poder determinar la dosis de coagulante que produce la más rápida desestabilización de las partículas coloidales en la planta, El equipo de jarras empleado fue el PHIPPS & BIRD, y se utilizaron seis jarras cuadradas de acrílico de 2000 ml de capacidad, provistas de un orificio situado a 10 cm por debajo del nivel del agua por medio del cual se extrae las muestras a analizar después del ensayo, en este orificio va colocado un tapón perforado de vidrio por el cual pasa una manguera de látex de 3/16" , a la que se le acopla una pinza tipo mohr, esto es con el fin de asegurar que las condiciones de presión, velocidad y flujo de extracción de muestra sean siempre las mismas en todos los ensayos.

Los coagulantes se aplicaron en soluciones de concentración 1% p/V, Las cuales no se pueden conservar por mas de 24 horas pues corren el riesgo de hidrolizarse y perder buena parte de su capacidad de coagulación; estas soluciones se prepararon a partir de soluciones madres de concentración del

10 % las cuales para el caso del sulfato de aluminio se pueden conservar hasta 3 meses, pero para este trabajo se prepararon las soluciones madres cada mes para todos los coagulantes.

Se realizaron pruebas de dosis óptimas para nueve valores diferentes de turbiedad con cada coagulante, es decir 36 pruebas de jarras y a partir de estas se hicieron las siguientes determinaciones:

- Aluminio residual, este es un criterio fundamental en la elección de un coagulante, ya que este es un parámetro importante en la calidad del agua potable.
- Volumen de lodos producidos
- Influencia de la dosis de coagulante en el pH final
- Análisis de metales en el agua tratada con cada coagulante y en los lodos producidos con cada uno de ellos.

3.4.2 Parámetros Operacionales

Los parámetros de operación con los que se realizaron las pruebas en este estudio y sus valores fueron los que se muestran en la tabla 1, a menos que se indique lo contrario; La velocidad de rotación de los agitadores en la mezcla rápida para todos los ensayos fue siempre 100rpm.

Tabla 1. Parámetros de operación para las pruebas de jarras

Parámetro operacional	Valor fijado
Velocidad de agitación en mezcla rápida	> 100 rpm
Tiempo de mezcla rápida	1 min
Velocidad de agitación en la floculación	40 rpm
Tiempo de floculación	15 min
Tiempo de sedimentación	15 min
Concentración de coagulante	1%

A partir de los parámetros anteriores, los cuales fueron fijados inicialmente, se iniciaron las pruebas y se determinaron los parámetros óptimos operacionales al seguir la secuencia de pruebas que se presenta en la tabla 2. Esta secuencia se tomó de un estudio realizado por Fabiola Berón (2003)⁽⁷⁾

Tabla 2. Secuencia de pruebas para la determinación de parámetros óptimos

Ensayo	Parámetros Empleados	Comentario
1. Determinación de dosis óptima	<ul style="list-style-type: none"> • Concentración de la solución: 1% • Tiempo de mezcla rápida: 1 min • Velocidad en floculación: 40 rpm • Tiempo de floculación: 15 min • Tiempo de sedimentación: 15 min 	
2. Determinación de la concentración coagulante	<ul style="list-style-type: none"> • Dosis de coagulante: La hallada en 1 • Tiempo de mezcla rápida: 1 min • Velocidad en floculación: 40 rpm • Tiempo de floculación: 15 min • Tiempo de sedimentación: 15 min 	Concentraciones evaluadas: 0.5, 1, 2, 4, 8,10%
3. Determinación del tiempo de mezcla rápida	<ul style="list-style-type: none"> • Dosis de coagulante: La hallada en 1 • Concentración sln: La hallada en 2 • Velocidad en floculación: 40 rpm • Tiempo de floculación: 15 min • Tiempo de sedimentación: 15 min 	Tiempos evaluados: 30, 60,90 segundos
4. Determinación del gradiente y tiempo floculación	<ul style="list-style-type: none"> • Dosis de coagulante: La hallada en 1 • Concentración sln: La hallada en 2 • Tiempo mezcla rápida: El hallado en 3 • Tiempo de sedimentación: 15 min 	Velocidades evaluadas: 20, 30, 40 y 55 rpm Tiempos evaluados: 7, 13, 20, 27, 33, 40 min.

El procedimiento del ensayo se realizó de acuerdo al recomendado en el capitulo 4 de la referencia (5).

1. Se determinan: el color, la turbiedad, el pH, y la alcalinidad en el agua cruda.
2. Se llenan las jarras con el agua cruda y se añaden los coagulantes a cada una de ellas en dosis progresivas, utilizando jeringas hipodérmicas de 1, 2, 5, 10 y 25 ml dependiendo de la cantidad de coagulante a utilizar. Las dosis aplicadas se reportan en partes por millón (ppm) la adición de los coagulantes se debe hacer simultáneamente con el fin de que el tiempo de mezcla rápida sea el mismo para todas las muestras, y se debe realizar dentro del seno del líquido y no sobre la superficie. Para el momento de la adición del coagulante, las paletas de los agitadores deben estar girando a una velocidad de 100 rpm, para asegurar una buena incorporación de los coagulantes en todo el líquido.
3. Se dejan girar las paletas 60 segundos después de la aplicación de los coagulantes, para garantizar buena mezcla.
4. Después de este periodo se cambia la velocidad de las paletas a 40 rpm durante 15 a 30 min .Durante este tiempo en el cual ocurre la floculación, se determinan el tiempo inicial de formación del floc y el tamaño; este se puede expresar en mm de acuerdo con un comparador desarrollado por el water research institute de Inglaterra⁽⁵⁾
5. Se suspende la agitación y se deja sedimentar el agua durante 15 a 30 min.
6. Al final de este tiempo se extraen aproximadamente 50ml de muestra de cada una de las jarras asegurándose de eliminar los primeros 5 ml, y se determina: color y turbiedad residual, y si se necesita, se puede determinar aluminio residual, pH y alcalinidad final.

7. Se toma como dosis óptima y como primer criterio la de la jarra que produce el menor valor de turbiedad y color residuales; aunque los criterios del tamaño del floc producido y el tiempo de formación del floc sirven para confirmar la elección, estos no siempre determinan cual es la dosis óptima.

3.4.3 Volumen De Lodos Producidos⁽²⁾

La determinación de la cantidad de lodos producidos en el proceso de sedimentación con cada coagulante se determinó utilizando un cono Imhoff.

Después de 30 minutos de sedimentación del agua floculada, se extrajo de la jarra que tenía la dosis óptima una muestra para hacer determinación de metales, y luego se extrajo agua hasta dejar en la jarra aproximadamente unos 1000 ml, seguido a esto se vertió la mayor cantidad del sobrenadante por la parte superior de la jarra teniendo cuidado de no agitar el lodo sedimentado, al final se vertió el contenido final de la jarra en el cono Imhoff y se dejó sedimentar durante 1 hora, después de lo cual se pudo leer en el cono el volumen de lodo producido.

Esta determinación se hizo para valores pequeños y altos de turbiedad, ya que la cantidad de lodos producidos depende en gran manera de la turbiedad de agua cruda y de la dosis de coagulante empleada.

3.4.4 Análisis De Metales

Esta determinación se hizo para el agua tratada y para los lodos producidos con cada coagulante.

Para la determinación de metales pesados en el agua tratada con cada coagulante, se aprovecharon las pruebas de dosis óptimas realizadas; las muestras a las que se les hizo la determinación de metales se tomaron de la jarra que había producido un agua con los menores valores de turbiedad y color, estas muestras se tomaron después de un periodo de sedimentación de 30 minutos con el fin de simular un poco mejor las condiciones reales de la planta; la cantidad de muestra para este análisis fue de 100 ml.

Las determinaciones que se hicieron fueron: As, Cd, Cu, Cr, Fe, Hg, Mn, Pb, Se, Zn. Estas se hicieron de acuerdo a Standard Methods parte 3000⁽⁴⁾

Para la determinación de metales en lodos, se tomaron los lodos producidos en varias pruebas de jarras hechas a muestras con diferentes valores de turbiedad para simular mejor las condiciones de estos en la planta, después de 30 minutos de sedimentación, estos se pusieron en recipientes abiertos con el fin de eliminar la mayor cantidad de agua posible, luego se llevaron a sequedad en una mufla a 60°C durante unas 3 horas para evitar el escape de algún metal volátil, luego se tomaron 0.5 gr de lodo seco y se añadieron a 100 ml de agua destilada, a partir de este punto se determinaron los mismos metales y con el mismo procedimiento aplicado al agua tratada.

3.4.5 Determinación De Aluminio Residual y Cloruros

La determinación de aluminio residual en el agua tratada con cada uno de los coagulantes, se hizo en las muestras recogidas de las jarras que tenían las dosis óptimas. La determinación se hizo de acuerdo al procedimiento establecido en Standard methods 3500-Al B.

La determinación de cloruros se hizo para una muestra de agua cruda con una turbiedad, color y pH de 8 NTU, 43 UPC y 7.59 respectivamente, y para el

agua tratada con sulfato de aluminio, pac férrico y pac-PQP, de este último se dosificó una vez 20 ppm y otra vez 100 ppm. Esta determinación se hizo de acuerdo al Standard methods 4500-Cl⁻ B.

3.4.6 Determinación de la influencia de la dosis de coagulante en el pH y la alcalinidad final

El objetivo de este ensayo es mirar cuanto influye la dosis de coagulante (especialmente cuando esta es alta) en la alcalinidad y por consiguiente en el pH final, para comparar los efectos de cada coagulante en cuanto al consumo de alcalinizantes.

El ensayo consiste en:

1. Determinar el pH y la alcalinidad inicial del agua cruda
2. Adicionar a cada jarra excepto a la primera, dosis progresivas de coagulante, por ejemplo: 10, 20,30, 40 y 50 ppm.
3. Seguir la prueba de jarras normalmente y al final determinar a cada una de las muestras su pH y alcalinidad final.
4. Hacer una grafica de pH vs. dosis de coagulante y una de alcalinidad vs. dosis de coagulante.
5. Repetir la prueba para los demás coagulantes y hacer las mismas gráficas.

La determinación de la influencia de la dosis en el pH y la alcalinidad final, se hizo también a partir de los resultados de las pruebas de dosis óptima, graficando los valores del pH final en cada muestra vs. La dosis de coagulante en cada jarra.

3.4.7 Determinación De La Influencia Del PH En La Coagulación

El pH tiene una gran influencia en la coagulación debido a que las reacciones del coagulante con el agua dependen de la cantidad de iones H⁺ y (OH)⁻. Por lo

general existe un pH óptimo, valores por encima o por debajo producen malos resultados ⁽⁵⁾

El objetivo de este ensayo es determinar el rango de pH en el cual se den los mejores resultados de coagulación para el tipo de agua con que se trabaja y para el tipo de coagulante utilizado.

El procedimiento consta de los siguientes pasos:

1. Se efectúa una prueba de dosis óptima para cada coagulante
2. Se coloca la misma cantidad de agua en las jarras y se ajusta el pH en cada una de ellas usando ácido sulfúrico 0.1 N o hidróxido de sodio 0.1N, de tal forma que este varié desde un valor entre 4-5 en la primera jarra hasta 8-9 en la última.
3. Después de que el pH esté ajustado, se añade a cada jarra la dosis óptima de coagulante, y de aquí en adelante se sigue el experimento con los mismos parámetros de coagulación y floculación utilizados en las prueba de dosis óptimas.
4. Al final de la prueba se determinan el color y la turbiedad en las muestras de cada jarra y con estos valores se hace una curva de turbiedad residual vs. pH, y otra de color residual vs. pH.

3.4.8 Determinación De La Influencia De La Concentración De La Solución De Coagulante En La Coagulación

Se ha demostrado que la concentración de la solución de los coagulantes influye en la eficiencia de la mezcla rápida, y por lo tanto en los resultados de la coagulación (Mendes y di Bernardo (1993)), aunque para tratamiento de aguas, son adecuadas concentraciones del 1 o 2%.

El objetivo de este ensayo es determinar la concentración de los coagulantes que da los mejores resultados en el proceso de coagulación-floculación y por ende en la sedimentación.

El ensayo se realizó de la siguiente manera:

1. Se determinó la dosis óptima en la forma convencional para el agua cruda determinada.
2. Se hizo una nueva prueba de jarras adicionando a cada jarra la dosis óptima encontrada en la prueba anterior, pero en concentraciones crecientes así: 0.5, 1, 2, 4, 8, y 10%.
3. Se continuó la prueba con los parámetros usuales de mezcla rápida, floculación y sedimentación.
4. Al final de la prueba se graficaron los valores de turbiedad residual de cada jarra vs. Las Concentraciones de coagulantes y de esta forma se determinó la mejor concentración de coagulante.

3.4.9 Determinación De La Velocidad De Sedimentación De Las Partículas⁽⁵⁾

El objetivo de este ensayo es comparar el trabajo que los coagulantes empleados realizan y que tan rápido lo realizan, desde un punto de vista cualitativo. Este ensayo se hizo con los cuatro coagulantes a la vez, ya que solo se necesita una jarra por coagulante

El ensayo consiste en los siguientes pasos:

1. Se determina la turbiedad del agua cruda , la cual se designa como (*No.*)
2. Se aplica a cada jarra la dosis óptima de coagulante, mientras se hace girar el agitador a 100 rpm.
3. Después de hecha la mezcla rápida se cambia la velocidad de las paletas a 40 rpm durante 15 a 30 minutos.
4. se detienen las paletas, se levantan y se empiezan a tomar muestras de cada jarra a intervalos de tiempo regulares, por ejemplo: $t=1 \text{ min}$, $t=3 \text{ min}$, $t=7 \text{ min}$, $t=12 \text{ min}$, $t=17 \text{ min}$, $t=25 \text{ min}$.

5. a cada una de las muestras y para cada intervalo de tiempo se le determina la turbiedad residual N_t . Con estos datos se dibuja una curva de porcentaje de turbiedad removida vs tiempo de sedimentación, el porcentaje de remoción será:

$$\left(1 - \frac{N_t}{N_o}\right) * 100$$

Al graficar estos valores contra los tiempos de toma de muestra se puede observar la velocidad de sedimentación del floc formado con cada uno de los coagulantes.

3.4.10 Determinación De Parámetros Óptimos De Coagulación-Floculación⁽⁶⁾

Este no es un ensayo en particular sino un grupo. Los parámetros óptimos que se determinaron fueron: tiempo óptimo de mezcla rápida, gradiente óptimo de floculación y tiempo óptimo de floculación.

3.4.10.1 Tiempo óptimo de mezcla rápida

Este ensayo se determinó, haciendo una prueba de jarras normal pero variando solamente el tiempo de mezcla rápida, y se puede hacer para los cuatro coagulantes a la vez, pero debido a que los agitadores no pueden girar a diferentes velocidades al mismo tiempo, este ensayo se debe repetir para los distintos tiempos que se escojan.

Los pasos son los siguientes:

1. Se efectúa una prueba de jarras y se determina la dosis óptima para todos los coagulantes.

2. Se utilizan cuatro jarras (una para cada coagulante) y a cada una de ellas se le aplica la dosis óptima, mientras los agitadores giran a 100 rpm.
3. Se dejan girar las paletas a 100 rpm, durante el tiempo escogido por ejemplo 30 s, y luego se cambia la velocidad a 40 rpm, y se continúa la prueba normalmente.
4. Todo el ensayo se repite para un nuevo tiempo de mezcla rápida escogido por ejemplo 60 s.
5. Al final se hacen curvas de turbiedad residual vs. tiempo de mezcla rápida y de color residual vs. tiempos de mezcla rápida, para cada coagulante y de esta forma se determina el tiempo óptimo de mezcla rápida para cada coagulante.

La prueba se debe repetir para diferentes valores de turbiedad, debido a que esta es muy variable en la planta.

3.4.10.2 Determinación de tiempos y gradientes óptimos de floculación

Esta dos determinaciones se pueden realizar en un salo ensayo cuyo objetivo es conocer la intensidad de agitación (gradiente, G) que debe dársele al agua durante el proceso de floculación, y durante cuanto tiempo se le debe aplicar para producir la mejor remoción posible de partículas durante el proceso de sedimentación.

Este ensayo empieza con la determinación de la dosis óptima de coagulante de la manera convencional, con una mezcla rápida a 100 rpm durante 1 min, y una floculación a 40 rpm durante 15 a 30 min.

Para realizar este ensayo se necesitaron aproximadamente 200 litros de agua cruda, debido a que para obtener buenos resultados se deben hacer una prueba de dosis óptima y unas tres pruebas de gradiente, en total cuatro pruebas para un solo coagulante lo cual equivale a 24 jarras de 2 litros, es

decir 48 litros. Esta prueba se hizo para los cuatro coagulantes necesitándose entonces 192 litros para el ensayo completo.

Este ensayo se realizó para cuatro valores diferentes de turbiedad inicial del agua cruda, las muestras de agua se recogieron en dos contenedores de 220 litros de capacidad; estas muestras no se almacenaron durante más de tres días ya que después de este tiempo se observó variación en su pH, lo cual impediría que las condiciones con las que se hacen las pruebas no fueran las mismas para todos los ensayos.

Después de que se ha determinado la dosis óptima de coagulante se realiza la prueba de gradiente de la siguiente manera:

1. se ponen los agitadores a 100 rpm, y se aplica a las seis jarras la dosis óptima del coagulante a ensayar, de la manera mas simultanea posible. La mezcla rápida se deja durante el tiempo óptimo encontrado en el ensayo anterior.
2. transcurrido este tiempo, se reduce la velocidad de los agitadores a la velocidad de rotación de los agitadores que se quiere probar, por ejemplo 30rpm (que para las jarras y los agitadores utilizados corresponde a un gradiente de 23.5 s^{-1}). Este se toma como el tiempo $t=0$ y a partir de este se empieza a contar el tiempo de flocculación.
3. en este punto se sigue la secuencia descrita en la tabla 3.⁽⁶⁾
4. En este ensayo el tiempo de sedimentación como se puede observar es de 10 minutos. A cada una de las muestras se les determina su turbiedad, y con estos valores se hace una curva de Turbiedad residual vs. Tiempo de flocculación.

Tabla 3. Secuencia para los ensayos de tiempo y gradiente de floculación

Tiempo de floculación (minutos)	Acción a ejecutar
0	Comienza la floculación al gradiente escogido
7	Se levanta el agitador de la celda No. 1
13	Se levanta el agitador de la celda No. 2
17	Se toma la muestra de la celda No. 1
20	Se levanta el agitador de la celda No. 3
23	Se toma la muestra de la celda No. 2
27	Se levanta el agitador de la celda No.4
30	Se toma la muestra de la celda No. 3
33	Se levanta el agitador de la celda No. 5
37	Se toma la muestra de la celda No4
40	Se levanta el agitador de la celda No. 6
43	Se toma la muestra de la celda No. 5
50	Se toma la muestra de la celda No. 6

- después de este ensayo, se procede a realizarlo de nuevo, en la misma manera, pero ahora para una velocidad de rotación de las paletas diferente por ejemplo 40 rpm lo cual equivale a un gradiente de 33 s^{-1} (anexo 2). Los resultados se grafican de la misma manera pero si es posible sobre la misma gráfica, lo cual facilita la comparación de los resultados.

Los pasos que se acaban de describir constituyen toda la prueba de gradientes completa, pero para un solo coagulante, de tal manera que este ensayo se realizó cuatro veces debido a que son cuatro los coagulantes que se compararon en este trabajo.

3.4.11 Evaluación de la eficiencia de los ayudantes de coagulación

El objetivo de este ensayo es el de comparar la eficiencia en la remoción de turbiedad y/o color de varios polielectrolitos, a fin de escoger el que mejor se adapte a las características del agua que se quiere analizar.

El procedimiento se realizó con referencia al descrito en el capítulo 4 de la referencia (5)

1. se hizo una prueba de jarras para determinar la dosis óptima de uno de los coagulantes.
2. se realizó otra prueba de jarras, en la cual se le agregó a cada jarra la misma dosis óptima, y dosis crecientes de polielectrolito excepto a la primer jarra; las dosis fueron: 0, 0.2, 0.4, 0.8, 1.5, y 2 mg/L.
3. La adición del polielectrolito se hizo 30 s después de la inyección del coagulante y después de otros 30 s se redujo la velocidad de los agitadores a 40 rpm.
4. se continuó la agitación durante 15 minutos y se dejó sedimentar el agua durante 15 minutos, después de lo cual se tomaron muestras de cada jarra y se les determinó turbiedad y color residual.
5. Después de esto se hizo un nuevo ensayo pero ahora variando las dosis de coagulante y polielectrolito al tiempo, pero conservando la dosis óptima de coagulante total, por ejemplo 90% de coagulante y 10% de polielectrolito, estas se variaron en cada jarra buscando de esta manera la combinación más efectiva posible y económica posible.
6. este ensayo se repitió para cinco valores diferentes de turbiedad.

Los ensayos anteriores se llevaron a cabo en el periodo del mes de enero hasta el mes de junio del año 2005 y fueron realizados repetidas veces para diferentes valores de turbiedad y color del agua cruda, con el fin de que el estudio fuera representativo y pudiera reproducirse posteriormente en la planta de tratamiento.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Como se indicó en el capítulo anterior, La experimentación se realizó en el periodo comprendido entre enero y junio de 2005, durante este periodo se presentó una variación alta en los valores de turbiedad y color en el agua cruda, lo cual permitió que se pudiera trabajar con valores de turbiedad desde 5 NTU hasta 329 NTU y de color desde 10 UPC hasta 664 UPC.

El pH del agua cruda durante este periodo osciló entre 7.52 y 7.92 unidades, lo cual se puede considerar como un valor aproximadamente constante, el valor de la alcalinidad presentó un valor casi constante de 55.4 mg CaCO₃/L.

4.1 RESULTADOS EXPERIMENTALES

4.1.1 Determinación de la dosis óptima

Para este ensayo se estudiaron nueve muestras de agua con diferentes valores de turbiedad y color para que el estudio fuera representativo. Los valores de turbiedades con que se trabajaron fueron: 5, 18, 29.7, 40.1, 52, 75, 100, 190 y 329 NTU; y los valores de color fueron: 10, 38, 72, 79, 227, 102, 137, 243 y 664 UPC respectivamente. En todos los casos el color fue más alto que la turbiedad y no varió con ella en una proporción definida.

En las figuras 6 y 7 aparecen graficados los resultados de la determinación de la dosis óptima para todos los coagulantes, en una de las muestras de agua cruda con que se trabajó, los parámetros son los siguientes:

parámetros iniciales	valor
turbiedad	52 NTU
color	227 UPC
pH	7.69

En las Figuras 6 y 7 se puede observar que para todos los coagulantes excepto para el pac-PQP la dosis que produce el menor valor de turbiedad es la misma que produce el menor valor de color; en el caso del pac-PQP la dosis que se toma como óptima es la que produce el menor valor de turbiedad. Las dosis óptimas son: para el sulfato de aluminio, el pac-férrico, el pac-PQP y el Quiprahc-Q4c: 31, 32, 29 y 32 ppm respectivamente.

Para el pac-férrico, todas las dosis empleadas produjeron un agua con los parámetros turbiedad y color establecidos por el decreto 475 (anexo 3), sin embargo las dosis óptimas de los otros tres coagulantes cumplen este requisito.

A pesar de que las dosis óptimas hayan sido tan similares, los tres policloruros tienen una ventaja sobre el sulfato y es que para producir un agua con el mismo valor de turbiedad y color que los que este deja, se requieren dosis mucho menores; por ejemplo la turbiedad en el agua tratada con la dosis óptima de sulfato de aluminio fue 4.6 mientras que para la menor dosis de pac-férrico (20 ppm), la turbiedad fue 2.95, es decir la dosis de pac-férrico que produciría una turbiedad residual de 4.6 es aún mucho menor a 20 ppm. En este caso la dosis de sulfato de aluminio es casi el doble de la del Pac-férrico.

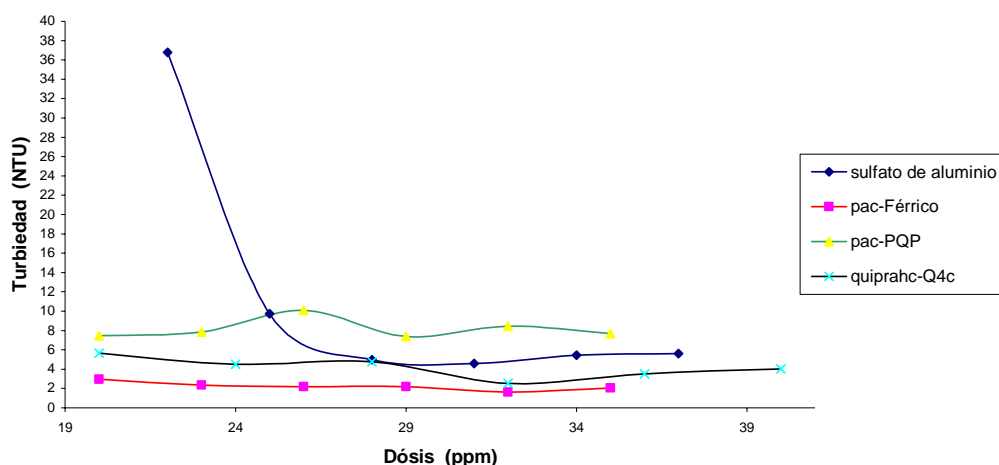


Figura 6. Curva de turbiedad residual Vs. dosis de coagulante

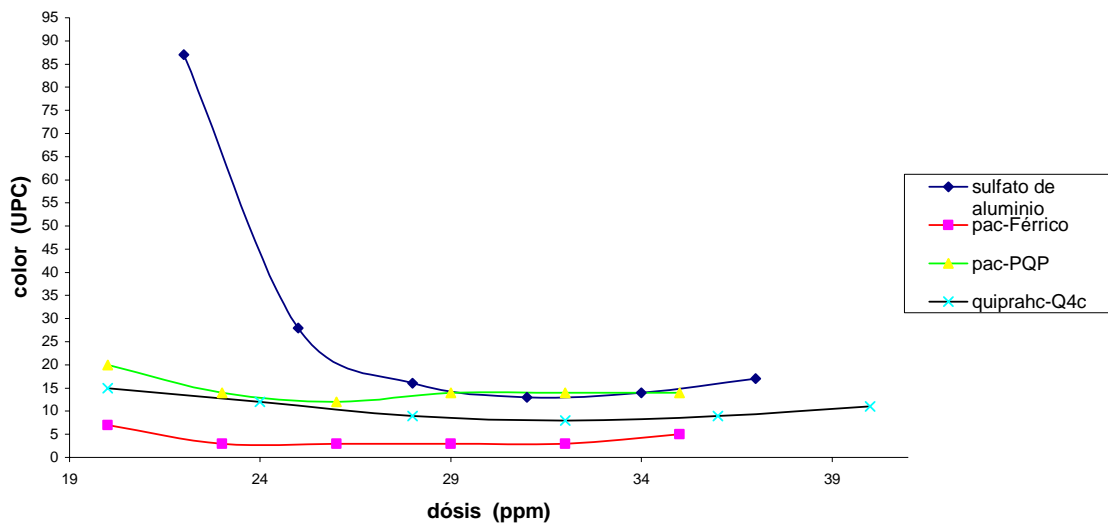


Figura 7. Color residual Vs. dosis de coagulante

Los resultados de todas las pruebas de dosis óptimas se encuentran en el anexo 4, las dosis óptimas para cada muestra de agua y para cada coagulante se muestran en la tabla 4. Estos valores fueron los usados para las demás pruebas.

Tabla 4. Dosis óptimas para diferentes turbiedades y coagulantes.

turbiedad inicial (NTU)	Color inicial (UPC)	sulfato de aluminio (ppm)	pac-férrico (ppm)	pac-PQP (ppm)	Quiprahc-Q4c (ppm)
5	10	18	16	18	16
18	38	36	32	38	34
29.7	72	33	25	40	40
40.1	79	32	25	30	---
52	227	31	32	29	32
75	102	35	29	35	40
100	137	34	35	35	45
190	243	55	45	60	65
329	664	70	50	55	---

En la tabla 4. Se puede observar que la dosis óptima aumenta proporcionalmente con la turbiedad o el color, pero no lo hace linealmente, inclusive existen casos en los que la dosis disminuyó al aumentar la turbiedad. Debido a esto los datos no se ajustaron para poder predecir en futuros ensayos, la dosis óptima de coagulante para el agua que se este trabajando.

Una de las ventajas que tienen los tres policloruros de aluminio, es que con ellos se reduce el consumo de coagulante, el cual constituye uno de los principales costos en una planta de tratamiento.

Para determinar cuanto es la reducción en el consumo de coagulante, se tomó como referencia la dosis óptima de sulfato de aluminio para cada valor de turbiedad estudiado y el valor de turbiedad residual obtenido con esta dosis, luego en las curvas de turbiedad residual vs. Dosis, se buscó la dosis de los otros coagulantes que producen el mismo valor de turbiedad residual que el obtenido con el sulfato de aluminio. Con estos valores, los cuales se presentan en la tabla 5. Se halló la razón de reemplazo de sulfato de aluminio para cada coagulante Tabla 6. Como esta razón de reemplazo está referida a la turbiedad, se hizo lo mismo pero para el color residual. Anexo 5.

Tabla 5. Dosis de reemplazo de sulfato de aluminio de acuerdo a la turbiedad

turbiedad inicial (NTU)	Dosis sulfato (ppm)	Dosis pac-férrico (ppm)	Dosis pac-PQP (ppm)	Dosis Quiprahc-Q4c (ppm)
5	17	12	18	16
18	35	13	22	18
29,7	33	15	21	20
40,1	31	10	16	---
52	31	17	20	20
75	36	23	32	30
100	38	19	35	29
190	56	24	58	32
329	70	48	55	---

Tabla 6. Razón de reemplazo de coagulante de acuerdo a la turbiedad

	reemplazo pac-férrico	reemplazo pac-PQP	reemplazo Quiprahc-Q4c
	1,42	0,94	1,06
	2,69	1,59	1,94
	2,20	1,57	1,65
	3,10	1,94	-----
	1,82	1,55	1,55
	1,57	1,13	1,20
	2,00	1,09	1,31
	2,33	0,97	1,75
	1,46	1,27	-----
Promedio	2,07	1,34	1,5
Desviación	0,58	0,34	0,32

La relación de reemplazo para los tres coagulantes no fue la misma, obteniéndose el mayor valor (2.07) para el pac-férrico, es decir con este coagulante se reduce el consumo de esta materia prima a la mitad; se observa que no hay diferencia entre la razón de reemplazo según la turbiedad y según el color residual. En el caso de los otros dos coagulantes, la razón de reemplazo es menor que en el pac-férrico, especialmente para el caso del Pac-PQP, cuyo consumo será solo 1.34 veces menor según la turbiedad, y 1.6 según el color.

4.1.2 Determinación de la concentración del coagulante

En las figuras 9, 10 y 11, se muestran los resultados de la determinación de la concentración de coagulante; El ensayo no se realizó para el sulfato de aluminio debido a que este ensayo ya se había realizado en la planta la flora⁽¹⁶⁾ para este coagulante con aguas de 1250, 750, 575 y 26 NTU. En los cuales se obtuvo que la concentración que producía un agua de mejor calidad es del 1%.

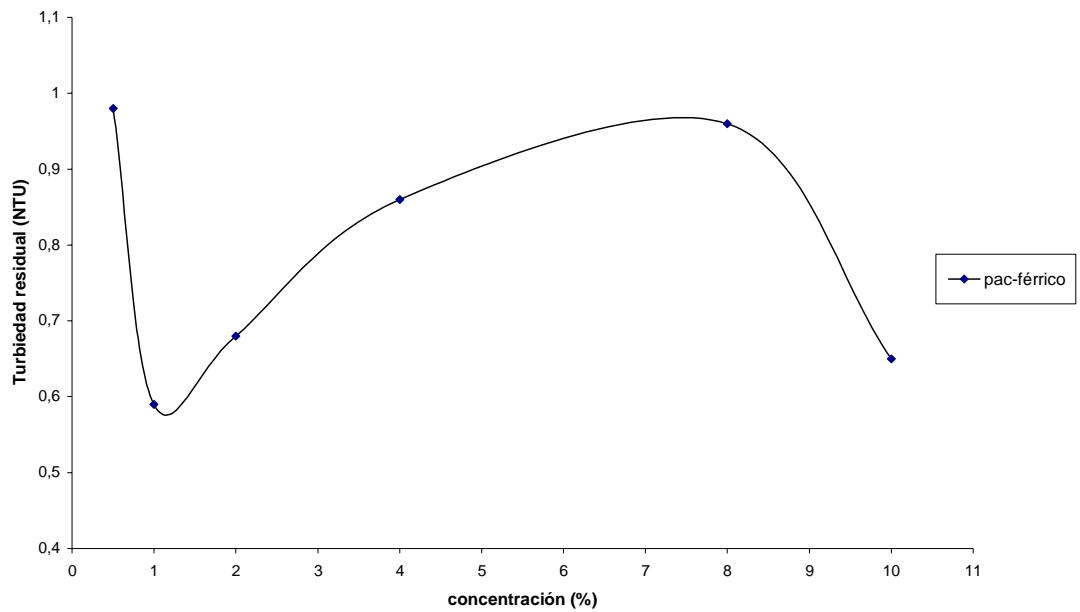


Figura 8. Determinación de la concentración óptima del pac-Férrico

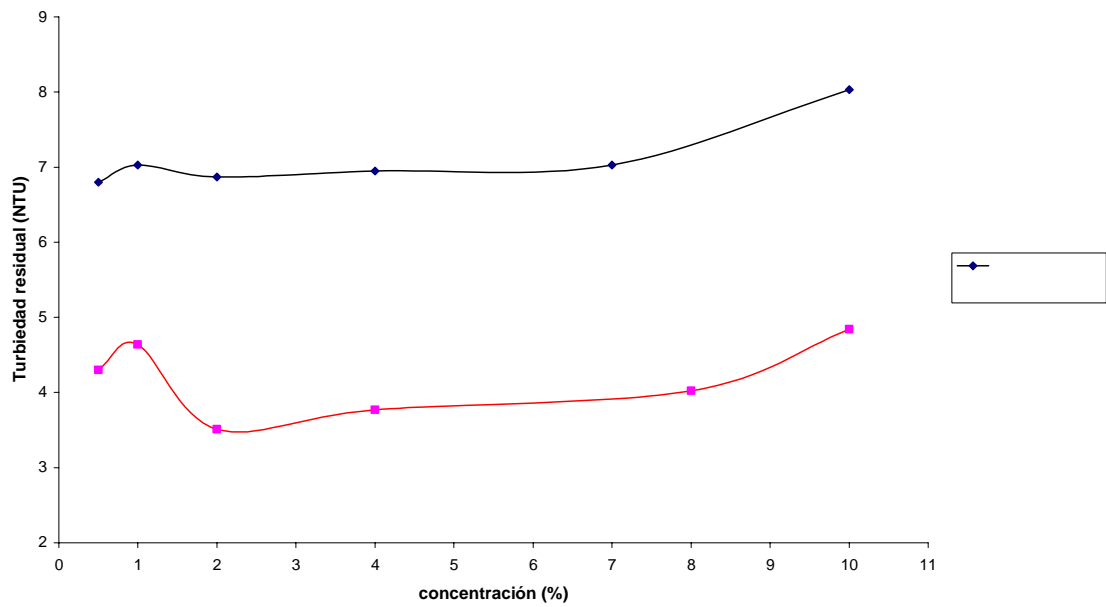


Figura 9. Determinación de la concentración óptima del pac-PQP y del Quiprahc-Q4c

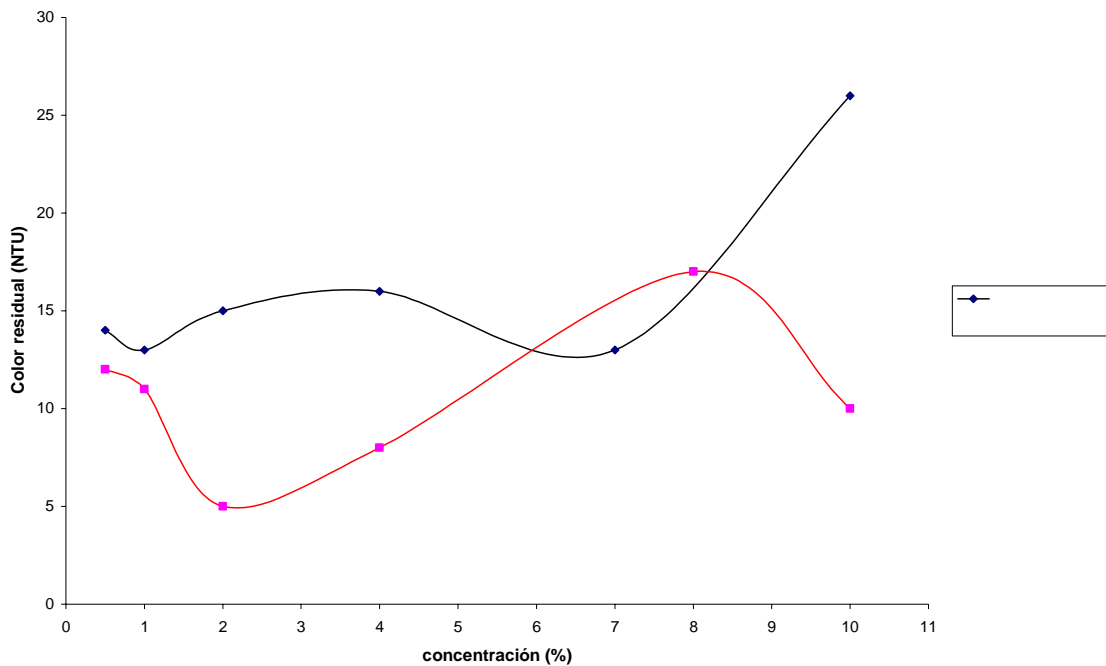


Figura 10. Determinación de la concentración óptima según el color

El agua con que se trabajó para el pac-Férrico tenía una turbiedad de 13 NTU y un color de 46 UPC, mientras que el agua para el pac-PQP y el Quiprahc-Q4c tenía una turbiedad de 52 NTU y un color de 27 UPC, esto indica la diferencia en los valores de turbiedad entre las figuras 9 y 10.

La concentración óptima para el pac-férrico fue 1% al igual que para el sulfato de aluminio. Todos los valores de concentración ensayados dieron un color residual de cero para este coagulante.

Para el pac-PQP la concentración óptima fue del 2%, según la turbiedad y 7% según el color, pero el valor tomado fue el de 2%. En el caso del Quiprahc-Q4c el valor de la concentración fue 2%, el mismo para el color que para la turbiedad.

4.1.3 Determinación De Parámetros Óptimos De Coagulación-Floculación

4.1.3.1 Tiempo óptimo de mezcla rápida

En las figuras 12 y 13 se presentan los resultados para la determinación del tiempo óptimo de mezcla rápida, para un agua con un valor de turbiedad de 100 NTU y de color 137 UPC, la velocidad de agitación para esta prueba fue 100 rpm. Los resultados de estas pruebas para otras muestras de agua cruda, se presentan en el anexo 6

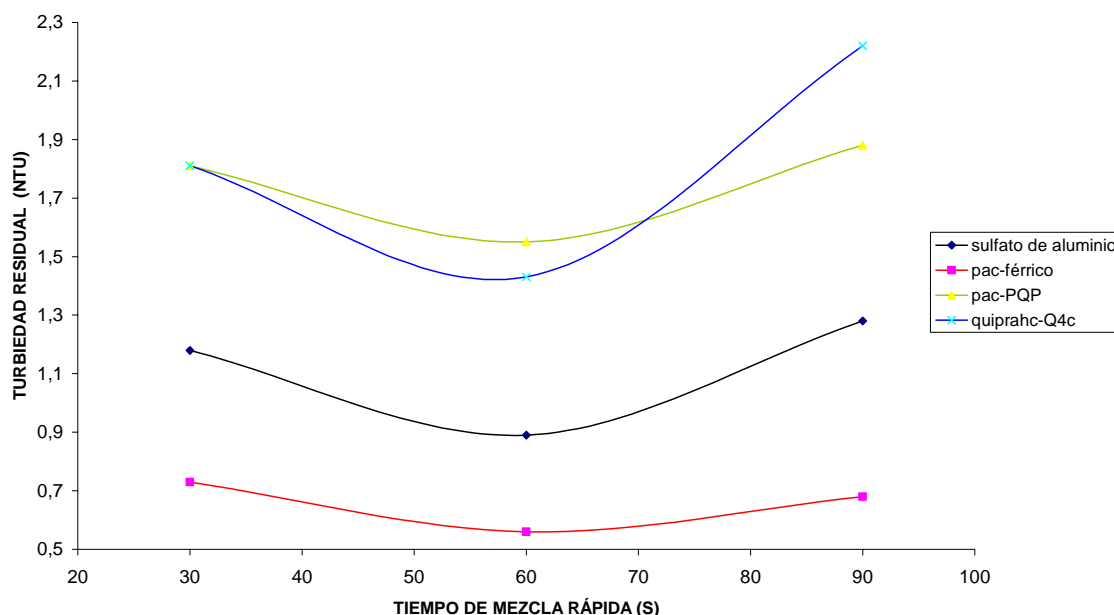


Figura 11. Determinación del tiempo de mezcla rápida de acuerdo a la turbiedad

El tiempo de mezcla rápida para todos los coagulantes, en todas las muestras de agua estudiadas, fue 60 segundos, tanto para turbiedad residual como para color residual. Las Turbiedades que se trabajaron fueron: 19,6, 52,3, y 100 NTU.

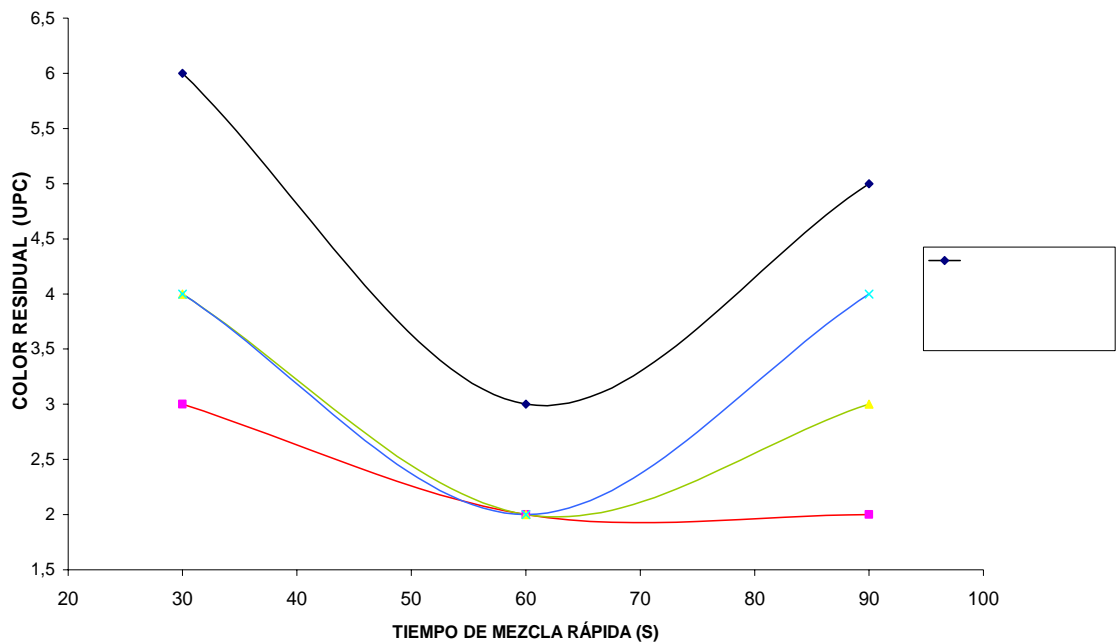


Figura 12. Determinación del tiempo de mezcla rápida de acuerdo al color

4.1.3.2 Determinación de tiempos y gradientes óptimos de floculación

En el anexo 7 se muestran los resultados de la determinación del tiempo y gradiente óptimo de floculación. Para este ensayo se analizaron cuatro muestras de agua con diferentes valores de turbiedad y color.

Los valores de gradientes ensayados fueron los siguientes:

velocidad de agitación (rpm)	Gradiente (S^{-1})
20	14
25	18,5
30	23,5
40	33
55	50

Los valores de gradientes correspondientes a cada velocidad de rotación se determinaron a partir de una curva de gradiente vs. Velocidad de rotación desarrollada por la compañía PHIPPS & BIRD. (Anexo 2)

El gradiente de velocidad correspondiente a 55 rpm deterioró los flocs formados, por lo tanto produce los valores de turbiedad residual más altos, mientras que el gradiente con el cual en todos los casos se produce el menor valor de turbiedad residual, es el correspondiente a una velocidad de entre 20 y 30 rpm, pero el valor de 20 rpm no se adoptó como el óptimo en ningún caso ya que con esta velocidad de rotación, Los flocs formados se sedimentaron durante el periodo de floculación, lo cual, de ocurrir en la planta podría resultar en la ruptura de las paletas de agitación.

Turbiedad (NTU)	sulfato de aluminio		pac-férrico		pac-PQP		Quiprahc-Q4c	
	Tiempo (min)	G (rpm)	Tiempo (min)	G (rpm)	Tiempo (min)	G (rpm)	Tiempo (min)	G (rpm)
18	33	30	29	30	---	---	20	30
40,1	27	30	20	30	---	---	---	---
75	27	30	20	30	24	25	25	25
115	30	30	28	30	24	30	29	30

En la tabla anterior se presentan los tiempos y gradientes óptimos para cada coagulante en cada muestra analizada. Con estos valores y debido a la similitud de los mismos, se halló un promedio para determinar el tiempo y gradiente óptimo para cada coagulante (tabla 7)

Tabla 7. Tiempos y gradientes óptimos para sulfato y policloruro de aluminio.

Coagulante	Tiempo óptimo (min)	Gradiente óptimo
sulfato de aluminio	29	30 rpm (23,5 S ⁻¹)
pac-férrico	24	30 rpm (23,5 S ⁻¹)
pac-PQP	24	28 rpm (21,5 S ⁻¹)
Quiprahc-Q4c	25	29 rpm (22,5 S ⁻¹)

4.1.4 Evaluación de la eficiencia de los ayudantes de coagulación

Esta prueba se realizó para cuatro muestras de agua con diferentes valores de turbiedad, en la forma que se describió en el capítulo anterior; Los resultados de estos ensayos se presentan en el anexo 8, a partir de estos se determinaron las mejores proporciones de polielectrolito-coagulante para cada turbiedad, obteniéndose los siguientes valores promedios para cada coagulante:

Tabla 8. Porcentajes de reemplazo de coagulante usando polielectrolito

coagulante	Porcentaje de reemplazo (%)
Pac-férrico	25.96
Pac-PQP	22.94
Quiprahc-Q4c	19.41

Los porcentajes de reemplazo fueron hallados bajo la suposición de que una parte de polielectrolito equivale a diez partes de coagulante, esta suposición se empleó al momento de variar las proporciones de polielectrolito-coagulante.

4.1.5 Determinación De La Velocidad De Sedimentación De Las Partículas

Esta prueba se realizó para tres muestras de agua con diferentes valores de turbiedad, en la Figura 18 se muestran los resultados para una de ellas, los demás se encuentran en el anexo 9.

En todos los casos se presentó para todos los coagulantes, el mismo comportamiento que se observa en la figura 18; El pac-férrico presentó la mayor velocidad de sedimentación, seguido del sulfato de aluminio y por último del pac-PQP y del Quiprahc-Q4c los cuales presentaron un comportamiento muy similar.

Estos últimos dos coagulantes tienen una velocidad de sedimentación lenta, sin embargo después de un periodo de sedimentación de unos 25 minutos estos alcanzan un porcentaje de remoción cercano al de los demás coagulantes.

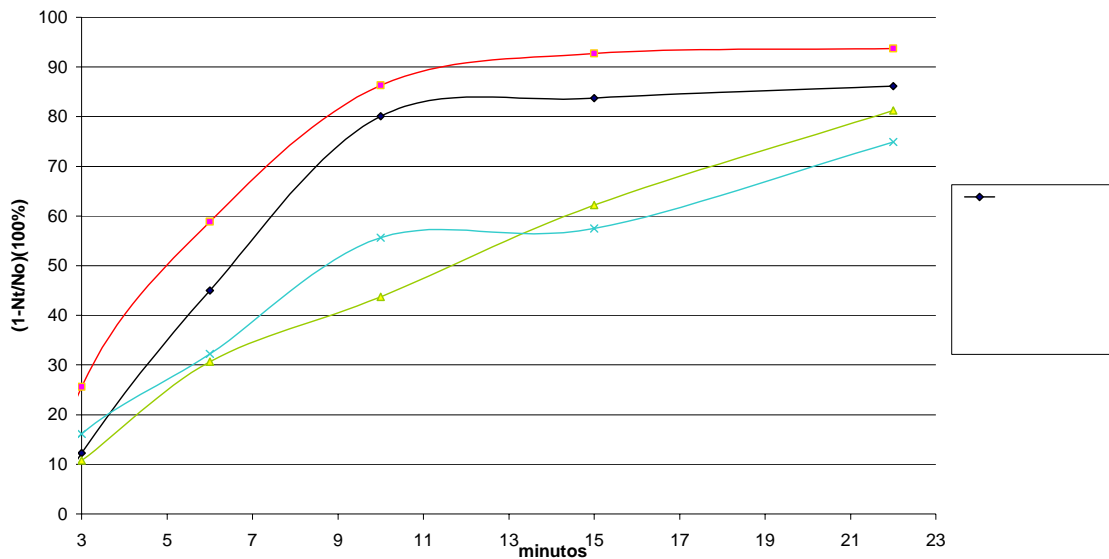


Figura 13. Velocidad de sedimentación para todos los coagulantes

4.1.6 Determinación De La Influencia Del pH En La Coagulación

Para esta prueba se trabajó con dos muestras de agua de diferentes turbiedades, cuyos resultados representan en el anexo 10. En los resultados de esta prueba, se determinaron los intervalos de pH que se muestran en la tabla 9 en los cuales cada coagulante tiene la mejor remoción de turbiedad y color.

Tabla 9. Intervalos de pH óptimos de coagulación para cada coagulante

coagulante	Intervalo óptimo de pH
Sulfato de aluminio	7.5 – 8.5
Pac-férrico	6.5 - 9
Pac-PQP	7.5 - 9
Quiprahc-Q4c	7 – 8.5

El pac-férrico fue el coagulante que trabajó en un intervalo más amplio de pH, lo cual significa que para cualquier tipo de agua cruda que llegue a la planta este trabajará en forma adecuada.

Debido a que el pH del agua cruda osciló a lo largo le periodo de experimentación entre 7.52 y 7.92 unidades, no hubo necesidad de ajustar el pH de esta ya que todos los coagulantes presentaron un intervalo óptimo de pH mayor al del agua cruda.

4.1.7 Determinación de la influencia de la dosis de coagulante en el pH y la alcalinidad final

Para esta prueba se trabajó con seis muestras de agua diferentes Debido a la importancia de esta prueba, ya que esta indica si existe reducción o eliminación del consumo de alcalinizantes en la planta.

Los resultados de esta prueba, los cuales se presentan en el anexo 11, fueron en todos los casos iguales para todos los coagulantes. El sulfato de aluminio fue el coagulante con mayor influencia en el pH final, mientras que el pac-PQP y el Quiprahc-Q4c tienen una influencia muy pequeña en el pH final, por lo cual con estos dos coagulantes, el consumo de cal en la planta se puede eliminar totalmente en temporadas de baja turbiedad.

El pH final menor a 7, el cual indica que se debe aplicar cal al agua para subir su pH, se alcanza para los dos coagulantes líquidos, cuando las dosis son mayores a 60 ppm y para el pac-férrico cuando la dosis es mayor de 30 ppm. A partir de la tabla 5 se predijeron los valores de turbiedad para los cuales las dosis de estos coagulantes seria mayor a los valores mencionados, y con los datos diarios de operación de la planta la flora para los años 2003, 2004, 2005

(ver anexo 12), se determinaron los días del año en los que sería necesario aplicar cal, si se usaran estos coagulantes.

El consumo de cal que habría con cada coagulante, en cada uno de estos días se tomó igual al consumo de cal para el sulfato de aluminio reportado en los datos diarios de operación de la planta la flora. Estos resultados se encuentran en el anexo 13.

4.1.8 Volumen De Lodos Producidos

Esta prueba se realizó para cinco muestras de agua diferentes, con valores de turbiedad desde 18 hasta 190 NTU, los resultados para cada muestra se encuentran en el anexo 14.



Figura 14. Determinación del volumen de lodos producidos utilizando conos Imhoff.

En todos los casos el volumen de lodos producidos fue menor para el sulfato de aluminio, y el pac-férrico fue el coagulante que produjo la mayor cantidad de lodos, sin embargo no se puede decir con certeza cuantas veces es mayor la producción de lodos para los tres policloruros, ya que esta determinación es muy subjetiva pues no todos los lodos se compactan con la misma rapidez y al momento de pasar los lodos de las jarras a los conos, esto se agitan y pierden compactación.

4.1.9 Determinación De Aluminio Residual y cloruros

A continuación se muestran los resultados para una de las seis muestras analizadas, cuya turbiedad, color y pH fueron: 29.7 NTU, 72 UPC y 7.78 respectivamente.

coagulante	Aluminio residual mg/L Al
Sulfato de aluminio	0,08
pac- Férrico	0,06
pac-PQP	0,05
quiprahc-Q4c	0,05

Los resultados de esta prueba, presentados en el anexo 14, mostraron para todas las muestras analizadas, excepto en este caso el mismo comportamiento: El pac férrico y el pac-PQP fueron los coagulantes que dejaron menos aluminio residual en el agua mientras que el sulfato de aluminio y el Quiprahc-Q4c presentaron los valores de aluminio residual mas altos, sin embargo estos nunca exceden el limite establecido en el decreto 475 de 1998.

En la tabla 10 se muestran las concentraciones de cloruros para una muestra de agua cruda y tratada. En todos los casos se cumplió el límite de concentración de cloruros según el decreto 475 aun para una dosis de 100 ppm de coagulante.

Tabla 10. Concentración de cloruros en agua tratada y agua cruda

muestra	coagulante	mg/L Cl⁻
agua cruda		1,38
agua tratada	sulfato de aluminio	2,06
agua tratada	pac-Férrico	5,68
agua tratada	pac-PQP 20 ppm	5,79
agua tratada	pac-PQP 100 ppm	17,08

4.1.10 Análisis de metales

En esta prueba se hicieron determinaciones de diez metales en tres muestras de agua diferentes, estos resultados se presentan en el anexo 15. Los únicos metales detectados fueron: Fe, Zn, As y Cu; y en todos los casos estos estuvieron en cantidades menores a las máximas permitidas por el decreto 475 (ver anexo 3)

Lo anterior indica la factibilidad del uso de cualquiera de los tres policloruros, especialmente del pac-PQP, desde el punto de vista de la nocividad, ya que estos no representan riesgo para la salud humana.

Para los análisis de metales en lodos⁽¹⁴⁾ se hicieron determinaciones de nueve metales, en las cuales se obtuvieron los siguientes resultados:

muestra	metal : Fe (mg/Kg lodo seco)	metal : Zn (mg/Kg lodo seco)	metal : Mn (mg/Kg lodo seco)
sulfato	28400	532	710
pac-férrico	24200	454	586
pac-PQP	25200	306	656
quiprahc-Q4c	28400	306	706

metal : Cu	no se detectó en ninguna muestra	L.D : 0.005 mg/L
metal : Hg	no se detectó en ninguna muestra	L.D : 0.0002 mg/L
metal : Se	no se detectó en ninguna muestra	L.D : 0.0002 mg/L
metal : Pb	no se detectó en ninguna muestra	L.D : 0.002 mg/L
metal : Cr	no se detectó en ninguna muestra	L.D : 0.005 mg/L
metal : Cd	no se detectó en ninguna muestra	L.D : 0.0006 mg/L

Los únicos metales detectados fueron Fe, Zn y Mn. Los cuales no tienen una concentración máxima permitida ya que estos no son Sustancias de interés sanitario de acuerdo al artículo 74 del decreto 1594 de 1984, ver anexo 16.

Se observó que los policloruros presentaron valores menores de concentración de estos metales, lo cual desde el punto de vista de las reglamentaciones del decreto 1594, los hace factibles de ser utilizados en la planta.

4.2 EVALUACIÓN TÉCNICA DEL POLICLORURO DE ALUMINIO

Esta evaluación se hizo de acuerdo a los resultados obtenidos en las anteriores pruebas, y a partir de esta se determinó la viabilidad del cambio del sulfato de aluminio únicamente desde el punto de vista técnico y ambiental.

4.2.1 Almacenamiento: Los policloruros líquidos se deben almacenar en tanques o contenedores de plástico, en lugares frescos con poca humedad y ventilación, después de 40°C se vuelven inestables. El pac-férrico se debe almacenar en un lugar seco y con ventilación ya que este es altamente higroscópico.

Si se implementa el pac-PQP o el Quiprahc-Q4c, Habrá un costo inicial en el proyecto, debido a su almacenamiento.

4.2.2 Forma de dosificación: para el pac-férrico se puede utilizar el sistema de dosificación existente en la planta, pero para los dos coagulantes líquidos se debe utilizar un sistema de tanque y bombas de desplazamiento positivo para su dosificación, lo cual incrementa el costo del nuevo proyecto.

4.2.3 Parámetros operacionales para cada coagulante: Debido a que los parámetros obtenidos para todos los coagulantes son tan similares, este factor hace viable el cambio de coagulante ya que no representa cambios en la infraestructura de la planta, y como los tiempos de floculación para el policloruro de aluminio son iguales o menores a los del sulfato, se favorece el tratamiento de un caudal mayor.

4.2.4 Reducción en el consumo de coagulante: La reducción en el consumo de coagulante al usar el policloruro de aluminio, como lo muestra la tabla 6, Hace viable el cambio de coagulante.

4.2.5 Reducción en consumo de cal y de polielectrolito: los anexos 11 y 13 muestran que con el uso de policloruro de aluminio se reduce el consumo de cal y polielectrolito, lo cual técnicamente hace viable el cambio del sulfato de aluminio por este coagulante.

4.2.6 Efectividad en el rango de pH: como se muestra en la tabla 8, el policloruro de aluminio trabaja en un rango de pH más amplio, lo cual garantiza que para cualquier valor de pH en el agua cruda este trabajara adecuadamente, lo cual hace viable el proyecto.

4.2.7 Carreras de filtración: como se muestra en la figura 13 y en el anexo 9 Las carreras de filtración duraran más con el pac-férrico ya que debido a su velocidad de sedimentación más alta que la del sulfato aluminio, el agua llegara a los filtros con menor turbiedad y color, lo cual disminuye la velocidad con que aumenta la caída de presión en los filtros.

4.2.8 Parámetros de calidad del agua tratada: Los parámetros evaluados para el agua tratada con los tres policloruros de aluminio, de acuerdo al decreto 475 de 1998, fueron: turbiedad, color, pH, alcalinidad, aluminio residual, cloruros y metales pesados. En todos los casos estos parámetros tuvieron un cumplimiento del 100%, lo cual hace viable el proyecto.

4.2.9 Producción de lodos: Como se mencionó en la sección 4.1.8, la cantidad de lodos producida con el policloruro de aluminio es mayor que con el sulfato de aluminio, lo cual es una desventaja desde el punto de vista técnico.

También se hicieron análisis de metales en lodos, y se encontró que las concentraciones de estos metales cumplen con lo estipulado en el decreto 1594 de 198

4.2.10 Corrosión: El policloruro de aluminio tiene mayor poder corrosivo que el sulfato de aluminio (estudio), por lo cual se debe tener cuidado con el tanque de almacenamiento (en el caso de implementarse alguno de los policloruros líquidos), este debe estar recubierto con un material anticorrosivo. Si se implementa el pac-férrico, una opción es recubrir los dosificadores con pintura anticorrosiva.

4.3 ANÁLISIS ECONÓMICO

El consumo de productos químicos que habría con el uso de cada coagulante se predijo de la siguiente manera: el consumo de policloruro de aluminio se determinó al dividir el consumo de sulfato de aluminio entre las razones de reemplazo obtenidas en la tabla 6; el consumo de cal para cada coagulante se determinó como se describió en la sección 4.1.7 y el consumo de polielectrolito se determinó multiplicando al consumo de cada coagulante hallado, por los porcentajes de reemplazo de coagulante obtenidos en la tabla 8. El consumo de policloruro de aluminio se volvió a determinar disminuyendo su primer valor en el porcentaje de reemplazo anterior, para que se completara el 100% de la dosis total. (Ver Anexo 13).

Después de tener los consumos de productos químicos para todos los coagulantes, se calculó el costo.

Tabla 11. Costos anuales de tratamiento para sulfato y policloruro de aluminio

coagulante	costo anual de productos químicos (\$)		
	año: 2003	año: 2004	año: 2005
sulfato de aluminio	263308098	245446575	103396310
Pac-Férrico	261879482	245303223	105497015
Pac-PQP	321731138	302011187	129858440
Quiprahc-Q4c	357388735	335482802	144237660

La tabla anterior muestra que desde el punto de vista económico no es viable utilizar policloruro de aluminio líquido en la planta la flora, pero si es viable utilizar el policloruro sólido, ya que el costo por consumo de productos químicos usando este coagulante es casi el mismo del sulfato de aluminio y este no requiere inversión inicial en sistema de dosificación, reduce costos al aumentar el tiempo de las carreras de filtración.

Para el año 2005 se tuvieron en cuenta solo los primeros 5 meses del año los cuales se caracterizaron por ser un periodo de poca turbiedad en el agua cruda; durante este periodo el costo para el pac-férrico fue mayor que para el sulfato de aluminio, lo cual muestra que el pac-férrico tiene mejor comportamiento a turbiedades altas.

5. CONCLUSIONES

- El cambio del sulfato de aluminio por el Pac-Férrico en la planta la flora es viable desde el punto de vista económico, técnico y ambiental, mientras que la implementación del Pac-PQP y del Quiprahc-Q4c no lo es, desde el punto de vista económico.
- Para el agua del río tona el policloruro de aluminio presenta una eficiencia de remoción de turbiedad y color en el agua cruda mucho mayor que la del sulfato de aluminio, lo cual se debe a que el poder de coagulación-floculación del policloruro de aluminio es mayor
- El policloruro de aluminio, presenta las siguientes ventajas sobre el sulfato de aluminio: reducción en el consumo de coagulante, cal y polielectrolito, Aumenta el tiempo de las carreras de filtración, Actúa eficazmente en un rango de pH mas amplio que para el sulfato de aluminio, Y su dosificación para el caso del Pac-Férrico es mas sencilla que con el sulfato, ya que este se disuelve mucho mas fácil en el agua.
- Los parámetros operacionales óptimos para cada coagulante, y con los cuales se recomienda trabajar en pruebas de laboratorio fueron el tiempo de mezcla rápida, tiempo de floculación y el gradiente de floculación. Para el sulfato de aluminio estos parámetros son: 1min, 29 min y 30 rpm (23.5 S^{-1}) respectivamente; para el pac-férrico: 1 min, 24 min y 30 rpm (23.5 S^{-1}); para el pac-PQP: 1 min, 25 min y 28 rpm (21.5 S^{-1}) y para el Quiprahc-Q4c: 1 min, 25 min y 29 rpm (22.5 S^{-1}).

6. RECOMENDACIONES

- Este trabajo es un estudio preliminar para establecer la viabilidad de la implementación del policloruro de aluminio en la planta la flora, el cual se debe continuar con la realización de las pruebas en campo, para que la evaluación técnica, económica y ambiental sea lo más acertada posible.
- Aunque el policloruro de aluminio presenta ventajas técnicas sobre el sulfato de aluminio, su implementación será muy poco rentable debido a su gran costo con respecto al sulfato de aluminio, a pesar de esto, si el PAC se implementa, la rentabilidad puede aumentar con el tiempo, ya que si este empieza a darse a conocer en el país y a implementarse en las plantas de tratamiento de agua de Colombia su precio tenderá a bajar por la mayor oferta por parte de los proveedores.
- El PAC se puede adoptar como un coagulante alternativo en la planta de tratamiento en periodos de alta turbiedad.

BIBLIOGRAFIA

(1) ACUEDUCTO METROPOLITANO DE BUCARAMANGA. Manual de operación de la planta la flora. Sección: 1.1, 2.1, 2.3., 2.5, 2.6, 2.7, 4.2, 4.3.24

(2) ACUEDUCTO METROPOLITANO DE BUCARAMANGA. Ensayos de tratabilidad de lodos. Pág. 1

(3) AMERICAN WATER WORKS ASOCIATION (AWWA). Calidad y tratamiento del agua. 5 ed. Madrid. Mc Graw-Hill. 2002, Pág: 297-298, 363, 917-921

(4) APHA, AWWA, WEF. Standard methods for the examination of water and wastewater. 20 ed. 1998, pág :(3-1) – (3-18), (3-56) – (3-59), (4-68)

(5) ARBOLEDA VALENCIA, Jorge. Teoría y práctica de la purificación del agua. 3 ed. Bogota. Asociación colombiana de ingeniería sanitaria y ambiental"ACODAL". Mc Graw Hill. 2000. tomo 1, Pág.: 11,15, 16, 52,54 72, 163-192

(6) ARBOLEDA VALENCIA, Jorge; BAYONA MONCADA, Hernando. Determinación práctica de los gradientes de velocidad en el proceso de floculación del agua. Pág. 5-7.

(7) BERÓN, Fabiola. Uso de Cloruro Férrico y Sulfato de Aluminio en el río Cauca como coagulante Primario. Santiago de Cali. Seminario internacional: Actualización y nuevas tendencias en potabilización de agua. ACODAL, 2004. Pág.: 5-10, 13.

(8) COX, Charles R. Práctica y vigilancia de las operaciones de tratamiento de agua. 1 ed. La Habana. Editorial científico-técnica. 1971. Pág. 58-64

(9) DI BERNARDO, Luiz; CAMPOS, Jose. R. Uso de polímeros naturales en el tratamiento de agua para abastecimiento. 2 versión en español. Pág. 15, 28

(10) H. Tsuji et al. Trial application of PAC at the Kunishima water works, Osaka. 19th Nacional Waters Works Research Symposium, 1968.

(11) INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS. Norma técnica colombiana, Productos químicos. Policloruro de aluminio líquido para tratamiento de agua. Primera actualización. Bogotá D.C. ICONTEC.2001. Pág. 1-2. NTC 4760.

(12) KEMMER, Frank N; McCallion, John. Manual Del agua, tratamiento y aplicaciones. 1 ed. México. Nalco Chemical Company. Mc Graw Hill, 1989. Pág: 8-2

(13) MINISTERIO DE SALUD. Decreto numero 475 de 1998. Republica de Colombia. Capítulos I y II.

(14) MINISTERIO DE SALUD. Decreto 1594 de 1998. Republica de Colombia. Capítulos I y IV

(15) MONTEJO, E. nuevos conceptos en los procesos de coagulación-floculación de agua cruda. Puerto la cruz. Universidad de oriente, escuela de ingeniería y ciencias aplicadas. 1989. Pág.:66, 67, 69,70

(16) PINTO, Deiva Sofía; PRADA ARIZA, Lizeth. Evaluación de la planta de tratamiento la flora. Bucaramanga: Universidad industrial de Santander, 1996. Pág.:35,36

Anexos

Anexo 1

FICHAS TÉCNICAS DEL POLICLORURO DE ALUMINIO UTILIZADO

EXCHEM GROUP INC.

589 HEYING PLACE, DAKLAND CA USA
EXP. N4 INORGANIC CHEMICALS

FICHA TECNICA Y CERTIFICADO DE ANALISIS PAC-A

Nombre Técnico Policloruro de Aluminio
Presentación Granular
Empaque Sacos de 25 kilos.

Especificaciones:

Relative density g/cm³(20°C) ≥ -

Ingrediente Activo:

Al₂O₃ ≥ 30%
Fe₂O₃ ≥ 5%
Basicity 55.0-90.0%
PH (1% water solution) 5 %
SO₄²⁻ ≤ 9.8%
Ammoniacal Nitrogeno ≤ 0.09%
As ≤ 0.0005%
Mn ≤ 0.045%
Cr⁶⁺ ≤ 0.0015%
Hg ≤ 0.00002%
Pb ≤ 0.003%
Cd ≤ 0.0006%

THE TURBIDITY OF LINTREATED WATER	ADDING PROPORTION (KG/KT WATER)
10-50	2-5
50-200	3-6
200-500	4-7
500-1000	6-9
1000	7-12

Ficha técnica pac-férrico

POLICLORUROS DE ALUMINIO PQ-PAC

Referencia	Apariencia	% Al ₂ O ₃	% Al	% Cl	Relación Al:Cl	Densidad
PQPAC 01	Amarillo Transparente	19 ± 1.0	10.06 ± 0.53	11.56 ± 0.61	0.87 ± 0.1	1.32 ± 0.01
PQPAC 02	Amarillo Transparente	10.25 ± 0.25	10.25 ± 0.25	8.0%min.	1.33min.	1.2 - 1.3

*Otras referencias se fabrican bajo pedido.

PQPAC: Los Policloruros de Aluminio PQPAC, son distribuidos a granel mediante carro tanques o en contenedores plásticos de 1000 kilos o en tambores de 55 galones. Estos se deben almacenar en bodegas amplias y ventiladas con temperatura ambiente entre 0°C y 40°C.

Seguridad y manejo: En general todos los polímeros elaborados y distribuidos por P.Q.P. no son tóxicos, pero se deben manejar como productos ligeramente corrosivos, no se debe tener contacto directo, se debe emplear equipo básico de seguridad: guantes de caucho, overol y gafas de seguridad. Evite el contacto directo con la piel, ojos y membranas mucosas. En caso de contacto, lavar con abundante agua. No debe ingerirse, en caso de derrame, se debe absorber con material inerte o arcilla.

Ficha Técnica

PROPIEDADES FISICO-QUÍMICAS

APARIENCIA: Líquido ámbar o transparente.

OLOR: Característico.

SOLUBILIDAD EN AGUA: Soluble.

SOLUBILIDAD EN SOLVENTES ORGANICOS: Insoluble en solventes aromáticos.

DENSIDAD: 18°C (g/ml), 1.32 +/- 0.004.

VISCOSIDAD: 20°C <50 mPA. S.

PUNTO DE EBULLICIÓN: 101.3 KPA, 100°C.

pH: 3...4 (1%M solución, ASTM D1172, ISO 4316).

CONCENTRACIÓN Al₂O₃ (%): 22.6 +/- 0.5.

ESTABILIDAD Y REACTIVIDAD

TEMPERATURA DE DESCOMPOSICIÓN: > 100°C.

ESTABILIDAD EN CONTRA DE ÁCIDOS: Limitada.

ESTABILIDAD EN CONTRA DE BASES: Limitada.

Estabilidad: Estable en condiciones normales de uso y operación.

Productos peligrosos de descomposición: Cuando se calienta hasta descomposición, se emiten gases tóxicos de cloruro de hidrógeno. Reacciona con ácidos, bases fuertes o metales para producir calor, gases tóxicos y gases corrosivos. La descomposición por oxidación de metales produce gases tóxicos de cloruro y gas de hidrógeno explosivo.

Polimerización peligrosa: No ocurre.

EFECTOS POTENCIALES PARA LA SALUD

RUTAS DE ENTRADA: Por contacto con la piel o mucosas y por ingestión.

INGESTION: Corrosivo, tomarlo puede causar dolor inmediato y quemaduras en la boca, garganta, esófago y tracto intestinal. Puede causar náusea, vómito y diarrea.

CONTACTO CON LA PIEL: Puede causar enrojecimiento, soluciones calientes causan descolorimiento de la piel.

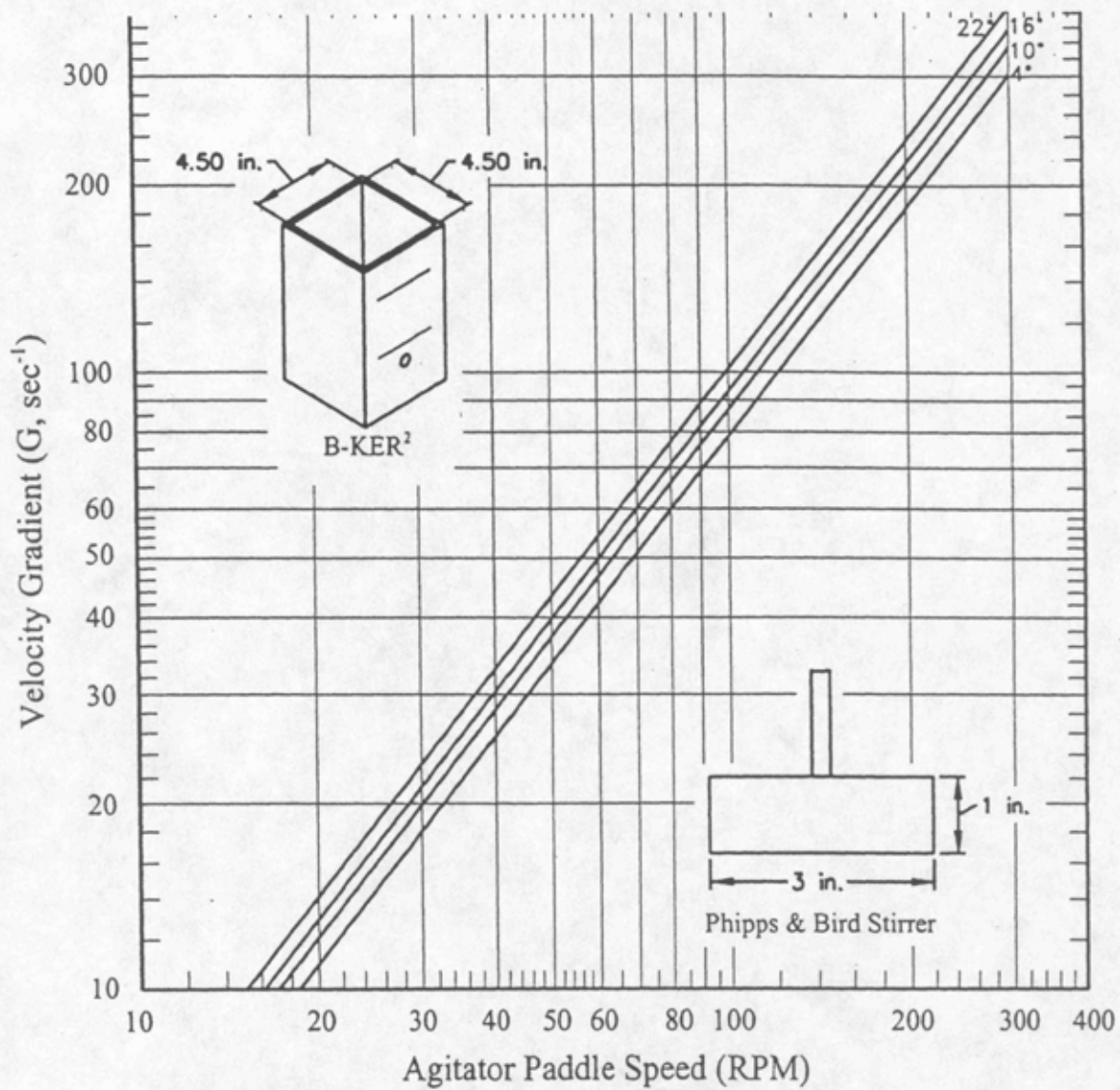
CONTACTO CON LOS OJOS: Corrosivo, el líquido es irritante y puede causar daño en los ojos.

Carrera 15 N° 5 -40 Tel: (5)5652261 Fax: (5)5652502 Cel: 3157423696, Email soamco@hotmail.com
NIT 13717211-3. Aguachica (Cesar) Colombia.

Ficha técnica QUIPRAHC-Q4c

Anexo 2

DETERMINACIÓN DE GRADIENTES EN JARRAS CUADRADAS DE 2 L.



Velocity Gradient vs. Agitator Speed for a 2-liter Square Beaker (B-KER²), Using a Phipps & Bird Stirrer. Water samples are at various temperatures ($^{\circ}\text{C}$).

Anexo 3

CRITERIOS ORGANOLÉPTICOS, FÍSICOS Y QUÍMICOS DE LA CALIDAD
DEL AGUA POTABLE SEGÚN EL DECRETO 475 DE 1998

CAPITULO III

Normas organolépticas, físicas, químicas y microbiológicas de la calidad del agua potable

Artículo 6º. Las normas organolépticas, físicas, químicas y microbiológicas de la calidad del agua potable establecidas en el presente decreto rigen para todo el territorio nacional y deben cumplirse en cualquier punto de la red de distribución de un sistema de suministro de agua potable.

Normas de calidad organolépticas, físicas y químicas.

Artículo 7º. Los criterios organolépticos y físicos de la calidad del agua potable son los siguientes:

CARACTERÍSTICAS	EXPRESADAS EN	VALOR ADMISIBLE
Color Verdadero	Unidades de Platino Cobalto (UPC)	< 15
OLOR Y SABOR		Aceptable
Turbiedad	Unidades nefelométricas de turbidez (UNT)	< 5
Sólidos Totales	mg/L	< 500
Conductividad	microhms/cm	50 - 1000
Sustancias Flotantes		Ausentes

Artículo 8º. Los criterios químicos de la calidad del agua potable son los siguientes:

a) Criterios para elementos y compuestos químicos, diferentes a los plaguicidas y otras sustancias, que al sobrepasar los valores establecidos tienen reconocido efecto adverso en la salud humana:

CARACTERÍSTICAS	EXPRESADAS COMO	VALOR ADMISIBLE mg/L
Aluminio	Al	0.2
Antimonio	Sb	0.005
Arsénico	As	0.01
Bario	Ba	0.5
Boro	B	0.3
Cadmio	Cd	0.003
Cianuro libre y disociable	CN ⁻	0.05
Cianuro total	CN ⁻	0.1
Cloroformo	CHCl ₃	0.03
Cobre	Cu	1.0
Cromo Hexavalente	Cr ⁺⁶	0.01

Fenoles totales	Fenol	0.001
Mercurio	Hg	0.001
Molibdeno	Mo	0.07
Níquel	Ni	0.02
Nitritos	NO ²	0.1
Nitratos	NO ³	10
Plata	Ag	0.01
Plomo	Pb	0.01
Selenio	Se	0.01
Sustancias activas al azul de metileno	ABS	0.5
Grasas y aceites	-	Ausentes
Trihalometanos Totales	THMs	0.1

b) Criterios de calidad química para características con implicaciones de tipo económico o acción indirecta sobre la salud.

CARACTERISTICAS	EXPRESADAS COMO	VALOR ADMISIBLE mg/L
Calcio	Ca	60
Acidez	CaCO ³	50
Hidróxidos	CaCO ³	<LD
Alcalinidad Total	CaCO ³	100
Cloruros	Cl ⁻	250
Dureza Total	CaCO ₃	160
Hierro Total	Fe	0.3
Magnesio	Mg	36
Manganeso	Mn	0.1
Sulfatos	SO ₄ ⁻²	250
Zinc	Zn	5
Fluoruros	F ⁻	1.2
Fosfatos	PO ₄ ⁻³	0.2

Artículo 10. El valor para el potencial de hidrógeno, pH, para el agua potable deberán estar comprendido entre 6.5 y 9.

Anexo 4

DETERMINACIÓN DE DOSIS ÓPTIMAS

parámetros iniciales	valor
turbiedad	5 NTU
color	10 UPC
pH	7,69
mezcla rápida	
velocidad	100 rpm
tiempo	1 min
floculación	
velocidad	40 rpm
tiempo	15 min
sedimentación	
tiempo	15 min

sulfato de aluminio			
Jarra	Dosis (ppm)	Turbiedad (NTU)	Color final (UPC)
1	10	4,59	10
2	12	4,75	8
3	14	3,61	2
4	16	2,83	2
5	18	2,8	3
6	20	3,33	2

pac-férrico			
Jarra	Dosis (ppm)	Turbiedad (NTU)	Color final (UPC)
1	10	3,23	2
2	12	3,19	2
3	14	1,56	1
4	16	1,21	1
5	18	1,34	1
6	20	1,38	2

pac-PQP			
Jarra	Dosis (ppm)	Turbiedad (NTU)	Color final (UPC)
1	10	3,8	7
2	12	3,54	3
3	14	4,2	3
4	16	3,77	3
5	18	3,1	4
6	20	3,65	4

Quiprahc-Q4c			
Jarra	Dosis (ppm)	Turbiedad (NTU)	Color final (UPC)
1	10	3,29	10
2	12	3,42	8
3	14	3,18	2
4	16	3,15	2
5	18	3,2	3
6	20	3,56	2

parámetros iniciales

turbiedad 18 NTU
 color 38 UPC
 pH 7,63

sulfato de aluminio				
Jarra	Dosis (ppm)	Turbiedad (NTU)	Color final (UPC)	pH final
1	20	11,2	>30	6,98
2	24	11,1	25	6,84
3	28	7,93	17	6,79
4	32	6,96	10	6,79
5	36	6,66	7	6,72
6	40	7,19	6	6,7

pac-férrico				
Jarra	Dosis (ppm)	Turbiedad (NTU)	Color final (UPC)	pH final
1	13	4,73	19	7,23
2	17	2,96	6	7,14
3	22	1,86	5	7,12
4	27	1,4	6	7,04
5	32	1,31	2	6,94
6	37	1,65	4	6,9

pac-PQP				
Jarra	Dosis (ppm)	Turbiedad (NTU)	Color final (UPC)	pH final
1	22	4,11	13	7,25
2	26	4,38	12	7,21
3	30	4,3	7	7,2
4	34	3,69	6	7,14
5	38	2,12	6	7,11

QUIPRAHC -Q4c				
Jarra	Dosis (ppm)	Turbiedad (NTU)	Color final (UPC)	pH final
1	18	3,99	8	7,21
2	22	3,7	8	7,19
3	26	3,47	6	7,19
4	30	3,21	7	7,17
5	34	2,37	7	7,14
6	38	3,16	7	7,03

parámetros iniciales

turbiedad 20.7 NTU

color 72 UPC

pH 7,78

sulfato de aluminio					
Jarra	dosis (ppm)	tiempo floc (min)	tamaño (mm)	Turbiedad (NTU)	color final (UPC)
1	24	----	0.5-0.75 mm	17,8	-----
2	27	2.15 min	0.5-0.75 mm	4,12	16
3	30	2 min	0.5-0.75 mm	4,05	12
4	33	1.30 min	0.5-0.75 mm	2,36	6
5	36	1.40 min	0.5-0.75 mm	2,96	5
6	39	1.50 min	0.5-0.75 mm	3,71	6

pac-férrico					
Jarra	dosis (ppm)	tiempo floc (min)	tamaño (mm)	Turbiedad (NTU)	color final (UPC)
1	10	---	-----	17,7	----
2	15	1.50 min	0.5-0.75 mm	2,94	11
3	20	29 s	1 mm	1,36	5
4	25	20 s	1 mm	1,15	3
5	30	15 s	1-1.5 mm	1,2	2
6	35	15 s	1-1.5 mm	1,48	2

pac-PQP					
Jarra	dosis (ppm)	tiempo floc (min)	tamaño (mm)	Turbiedad (NTU)	color final (UPC)
1	15	----	----	14,6	---
2	20	2.30 min	0.3-0.5 mm	4,25	11
3	25	1.50 min	0.3-0.5 mm	3,76	5
4	30	55 s	0.3-0.5 mm	3,71	5
5	35	45 s	0.3-0.5 mm	4,41	4
6	40	50 s	0.5 mm	3,2	4

Quiprahc -Q4c					
Jarra	dosis (ppm)	tiempo floc (min)	tamaño (mm)	Turbiedad (NTU)	color final (UPC)
1	20	55 s	0.75-1 mm	1,56	3
2	25	40 s	0.75-1 mm	1,43	3
3	30	40 s	0.75-1 mm	1,38	3
4	35	40 s	0.75-1 mm	0,85	4
5	40	1.0 min	0.75-1 mm	0,73	6
6	45	2.26 min	0.75 mm	0,93	2

parámetros iniciales

turbiedad 40.1NTU

color 79 UPC

pH 7,73

sulfato de aluminio						
Jarra	Dosis (ppm)	tiempo floc (min)	tamaño (mm)	Turbiedad (NTU)	color final (UPC)	pH final
1	20	4 min	0,75	3,24	8	7,12
2	23	3.30 min	0.75-1	2,6	6	7,09
3	26	2.13 min	0.75-1	2,48	6	7,06
4	29	2.00 min	0.75-1	2,29	4	6,86
5	32	1.50 min	0.75-1	2,17	4	6,79
6	35	1.20 min	0.75-1	3,03	5	6,77

pac-férrico						
Jarra	Dosis (ppm)	tiempo floc (min)	tamaño (mm)	Turbiedad (NTU)	color final (UPC)	pH final
1	10	4	1	1,61	4	7,34
2	15	1,3	1-1.5	1,31	4	7,26
3	20	0,4	1-1.5	0,56	3	7,26
4	25	0,15	1-1.5	0,43	3	7,14
5	30	0,1	1-1.5	0,61	2	7,03
6	35	0,05	1-1.5	0,65	2	6,93

pac-PQP						
Jarra	dosis (ppm)	tiempo floc (min)	tamaño (mm)	Turbiedad (NTU)	color final (UPC)	pH final
1	10	5	0.3-0.5	3,74	4	7,52
2	15	2,4	0.5-0.75	2,31	3	7,47
3	20	1,5	0.5-0.75	1,75	2	7,39
4	25	1,2	0.5-0.75	1,72	2	7,28
5	30	1,2	0.5-0.75	1,64	2	7,26
6	35	1,2	0.5-0.75	2,46	3	7,2

parámetros iniciales
 turbiedad 52NTU
 color 227 UPC
 pH 7.69

sulfato de aluminio			
Jarra	Dosis (ppm)	Turbiedad (NTU)	color final (UPC)
1	22	36,8	87
2	25	9,73	28
3	28	5	16
4	31	4,6	13
5	34	5,47	14
6	37	5,62	17

pac-férrico			
Jarra	Dosis (ppm)	Turbiedad (NTU)	color final (UPC)
1	20	2,95	7
2	23	2,34	3
3	26	2,17	3
4	29	2,18	3
5	32	1,64	3
6	35	2,07	5

pac-PQP			
Jarra	Dosis (ppm)	Turbiedad (NTU)	color final (UPC)
1	20	7,46	20
2	23	7,84	14
3	26	10,1	12
4	29	7,37	14
5	32	8,47	14
6	35	7,69	14

QUIPRAHC Q4c			
Jarra	Dosis (ppm)	Turbiedad (NTU)	color final (UPC)
1	20	5,65	15
2	24	4,5	12
3	28	4,78	9
4	32	2,54	8
5	36	3,52	9
6	40	4,05	11

parámetros iniciales

turbiedad 75 NTU
 color 102 UPC
 pH 7,51
 alcalinidad 45,4

sulfato de aluminio					
Jarra	Dosis (ppm)	Turbiedad (NTU)	color final (UPC)	pH final	alcalinidad final mg CaCO ₃ /L
1	25	40,6	>50	6,86	-----
2	30	14,8	49	6,73	34,6
3	35	2,23	7	6,63	32,6
4	40	3,66	9	6,61	30,4
5	45	5,69	8	6,48	28,8
6	50	5,53	8	6,45	27,4

pac-férrico					
Jarra	Dosis (ppm)	Turbiedad (NTU)	color final (UPC)	pH final	alcalinidad final mg CaCO ₃ /L
1	13	35,2	>50	7,21	43
2	18	15,1	38	7,1	42,2
3	23	2,7	10	7,03	40,6
4	29	1,77	5	7,01	37,6
5	34	2,61	2	6,89	35,8
6	40	2,35	5	6,82	35

pac-PQP					
Jarra	Dosis (ppm)	Turbiedad (NTU)	color final (UPC)	pH final	alcalinidad final mg CaCO ₃ /L
1	20	40,7	>50	7,31	----
2	25	13,5	35	7,25	42,6
3	30	4,67	23	7,23	41,8
4	35	3,31	10	7,16	39,8
5	40	3,78	6	7,14	38,2
6	45	4,15	4	7,1	37,8

QUIPRAHC -Q4c					
Jarra	Dosis (ppm)	Turbiedad (NTU)	color final (UPC)	pH final	alcalinidad final mg CaCO ₃ /L
1	20	33,3	>50	7,26	43,8
2	25	12,1	41	7,2	42,4
3	30	3,82	15	7,16	41,2
4	35	4,21	11	7,13	40
5	40	2,33	8	7,08	39,2
6	45	3,91	4	7,04	38,4

parámetros iniciales

turbiedad 100 NTU

color 137 UPC

pH 7,52

sulfato de aluminio						
Jarra	dosis (ppm)	tiempo floc (min)	tamaño (mm)	Turbiedad (NTU)	color final (UPC)	pH final
1	28	1	0.75-1	1,3	4	6,89
2	31	1	0.75-1	1,15	4	6,88
3	34	1	0.75-1	1,13	4	6,88
4	37	1	0.75-1	1,2	3	6,87
5	40	1	0.75-1	1,14	3	6,86
6	43	1	0.75-1	1,54	6	6,77

pac-férrico						
Jarra	dosis (ppm)	Tiempo floc (min)	tamaño (mm)	Turbiedad (NTU)	color final (UPC)	pH final
1	15	0,42	0,75	1,63	3	----
2	20	0,3	0.75-1	1,01	0	7,16
3	25	0,26	1-1.5	0,66	0	7,14
4	30	0,26	1-1.5	0,57	0	7,14
5	35	0,25	1-1.5	0,53	0	6,97
6	40	0,2	1-1.5	0,59	0	6,97

pac-PQP						
Jarra	dosis (ppm)	tiempo floc (min)	tamaño (mm)	Turbiedad (NTU)	color final (UPC)	pH final
1	20	1,2	0.5-0.75	1,81	2	7,35
2	25	1,2	0.5-0.75	1,74	1	7,33
3	30	1,12	0.5-0.75	1,51	2	7,32
4	35	1,3	0.5-0.75	1,33	2	7,3
5	40	1,3	0.5-0.75	1,41	1	7,28
6	45	1,3	0.5-0.75	1,41	3	----

Quiprahc-Q4c						
Jarra	dosis (ppm)	tiempo floc (min)	tamaño (mm)	Turbiedad (NTU)	color final (UPC)	pH final
1	20	1,1	0,75	1,86	6	7,24
2	25	1	0,75	1,2	6	7,25
3	30	1	0,75	1,08	4	7,17
4	35	0,44	1	0,86	4	7,09
5	40	0,44	1	0,61	3	7,12
6	45	0,44	1	0,46	2	7,15

parámetros iniciales

turbiedad 190 NTU

color 243 UPC

pH 7,83

sulfato de aluminio					
Jarra	Dosis (ppm)	Turbiedad (NTU)	color final (UPC)	pH final	alcalinidad final mg CaCO ₃ /L
1	40	2,81	6	6,89	45
2	45	1,99	5	6,8	41,8
3	50	1,9	1	6,74	39,6
4	55	1,71	2	6,73	38,4
5	60	1,81	2	6,71	37,2
6	65	1,85	2	6,64	36

pac-férrico					
Jarra	Dosis (ppm)	Turbiedad (NTU)	color final (UPC)	pH final	alcalinidad final mg CaCO ₃ /L
1	15	6,48	3	7,47	51,2
2	25	1,57	0	7,29	50,6
3	35	0,52	0	7,13	48,8
4	45	0,43	0	7,01	45,4
5	55	0,69	0	6,92	41,8
6	60	0,91	0	6,84	41

pac-PQP					
Jarra	Dosis (ppm)	Turbiedad (NTU)	color final (UPC)	pH final	alcalinidad final mg CaCO ₃ /L
1	24	-----	0.5-0.75 mm	17,8	---
2	27	2.15 min	0.5-0.75 mm	4,12	16
3	30	2 min	0.5-0.75 mm	4,05	12
4	33	1.30 min	0.5-0.75 mm	2,36	6
5	36	1.40 min	0.5-0.75 mm	2,96	5
6	39	1.50 min	0.5-0.75 mm	3,71	6

QUIPRAHC -Q4c					
Jarra	Dosis (ppm)	Turbiedad (NTU)	color final (UPC)	pH final	alcalinidad final mg CaCO ₃ /L
1	15	6,66	8	7,53	53,6
2	25	2,49	4	7,44	52,6
3	35	1,66	1	7,28	51
4	45	1,14	0	7,15	48,6
5	55	1,07	0	7,13	47,8
6	65	0,74	0	7,03	46,8

parámetros iniciales

turbiedad 329 NTU

color 664 UPC

pH 7.76

sulfato de aluminio			
Jarra	Dosis (ppm)	Turbiedad (NTU)	color final (UPC)
1	50	54,8	189
2	55	13,6	48
3	60	7,24	42
4	65	7,9	38
5	70	6,62	38
6	75	15,6	21

pac-férrico			
Jarra	Dosis (ppm)	Turbiedad (NTU)	color final (UPC)
1	35	71,7	118
2	40	25,8	79
3	45	7,98	21
4	50	5,66	20
5	55	15,6	35
6	60	13,5	23

pac-PQP			
Jarra	Dosis (ppm)	Turbiedad (NTU)	color final (UPC)
1	40	277	----
2	45	84,4	----
3	50	38,8	32
4	55	11,2	17
5	60	25,4	20
6	65	18	19

Anexo 5

RAZONES DE REEMPLAZO DE SULFATO DE ALUMINIO PARA CADA
COAGULANTE

Dosis de reemplazo de sulfato de aluminio de acuerdo al color

color inicial (UPC)	Dosis sulfato (ppm)	Dosis pac-férrico (ppm)	Dosis pac-PQP (ppm)	Dosis Quiprahc-Q4c (ppm)
10	16	10	13	16
38	36	16	30	25
72	34	20	24	20
79	30	10	10	---
102	36	25	38	39
137	39	16	22	30
227	32	17	22	23
243	52	22	26	36
664	70	44	51	---

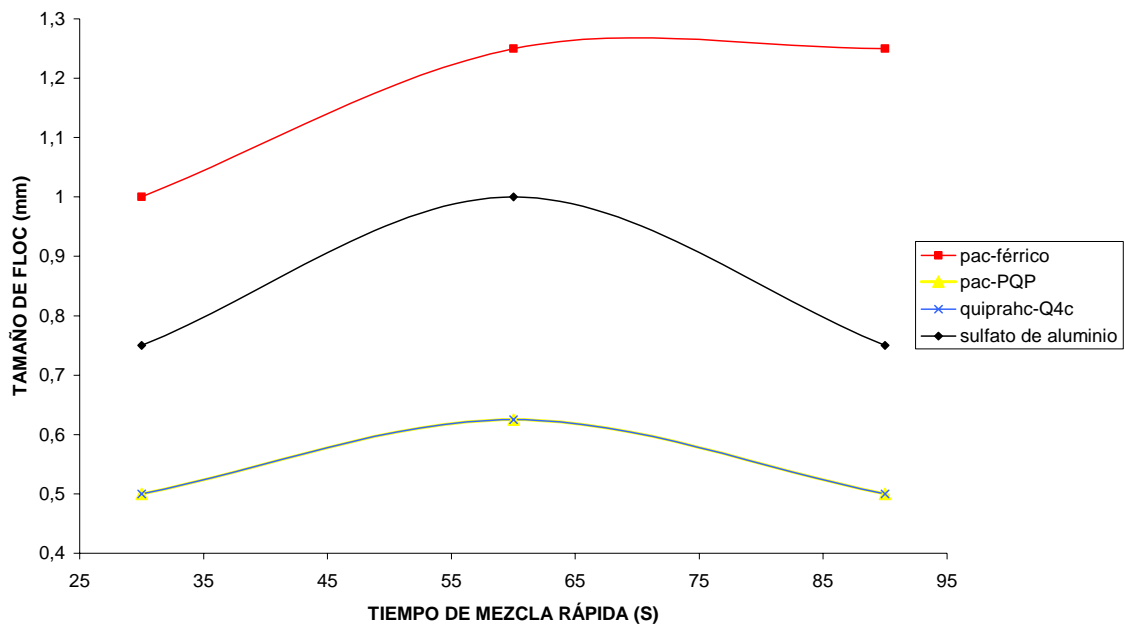
Razón de reemplazo de coagulante de acuerdo al color

	reemplazo pac-férrico	reemplazo pac-PQP	reemplazo Quiprahc-Q4c
	1,60	1,23	1,00
	2,25	1,20	1,44
	1,70	1,42	1,70
	3,00	3,00	-----
	1,44	0,95	0,92
	2,44	1,77	1,30
	1,88	1,45	1,39
	2,36	2,00	1,44
	1,59	1,37	-----
Promedio	2,03	1,60	1.31
Desviación	0,52	0,61	0,27

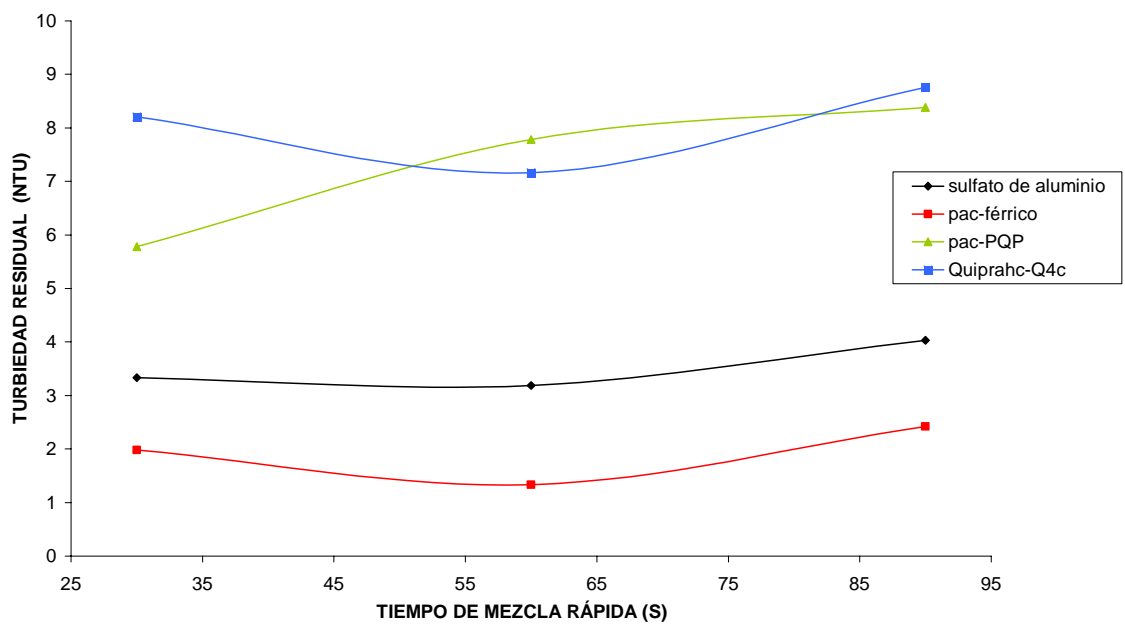
Anexo 6

DETERMINACIÓN DE TIEMPOS ÓPTIMOS DE MEZCLA RÁPIDA

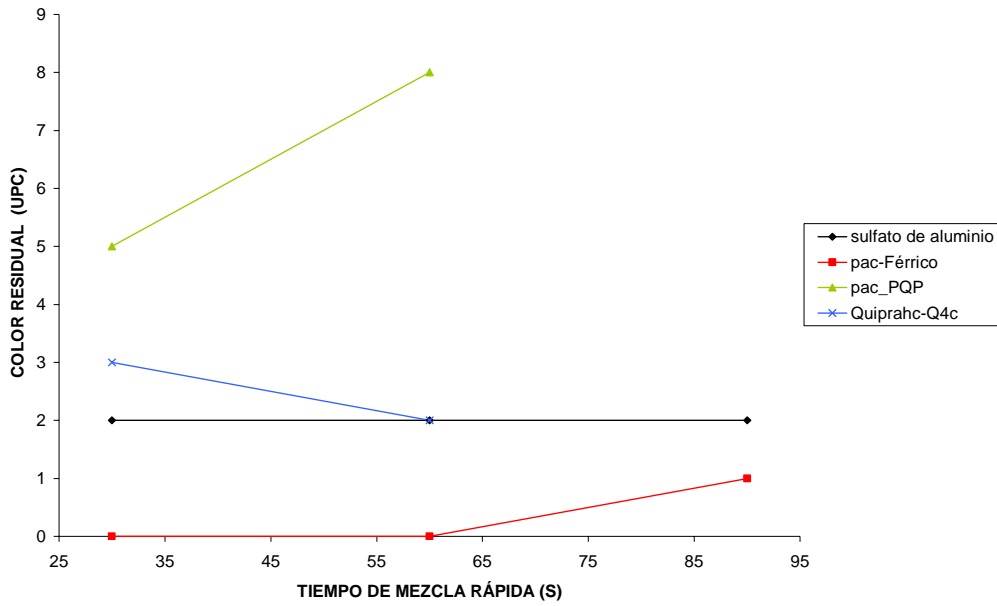
parámetros iniciales
 turbiedad (NTU) 52,3
 color (UPC) 85
 pH 7,76
mezcla rápida
 velocidad 100 rpm
sedimentación
 tiempo 10 min



Tiempo óptimo de mezcla rápida para cada coagulante

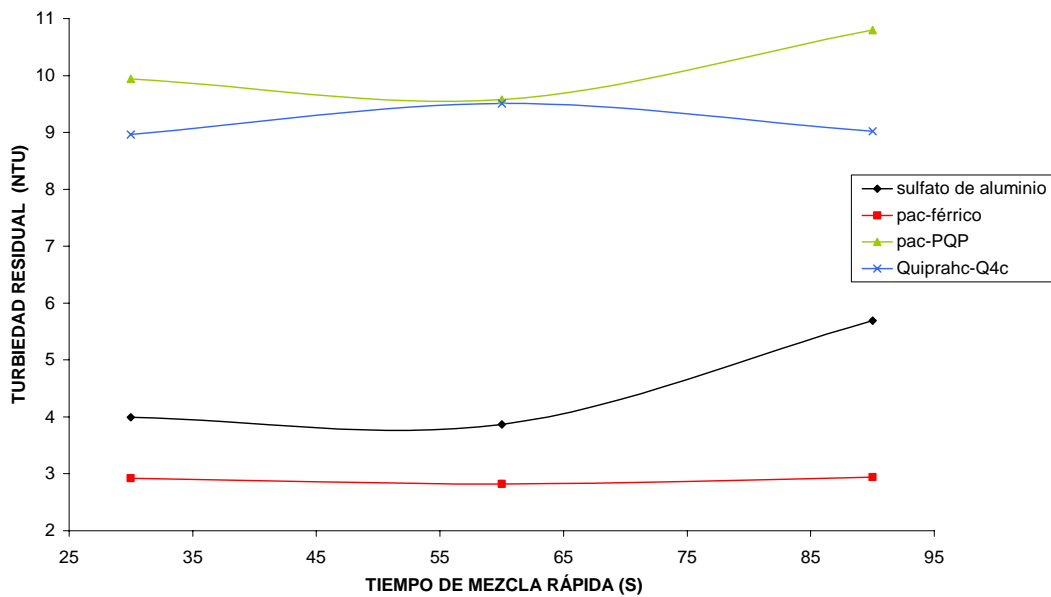


Tiempo óptimo de mezcla rápida para cada coagulante

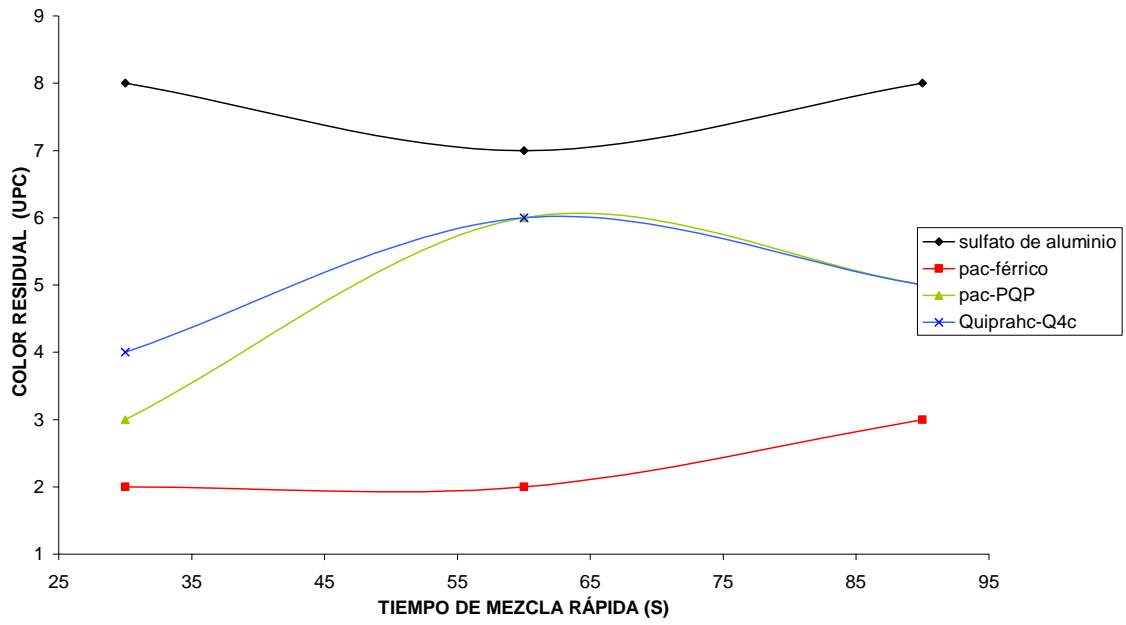


Tiempo óptimo de mezcla rápida para cada coagulante

parámetros iniciales
 turbiedad (NTU) 19.6
 color (UPC) 39
 pH 7,79
mezcla rápida
 velocidad 100 rpm
sedimentación
 tiempo 10 min



Tiempo óptimo de mezcla rápida para cada coagulante

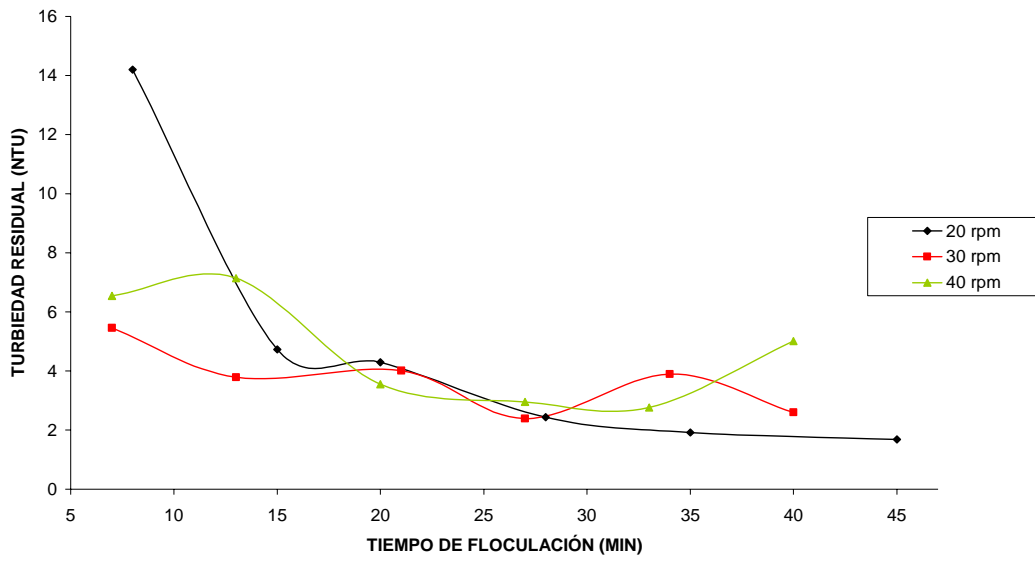


Tiempo óptimo de mezcla rápida para cada coagulante

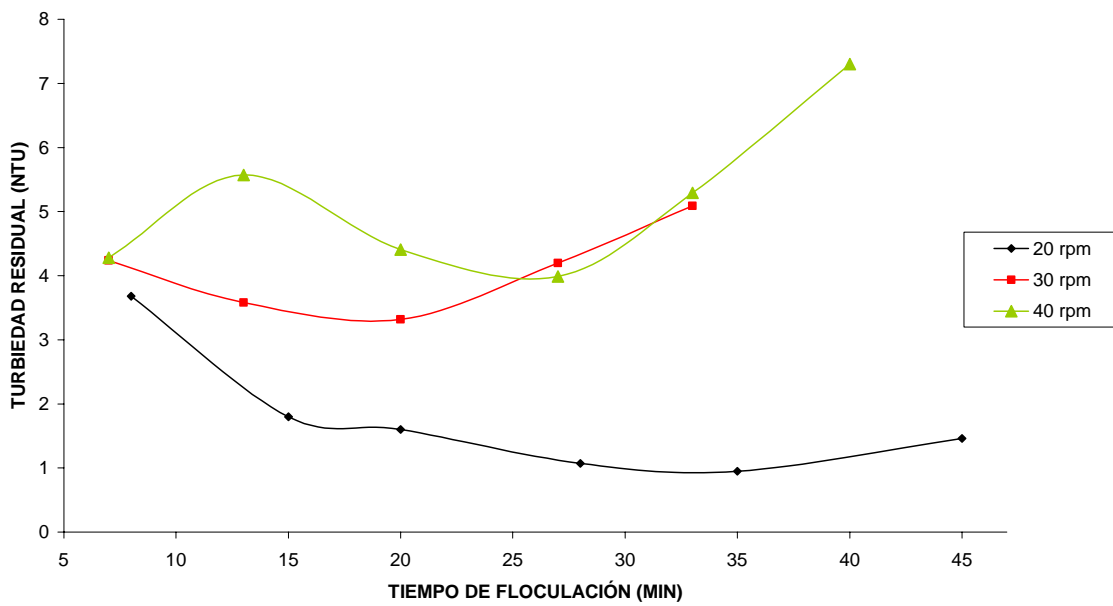
Anexo 7

DETERMINACIÓN DE TIEMPOS Y GRADIENTES ÓPTIMOS DE FLOCULACIÓN.

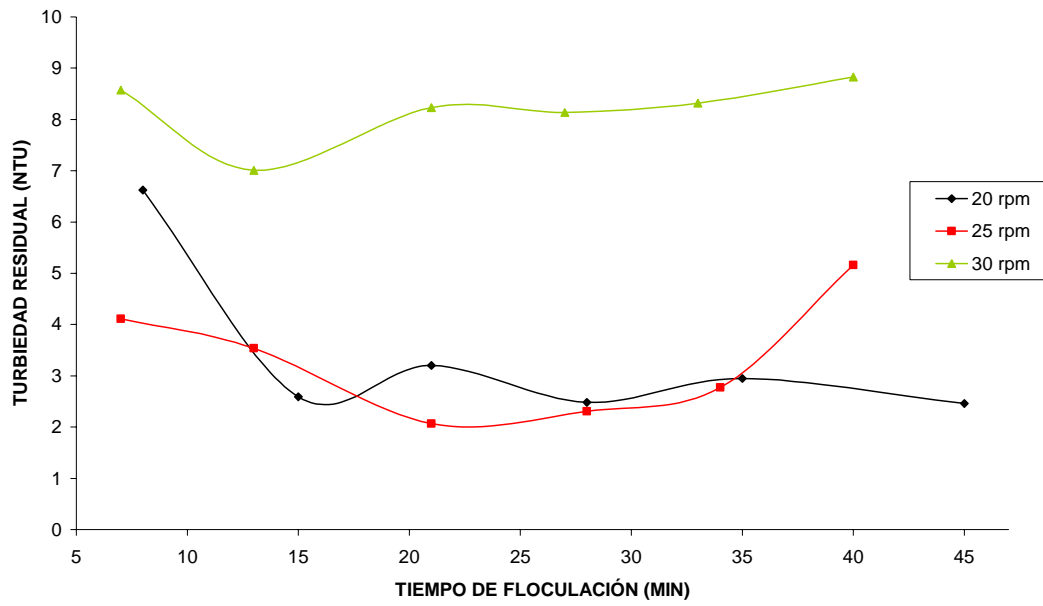
parámetros iniciales
 turbiedad (NTU) 75
 color (UPC) 102
 pH 7,51
mezcla rápida
 velocidad 100 rpm
 tiempo 1 min
sedimentación
 tiempo 10 min



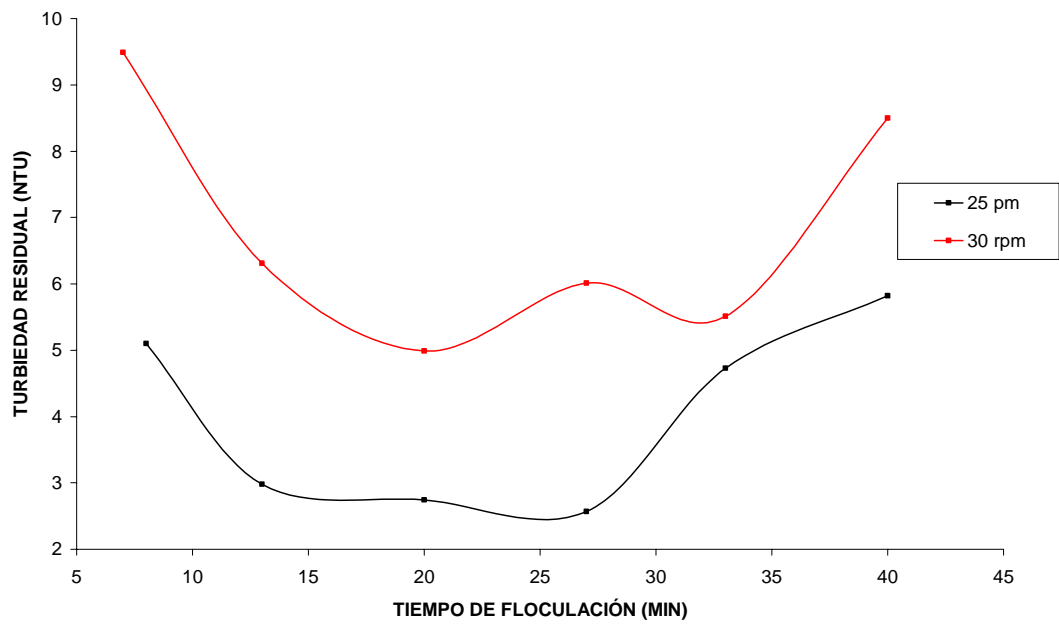
Tiempos y gradientes de floculación para el sulfato de aluminio



Tiempos y gradientes de floculación para el pac-férrico

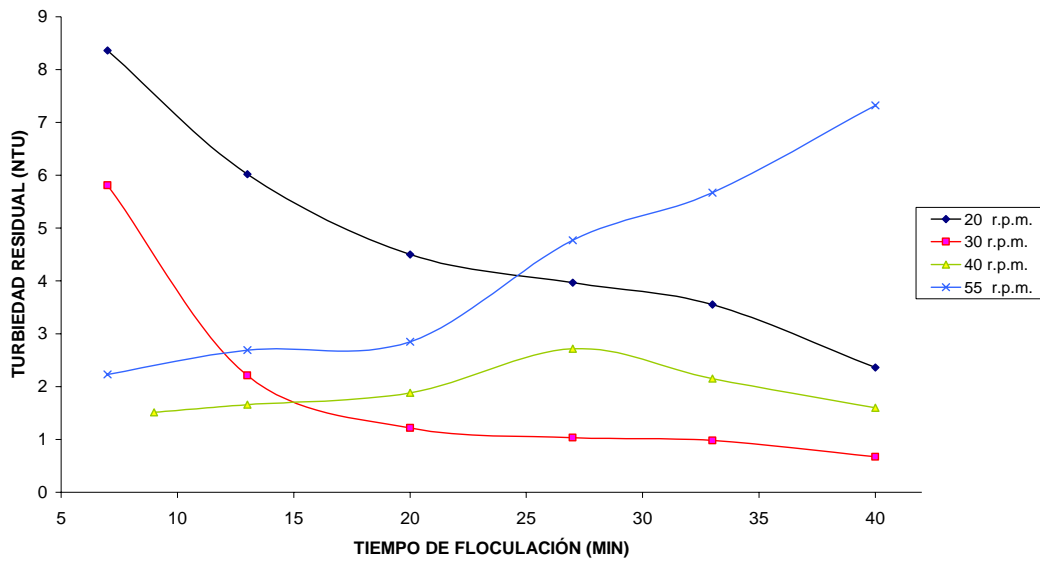


Tiempos y gradientes de floculación para el pac-PQP

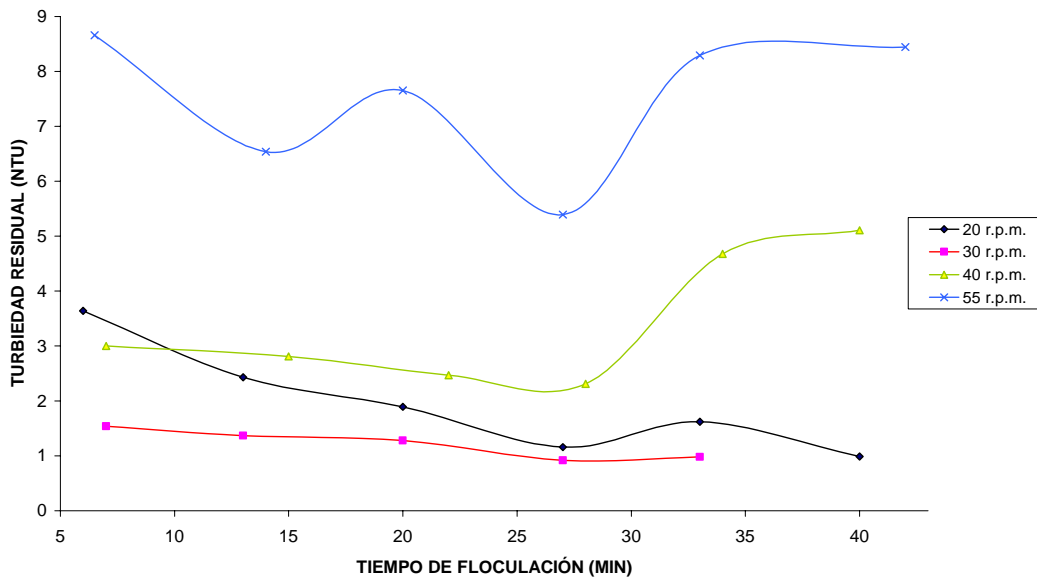


Tiempos y gradientes de floculación para el Quiprahc-Q4c

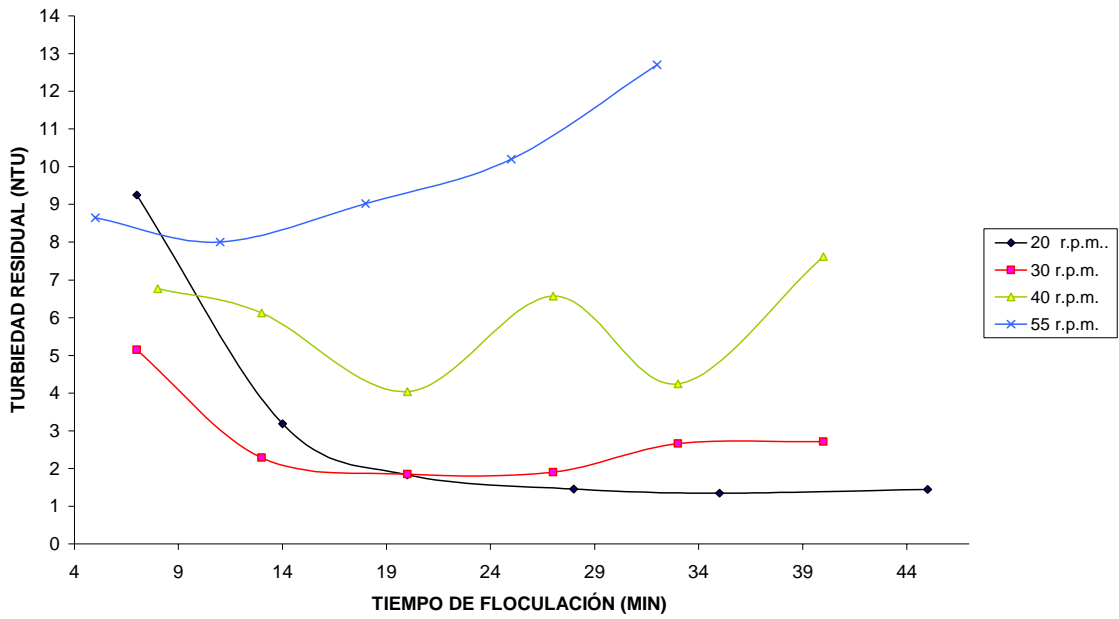
parámetros iniciales	
turbiedad	115 (NTU)
color	145 (UPC)
pH	7,77
mezcla rápida	
velocidad	100 rpm
tiempo	1 min.
sedimentación	
tiempo	10 min.



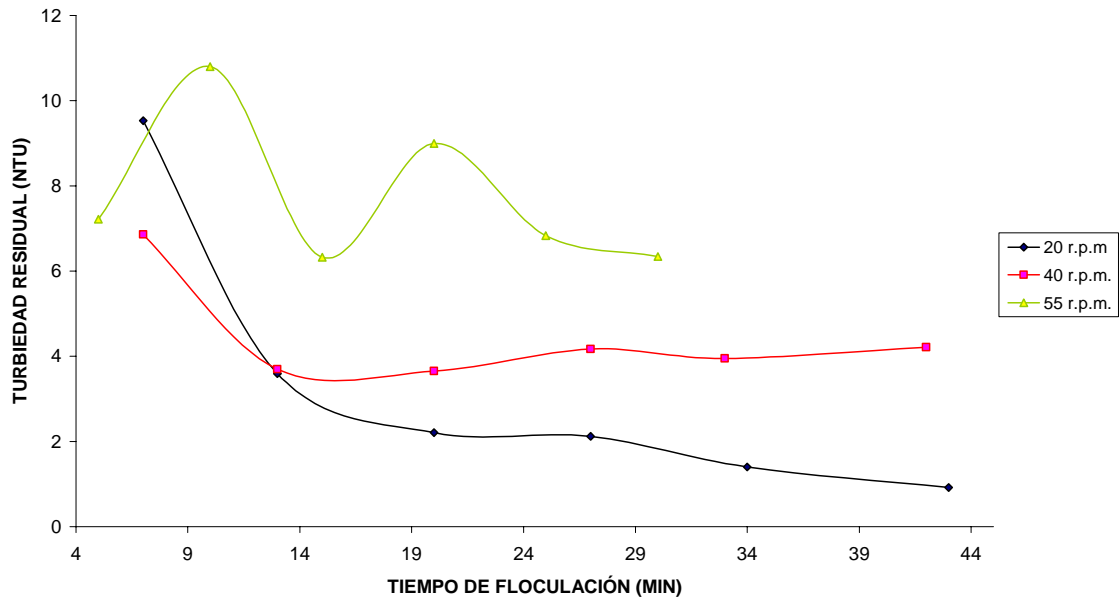
Tiempos y gradientes de floculación para el sulfato de aluminio



Tiempos y gradientes de floculación para el pac-Férrico

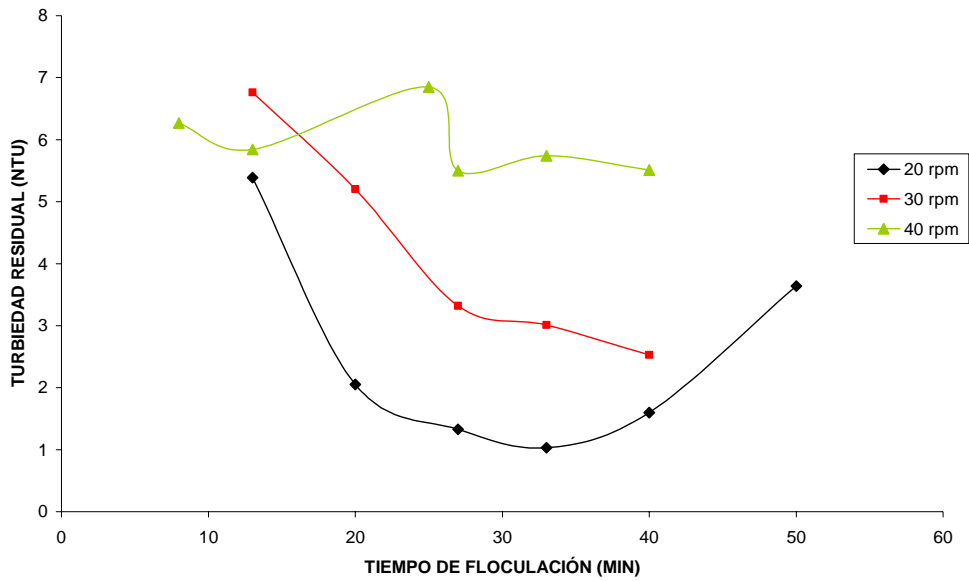


Tiempos y gradientes de floculación para el pac-PQP

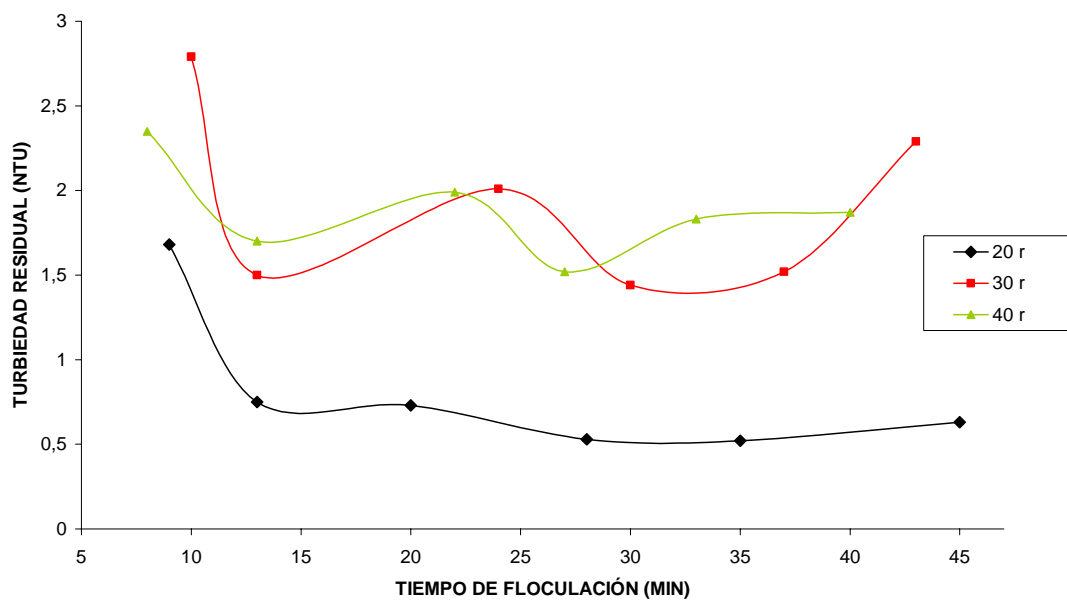


Tiempos y gradientes de floculación para el Quiprahc-Q4c.

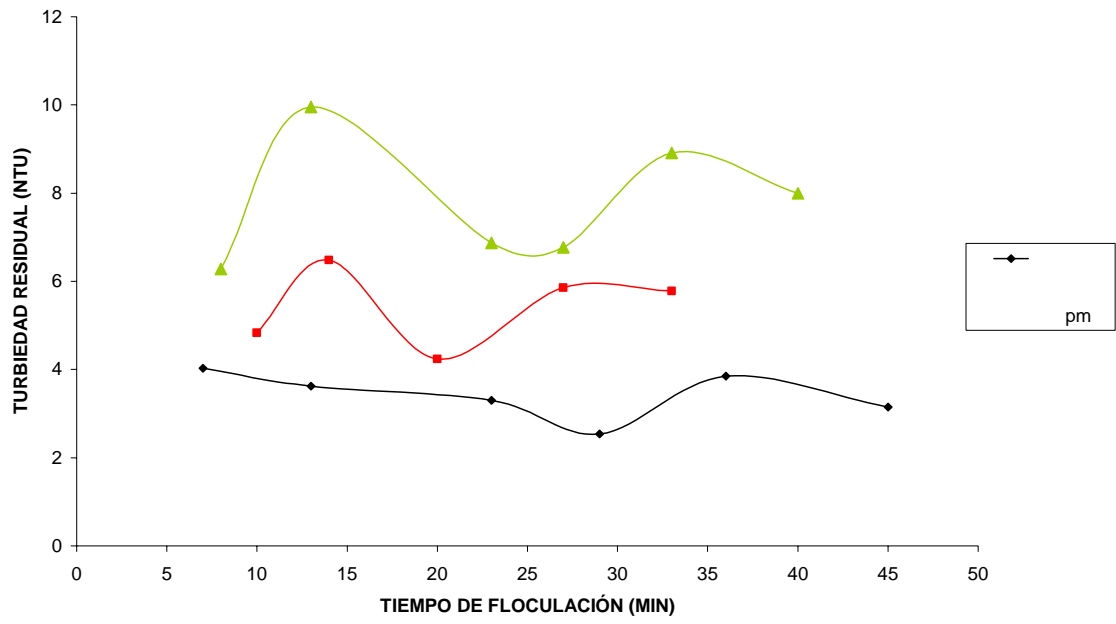
parámetros iniciales
 turbiedad (NTU) 18
 color (UPC) 38
 pH 7,63
mezcla rápida
 velocidad 100 rpm
 tiempo 1 min
sedimentación
 tiempo 10 min



Tiempos y gradientes de floculación para el sulfato de aluminio

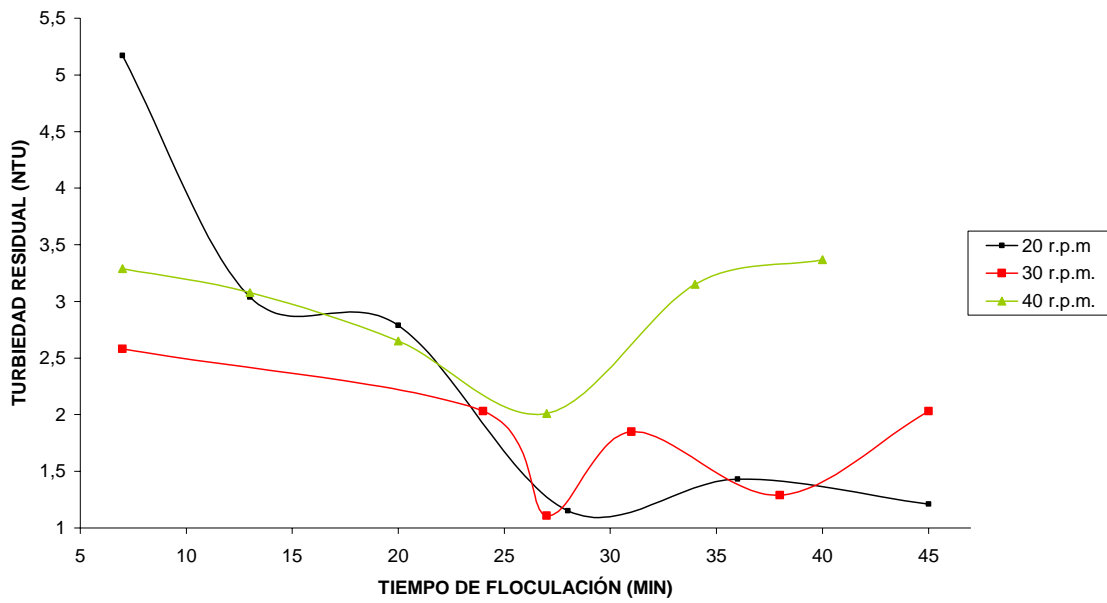


Tiempos y gradientes de floculación para el pac-férrico

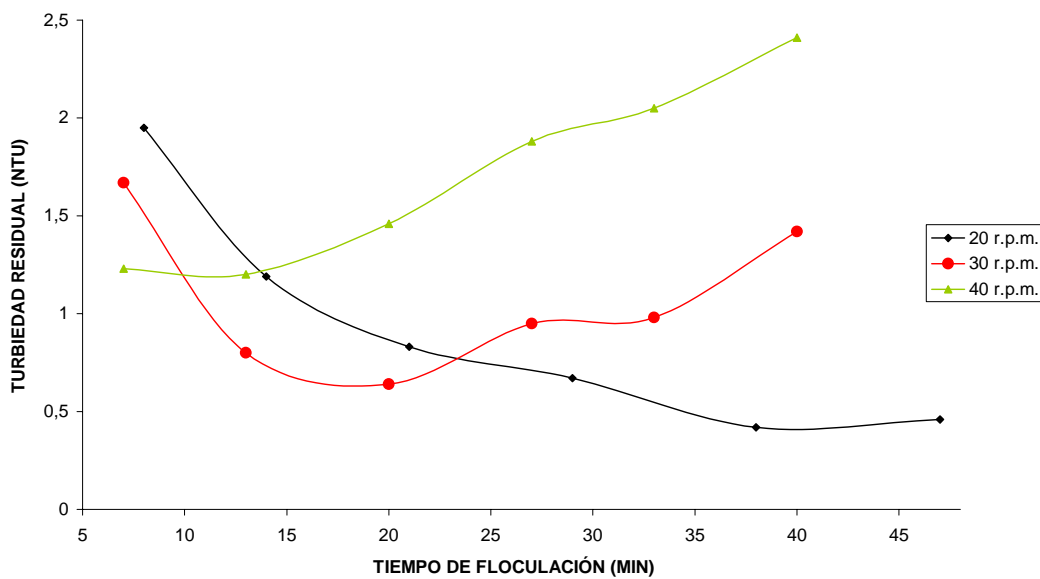


Tiempos y gradientes de floculación para el Quiprahc-Q4c

parámetros iniciales
 turbiedad (NTU) 40,1
 color (UPC) 79
 pH 7,73
mezcla rápida
 velocidad 100 rpm
 tiempo 1 min
sedimentación
 tiempo 10 min



Tiempos y gradientes de floculación para el sulfato de aluminio



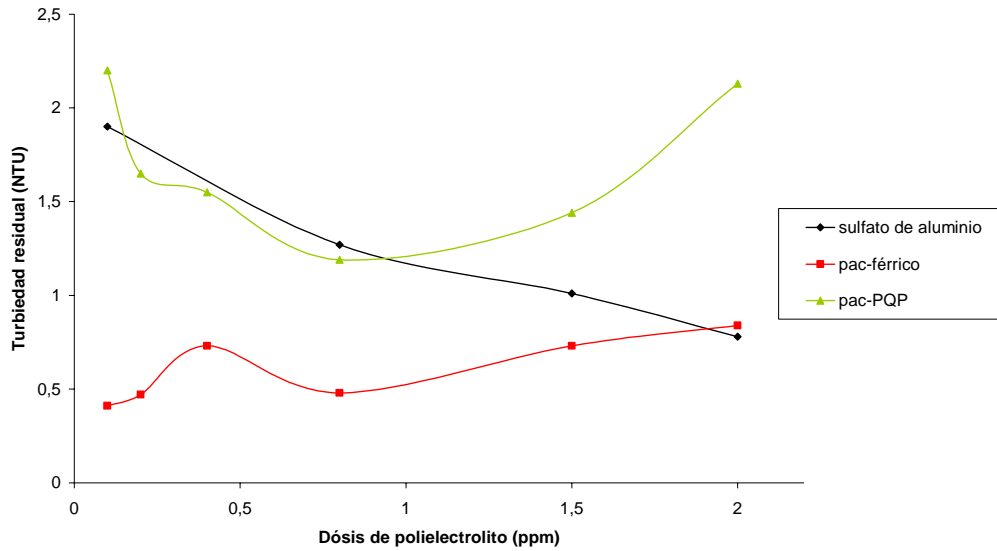
Tiempos y gradientes de floculación para el pac-férrico

Anexo 8

DETERMINACIÓN DE DE LA EFICIENCIA DE LOS AYUDANTES DE
COAGULACIÓN.

parámetros iniciales

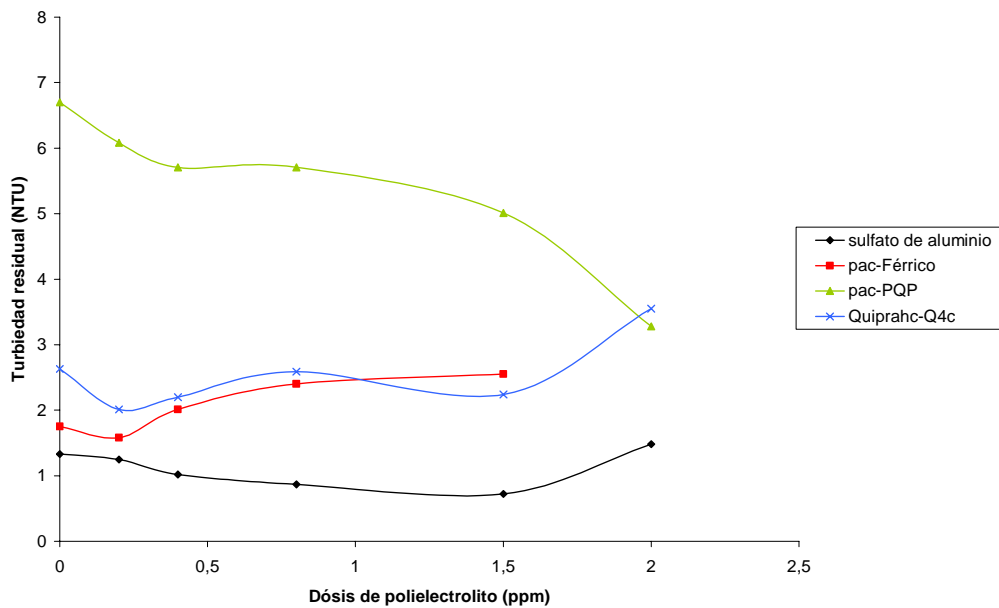
turbiedad 100 NTU
color 137 UPC
pH 7,52



Comportamiento del ayudante de coagulación

parámetros iniciales

turbiedad 29.7 NTU
color 72 UPC
pH 7,78



Comportamiento del ayudante de coagulación

parámetros iniciales

turbiedad 29.7 NTU

color 72 UPC

pH 7,78

sulfato de aluminio			
Jarra	coagulante (ppm)	polielectrolito (ppm)	Turbiedad (NTU)
1	33	0	1,01
2	30	0,3	1,26
3	27	0,6	1,86
4	24	0,9	1,09
5	21	1,2	1,29
6	18	1,5	1,49

pac-Férrico			
Jarra	coagulante (ppm)	polielectrolito (ppm)	Turbiedad (NTU)
1	25	0	1,5
2	23	0,2	1,5
3	20	0,5	1,16
4	17	0,8	1,16
5	15	1	1,01
6	13	1,2	1,24

pac-PQP			
Jarra	coagulante (ppm)	polielectrolito (ppm)	Turbiedad (NTU)
1	30	0	1,93
2	26	0,4	1,77
3	22	0,8	1,73
4	18	1,2	2,13
5	14	1,6	2,24
6	10	2	2,39

Quiprahc- Q4c			
Jarra	coagulante (ppm)	polielectrolito (ppm)	Turbiedad (NTU)
1	35	0	2,49
2	33	0,2	2,55
3	30	0,5	2,21
4	28	0,7	2,13
5	25	1	2,09
6	20	1,5	2,85

parámetros iniciales

turbiedad 212 NTU

color 303 UPC

pH 7,92

sulfato de aluminio					
Jarra	coagulante (ppm)	polielectrolito (ppm)	tiempo floc	Turbiedad (NTU)	color final (UPC)
1	60	0	37 s	6,79	15
2	56	0,4	45 s	7,06	15
3	52	0,8	58 s	6,61	15
4	45	1,5	1,5 min	6,27	14
5	35	2,5	N.D	10,5	>100

pac-férrico					
Jarra	coagulante (ppm)	polielectrolito (ppm)	tiempo floc	Turbiedad (NTU)	color final (UPC)
1	50	0	0	1,32	10
2	46	0,4	0	1,17	8
3	42	0,8	9 s	0,96	8
4	35	1,5	10 s	1,52	19
5	25	2,5	4 min	27,6	>100

pac-PQP					
Jarra	coagulante (ppm)	polielectrolito (ppm)	tiempo floc	Turbiedad (NTU)	color final (UPC)
1	60	0	20 s	8,12	10
2	56	0,4	20 s	5,49	14
3	52	0,8	30 s	5,67	8
4	45	1,5	1 min	5,36	14
5	40	2	1,16 min	4,6	19

Quiprahc-Q4c					
Jarra	coagulante (ppm)	polielectrolito (ppm)	tiempo floc	Turbiedad (NTU)	color final (UPC)
1	65	0	13 s	7,46	16
2	60	0,5	13 s	7,57	9
3	55	1	13 s	6,94	11
4	48	1,7	15 s	8,2	10
5	40	2,5	1 min	7,05	23

parámetros iniciales

turbiedad 58 NTU
color 136 UPC
pH 7,6

Jarra	pac-Férrico		Turbiedad (NTU)	color final (UPC)
	coagulante (ppm)	polielectrolito (ppm)		
1	32	0	2,44	13
2	28	0,4	3,3	9
3	24	0,8	3,43	11
4	17	1,5	17	>40
5	12	2	36,3	>80

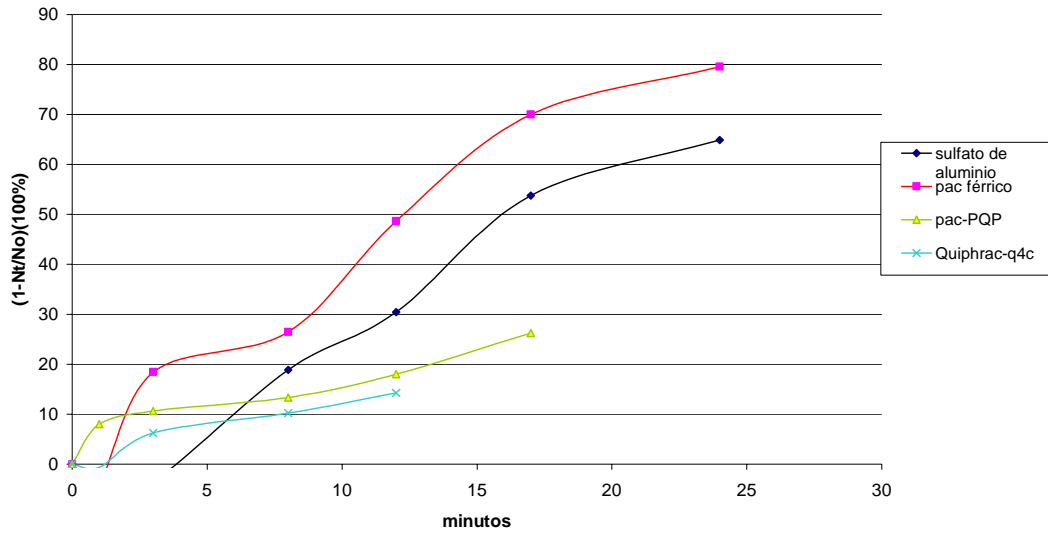
Jarra	pac-PQP		Turbiedad (NTU)	color final (UPC)
	coagulante (ppm)	polielectrolito (ppm)		
1	34	0	4,95	11
2	30	0,4	5,54	15
3	26	0,8	10	18
4	19	1,5	>30	>40
5	14	2	>50	>50

Jarra	Quiprahc-Q4c		Turbiedad (NTU)	color final (UPC)
	coagulante (ppm)	polielectrolito (ppm)		
1	35	0	5,67	5
2	33	0,2	4,96	9
3	31	0,4	3,8	11
4	27	0,8	5,22	7
5	20	1,5	28	>30

Anexo 9

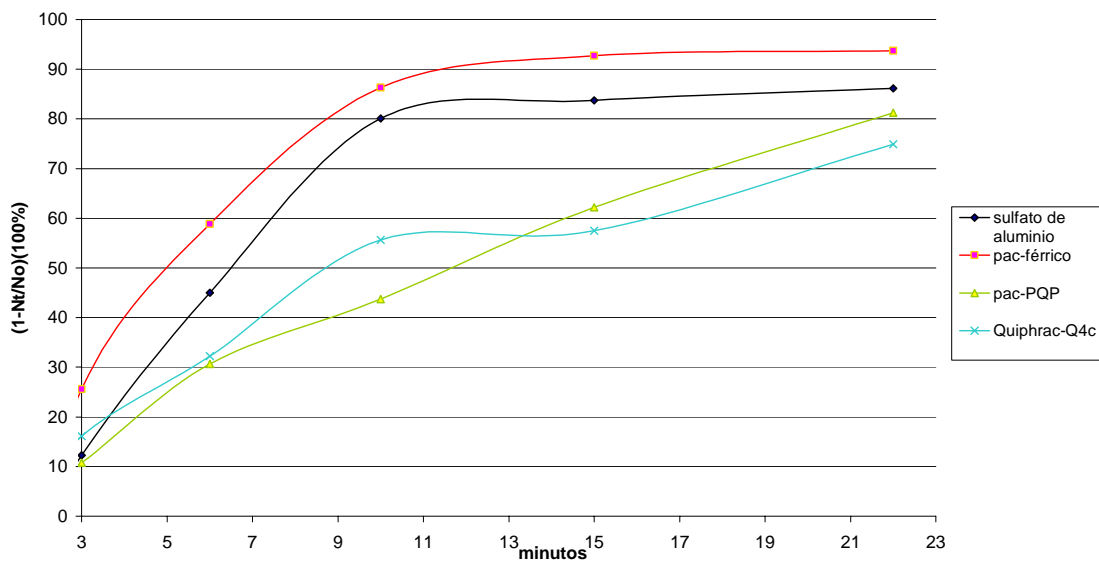
EVALUACIÓN DE LA VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN

turbiedad inicial (NTU)	4,5
color inicial (UPC)	19
PH inicial	7,87



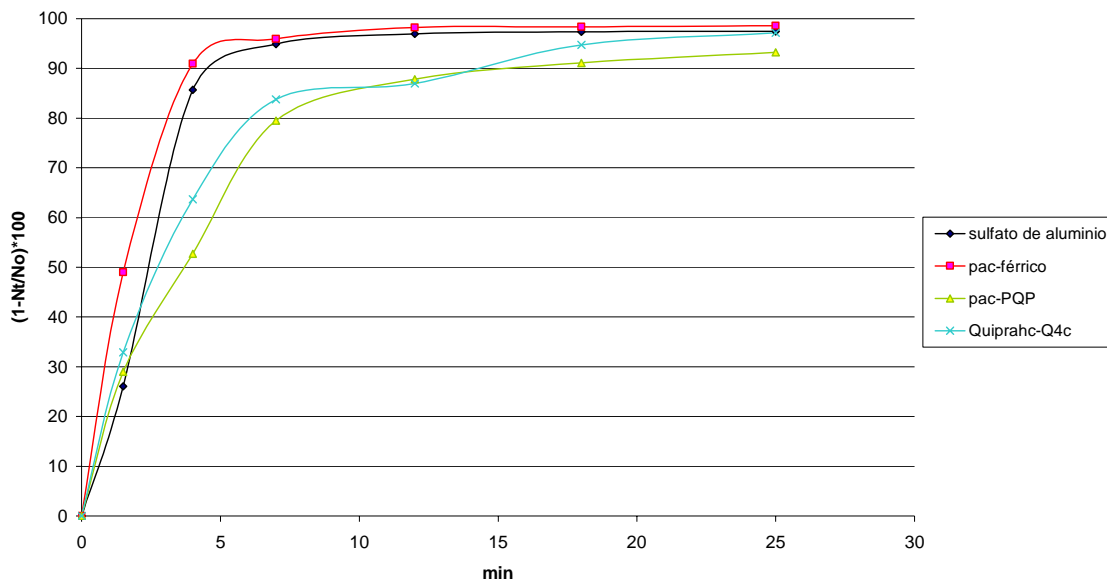
Porcentaje de remoción de turbiedad vs. Tiempo de sedimentación

turbiedad inicial (NTU)	13
color inicial (UPC)	46
PH inicial	7,76



Porcentaje de remoción de turbiedad vs. Tiempo de sedimentación

turbiedad inicial (NTU) 41
color inicial (UPC) 52
PH inicial 7,83

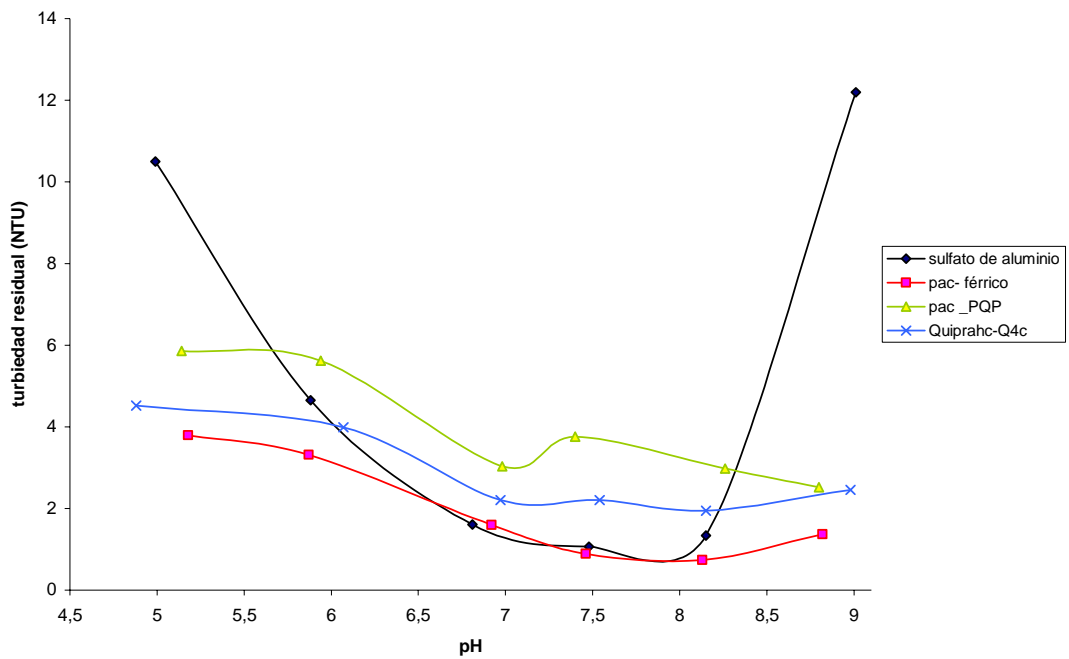


Porcentaje de remoción de turbiedad vs. Tiempo de sedimentación

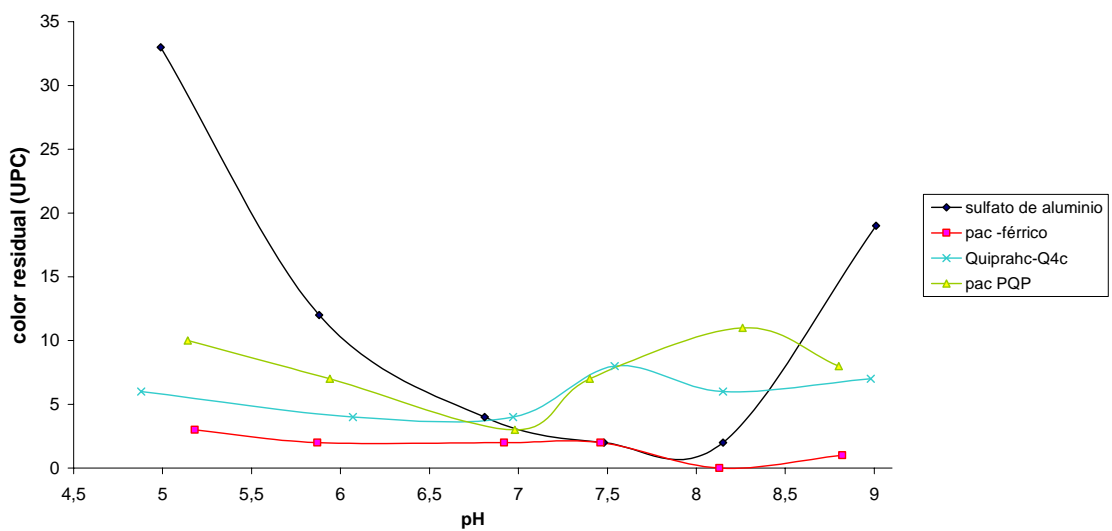
Anexo 10

INFLUENCIA DEL PH EN LA COAGULACIÓN

turbiedad inicial (NTU) 41
 color inicial (UPC) 52
 pH inicial 7,83

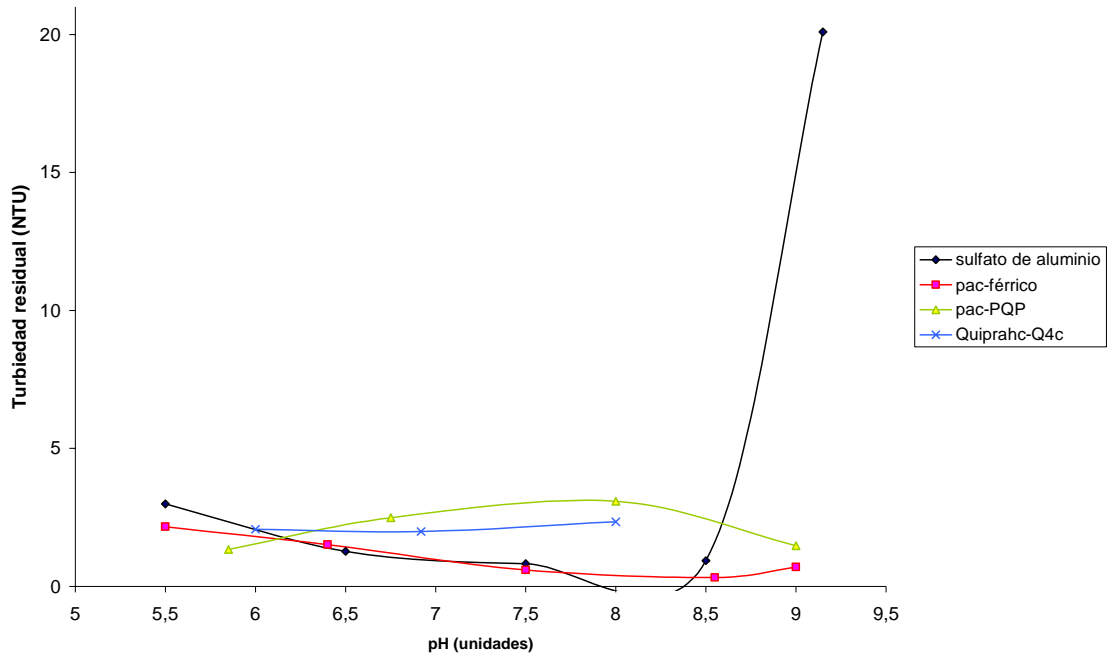


Determinación del Intervalo óptimo de pH

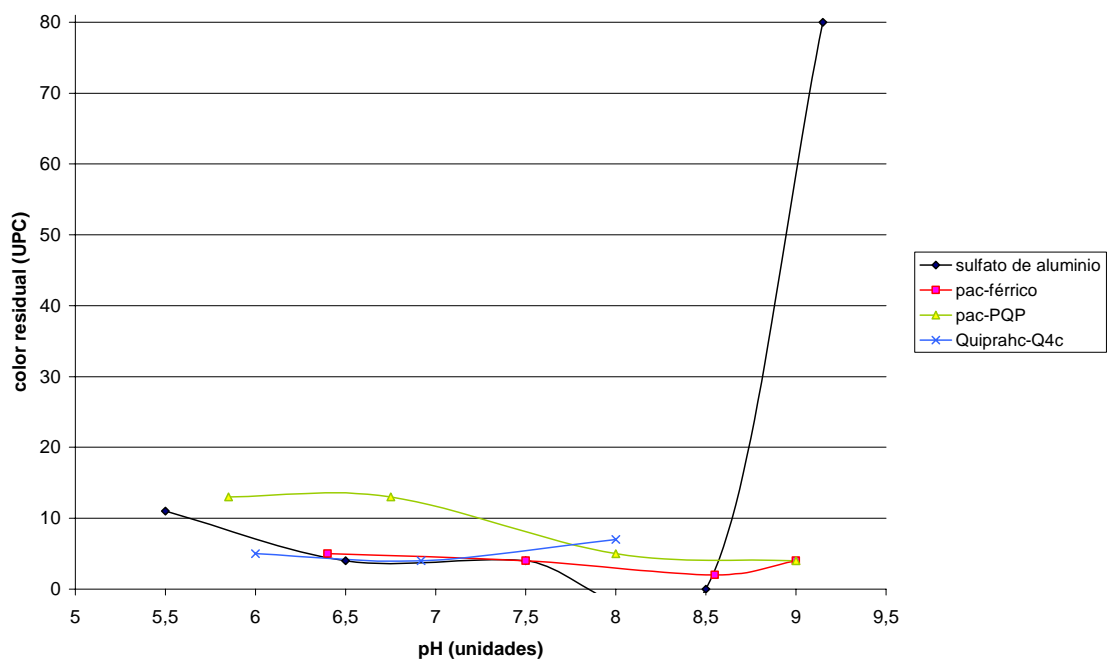


Determinación del Intervalo óptimo de pH

turbiedad inicial (NTU) 100
 color inicial (UPC) 137
 pH inicial 7,52



Determinación del Intervalo óptimo de pH



Determinación del Intervalo óptimo de pH

Anexo 11

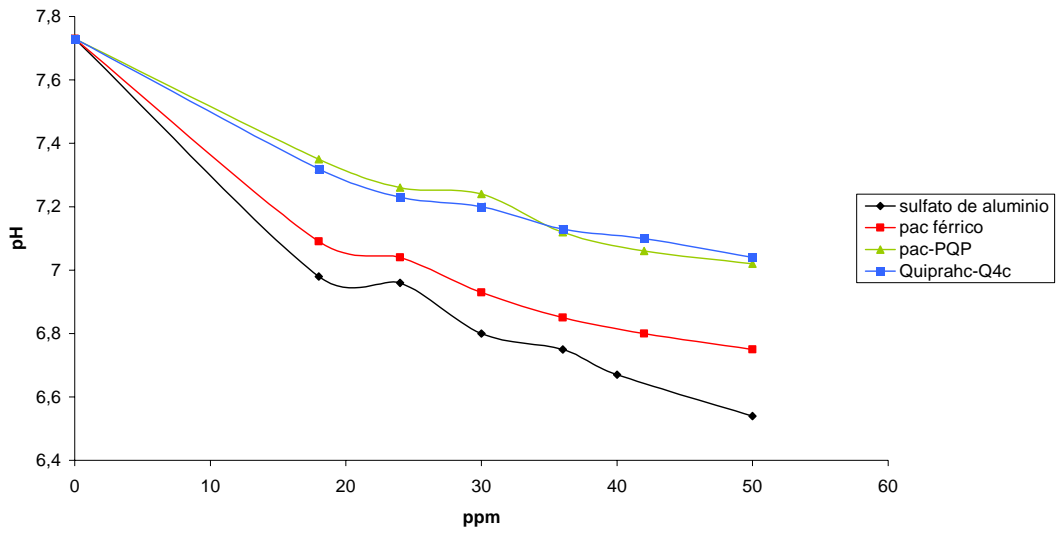
INFLUENCIA DE LA DOSIS DE COAGULANTE EN EL PH Y LA
ALCALINIDAD

parámetros iniciales

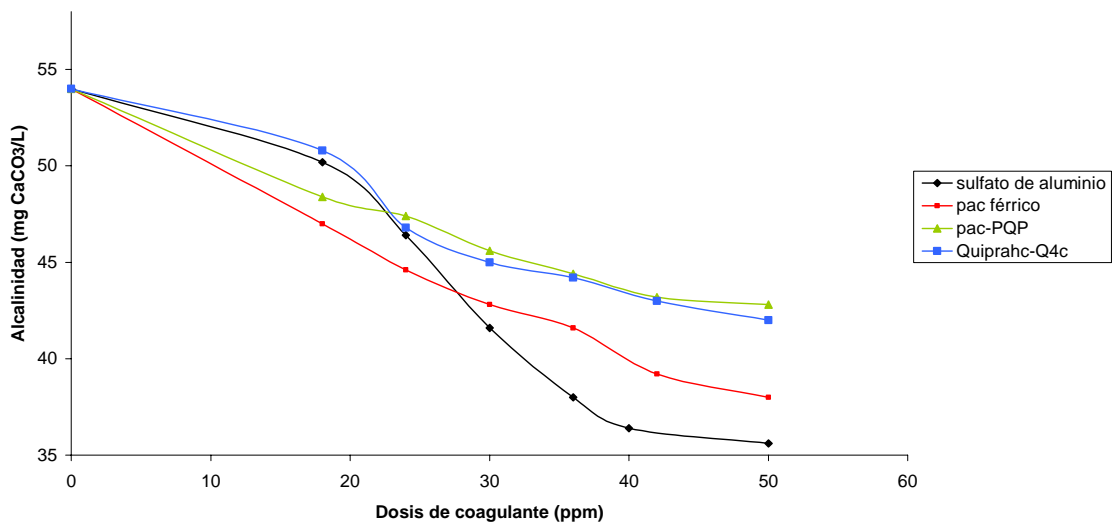
turbiedad 15 NTU

color 54 UPC

pH 7,73



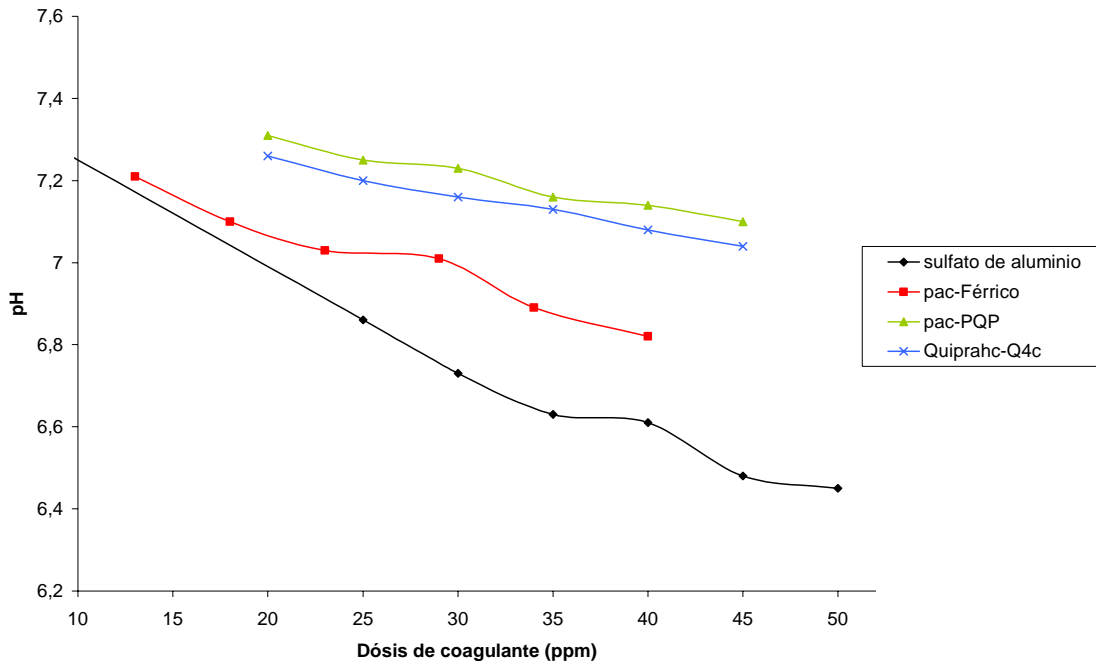
pH vs. Dosis de coagulante



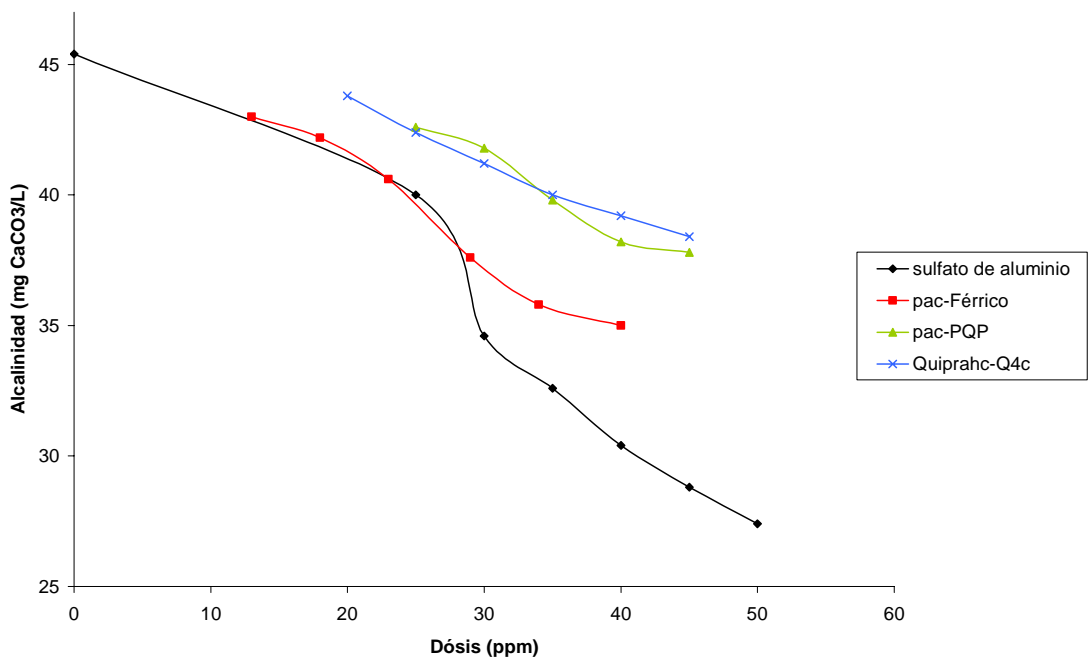
Alcalinidad vs. Dosis de coagulante

parámetros iniciales

turbiedad 75 NTU
 color 102 UPC
 pH 7,51
 alcalinidad 45,4



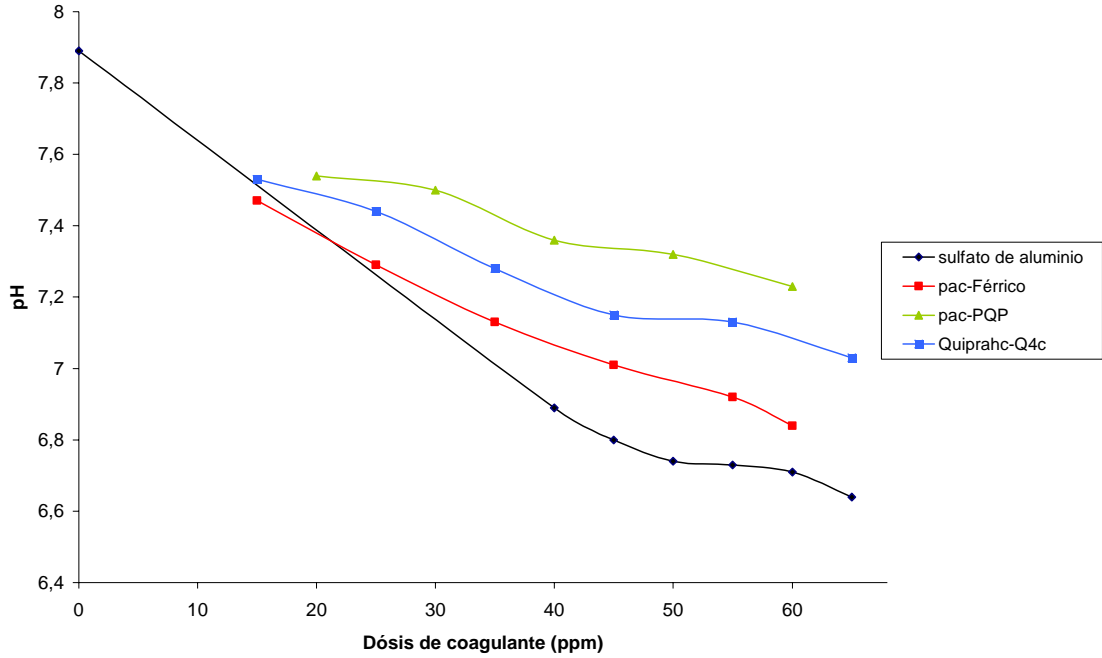
pH vs. Dosis de coagulante



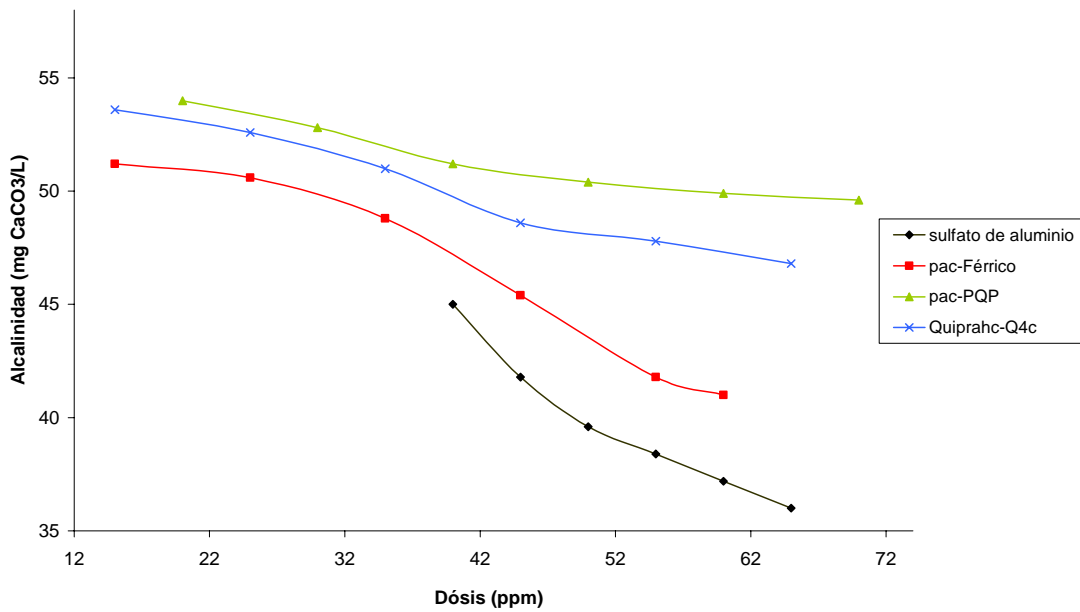
Alcalinidad vs. Dosis de coagulante

parámetros iniciales

turbiedad 190 NTU
 color 243 UPC
 pH 7,89



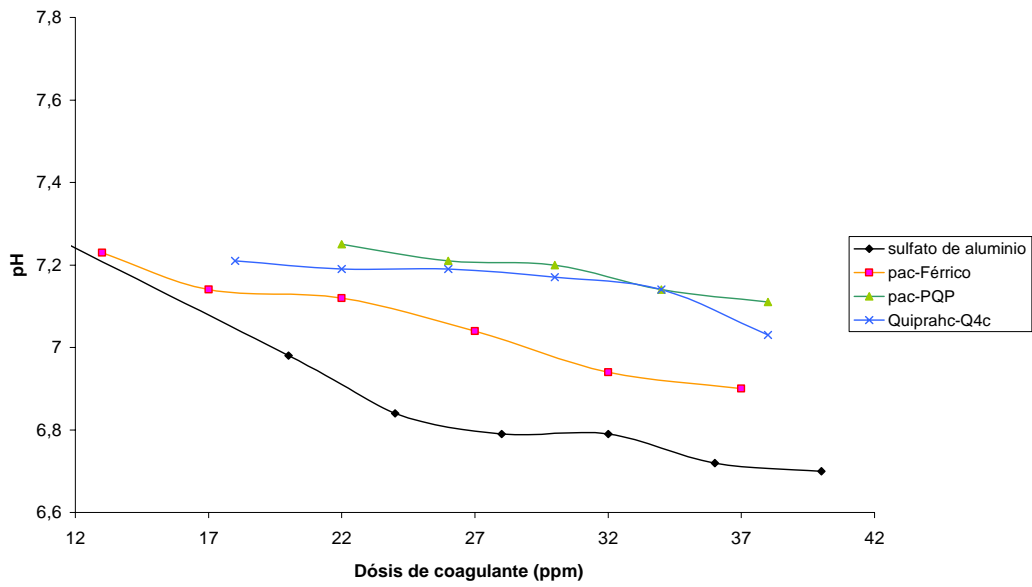
pH vs. Dosis de coagulante



Alcalinidad vs. Dosis de coagulante

parámetros iniciales

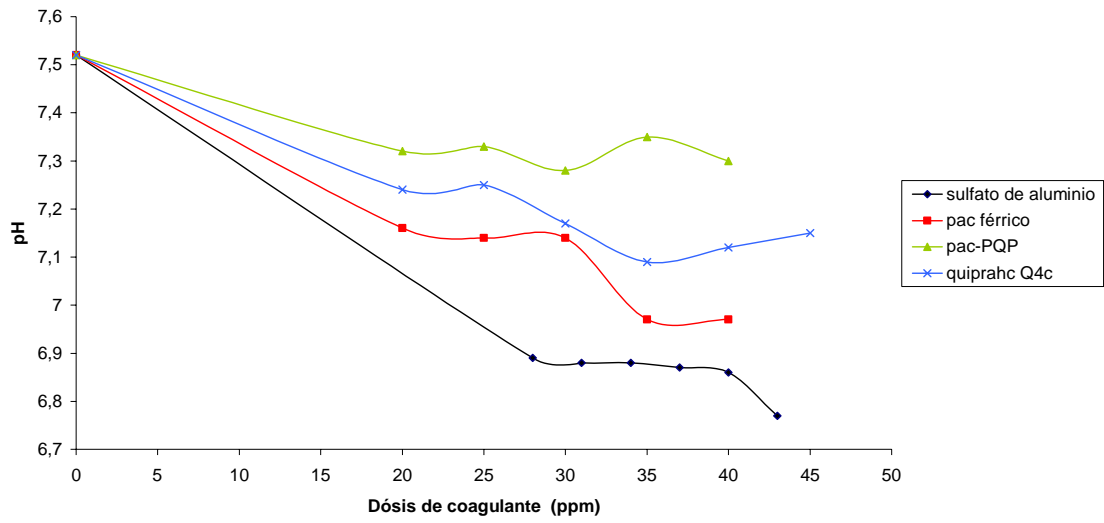
turbiedad 18 NTU
color 38 UPC
pH 7,63



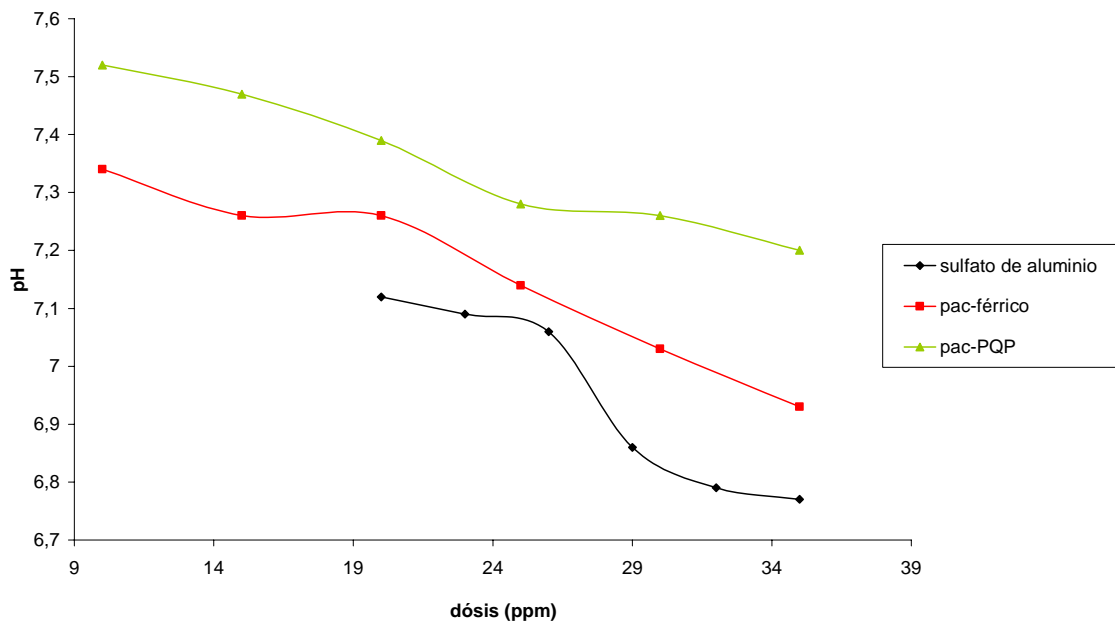
pH vs. Dosis de coagulante

parámetros iniciales

turbiedad 100 NTU
color 137 UPC
pH 7,52



pH vs. Dosis de coagulante



pH vs. Dosis de coagulante

Anexo 12

DATOS DIARIOS DE OPERACIÓN DE LA PLANTA LA FLORA PARA LOS
AÑOS 2003, 2004, Y 2005

[LIBROS DE EXCELL:
PLANTA LA FLORA 2003,2004 Y 2005](#)

Anexo 13

COSTOS DE TRATAMIENTO PARA LOS AÑOS 2003, 2004 Y 2005,
DEBIDOS AL CONSUMO DE PRODUCTOS QUÍMICOS EN LA PLANTA LA
FLORA

Costos de productos químicos para el 2005*

precios	\$/Kg
sulfato	568,4
pac-Férrico	1682
pac-PQP	1276
Quiprahc-Q4c	1566**
cal	305,08
polimero	4.292,0

* Precios puestos en planta

** Este precio incluye el sistema de dosificación

Consumo de Productos Químicos (Kg)*				
LA FLORA año:2003				
mes	Sulfato	cal	polielectrolito	Costo (\$) **
enero	1600	0	0	909440
febrero	17800	300	175	10960144
marzo	31496	0	465	19898106,4
abril	57725	6925	1940	43250049
mayo	11175	0	125	6888370
junio	25125	0	105	14731710
julio	9800	0	0	5570320
agosto	15075	0	0	8568630
septiembre	53475	5830	1295	37731946,4
octubre	73775	8360	1525	51029478,8
noviembre	53175	5985	665	34904753,8
diciembre	47725	0	405	28865150
TOTAL				263308098

* Datos reales de la planta la flora.

** Costos calculados con precios del 2005

Consumo de Productos Químicos (Kg) ***				
LA FLORA año:2003				
mes	pac-Férrico	cal	polielectrolito	costo (\$)
enero	572,302738	0	20,0644122	1048729
febrero	6366,86795		223,216586	11667117
marzo	11265,7794	0	394,967955	20644243
abril	20647,6097	500	723,886373	37988739
mayo	3997,17693	0	140,137379	7324721
junio	8986,94143	0	315,073973	16468332
julio	3505,35427	0	122,894525	6423469
agosto	5392,16486	0	189,044384	9880999
septiembre	19127,4306	560	670,590278	35221356
octubre	26388,5215	500	925,157508	48508809
noviembre	19020,1238	1360	666,8282	35268783
diciembre	17070,7176	500	598,483796	31434179
TOTAL				261879482

*** Consumos predichos a partir de los ensayos de laboratorio

Consumo de Productos Químicos (Kg)***				
LA FLORA año:2003				
mes	pac-PQP	cal	polielectrolito	costo (\$)
enero	920,105356	0	27,3924495	1291622,83
febrero	10236,1721	0	304,741001	14369304
marzo	18112,2739	0	539,220369	25425595,4
abril	33195,676	500	988,268218	46751869,8
mayo	6426,36084	0	191,31914	9021178,18
junio	14448,5294	0	430,147059	20282514,7
julio	5635,6453	0	167,778753	7911189,82
agosto	8669,11765	0	258,088235	12169508,8
septiembre	30751,6462	0	915,507024	43168456,7
octubre	42425,4829	0	1263,04873	59555921,3
noviembre	30579,1264	1085	910,370939	43257289,2
diciembre	27445,0176	0	817,065408	38526687,1
TOTAL				321731138

*** Consumos predichos a partir de los ensayos de laboratorio

Consumo de Productos Químicos (Kg) **				
LA FLORA año:2003				
mes	Quiprahc-Q4c	cal	polielectrolito	costo (\$)
enero	1111,53215	0	26,7778199	1855589,744
febrero	12365,7951	0	297,903246	20643435,9
marzo	21880,5103	0	527,121384	36527284,1
abril	40101,9957	500	966,093533	67098738,72
mayo	7763,35733	0	187,026336	12960134,62
junio	17454,5282	0	420,495453	29138557,69
julio	6808,13439	0	164,014147	11365487,18
agosto	10472,7169	0	252,297272	17483134,62
septiembre	37149,4884	0	894,964949	62017288,46
octubre	51252,0525	0	1234,70854	85560083,33
noviembre	36941,0762	1085	889,944108	62000377,18
diciembre	33154,9198	0	798,732159	55348762,82
TOTAL				357388735

*** Consumos predichos a partir de los ensayos de laboratorio

Consumo de Productos Químicos (Kg)				
LA FLORA año:2004				
mes	Sulfato	cal	polielectrolito	costo (\$)
enero	24925	3875	385	17001975
febrero	9625	0	55	5706910
marzo	13625	400	70	8166922
abril	59175	3375	950	38742115
mayo	55650	400	580	34242852
junio	3650	0	50	2289260
julio	4825	0	80	3085890
agosto	5625	0	0	3197250
septiembre	50025	5800	500	32349674
octubre	45400	5350	930	31429098
noviembre	69450	9375	1680	49546065
diciembre	31575	2050	260	19688564
TOTAL				245446575

Consumo de Productos Químicos (Kg)				
LA FLORA año:2004				
mes	pac-Férrico	cal	polielectrolito	costo (\$)
enero	8915,40358	0	312,565922	16337241,8
febrero	3442,75866	0	120,69998	6308764,37
marzo	4873,5155	0	170,86101	8930588,53
abril	21166,2591	875	742,069746	39053556,1
mayo	19905,4046	0	697,865338	36476128,6
junio	1305,56562	0	45,7719404	2392414,54
julio	1725,85044	0	60,5067432	3162575,39
agosto	2012,00181	0	70,5389493	3686940,22
septiembre	17893,4028	0	627,326389	32789188,3
octubre	16239,0902	0	569,327697	29757704,2
noviembre	24841,5157	625	870,920894	45712096,9
diciembre	11294,0368	0	395,958635	20696024,4
TOTAL				245303223

Consumo de Productos Químicos (Kg)				
LA FLORA año:2004				
mes	pac-PQP	cal	polielectrolito	costo (\$)
enero	14333,5162	0	426,723003	20121061,9
febrero	5535,00878	0	164,782704	7769918,57
marzo	7835,27217	0	233,263828	10998975,6
abril	34029,5215	875	1013,09263	48036808
mayo	32002,4144	0	952,743635	44924256,5
junio	2098,99034	0	62,4890255	2946514,57
julio	2774,69271	0	82,6053556	3895050,09
agosto	3234,74539	0	96,3015803	4540861,5
septiembre	28767,669	0	856,442054	40383395
octubre	26107,9895	0	777,260755	36649797,7
noviembre	39938,3231	625	1189,00351	56255178,3
diciembre	18157,7041	0	540,572871	25489369,2
TOTAL				302011187

Consumo de Productos Químicos (Kg)				
LA FLORA año:2004				
mes	Quiprahc-Q4c	cal	polielectrolito	costo (\$)
enero	17315,5867	0	417,148225	28906609
febrero	6686,56057	0	161,085323	11162532,1
marzo	9465,39093	0	228,029872	15801506,4
abril	41109,3217	875	990,360932	68894771,9
mayo	38660,4775	0	931,366048	64539730,8
junio	2535,68271	0	61,0869016	4233064,1
julio	3351,96413	0	80,7518631	5595762,82
agosto	3907,7302	0	94,140773	6523557,69
septiembre	34752,7473	0	837,225275	58016173,1
octubre	31539,7246	0	759,820639	52652359
noviembre	48247,4422	625	1162,32474	80734867,3
diciembre	21935,3922	0	528,443539	36618903,8
TOTAL				335482802

Consumo de Productos Químicos (Kg)				
LA FLORA año:2005				
mes	Sulfato	cal	polielectrolito	costo (\$)
enero	40600	3150	650	26827842
febrero	26625	2800	265	17125254
marzo	7000	0	0	3978800
abril	29125	4350	115	18375328
mayo	57125	6700	600	37089086
TOTAL				103396310

Consumo de Productos Químicos (Kg)				
LA FLORA año:2005				
mes	pac-Férrico	cal	polielectrolito	costo (\$)
enero	14522,182	250	509,134461	26687785,2
febrero	9523,47524	0	333,88436	17451517
marzo	2503,82448	0	87,7818035	4588192,27
abril	10417,6983	0	365,235004	19090157,1
mayo	20432,9962	775	716,362218	37679363,2
TOTAL				105497015

Consumo de Productos Químicos (Kg)				
LA FLORA año:2005				
mes	pac-PQP	cal	polielectrolito	costo (\$)
enero	23347,6734	250	695,083406	32851199,2
febrero	15311,1282	0	455,82748	21493411,1
marzo	4025,46093	0	119,841967	5650849,87
abril	16748,7928	0	498,628183	23511571,8
mayo	32850,6365	775	977,996049	46351408,2
TOTAL				129858440

Consumo de Productos Químicos (Kg)				
LA FLORA año:2005				
mes	Quiprahc-Q4c	cal	polielectrolito	costo (\$)
enero	28205,1282	250	679,487179	47161859,7
febrero	18496,5896	0	445,599659	30878173,1
marzo	4862,95314	0	117,152962	8118205,13
abril	20233,3586	0	487,440003	33777532,1
mayo	39685,1712	775	956,05185	66486789,6
TOTAL				144237660

Anexo 14

VOLUMEN DE LODOS PRODUCIDOS Y ALUMINIO RESIDUAL

parámetros iniciales

turbiedad 190 NTU
color 243 UPC
pH 7,89

coagulante	mg/L Al	volumen de lodo (ml)
sulfato	0,08	10
pac- Férrico	0,06	13
pac-PQP	0,07	13
quiprahc-Q4c	0,08	15

parámetros iniciales

turbiedad 18 NTU
color 38 UPC
pH 7,63

coagulante	mg/L Al	volumen de lodo (ml)
sulfato	0,07	6
pac- Férrico	0,04	10
pac-PQP	0,07	10
quiprahc-Q4c	0,11	8

parámetros iniciales

turbiedad 75 NTU
color 102 UPC
pH 7,51

coagulante	mg/L Al	volumen de lodo (ml)
sulfato	0,09	5
pac- Férrico	0,08	10,5
pac-PQP	0,13	8
quiprahc-Q4c	0,13	11

parámetros iniciales

turbiedad 40.1NTU
color 79 UPC
pH 7,73

coagulante	mg/L Al	volumen de lodo (ml)
sulfato	N.D	5
pac- Férrico	0,05	8
pac-PQP	0,06	6

parámetros iniciales

turbiedad 100 NTU
color 137 UPC
pH 7,52

coagulante	mg/L Al	volumen de lodo (ml)
sulfato	0,07	6,5
pac- Férrico	0,04	12,5
pac-PQP	0,07	9
quiprahc-Q4c	0,09	11

ANEXO 15

DETERMINACIÓN DE METALES EN EL AGUA TRATADA CON CADA
COAGULANTE.

parámetros iniciales

turbiedad 52 NTU
 color 227 UPC
 pH 7,69

Metales detectados en agua tratada con cada coagulante

coagulante	metal : Fe (ppm)	metal : Zn (ppm)	metal : As (ppm)
sulfato	0,31	0,1	0,698
pac-férrico	0,37	0,12	0,878
pac-PQP	0,15	0,07	0,339
Quiprahc-Q4c	0,17	0,07	0,459
Agua cruda	0,69	0,03	0,459

metal : Hg	no se detectó en ninguna muestra	límite de detección :	0.0002 mg/L
metal : Se	no se detectó en ninguna muestra	límite de detección :	0.0002 mg/L
metal : Pb	no se detectó en ninguna muestra	límite de detección :	0.002 mg/L
metal :Cr	no se detectó en ninguna muestra	límite de detección :	0.005 mg/L
metal :Mn	no se detectó en ninguna muestra	límite de detección :	0.005 mg/L
metal :Cd	no se detectó en ninguna muestra	límite de detección :	0.0006 mg/L
metal :Cu	no se detectó en ninguna muestra	límite de detección :	0.005 mg/L

parámetros iniciales

turbiedad 190 NTU
 color 243 UPC
 pH 7,89

Metales detectados en agua tratada con cada coagulante

coagulante	metal : Fe (ppm)	metal : Zn (ppm)	metal : Mn (ppm)
sulfato	0,13	0,17	N.D
pac-férrico	0,13	0,17	N.D
pac-PQP	0,07	0,153	N.D
quiiprahc-Q4c	0,2	0,153	N.D
Agua cruda	2.5	0.233	1.27

metal :Cu	no se detectó en ninguna muestra	límite de detección :	0.005 mg/L
metal : Hg	no se detectó en ninguna muestra	límite de detección :	0.0002 mg/L
metal : Se	no se detectó en ninguna muestra	límite de detección :	0.0002 mg/L
metal : Pb	no se detectó en ninguna muestra	límite de detección :	0.002 mg/L
metal :Cr	no se detectó en ninguna muestra	límite de detección :	0.005 mg/L
metal :Mn	Solo se detectó en el agua cruda	límite de detección :	0.005 mg/L
metal :Cd	no se detectó en ninguna muestra	límite de detección :	0.0006 mg/L

parámetros iniciales

turbiedad 40.1 NTU

color 79 UPC

pH 7,73

	metal : Fe (ppm)	metal : Zn (ppm)
coagulante		
sulfato	0,17	0,16
pac-férrico	0,17	0,15
pac-PQP	0,18	0,133
Agua cruda	1,71	0,22

metal : Hg	no se detectó en ninguna muestra	límite de detección :	0.0002 mg/L
metal : Se	no se detectó en ninguna muestra	límite de detección :	0.0002 mg/L
metal : Pb	no se detectó en ninguna muestra	límite de detección :	0.002 mg/L
metal :Cr	no se detectó en ninguna muestra	límite de detección :	0.005 mg/L
metal :Mn	no se detectó en ninguna muestra	límite de detección :	0.005 mg/L
metal :Cd	no se detectó en ninguna muestra	límite de detección :	0.0006 mg/L
metal :Cu	no se detectó en ninguna muestra	límite de detección :	0.005 mg/L

ANEXO 16

CONCENTRACIONES DE SUSTANCIAS DE INTERÉS SANITARIO EN
VERTIMIENTOS SEGÚN EL DECRETO 1594

ARTICULO 74. Las concentraciones para el control de la carga de las siguientes sustancias de interés sanitario, son:

Sustancia	Expresada como	Concentración (mg/L)
Arsénico	As	0.5
Bario	Ba	5.0
Cadmio	Cd	0.1
Cobre	Cu	3.0
Cromo	Cr ⁺⁶	0.5
Compuestos fenólicos	Fenol	0.2
Mercurio	Hg	0.02
Níquel	Ni	2.0
Plata	Ag	0.5
plomo	Pb	0.5
Selenio	Se	0.5
cianuro	CN ⁻	1.0
Difenil policlorados	Concentración de agente activo	No detectable
Mercurio orgánico	Hg	No detectable
tricloroetileno	Tricloroetileno	1.0
cloroformo	Extracto carbón cloroformo (ECC)	1.0
Tetracloruro de carbono	Tetracloruro de carbono	1.0
Dicloroetileno	Dicloroetileno	1.0
Sulfuro de carbono	Sulfuro de carbono	1.0
Otros Compuestos organoclorados	Concentración de agente activo	0.05
Compuestos organofosforados	Concentración de agente activo	0.1
Carbamatos	carbamatos	0.1