

ESTUDIO PARA LA DETERMINACION Y DOSIFICACION ÓPTIMA DE
COAGULANTES EN EL PROCESO DE CLARIFICACION DE AGUAS CRUDAS
EN LA POTABILIZACION DE AGUAS DE LA EMPRESA EMPOOBANDO E.SP.

VICKY ALEXANDRA CERÓN PÉREZ

UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
SAN JUAN DE PASTO
2016

ESTUDIO PARA LA DETERMINACION Y DOSIFICACION ÓPTIMA DE
COAGULANTES EN EL PROCESO DE CLARIFICACION DE AGUAS CRUDAS
EN LA POTABILIZACION DE AGUAS DE LA EMPRESA EMPOOBANDO E.SP.

VICKY ALEXANDRA CERÓN PÉREZ

Trabajo de grado presentado como requisito parcial
para optar al título de Química

Directora

ALBA LUCY ENRIQUEZ BRAND
Esp. en docencia de la Química

UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
SAN JUAN DE PASTO
2016

Las ideas y conclusiones aportadas en el presente trabajo de grado son responsabilidad exclusiva de los autores.

Artículo 1° del acuerdo No. 324 del 11 de Octubre de 1966, emanado por el Honorable Concejo Directivo de la Universidad de Nariño.

Nota de Aceptación:

ALBA LUCY ENRIQUEZ BRAND

Directora

YOLANDA LAGOS

Jurado

JUAN PABLO JIMENEZ

Jurado

San Juan de Pasto, 16 de Diciembre de 2016

DEDICATORIA

A mis papitos, infinitas gracias por ser ese ejemplo de trabajo, dedicación y esfuerzo, por ser el motor de mi vida, por desvelarse, cuidarme y guiarme en las decisiones de la vida, gracias por ese amor incondicional único y bonito. Gracias por ser mis cómplices y convertirme en la mujer que soy; mi amor y agradecimiento eterno siempre para ustedes. Los amo!

A mis hermanos por consentirme y aconsejarme, por ser mi orgullo y mi ejemplo a seguir.

A mi abue, por ser mi niña linda, la de juegos y alegrías, gracias por cuidarme y hacerme sonreír.

A mi abuelito por ser parte de mi infancia perfecta y de una vida feliz.

A mi Martina, por alegrarme tanto el corazón y hacerme inmensamente feliz 🐾

A mis angelitos en el cielo...

Gracias por tanto amor, todo en mi vida siempre será por ustedes y para ustedes.

*“Soy de los que piensan que la ciencia tiene una gran belleza.
Un científico en su laboratorio no es sólo un técnico, es también un niño colocado ante
fenómenos naturales que le impresionan como un cuento de hadas”*

Maria Salomea Skłodowska-Curie

AGRADECIMIENTOS

A Dios, a la vida y el universo.

Agradecimiento eterno y de corazón a mis pas Mariela y Gabriel, mis hermanos Carol y Francisco y mis abuelos Clara y Alfredo por el amor único el apoyo incondicional; todo por ellos y para ellos.

A la Empresa de Obras Sanitarias De La Provincia De Obando EMPOOBANDO E.S.P por permitirme el desarrollo de este trabajo en sus instalaciones, en especial al Ingeniero Químico Erik Sánchez quien fuese guía y amigo y a Julita por su apoyo moral.

A mi directora Albita por el apoyo y el ánimo en los innumerables obstáculos que se presentaron en el camino.

Al profesor Arsenio Hidalgo por sus importantes contribuciones en la parte estadística.

A los Químicos Diana Gómez y en especial a David Arturo por sus sugerencias y buena vibra.

A los profes de diversos departamentos de la Universidad de Nariño por su formación académica.

A los amigos que la u me cruzó en el camino, gracias por la experiencia.

A todas las personas que me acogieron en Ipiales e hicieron de mi estancia en su ciudad una experiencia única.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCION	19
1. OBJETIVOS	21
1.1. OBJETIVO GENERAL	21
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	21
2. ESTADO DEL ARTE	22
2.1. ANTECEDENTES	22
2.2 MARCO TEÓRICO	27
2.2.1 Agua potable	27
2.2.2 Características fisicoquímicas del agua	27
2.2.2.1 Turbiedad	27
2.2.2.2 Color	28
2.2.2.3 pH	28
2.2.3.4 Alcalinidad	29
2.2.3 Clasificación de fuentes de abastecimiento	29
2.2.4 Tratamiento convencional para el funcionamiento de la planta	30
2.2.4.1 Componente físico	30
2.2.4.2 Componente químico	30
2.2.4.3 Componente microbiológico	30
2.2.5. Procesos para el tratamiento de agua	31
2.2.5.1 Procesos de oxidación- aereación	31
2.2.5.2 Mezcla rápida	31
2.2.5.3 Coagulación	31
2.2.5.4 Floculación	37
2.2.5.5 Sedimentación	39
2.2.5.6 Corrección de pH	39
2.2.5.7 Filtración	39
2.2.5.8 Desinfección	39
2.2.6. Tipos de coagulante	40
2.2.7 MARCO NORMATIVO	46
2.2.7.1 Constitución política de Colombia 1991	46
2.2.7.2. Acueducto urbano	47
2.2.7.3. Fuente hídrica del acueducto de Ipiales	49
2.2.7.4. Calidad del agua	50

2.2.8	Pruebas de tratabilidad	53
3.	MATERIALES Y METODOS	55
3.1.	Preparación de las disoluciones	55
3.2.	Muestreo	55
3.3.	Medición de parámetros iniciales	55
3.3.1.	Alcalinidad total	55
3.3.2.	Determinación de pH	56
3.3.3.	Determinación de turbiedad	57
3.3.4.	Determinación de color	57
3.4.	Ensayo de coagulación (JAR TEST)	58
3.4.1.	Técnicas para el test de jarras	59
3.5.	Tratamiento estadístico de datos	59
3.6.	Determinación de aluminio	60
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	61
4.1.	RESULTADOS EXPERIMENTALES	62
4.1.1.	Determinación de la dosis óptima de coagulante	62
4.1.1.1	Determinación de dosis óptima de acuerdo a la turbiedad	63
4.1.1.2.	Porcentaje de remoción de turbiedad por coagulante	69
4.1.2.	Determinación de dosis óptima de acuerdo al color residual.	71
4.1.3.	Influencia de la dosis en el pH	79
4.1.4.	Determinación de aluminio residual	81
4.1.5.	Evaluación técnica del STBS vs PAC	69
	CONCLUSIONES	87
	RECOMENDACIONES	88
	BIBLIOGRAFIA	89
	ANEXOS	

LISTA DE GRAFICOS

	Pág.
Grafica No. 1 Gráfico de interacciones en relación a la turbiedad	63
Grafico No. 2: Gráfico de medias y de turbiedad residual con el método LSD para determinar el mejor coagulante	65
Grafico No. 3: Gráfico de medias y de turbiedad con el método LSD para determinar la dosis óptima con PAC	67
Grafico No. 4: Gráfico de medias y de turbiedad con el método LSD para determinar la dosis óptima con STBL	67
Grafico No. 5: Gráfico de medias y de turbiedad con el método LSD para determinar la dosis óptima con STBS	68
Grafico No. 6: Gráfico de medias y de turbiedad con el método LSD para determinar la dosis óptima con FeCl_3	68
Grafica No. 7: Gráfico de interacciones respecto al porcentaje de remoción de turbiedad	69
Gráfico No. 8: Gráfico de medias y 95% de Fisher LSD para determinar el mejor coagulante respecto al porcentaje de remoción de turbiedad	70
Gráfico No. 9: Gráfico de interacciones en relación al color residual	71
Grafico No. 10: Gráfico de medias y de color residual con el método LSD para determinar el mejor coagulante	73
Grafico No. 11: Gráfico de medias y de color residual con el método LSD para determinar dosis óptima con PAC	74
Gráfico No. 12: Gráfico de medias y de color con el método LSD para determinar la dosis óptima con STBL	75
Gráfico No. 13: Gráfico de medias y de color con el método LSD para determinar la dosis óptima con STBS	76

Gráfico No. 14: Gráfico de medias y de color con el método LSD para determinar la dosis óptima con FeCl_3	76
Gráfico No. 15: Grafico de interacciones respecto al porcentaje de remoción de color	77
Grafico No. 16: Gráfico de medias y 95% de Fisher LSD para determinar el mejor coagulante respecto al porcentaje de remoción de color	78
Gráfico No. 17: Gráfico de interacciones en relación al pH	79
Gráfico No. 18: Gráfico de medias con el método LSD en relación al pH	81
Gráfico No. 19: Aluminio residual vs coagulante	83

LISTA DE TABLAS

	Pag.
Tabla No. 1: Arcillas más comunes	32
Tabla No. 2: Requisitos químicos del sulfato de aluminio tipo B	43
Tabla No. 3: Propiedades generales del FeCl_3 al 40%	44
Tabla No. 4: Resultados de análisis de agua	49
Tabla No. 5: Características físicas del agua para consumo humano	50
Tabla No. 6: Características químicas que tiene efecto adverso en la salud humana	51
Tabla No. 7: Características químicas que tienen implicaciones sobre la salud humana	52
Tabla No. 8: Características químicas que tienen mayores consecuencias económicas e indirectas sobre la salud humana	52
Tabla No. 9: Rangos de características físico-químicas de agua cruda	61
Tabla No. 10: Condiciones de gradientes y tiempos	62
Tabla No. 11: Análisis de Varianza para Turbiedad residual - Suma de Cuadrados Tipo III	64
Tabla No. 12: Pruebas de Múltiple Rangos para Turbiedad residual por coagulante	64
Tabla No. 13: ANOVA para turbiedad residual por dosis de PAC	66
Tabla No. 14: Pruebas de Múltiple Rangos para Turbiedad residual por dosis con PAC	66
Tabla No.15: Pruebas de Múltiple Rangos para % remoción de turbiedad por coagulante	69

Tabla No. 16: Análisis de varianza para color residual - suma de cuadrados tipo III	72
Tabla No. 17: ANOVA para Color residual por dosis de PAC	73
Tabla No. 18: Pruebas de Múltiple Rangos para Color residual por dosis de PAC	74
Tabla No. 19: Análisis De Varianza Para % Remoción de color- Suma De Cuadrados Tipo III	77
Tabla No. 20: Dosis óptima de cada coagulante frente a remoción de turbiedad y color	78
Tabla No. 21: Análisis de Varianza para pH final - Suma de Cuadrados Tipo III	80
Tabla No. 22: Pruebas de Múltiple Rangos para pH final por Coagulante	80
Tabla No. 23: Rangos de características fisicoquímicas de agua cruda para determinación de Al residual	81
Tabla No. 24: Determinación de aluminio residual empleando PAC con dosis óptima 20ppm y STBS con dosis óptima 40ppm	82
Tabla No. 25: Calculo de dosis para aplicar en planta	85
Tabla No. 26: Costos operacionales	85
Tabla No. 27: Instalaciones y equipos para PAC	85

LISTA DE ESQUEMAS

	Pág.
Esquema No. 1: Modelo esquemático del proceso de coagulación	34
Esquema No. 2: Coagulación por adsorción y neutralización	35
Esquema No. 3: Coagulación de barrido	36
Esquema No. 4 Reacciones ácidas de Al^{3+} análogas a las de Fe^{3+}	41
Esquema No. 5: Modelo de neutralización de coloides	42
Esquema No. 6: Diseño general de un sistema de abastecimiento de agua potable.	47
Esquema No. 7: Procedimiento para medir color por el método Hazen (Pt/Co)	58
Esquema No. 8: Determinación de Al	60

LISTA DE ANEXOS

ANEXO 1: Datos de muestreo de agua cruda y resultados de agua tratada

ANEXO 2: Porcentajes de remoción de turbiedad y color

ANEXO 3: Tablas ANOVA para determinación de dosis óptima de coagulante respecto a la turbiedad

ANEXO 4: Tablas ANOVA para determinación de dosis de coagulante respecto al color

ANEXO 5: Prueba de rangos múltiples para dosis óptimas de los coagulantes de acuerdo a la turbiedad

ANEXO 6: Prueba de rangos múltiples para dosis óptimas de los coagulantes de acuerdo al color

GLOSARIO

Coagulante: Los coagulantes son sustancias químicas que actúan anulando las cargas eléctricas sobre la superficie del coloide, permitiendo que las partículas coloidales se aglomeren formando flóculos.

Color: El color en las aguas superficiales y subterráneas se debe principalmente a la presencia de materia orgánica natural, en particular materia húmica soluble.

Partículas coloidales: Las partículas coloidales en el agua por lo general presentan un diámetro entre 1 y 1.000 nanómetros y su comportamiento depende de su naturaleza y origen. Estas partículas presentes en el agua son las principales responsables de la turbiedad.

pH: Es una medida de acidez o alcalinidad de una disolución. El pH indica la concentración de iones hidronio $[H_3O]^+$ presentes en determinadas disoluciones.

Proceso de coagulación (mezcla rápida): Es un proceso de desestabilización química de las partículas coloidales que se produce al neutralizar las fuerzas que los mantienen separados, por medio de la adición de los coagulantes químicos y la aplicación de la energía de mezclado.

Proceso de floculación (mezcla lenta): Es reunir las partículas desestabilizadas por el coagulante para formar aglomeraciones de mayor peso y tamaño que sedimenten con mayor eficiencia.

Turbiedad: La turbiedad es una expresión de la propiedad óptica que hace que los rayos luminosos se dispersen o se absorban, en lugar de que se transmitan sin alteración a través de una muestra.

ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS

Al:	Aluminio
FeCl ₃	Cloruro de hierro
C:	Color
D.L.S.S.S:	Dirección Local de Seguridad Social en Salud
g:	Gramos
L	Litros
m.s.n.m:	Metros sobre el nivel del mar
m ³ :	Metros cúbicos
mg:	Miligramos
mL	Mililitros
min:	Minutos
N:	Normalidad
OMS:	Organización mundial de la salud
ppm:	Partes por millón
PAC:	Policloruro de aluminio
%p/v:	Porcentaje peso/volumen
%v/v:	Porcentaje volumen/volumen
rpm:	Revoluciones por minuto
STBL:	Sulfato de aluminio tipo B líquido
STBS:	Sulfato de aluminio tipo B sólido
T:	Turbiedad
UNT:	Unidad Nefelométrica De Turbiedad
UPC:	Unidades de platino-cobalto
W:	Watts

RESUMEN

Un cuerpo de agua, requiere de algún tratamiento antes de ser distribuida al consumidor, esta puede contener sustancias de diversas clases, algunas de las cuales son peligrosas para salud y otras simplemente crean problemas estéticos. Una de las limitantes en el consumo de agua en zonas rurales y urbanas a nivel mundial es la presencia de partículas en suspensión que se reflejan en color y turbiedades medias y elevadas para lo cual se exigen tratamientos químicos que incrementan el costo de su tratamiento y que conllevan a un riesgo para la salud. Atendiendo a esta problemática se evaluaron alternativas con sustancias químicas como: sulfato de aluminio tipo B sólido y líquido, el cloruro de hierro y el policloruro de aluminio, los cuales son utilizados para el tratamiento de agua potable, con el fin de determinar cuál de ellos presenta un mejor comportamiento ante remoción de turbiedad y color en diferentes muestras de agua cruda analizadas durante el periodo de Abril hasta Agosto de 2015, así mismo se determinó la dosis óptima de cada uno de estos coagulantes.

Para la determinación de dosis óptima, se empleó el método de jarras, escogiendo de ellas la que presentara mejores características de color y turbiedad y que se encontraran dentro de los límites permisibles de acuerdo a la resolución 2115 de 2007.

Los datos arrojados en los ensayos, fueron procesados mediante el programa STATGRAPHICS Centurion XVI tomando como factores principales el tipo de coagulante y la dosis y como variables de respuesta, la turbiedad y color residuales, también se analizó la influencia de los factores sobre el pH final.

Finalmente se realizó la comparación técnica para evaluar la posible implementación del mejor coagulante en la planta de potabilización de agua en la empresa EMPOOBANDO E.S.P

ABSTRACT

A body of water requires some treatment before being distributed to the consumer, it may contain several types of substances, some of them are considered dangerous to health and many others simply create esthetic issues. One of the limitations on water consumption in rural and urban areas is the presence of suspended particles that are reflected in color and medium and high turbidity for which chemical treatments that increase the cost of treatment and involve the risk of health.

To deal with this problem during the project were evaluated different alternatives with many chemical substances such as aluminum sulphate type B solid and liquid, iron chloride and polyvinyl aluminum, which are used for the treatment of drinking water, in order to determine which of them presents a better performance against turbidity removal and color in different samples of raw water analyzed during the period of April to August 2015, furthermore it was determined the optimal dose of each of these coagulants.

To determine the optimal dose it was used the pitchers method, for selecting the best characteristics of color and turbidity in the best substance with the permissible limits according to resolution 2115 of 2007.

The data obtained in the tests were processed using the STATGRAPHICS Centurion XVI program taking as main factors the type of coagulant dosage and as response variables, turbidity and residual color, the influence of factors on the final pH was also analyzed.

Finally the technical comparison was performed to evaluate the possible implementation of the best coagulant in water purification plant in the company EMPOOBANDO E.S.P

INTRODUCCIÓN

El agua es esencial para la vida, la producción de alimentos, generación de electricidad, calidad de vida saludable, elaboración de diversos productos en todas las áreas y en especial para asegurar la sostenibilidad de ecosistemas.

El creciente interés por el tema ambiental y de salud pública, los estándares internacionales de calidad y medio ambiente han motivado el desarrollo y evaluación de los procesos existentes de potabilización y una mayor exigencia ambiental a los nuevos proyectos.

La contaminación ha aumentado en los últimos años y también ha decrecido la calidad de muchos depósitos de agua que son ocasionados por las termoeléctricas. El aumento en la actividad industrial ha incrementado la polución de las aguas de la superficie terrestre y está contaminando cada día los depósitos de agua subterráneas.

La contaminación hídrica en Colombia proviene principalmente de las actividades industriales, domésticas y agropecuarias, además del aporte de residuos de las explotaciones mineras y de sitios de disposición final de residuos. En los grandes centros urbanos y núcleos industriales del país, la calidad del recurso hídrico se ha deteriorado por la descarga de residuos peligrosos (básicamente de la industria química, farmacéutica y de transformación), la descarga de materia orgánica y la presencia de microorganismos patógenos, aportados por algunos tipos de industrias y servicios (hospitales y otros).^[1]

En la subcuenca del Río Blanco tiene su origen en el Nevado de Cumbal, a una altitud de 4600 m.s.n.m. hace su recorrido de occidente a oriente, hasta desembocar en el Río Guáitara. De los 3.100 m.s.n.m. a 2.800 m.s.n.m, es la zona más crítica del río por cuanto en este sector se localizan: lavaderos de ropa, basureros, vertimientos de aguas negras de la zona rural y la desembocadura del río Chiquito, el cual transporta los vertimientos del alcantarillado del Municipio de Cumbal; en esta zona del río, se localiza la bocatoma del acueducto urbano de Ipiales. Otro aspecto de gran relevancia que contribuye al deterioro de las condiciones del Río Blanco es la proliferación de actividades como talas y quemas en sus riberas que destruyen la vegetación natural protectora del lecho del río y el vertimiento de agroquímicos.^[2]

¹ Lenntech Agua & Tratamiento del Aire. [En línea] disponible en: <<http://www.lenntech.com/espanol/home-esp.htm>>

² Plan De Ordenamiento Del Recurso Hídrico - PORH Del Rio Blanco. Corponariño 2011. [En línea] Disponible en: <http://corponarino.gov.co/expedientes/descontaminacion/porhrioblanco.pdf>

La potabilización del agua es objeto de importantes estudios sobre calidad, eficiencia y bajos costos operacionales, donde el objetivo principal es encontrar soluciones a diferentes problemáticas tales como la contaminación de fuentes hídricas entre otras. La turbiedad y el color del agua son principalmente causados por partículas muy pequeñas, llamadas partículas coloidales. Estas partículas permanecen en suspensión en el agua por tiempo prolongado y pueden atravesar un medio filtrante muy fino. Por otro lado aunque su concentración es muy estable, no presentan la tendencia de aproximarse unas a otras.

Dentro de las etapas del tratamiento, son comunes la coagulación y floculación, que dependen no solo de las estructuras de la planta sino también de diferentes variables del agua a tratar, entre las cuales están turbiedad, alcalinidad, pH, color, así como también la dosis de agente coagulante. Esta dosis está determinada por medio de una prueba de jarras y dimensionada para las condiciones de operación de la planta; cuando se opera con exceso de coagulante aumentan los costos del tratamiento y además la coagulación es deficiente, por el contrario, cuando hay déficit conlleva a un incumplimiento de los objetivos de la calidad del agua y seguramente a daños en la salud. ^[1]

El sulfato de Aluminio es el coagulante más usado en Colombia ^[3]. Es por ello que la empresa de servicios públicos EMPOOBANDO E.S.P estuvo interesada en realizar la evaluación con cuatro tipos de floculante, como son el Sulfato de Aluminio Granulado Tipo B, actualmente utilizado por EMPOOBANDO E.S.P; Sulfato de Aluminio Líquido, cloruro férrico y policloruro de aluminio (PAC); correlacionando los ensayos del rango de dosis óptima de coagulante con las características de turbiedad, color y pH del agua cruda y agua tratada.

La evaluación comparativa de la eficiencia de floculación de los cuatro tipos de floculantes, se realizó mediante prueba de Jarras y análisis estadístico de la eficiencia en coagulación-floculación.

¹ Lenntech Agua & Tratamiento del Aire. [En línea] disponible en: <<http://www.lenntech.com/espanol/home-esp.htm>>

³ Huertas Rojas Ana Fernanda; Quintero Pérez Henderson Ivan. Estudio Aplicabilidad e Implementación del Sulfato de Aluminio tipo B, Líquido como coagulante en la planta de tratamiento de agua potable del municipio de Lebrija (Santander). Tesis Ingeniería química. Bucaramanga- Santander, Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. 2007

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar el comportamiento de los coagulantes y determinar la dosis óptima del más adecuado en función de parámetro de turbiedad y color para la potabilización de agua de la planta de EMPOOBANDO E.S.P

1.2 Objetivos Específicos

- Evaluar la eficiencia de cuatro tipos de coagulantes Sulfato de Aluminio tipo B sólido (STBS), sulfato de Aluminio tipo B líquido (STBL), cloruro férrico (FeCl_3) y policloruro de Aluminio (PAC) en el proceso de clarificación de aguas crudas.
- Establecer la relación entre turbiedad de agua cruda y el rango de dosis óptimo para la coagulación-floculación.
- Estudiar la implementación en la planta de tratamiento de agua potable EMPOOBANDO E.S.P del coagulante de mayor eficiencia.

2. ESTADO DEL ARTE

2.1 ANTECEDENTES

Una de las mayores preocupaciones en la historia de la humanidad ha sido la búsqueda de buenas prácticas de producción, en este caso, la obtención de agua de óptima calidad para su consumo. De acuerdo con estadísticas, el 45% de la población mundial carece de un acceso directo a los servicios de agua potable, mil millones de personas están sin acceso al servicio, dos mil quinientos millones no cuentan con servicio de purificación y en los países desarrollados los niños consumen de 30 a 50 veces más agua que en los países llamados en vías de desarrollo. La potabilización del agua suele consistir en la eliminación de compuestos volátiles seguido de la precipitación de impurezas con floculantes, filtración y desinfección con cloro u ozono.

El suministro de agua potable es un problema que ha ocupado al hombre desde la antigüedad. En algunas zonas se construían y construyen cisternas que recogen las aguas pluviales. Estos depósitos suelen ser subterráneos para que el agua se mantenga fresca y sin luz, la que favorecería el desarrollo de algas. En Europa se calcula con un gasto medio por habitante de entre 150 y 200 litros de agua potable al día aunque se consumen como bebida tan sólo entre 2 y 3 litros. En muchos países el agua potable es un bien cada vez más escaso y se teme que puedan generarse conflictos bélicos por la posesión de sus fuentes ^[4].

En Colombia la tasa de morbilidad y mortalidad infantil por enfermedades relacionadas con el consumo de agua de baja calidad, entre las que se encuentran la diarrea y el cólera, aún es alta. Las malas aguas generan un impacto negativo en la salud pública que según cálculos recientes asciende aproximadamente a 1,96 billones de pesos al año, de los cuales el 70% corresponde al impacto de la morbilidad y mortalidad por enfermedades diarreicas y el 30% restante al gasto en prevención. Esta situación es más grave en las zonas rurales y de población dispersa del país.

Según cálculos del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (2002), del 56% de la población rural que tiene alguna forma de abastecimiento de agua, solo el 6% cuenta con agua a la que se le da algún tratamiento para desinfectarla. Por esto es muy importante que los municipios del país cuenten con un sistema que permita hacerle seguimiento constante a la calidad del agua que distribuyen a sus habitantes. ^[5]

⁴ ROMERO, Mynor. Tratamientos utilizados en potabilización de agua. Facultad de ingeniería. Universidad Rafael Landívar.

⁵El agua potable y el saneamiento básico en los planes de desarrollo. [En línea] Disponible en: http://www.procuraduria.gov.co/portal/media/file/descargas/publicaciones/parte3_agua.pdf

Los tratamientos para potabilizar el agua, se pueden clasificar de acuerdo con:

- Los componentes o impurezas a eliminar.
- Parámetros de calidad.
- Grados de tratamientos de agua ^[4]

En la actualidad los polielectrolitos son los más utilizados debido a su menor impacto ambiental y a la calidad del floculo que producen. Para poder determinar la cantidad de producto a agregar al agua se tiene que hacer un ensayo conocido como “Jar Test” o Test de Jarras con el agua a tratar. Este test mide básicamente el efecto de las diferentes combinaciones de dosis de coagulante y PH.

Según Black y colaboradores, los primeros aparatos para realizar la prueba de jarras fueron desarrollados en los Estados Unidos, entre 1918-1921, por Langelier y Baylis separadamente. Desde entonces la prueba de jarras ha constituido uno de los principales instrumentos de trabajo en las plantas de tratamiento de aguas en todo el mundo.

En una encuesta hecha por Ockershausen en los Estados Unidos, en 1965, se encontró que la prueba de jarras se usaba en 42 de las 45 plantas de tratamiento de agua potable que contestaron el cuestionario, pero que solo el 50% de los casos resultaron de las pruebas de jarras coincidían con los objetivos en la planta. ^[6]

En Colombia en el interés de mejorar la calidad de agua potable, se han realizado varios estudios sobre el estudio de coagulantes para potabilización de agua y dosis óptima del mejor coagulante para la potabilización de agua en pro de mejorar la calidad del recurso hídrico para los usuarios.

⁴ ROMERO, Mynor. Tratamientos utilizados en potabilización de agua. Facultad de ingeniería. Universidad Rafael Landívar.
⁶ Eliminación de Contaminantes: Test de Jarras y Adsorción [En línea] Disponible en: <<http://ocw.uc3m.es/ingenieria-quimica/quimica-ii/practicas-1/PR-F-005.pdf>>

En el año 2005 se realizó el *“Estudio de aplicabilidad e implementación del policloruro de aluminio como coagulante primario en la planta La Flora del AMB. S.A E.S.P”* Trabajo realizado por Christian cañas Rojas, Ingeniero Químico egresado de la Universidad Industrial de Santander.

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 de aluminio y el PAC. Los resultados obtenidos demostraron que el PAC 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. ^[7]

En el año 2007 se llevó a cabo el *“Estudio de Aplicabilidad e Implementación Del Sulfato de Aluminio Tipo B Líquido Como Coagulante en la Planta de Tratamiento de Agua Potable del Municipio De Lebrija (Santander)”* trabajo desarrollado por Ana Fernanda Huertas Rojas y Henderson Iván Quintero Pérez, Ingenieros Químicos egresados de la Universidad Industrial de Santander.

La implementación de STBL como coagulante primario en la planta de tratamiento de agua potable del municipio de Lebrija se analiza desde el punto de vista técnico, económico y ambiental; mediante el desarrollo de pruebas de laboratorio que tuvieron en cuenta variables operacionales de la planta, además, un análisis económico del consumo de coagulante en los últimos años y pruebas físico-químicas del agua cruda y de agua tratada en la prueba de campo ejecutada.

Se utilizó un diseño de experimento general de proceso involucrando cinco factores y dos niveles para conocer las características del afluente, determinar las condiciones reales de operación de la planta y la combinación de factores buscando la más alta remoción de turbiedad y color. ^[3]

³ Huertas Rojas Ana Fernanda; Quintero Pérez Henderson Ivan. Estudio Aplicabilidad e Implementación del Sulfato de Aluminio tipo B, Líquido como coagulante en la planta de tratamiento de agua potable del municipio de Lebrija (Santander). Tesis Ingeniería química. Bucaramanga- Santander, Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. 2007

⁷ Cañas Rojas Christian. Estudio de aplicabilidad e implementación del policloruro de aluminio como coagulante primario en la planta la flora del AMB. S.A E.S.P. Tesis Ingeniería química. Bucaramanga – Santander, facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Universidad Industrial de Santander. 2005

Posteriormente se estudiaron muestras de agua organizadas en dos escenarios de turbiedad de agua cruda; turbiedad inicial alta y turbiedad inicial baja, para determinar la dosis óptima de cada coagulante y se procedió a validar los dos sulfatos mediante la determinación de tiempo óptimo de mezcla rápida, gradiente y tiempo de floculación, velocidad de sedimentación, influencia de pH en la coagulación e influencia del coagulante en el pH final.

Finalmente se hizo una prueba de campo de 16 horas con el STBL que permitió un análisis comparativo técnico, económico y ambiental más preciso. Este estudio demostró que el STBL presenta mejores resultados en remoción de turbiedad, color y mayor calidad de agua tratada en condiciones normales de operación, además, la dosis optima aplicada reflejó favorabilidad económica en costo de consumo de coagulante. ^[3]

En el año 2010 se llevó a cabo un estudio denominado *“Obtención de la mínima dosis de reemplazo de policloruro de aluminio en aguas y aguas de Pereira.”* Trabajo realizado por la Química Industrial Rosa Virginia Garcés Paz egresada de la Universidad Tecnológica de Pereira

En el estudio para la obtención de la mínima dosis de reemplazo de policloruro de aluminio (PAC), se analizaron aguas crudas entre 2 a 43,3 UNT de turbiedad y 20 a 435 UPC de color. Estas aguas se trataron con dosis de 15, 18 y 23 ppm de sulfato de aluminio (SAG), cada una de estas dosis se mezclaron con 6 y 8 ppm de PAC.

Una vez terminado cada ensayo se midieron las variables fisicoquímicas de alcalinidad, color, pH, aluminio residual y la turbiedad del agua clarificada, estas dos últimas se utilizaron como variables de respuesta y se analizaron estadísticamente mediante gráficos de control. ^[8]

³ Huertas Rojas Ana Fernanda; Quintero Pérez Henderson Ivan. Estudio Aplicabilidad e Implementación del Sulfato de Aluminio tipo B, Líquido como coagulante en la planta de tratamiento de agua potable del municipio de Lebrija (Santander). Tesis Ingeniería química. Bucaramanga- Santander, Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. 2007

⁸ Garcés Paz Rosa Virginia. Obtención de la mínima dosis de reemplazo de policloruro de aluminio en aguas y aguas de Pereira. Tesis Química Industrial Pereira-Risaralda, Universidad Tecnológica de Pereira. 2010

En el año 2011 se efectuó un estudio designado *“Ajuste Matemático Del Comportamiento De La Turbiedad Residual En Los Procesos De Floculación-Coagulación Del Agua Realizados En La Planta La Flora Del A.M.B S.A E.S.P Empleando Policloruro De Aluminio Líquido”* Trabajo realizado por Margarita Rosa García-Rey Santos, Ingeniera Química egresada de la Universidad Industrial de Santander.

Este trabajo se enfoca en la obtención de un modelo para la turbiedad residual del agua a escala de laboratorio en los procesos de coagulación-floculación utilizando policloruro de aluminio líquido como coagulante, y a su vez, usando parámetros medidas de turbiedad, color, pH y alcalinidad del agua cruda.

Se utilizaron pruebas de hipótesis para la determinación de los factores influyentes en el comportamiento de la turbiedad residual del agua, se obtuvo que la dosis de policloruro de aluminio líquido y la turbiedad, color, pH y alcalinidad del agua cruda influyen de manera significativa en el comportamiento de la misma. ^[9]

En el año 2012 en la ciudad de Pereira se desarrolló un estudio denominado *“Determinación De Las Dosis Óptimas Del Coagulante Sulfato De Aluminio Granulado Tipo B En Función De La Turbiedad Y El Color Para La Potabilización Del Agua En La Planta De Tratamiento De Villa Santana”* trabajo realizado por Daniela Castrillón Bedoya y María De Los Ángeles Giraldo . Tecnólogas químicas egresadas de la Universidad tecnológica de Pereira.

En la Planta de tratamiento de agua de Villa Santana, se realizaron ensayos de tratabilidad con el coagulante sulfato de aluminio Granulado TIPO B con el fin de determinar las dosis óptimas requeridas para la remoción de turbiedad y color en diferentes muestras de agua recogidas durante un periodo de tiempo específico.

Cada muestra recogida presentaba valores significativos en cuanto a turbiedad y color con el fin de obtener un rango amplio para analizar.

El método por el cual se determinaron dichas dosis óptimas fue mediante el test de jarras y estas dosis fueron escogidas tomando como base el cumplimiento del decreto 1575 resolución 2115/2007. Los resultados obtenidos después de realizar el test de jarras arrojaron resultados óptimos en cuanto a la remoción de los parámetros fisicoquímicos analizados y el cumplimiento de ellos según la norma. ^[10]

⁹ García-Rey Santos Margarita Rosa. Ajuste Matemático Del Comportamiento De La Turbiedad Residual En Los Procesos De Floculación-Coagulación Del Agua Realizados En La Planta La Flora Del A.M.B S.A E.S.P Empleando Policloruro De Aluminio Líquido. Tesis Ingeniera Química. Bucaramanga – Santander, facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Universidad Industrial de Santander. 2011

¹⁰ Castrillón Bedoya Daniela; Giraldo María de los Ángeles. Determinación de las dosis óptimas del coagulante Sulfato de Aluminio granulado tipo B en función de la turbiedad y el color para la potabilización del agua en la planta de tratamiento de Villa Santana. Tesis Tecnología Química. Pereira-Risaralda, Universidad Tecnológica de Pereira, Facultad de Tecnologías. 2012

2.2 MARCO TEORICO

2.2.1 Agua potable

El agua potable, es toda agua natural o producida por un tratamiento de potabilización que cumpla con las normas de calidad establecidas para tal fin. Estas normas se basan en estudios toxicológicos y epidemiológicos, así como en consideraciones estéticas. El agua potable se produce a partir del agua contaminada que proviene de aguas superficiales (lagos, arroyos, lagunas, ríos, mares, océanos y glaciares), subterráneas (pozos profundos) y atmosféricas (lluvias).^[10]

2.2.2 Características fisicoquímicas del agua

La presencia de sustancias químicas disueltas e insolubles en el agua que pueden ser de origen natural o antropogénico define su composición física y química. Aunque solamente alrededor del 2% del agua de consumo público se destina a uso del consumidor, el consumidor es cada vez más exigente en relación al olor y sabor del agua que recibe.^[11]

2.2.2.1 Turbiedad

Es una expresión de la propiedad o efecto óptico causado por la dispersión o interferencia de los rayos luminosos que pasan a través de una muestra de agua; en otras palabras, la turbiedad es la propiedad óptica de una suspensión que hace que la luz sea remitida y no transmitida a través de la suspensión. La turbiedad del agua puede ser causada por una gran variedad de materiales en suspensión, que varían en tamaño desde dispersiones coloidales hasta partículas gruesas, entre otros.

La determinación de turbiedad es de gran importancia en aguas para consumo humano y en una gran cantidad de industrias procesadoras de alimentos y bebidas. Los valores de turbidez sirven para determinar el grado de tratamiento requerido por una fuente de agua cruda, su filtrabilidad y consecuentemente, la tasa de filtración, así como para determinar la potabilidad del agua^[12]

¹⁰ Castrillón Bedoya Daniela; Giraldo María de los Ángeles. Determinación de las dosis óptimas del coagulante Sulfato de Aluminio granulado tipo B en función de la turbiedad y el color para la potabilización del agua en la planta de tratamiento de Villa Santana. Tesis Tecnología Química. Pereira-Risaralda, Universidad Tecnológica de Pereira, Facultad de Tecnologías. 2012

¹¹ ARBOLEDA, J. Teoría y práctica de la purificación del agua. Tercera Edición. Bogotá, Asociación Colombiana de Ingeniería sanitaria y ambiental "ACODAL" Vol. I, 2000

¹² ROMERO ROJAS, Jairo Alberto. Calidad del Agua. Primera Edición, 2002. P 67, 69, 70, 71.

2.2.2.2 Color

Las causas más comunes del color del agua son la presencia de hierro y manganeso coloidal o en disolución; el contacto del agua con desechos orgánicos, hojas, madera, raíces, etc., en diferentes estados de descomposición y la presencia de taninos, ácido húmico y algunos residuos industriales. El color natural en el agua existe principalmente por efecto de partículas coloidales cargadas negativamente; debido a esto, su remoción puede lograrse con ayuda de un coagulante de sal de ión metálico trivalente como el Al^{3+} o el Fe^{3+} .

Los coloides hidrofóbicos no reaccionan con el agua pero los hidrofílicos sí; las sustancias que producen color son hidrofílicas. De importancia en el tratamiento del agua es que los coloides hidrofílicos pueden reaccionar químicamente con el coagulante usado en el proceso de tratamiento de agua, así, los colores hidrofílicos requieren mayor cantidad de coagulante que los hidrofóbicos [13]

Dos tipos de color se reconocen en el agua: el color verdadero, o sea el color de la muestra una vez que su turbiedad ha sido removida, y el color aparente que incluye no solamente el color de las sustancias en disolución y coloidales sino también el color debido al material suspendido. El color aparente se determina sobre la muestra original sin filtración o centrifugación previa.

La remoción del color es una función del tratamiento del agua y se practica para hacer un agua adecuada para usos generales o industriales. La determinación del color es importante para evaluar las características del agua, la fuente del color y la eficiencia del proceso usado para su remoción; cualquier grado de color es objetable por parte del consumidor y su remoción, es por tanto, objetivo esencial del tratamiento. [10]

2.2.2.3 pH

A nivel general, el pH es un indicador de la acidez de una sustancia, la escala de pH varía de 0 a 14, siendo 7 el rango promedio. Un pH menor a 7 indica acidez, mientras que uno mayor a 7 indica un rango básico. Por definición el pH es en realidad una medición de la cantidad relativa de iones de hidrógeno e hidróxido en el agua. Se considera que el pH de aguas crudas debe estar comprendida entre 6.5 y 8.5 y de aguas tratadas debería estar entre 6.5 y 9. Por lo general este rango permite controlar sus efectos en el comportamiento de otros constituyentes del agua. El pH tiene una gran influencia en la coagulación. Valores por encima o debajo del pH óptimo producen malos resultados [11]

⁴ Castrillón Bedoya Daniela; Giraldo María de los Ángeles. Determinación de las dosis óptimas del coagulante Sulfato de Aluminio granulado tipo B en función de la turbiedad y el color para la potabilización del agua en la planta de tratamiento de Villa Santana. Tesis Tecnología Química. Pereira-Risaralda, Universidad Tecnológica de Pereira, Facultad de Tecnologías. 2012

⁵ ARBOLEDA, J. Teoría y práctica de la purificación del agua. Tercera Edición. Bogotá, Asociación Colombiana de Ingeniería sanitaria y ambiental "ACODAL" Vol. I, 2000

¹³ BARRENECHEA, Ada. OPS/CEPIS. Tratamiento de Agua para Consumo Humano. Manual I, Tomo I Capítulo 4 y 8: Coagulación. Versión en PDF. Lima, 2004.

2.2.2.4 Alcalinidad

La alcalinidad del agua se debe principalmente a sales de ácidos débiles y bases fuertes y, estas sustancias actúan como amortiguadoras para resistir la caída de pH resultante a la adición de ácidos. Este concepto se utiliza mucho en la práctica del tratamiento de aguas residuales.

Internacionalmente es aceptada una alcalinidad mínima de 20 mg de CaCO_3/L para mantener la vida acuática. Cuando se tiene alcalinidades inferiores se vuelve muy sensible a la contaminación, ya que no posee la capacidad de oponerse a las modificaciones que generan disminuciones de pH (Acidificación). Se han propuesto clasificaciones de las aguas según su capacidad amortiguadora (alcalinidad), lo que permite manejar descriptores categóricos sencillos a ser utilizados en el análisis de calidad de agua ^[11].

Los bicarbonatos, carbonatos y el ion hidroxilo representan las formas más importantes de alcalinidad, pero en algunos casos pueden contribuir los boratos, silicatos, fosfatos y otras bases. Aunque el bicarbonato, HCO_3^- , es la forma más común de alcalinidad, es importante considerar que en el agua existe en realidad un sistema de equilibrio entre CO_2 , H_2CO_3 , HCO_3^- , $\text{CO}_3^{=}$, H_3O^+ y el OH^- ^[15]. En resumen se podría decir que las concentraciones de estas especies (hidróxidos, carbonatos y bicarbonatos) producen en el agua un efecto tampón ya que absorben protones manteniendo el pH a un valor estable. ^[14]

2.2.3 Clasificación de la fuente de abastecimiento

La calidad del agua cruda oscila en gran proporción de una fuente a otra; por ello el tipo de tratamiento requerido para producir agua potable también varía. Dependiendo de la calidad del agua cruda, el grado de complejidad del tratamiento es diferente.

Según la resolución 2115 de 2007, el gobierno de Colombia fijó una serie de criterios para calificar los estándares de una fuente de agua cruda, que se utilizará para realizar suministros domésticos, con base en estos criterios, también la legislación hace sugerencias sobre el tipo de tratamiento que debe realizarse en el agua. Las fuentes se clasifican en: Excelente, Buena y Fuente Pobre ^[15].

¹¹ ARBOLEDA, J. Teoría y práctica de la purificación del agua. Tercera Edición. Bogotá, Asociación Colombiana de Ingeniería sanitaria y ambiental "ACODAL" Vol. I, 2000

¹⁴ ANDIA CARDENAS, Yolanda. Evaluación de plantas y desarrollo tecnológico. Tratamiento de agua: coagulación-floculación. Lima. Abril del 2000 [En línea] Disponible en: http://www.sedapal.com.pe/c/document_library/get_file?uuid=2792d3e3-59b7-4b9e-ae55-56209841d9b8&groupId=10154

¹⁵ MINISTERIO DE SALUD. Decreto 1594 de 1998. República de Colombia. Capítulos I y IV

2.2.4 Tratamiento convencional para el funcionamiento de la planta.

El sistema de tratamiento de tipo convencional debe contener tres componentes fundamentales: tratamiento físico, químico y microbiológico ^[16]

2.2.4.1 Componente físico

Con este se busca la eliminación de la turbiedad y color; es decir la eliminación de materias en suspensión, finamente divididas, que no sedimentan fácilmente, acompañadas muchas veces de materias orgánicas coloidales o disueltas, que no son retenidas por la simple filtración. Para ellos es necesario un tratamiento previo con coagulante químico, seguido de decantación o clarificación y luego filtración, a través de un material inerte y finalmente un tratamiento de desinfección, más o menos intenso, según el grado de contaminación.^[17]

2.2.4.2 Componente químico

El tratamiento corrector químico se refiere a la corrección del pH del agua, a la reducción de la dureza, a la eliminación de los elementos nocivos o al agregado de ciertos productos químicos, buscando siempre mejorar la calidad del agua. La corrección de pH puede hacerse agregando cal o carbonato de sodio, antes o después de la filtración. La reducción de la dureza, puede hacerse por métodos simples (cal, soda, Zeolita o resinas) o bien por métodos compuestos (cal-soda, cal zeolita, cal-resina). ^[17]

2.2.4.3. Componente microbiológico

El tratamiento bacteriológico se refiere casi exclusivamente a la desinfección con cloro, pudiéndose utilizar cloro puro, sales clorogénas o hipocloritos. Las dosis a utilizar generalmente se fijan con base en el cloro residual. Luego de aplicar este tratamiento, el agua será apta para el consumo humano y se conducirá por gravedad hasta el tanque de almacenamiento y distribución. ^[17]

¹⁶ ESTUDIOS Y DISEÑOS PARA LA CONSTRUCCION DE LA CIUDADELA ALVARO URIBE VELEZ EN EL MUNICIPIO DE GIRÓN, Planta de tratamiento de agua potable. Volumen IIIa. Pa. 4-6

¹⁷ LORENZO-ACOSTA, Yaniris. Estado del arte del tratamiento de aguas por coagulación-floculación. Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar, 2006. P 3,4

2.2.5 Procesos para el tratamiento de agua

2.2.5.1 Proceso de Oxidacion-Aireacion:

La aireación es el proceso unitario mediante el cual el agua es puesta en contacto íntimo con el aire con el propósito de modificar la concentración de sustancias volátiles contenidas en ella. En resumen es el proceso de introducir aire al agua. Las funciones más importantes de la aireación son: transferir oxígeno al agua para aumentar el OD, disminuir la concentración de CO₂, disminuir la concentración de H₂S, remover gases como metano, cloro y amoníaco, oxidar hierro y manganeso y remover sustancias volátiles productoras de olores y sabores. Con esto, cumple sus objetivos de purificación del agua mediante el arrastre o barrido de sustancias volátiles causado por la mezcla turbulenta del agua con el aire ^[18]

2.2.5.2 Mezcla rápida

La canaleta Parshall es una estructura que permite medir el caudal y efectuar la mezcla rápida. Es una unidad muy utilizada que trabaja con el concepto de resalto hidráulico provocado para mezclar los reactivos con el agua. Por lo tanto, la mezcla rápida es indispensable para tener un uso racional de productos químicos.

2.2.5.3 Coagulación

El agua puede contener una variedad de impurezas, solubles e insolubles; entre estas últimas destacan las partículas coloidales, las sustancias húmicas y los microorganismos en general. Tales impurezas coloidales presentan una carga superficial negativa, que impide que las partículas se aproximen unas a otras y que las lleva a permanecer en un medio que favorece su estabilidad. Las partículas coloidales en el agua por lo general presentan un diámetro entre 1 y 1.000 milimicrómetros y su comportamiento depende de su naturaleza y origen. Estas partículas presentes en el agua son las principales responsables de la turbiedad. ^[19]

Existen diversos tipos de coloides entre los cuales se destacan las arcillas (Tabla No. 1) y ácidos húmicos. Las arcillas son coloides hidrófobos constituidas principalmente por aluminio, silicio, magnesio, potasio, oxígeno e hidrógeno y se caracterizan por ser termodinámicamente inestables con respecto a la formación de grandes cristales no coloidales. Por otra parte, las sustancias húmicas están compuestas por moléculas aromáticas de alto peso molecular que muestran características polianiónicas en soluciones neutras o alcalinas. ^[13]

¹⁰ PLANTA CONTINUA. Sistemas hidráulicos y sanitarios Ltda. "SIHSA".

¹³ BARRENECHEA, Ada. OPS/CEPIS. Tratamiento de Agua para Consumo Humano. Manual I, Tomo I Capítulo 4 y 8: Coagulación. Versión en PDF. Lima, 2004.

¹⁹ Teoría diseño y control de los procesos de clarificación del agua [En línea] Disponible en: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/scan/002320/002320-04a.pdf>

Tabla No. 1: Arcillas más comunes

Caolinita	$Al_4 (Si_4 O_{10}) (OH)_8 + Al_4 (Si_4 O_6) (OH)_{16}$
Montmorillonita (bentonita)	$Al (Mg) (Si_8 O_{20}) (OH)_4 \cdot XH_2O^*$
Ilita	$K_y Al_4 (Fe_4 Mg_4 Mg_{16}) (Si_8 - Y Al_y) O_{20}^*$
Muscovita	$K_y Al_4 (Al_2 Si_6 O_{20}) (OH)_4$

* Los elementos entre paréntesis pueden ser sustituidos por el material que se encuentra a la izquierda del paréntesis.

Fuente: BARRENECHEA, Ada. OPS/CEPIS. Tratamiento de Agua para Consumo Humano.

Para desestabilizar las partículas coloidales, se lleva a cabo el proceso de coagulación- floculación que consiste en la aglomeración de las partículas coloidales presentes en el agua formando pequeños gránulos con un peso específico superior al del agua llamados floc. La carga eléctrica de la superficie de las partículas coloidales es el factor que contribuye, en mayor medida, a su estabilidad a largo plazo puesto que las partículas que tendrán tendencia a formar aglomerados son repelidas mutuamente por sus cargas eléctricas ^[20], en la coagulación ocurre la desestabilización de estas partículas suspendidas, o sea la remoción de las fuerzas que las mantienen separadas, mientras que en el proceso de floculación ocurre el transporte de ellas dentro del líquido para que las partículas ya desestabilizadas choquen unas con otras para formar coágulos mayores; de esta forma las partículas sedimentan y ocurre la remoción de los materiales en suspensión, lo que permite que el agua alcance las características físicas y organolépticas adecuadas para ser llamada potable ^[21].

Este proceso se realiza para lograr la desestabilización de partículas coloidales, para quitar los coloides del agua, la mejor solución es realizar como primer paso una coagulación de las partículas con un agente coagulante y comienza en el mismo instante en que se agrega el coagulante al agua y dura fracciones de segundos ^[22]

¹³ BARRENECHEA, Ada. OPS/CEPIS. Tratamiento de Agua para Consumo Humano. Manual I, Tomo I Capítulo 4 y 8: Coagulación. Versión en PDF. Lima, 2004.

²⁰ STEEL, e. w; MCGHEE, Terence. J. Abastecimiento de agua y alcantarillado, Barcelona, 1991. P 252-254.

²¹ VALENCIA, Jorge Arboleda. Teoría y práctica de la purificación del agua Tomo I, Colombia, 2000. P 43-47.

²² Universidad Libre Pereira, 2011. [En línea] Disponible en: <www.unilibrepereira.edu.co/portal/archivos/pdf/inftecnico.pdf>

El objetivo de este paso es desestabilizar la carga electrostática coloidal para promover su aglomeración futura durante el paso de la floculación. Debido a que son partículas de bajo diámetro, son responsables de la turbiedad o del color del agua. La coagulación es un proceso complejo que se ve afectado por los siguientes factores: ^[23].

- Características del agua
- Tipo y dosis de coagulante
- pH de coagulación
- Condiciones de mezcla
- Temperatura.

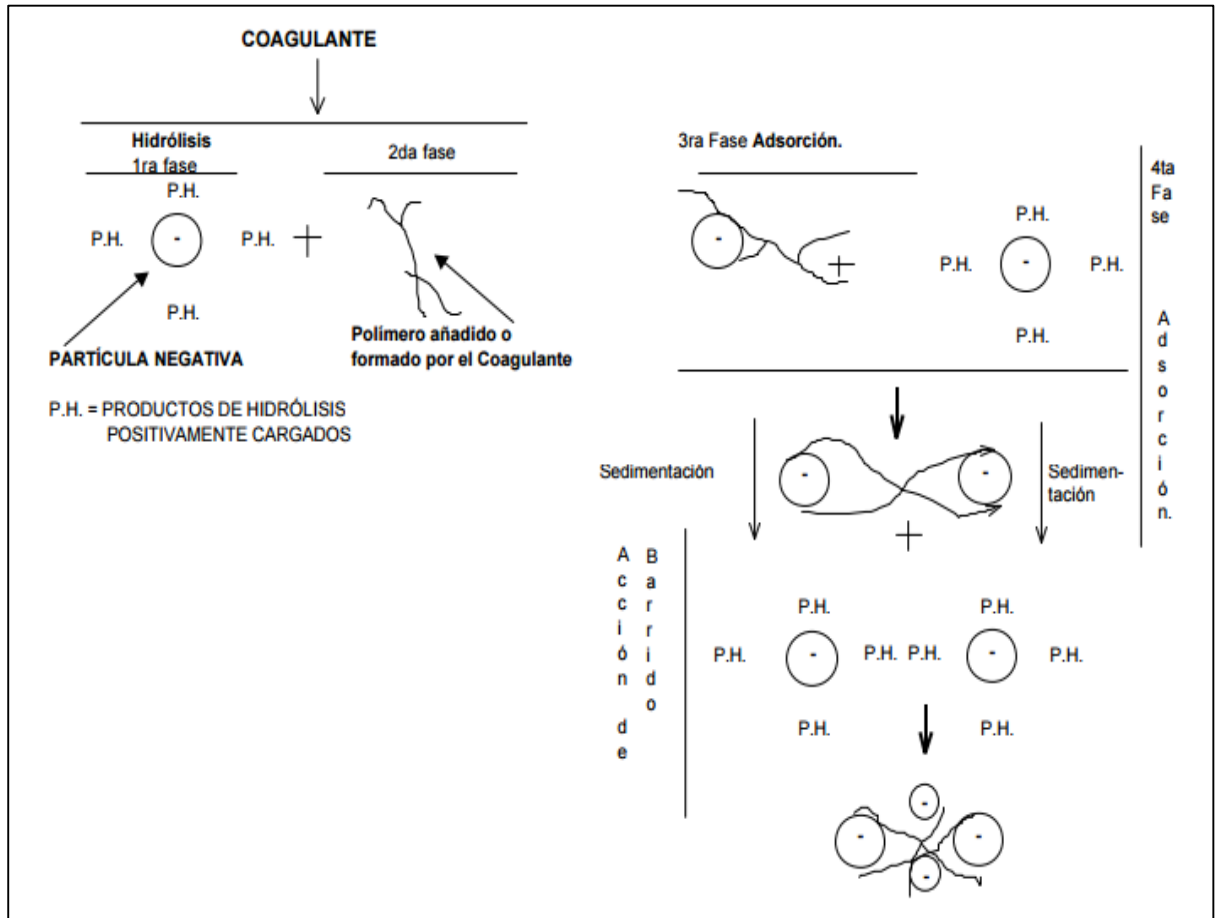
Etapas del proceso de coagulación

En el esquema No.1 se presenta el modelo del proceso de coagulación que comprende las siguientes etapas:

- Primera Fase: Hidrólisis de los coagulantes y desestabilización de las partículas existentes en la suspensión.
- Segunda Fase: Precipitación y formación de componentes químicos que se polimerizan.
- Tercera Fase: Adsorción de las cadenas poliméricas en la superficie de los coloides.
- Cuarta Fase: Adsorción mutua entre los coloides.
- Quinta Fase: Acción de barrido.

²³ KEMMER, Frank N; McCallon, Jhon. Manual del agua, tratamiento y aplicaciones. 1ed. México. NalcoChemicalCompany. Mc Graw Hill, 1989. Pa. 8-21

Esquema No. 1: Modelo esquemático del proceso de coagulación



Fuente: Andia Cárdenas, Y. Evaluación de plantas y desarrollo tecnológico

• MECANISMOS DE COAGULACIÓN PREDOMINANTES

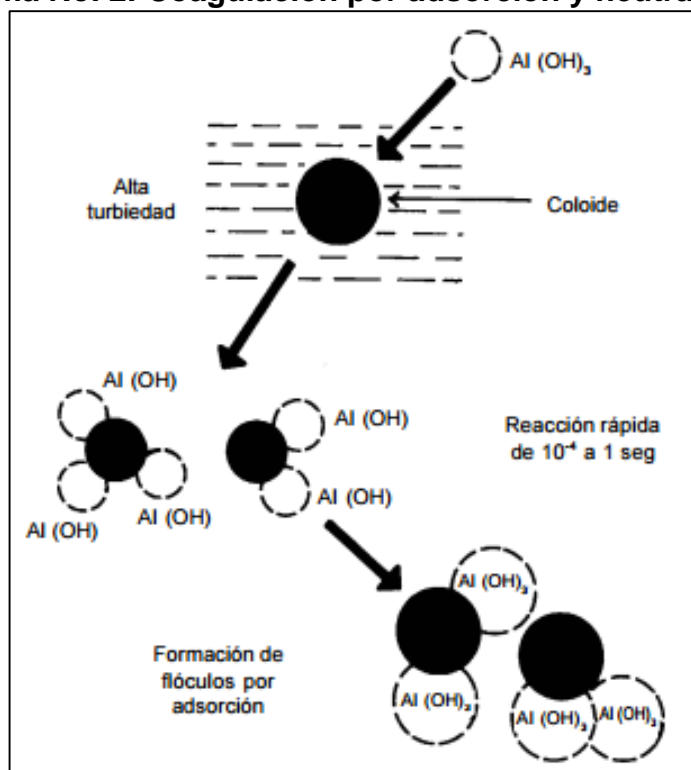
Actualmente se considera la coagulación como el resultado de la acción de cuatro mecanismos:

- **Compresión de la doble capa:** Este modelo físico de doble capa explica el fenómeno de la desestabilización de un coloide por un coagulante mediante el fenómeno de desestabilización. La introducción de un electrolito indiferente en un sistema coloidal causa un incremento de la densidad de cargas en la capa difusa y disminución de la "esfera" de influencia de las partículas, y ocurre la coagulación por compresión de la capa difusa. Concentraciones elevadas de iones positivos y negativos (fuerza iónica grande) en el agua acarrearán un incremento del número de iones en la capa difusa que, para mantenerse eléctricamente neutra, necesariamente tiende a reducir su

volumen, de modo tal que las fuerzas de Van der Waals sean dominantes, y se elimine la estabilización electrostática. [13]

- **Adsorción y neutralización:** La adsorción de las especies hidrolíticas por el coloide, lo que provoca la neutralización de la carga (Esquema No. 2). Cuando se agrega sales de aluminio o sales de hierro al agua, se forma una serie de especies solubles hidrolizadas. En el caso del sulfato de aluminio, las especies hidrolizadas que se forman son Al^{3+} , $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$, $\text{Al}_8(\text{OH})_{20}^{4+}$ y $\text{Al}(\text{OH})_3$, las cuales son tomadas a menudo para representar todo el sistema. Estas especies hidrolizadas se adhieren o forman complejos superficiales con los coloides, y lo desestabilizan, lo que permite la formación de flóculos [13]

Esquema No. 2: Coagulación por adsorción y neutralización

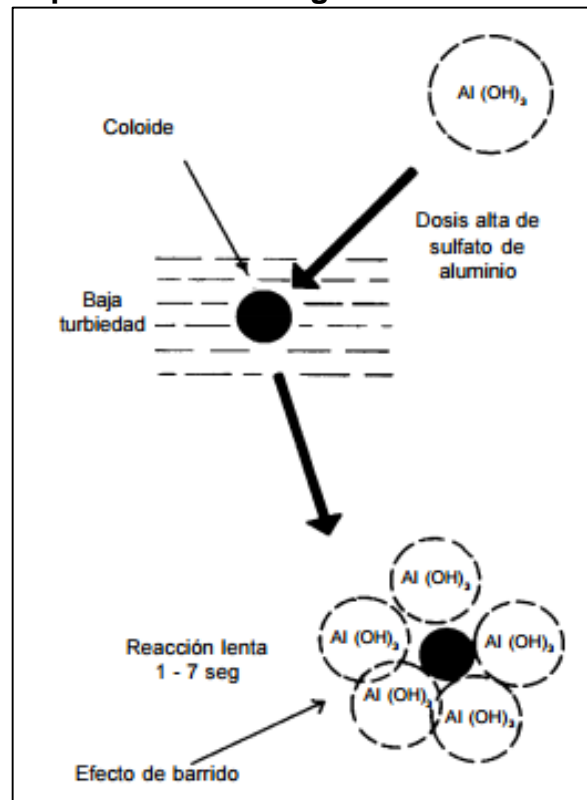


Fuente: BARRENECHEA, Ada. OPS/CEPIS. Tratamiento de Agua para Consumo Humano.

¹³ BARRENECHEA, Ada. OPS/CEPIS. Tratamiento de Agua para Consumo Humano. Manual I, Tomo I Capítulo 4 y 8: Coagulación. Versión en PDF. Lima, 2004.

- Captura por barrido:** Cuando la dosis de un coagulante de sales metálicas en solución como el $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ y FeCl_3 excede el producto de solubilidad de sus hidróxidos metálicos como el $\text{Al}(\text{OH})_3$ y el $\text{Fe}(\text{OH})_3$, se produce una precipitación rápida de los hidróxidos gelatinosos que explica el fenómeno de remoción de turbiedad. Con dosis de alúmina suficientemente altas, se forma un precipitado de hidróxido de aluminio que físicamente arrastra de la suspensión a las partículas coloidales, por lo que se denomina coagulación de barrido. Este mecanismo se muestra en el esquema No.3, donde se evidencia que la coagulación de las partículas coloidales en el tratamiento del agua es controlada principalmente por la química del hidróxido de aluminio y sus especies hidrolíticas precursoras. Este tipo de coagulación se presenta normalmente cuando el agua es clara y el porcentaje de partículas coloidales es pequeño. En este caso, las partículas son atrapadas al producirse una sobresaturación de precipitado de hidróxido de aluminio. ^[13]

Esquema No. 3: Coagulación de barrido



Fuente: BARRENECHEA, Ada. OPS/CEPIS. Tratamiento de Agua para Consumo Humano.

¹³ BARRENECHEA, Ada. OPS/CEPIS. Tratamiento de Agua para Consumo Humano. Manual I, Tomo I Capítulo 4 y 8: Coagulación. Versión en PDF. Lima, 2004.

- **Adsorción y formación del puente:** La coagulación puede realizarse también usando una variedad significativa de compuestos orgánicos sintéticos y naturales caracterizados por grandes cadenas moleculares, que gozan de la propiedad de presentar sitios ionizables a lo largo de la cadena y de actuar como coagulantes. Los polímeros pueden ser clasificados como catiónicos, aniónicos, no iónicos y anfóliticos ^[13]

pH óptimo de coagulación

El valor del pH es uno de los factores de mayor importancia y efecto sobre el proceso de coagulación, el pH afecta la solubilidad de los precipitados formados por el hierro y el aluminio, así como el tiempo requerido para formación de floc y la carga sobre las partículas coloidales. El pH óptimo para la remoción de coloides negativos varía según la naturaleza del agua, aunque usualmente se encuentra entre 5 y 6,5.

Los coagulantes metálicos son muy sensibles al pH y a la alcalinidad. Si el pH no está dentro del intervalo adecuado, la clarificación es pobre y pueden solubilizarse el hierro o el aluminio y generar problemas al usuario del agua. Cuanto menos sea la dosis de coagulante, tanto mayor será la sensibilidad del flóculo a cambios de pH ^[11].

2.2.5.4 Floculación

La formación de los flóculos es consecuencia de la agrupación de las partículas descargadas al ponerse en contacto unas con otras. Puede ser causada por la colisión entre las partículas, debido a que cuando se acercan lo suficiente las superficies sólidas, las fuerzas de Van der Waals predominan sobre las fuerzas de repulsión, por la reducción de la carga eléctrica que trae como consecuencia la disminución de la repulsión eléctrica.

En el proceso de choque entre las partículas intervienen en forma secuencial tres formas de transporte:

- **Floculación pericinética:** Contactos por bombardeo de las partículas producidos por el movimiento de las moléculas del líquido (movimiento browniano) que sólo influye en partículas de tamaños menores a un micrón. Sólo actúa al comienzo del proceso, en los primeros 6 a 10 s y es independiente del tamaño de la partícula. ^[14]

¹³ BARRENECHEA, Ada. OPS/CEPIS. Tratamiento de Agua para Consumo Humano. Manual I, Tomo I Capítulo 4 y 8: Coagulación. Versión en PDF. Lima, 2004

¹¹ ARBOLEDA, J. Teoría y práctica de la purificación del agua. Tercera Edición. Bogotá, Asociación Colombiana de Ingeniería sanitaria y ambiental "ACODAL" Vol. I, 2000

¹⁴ ANDIA CARDENAS, Yolanda. Evaluación de plantas y desarrollo tecnológico. Tratamiento de agua: coagulación-floculación. Lima. Abril del 2000

Floculación ortocinética o gradiente de velocidad: Contactos por turbulencia del líquido, esta turbulencia causa el movimiento de las partículas a diferentes velocidades y direcciones, lo cual aumenta notablemente la probabilidad de colisión. Efectivo sólo con partículas mayores a un micrón. Actúa durante el resto del proceso, de 20 a 30 minutos. [12]

- Sedimentación diferencial: Los métodos de sedimentación diferencial utilizan la diferencia entre las velocidades terminales que puede existir entre sustancias de diferente densidad. La densidad del medio es menor que la de cualquiera de las sustancias. La desventaja del método reside en que, como la mezcla de materiales a separar comprende un intervalo de tamaños de partícula, las más grandes y ligeras pueden sedimentar con la misma velocidad que las más pequeñas y pesadas, por lo que se obtendrá una fracción mezclada. [26]

Factores que influyen en la Floculación

- Concentración y naturaleza de las partículas. La velocidad de formación del floc es proporcional a la concentración de partículas en el agua y del tamaño inicial de estas.
- Tiempo de retención o retención hidráulica es el tiempo medio teórico que se demoran las partículas de agua en un proceso unitario de tratamiento; la velocidad de aglomeración de las partículas es proporcional al tiempo de detención. Debe estar lo más cerca posible al óptimo determinado por medio de ensayos de jarras, esto se puede lograr dividiendo la unidad de floculación en cámaras. Se puede decir que una eficiencia dada, se obtiene en tiempos cada vez menores a medida que se aumenta el número de cámaras de floculación en serie. Por razones de orden práctico el número de cámaras no puede ser muy grande, estableciéndose un mínimo de tres (3) unidades.
- Gradiente de velocidad: Este es un factor proporcional a la velocidad de aglomeración de las partículas. Existe un límite máximo de gradiente que no puede ser sobrepasado, para evitar el rompimiento del floc. El gradiente a través de las cámaras debe ser decreciente y no se deben tener cámaras intermedias con gradientes elevados [25]

¹² ROMERO ROJAS, Jairo Alberto. Calidad del Agua. Primera Edición, 2002. P 67, 69, 70, 71.

²⁵ 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. Pa. 66, 67, 69, 70

²⁶ RODRÍGUEZ, Carlos. Operación y mantenimiento de plantas de tratamiento de agua. Santafé de Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 1995. P 115.

2.2.5.5 Sedimentación

La sedimentación es una unidad que permite la separación de los lodos formados en el floculador, buscando disminuir 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. El reposo natural prolongado también ayuda a mejorar la calidad del agua, pues provee oportunidad de la acción directa del aire y los rayos solares, lo cual mejora el sabor y elimina algunas sustancias nocivas del agua. La sedimentación secundaria ocurre cuando se aplica un coagulante para producir la sedimentación de la materia sólida contenida en el agua. ^[27]

2.2.5.6 Corrección de pH

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. ^[26] obteniendo un agua con pH de carácter ácido y en varias ocasiones fuera de la normatividad establecida, para corregir este inconveniente, se lleva a cabo un proceso de alcalinización mediante la adición de cal apagada ($Ca(OH)_2$), aplicada en disolución, la cual es preparada en un tanque de mezclados de cal y suministrada por medio de un dosificador.

2.2.5.7 Filtración

Unidad utilizada para separar las partículas y microorganismos que no se eliminaron en los procesos anteriores, la filtración depende en gran manera de la eficiencia que tengan los procesos de coagulación-floculación-sedimentación. Permitiendo pulir el agua, removiendo microflóculos: esto es, turbiedad, color, quistes de amebas, etc.

2.2.5.8 Desinfección

Tiene como objetivo 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. Esta operación se lleva a cabo mediante la aplicación de cloro gaseoso u otro agente desinfectante como por ejemplo hipoclorito de sodio, en dosis apropiadas al agua filtrada, para cumplir con los objetivos de este proceso.

²⁶ RODRÍGUEZ, Carlos. Operación y mantenimiento de plantas de tratamiento de agua. Santafé de Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 1995. P 115.

²⁷ SEDIMENTACIÓN Ampliación de Ingeniería Química

2.2.6 Tipos de coagulantes

Los coagulantes son productos químicos que al adicionar al agua son capaces de producir una reacción química con los componentes químicos del agua, especialmente con la alcalinidad del agua para formar un precipitado voluminoso, muy absorbente, constituido generalmente por el hidróxido metálico del coagulante que se está utilizando. Los principales coagulantes utilizados para desestabilizar las partículas y producir el floc son:

- Sulfato de Aluminio.
- Aluminato de Sodio.
- Cloruro de Aluminio.
- Cloruro Férrico.
- Sulfato Férrico.
- Sulfato Ferroso.
- Polielectrolitos (Como ayudantes de floculación).

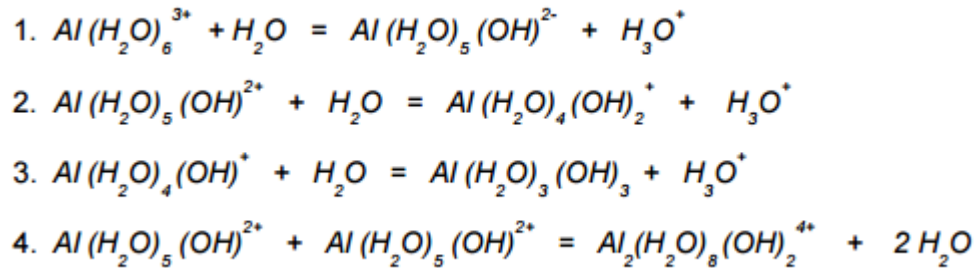
Siendo los más utilizados las sales de Aluminio y de Hierro; cuando se adiciona estas sales al agua se producen una serie de reacciones muy complejas donde los productos de hidrólisis son más eficaces que los iones mismos; estas sales reaccionan con la alcalinidad del agua y producen los hidróxidos de aluminio o hierro que son insolubles y forman los precipitados.

Sulfato de aluminio

La teoría ácidos-bases de Bronsted-Lowry explica las reacciones de los iones de aluminio y hierro con el agua, las cuales son de gran utilidad en la desestabilización. En el agua todos los cationes metálicos provenientes de los coagulantes químicos son hidratados. Las especies iónicas Fe^{3+} y Al^{3+} no existen en el agua sino que se presentan como complejos hexahidratados: $Fe(H_2O)_6^{3+}$ y $Al(H_2O)_6^{3+}$, los mismos que se comportan como ácidos débiles; es decir, son donadores de protones. Si una sal de hierro (III) o de aluminio (III) está presente en una concentración menor que la solubilidad del hidróxido metálico, el metal formará monómeros, dímeros y pequeños complejos poliméricos de hidróxido metálico, además del ion acuoso-metálico libre. En el esquema No. 4 se presentan algunas de las reacciones que ocurren para el aluminio en solución acuosa, estas reacciones son análogas al hierro. ^[13]

¹³ BARRENECHEA, Ada. OPS/CEPIS. Tratamiento de Agua para Consumo Humano. Manual I, Tomo I Capítulo 4 y 8: Coagulación. Versión en PDF. Lima, 2004.

Esquema No. 4 Reacciones ácidas de Al^{3+} análogas a las de Fe^{3+}



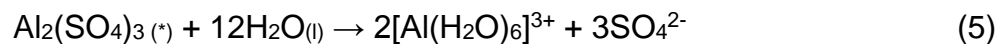
Fuente: BARRENECHEA, Ada. OPS/CEPIS. Tratamiento de Agua para Consumo Humano.

En el esquema No.4 las ecuaciones 1 y 3 son de ácidos-base, donde el ion acuoso de aluminio actúa como ácido y el H_2O actúa como base. La reacción 4 se produce entre dos monómeros para formar un dímero, $Al_2(H_2O)_8(OH)_2^{4+}$. Otros polímeros que, según se cree, están presentes en soluciones acuosas de aluminio son los siguientes: $Al_3(OH)_{20}^{4+}$, $Al_7(OH)_{17}^{3+}$, $Al_{13}(OH)_{34}^{5+}$ y $Al_6(OH)_{15}^{3+}$. [13]

El sulfato de aluminio es el coagulante estándar usado en tratamientos de aguas. El producto comercial tiene usualmente la fórmula $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$. Se obtiene de la digestión de minerales de bauxita con ácido sulfúrico.

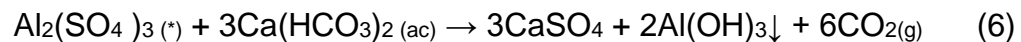
El material es empacado en diversas formas: en polvo, molido, en terrones, en granos parecidos al arroz y en forma líquida. [3]

Cuando está en solución se encuentra hidrolizado como se indica en la ecuación (5)



(*): Sólido y líquido

Los iones de Al hidratados $[Al(H_2O)_6]^{3+}$ actúan como un ácido y reaccionan con las bases disueltas de la alcalinidad que se expresa en forma de OH^- , CO_3^{2-} y HCO_3^- . Como las bases que constituyen la alcalinidad son más reactivas que el H_2O , el $[Al(H_2O)_6]^{3+}$ reaccionará siempre antes con ella y no con las moléculas de agua. Como se indica en la ecuación (6) [3]



(*) Sólido o líquido

³ Huertas Rojas Ana Fernanda; Quintero Pérez Henderson Ivan. Estudio Aplicabilidad e Implementación del Sulfato de Aluminio tipo B, Líquido como coagulante en la planta de tratamiento de agua potable del municipio de Lebrija (Santander). Tesis Ingeniería química. Bucaramanga- Santander, Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. 2007

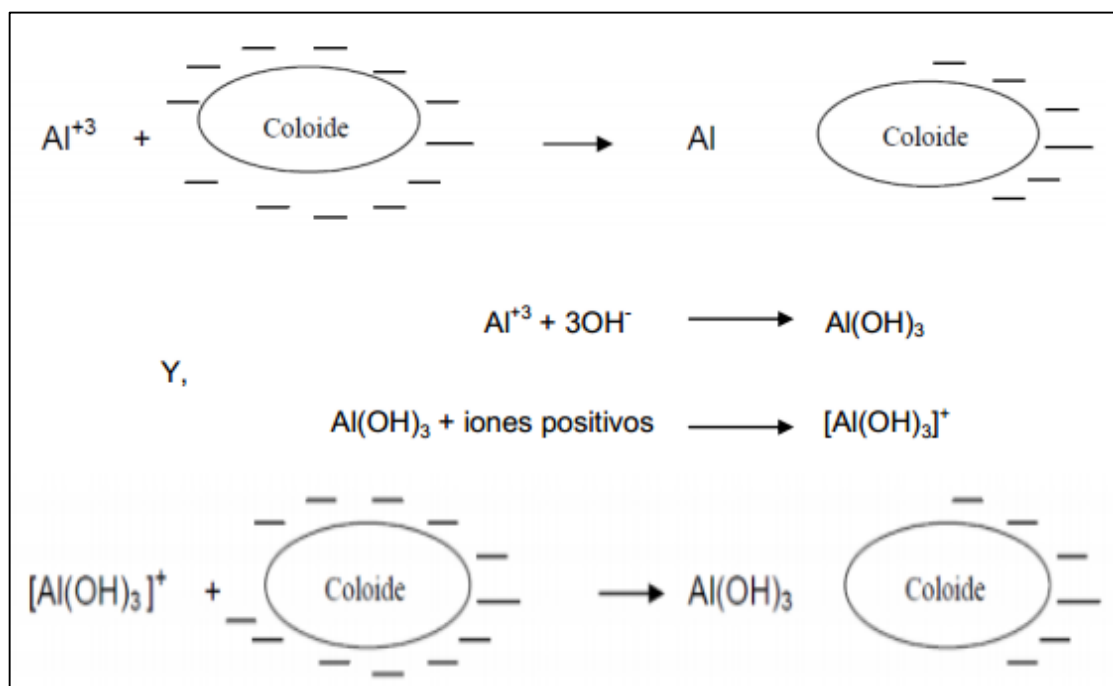
¹³ BARRENECHEA, Ada. OPS/CEPIS. Tratamiento de Agua para Consumo Humano. Manual I, Tomo I Capítulo 4 y 8: Coagulación. Versión en PDF. Lima, 2004.

El Al^{3+} puede también combinarse con los OH^- del agua para formar hidróxido de Al. Este hidróxido de aluminio es de carácter coloidal, ya que absorbe iones positivos en disolución para formar un sol cargado positivamente. Dicho sol neutraliza la carga de los coloides negativos y ayuda a completar la aglomeración.

Casi siempre se forma un exceso de solución de hidróxido de aluminio y su destrucción y precipitación se logra mediante los iones sulfato y otros iones negativos presentes en el agua. El sulfato de aluminio debe distribuirse a través de toda la masa de agua rápidamente, con el fin de que se logre el contacto con todas las partículas coloidales antes de que se presente la formación de las especies menos deseables. Esto se logra mediante una mezcla instantánea que provea una buena distribución del coagulante en el menor tiempo posible. Durante la floculación se completa la aglomeración de las partículas y crecen los flocs hasta una condición adecuada para su sedimentación. Durante la sedimentación el floc se sedimenta para dejar un líquido clarificado.^[10]

Este proceso se puede observar a modo general en el esquema No. 5

Esquema No. 5: Modelo de neutralización de coloides.



Fuente: Castrillón D, Giraldo M. Pereira 2012

¹⁰ Castrillón Bedoya Daniela; Giraldo María de los Ángeles. Determinación de las dosis óptimas del coagulante Sulfato de Aluminio granulado tipo B en función de la turbiedad y el color para la potabilización del agua en la planta de tratamiento de Villa Santana. Tesis Tecnología Química. Pereira-Risaralda, Universidad Tecnológica de Pereira, Facultad de Tecnologías. 2012

También cabe mencionar que la solubilidad del $\text{Al}(\text{OH})_3$ aumenta a pH mayor de 7, esto es debido a la formación del ion aluminato a pH alto, es decir, propiedades anfóteras del $\text{Al}(\text{OH})_3$. Los hidróxidos metálicos, como el hidróxido férrico son solubles en ácido, pero no en base; por el contrario los hidróxidos no metálicos son solubles en base pero no en ácidos. Sin embargo, ciertos hidróxidos como los de Al, Zn y Cr son solubles tanto en ácido como en base, estos hidróxidos son conocidos como anfóteros ^[9]

Sulfato de aluminio tipo B

Según la Norma Técnica Colombiana NTC 531 el sulfato de aluminio tipo B es el que cumple las especificaciones consignadas en la tabla No. 2: ^[28]

Tabla 2. Requisitos químicos del Sulfato de Aluminio tipo B

REQUISITOS	SÓLIDO	SOLUCIÓN
% Al_2O_3 mínimo	15,2	7,3
Hierro como Fe_2O_3	2,0	1,2
% materia insoluble	8,0	0,1
% Al_2O_3 (b) mínimo	0,05	(1)

Cloruro férrico

Los coagulantes inorgánicos basados en el hierro como elemento metálico tiene una gran aplicabilidad en el campo del tratamiento de aguas, en concreto el cloruro férrico se emplea masivamente en la depuración de efluentes urbanos e industriales al igual que otras sales de hierro.

El cloruro férrico suele presentarse en forma de disolución acuosa conteniendo un 40-45% de FeCl_3 como puede observarse en la tabla No. 3 y raramente en forma sólida como $(\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O})$. En forma de disolución acuosa presenta color parduzco, algo viscoso, mientras que en forma sólida aparece en forma cristalina, granular o en polvo.

⁹ García-Rey Santos Margarita Rosa. Ajuste Matemático Del Comportamiento De La Turbiedad Residual En Los Procesos De Flocculación-Coagulación Del Agua Realizados En La Planta La Flora Del A.M.B S.A E.S.P Empleando Policloruro De Aluminio Líquido. Tesis Ingeniera Química. Bucaramanga – Santander, facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Universidad Industrial de Santander. 2011

²⁸ Norma Técnica Colombiana NTC 531. Productos Químicos para uso Industrial. Sulfato de Aluminio. 1995-11-29

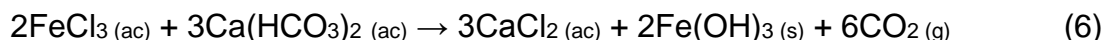
Tabla 3. Propiedades generales del cloruro férrico al 40%

FeCl₃ (%)	40 ± 0.5
Densidad a 20°C (Kg/L)	1.40 ± 0.03
Hierro total (%)	13.4 ± 0.6
Acidez HCl (%)	1.2 ± 1.0
Cloro libre (%)	0.1
Hierro ferroso (%)	0.1 ± 0.1
Punto de congelación (°C)	-15
Punto de ebullición (°C)	315
Viscosidad a 20°C (mPa.s)	10 ± 2.0

En presencia de hierro, las soluciones acuosas de cloruro férrico se reducen rápidamente a cloruro ferroso FeCl₂. Esta reacción explica su gran poder corrosivo frente al acero, y la necesidad de seleccionar adecuadamente el material de los recipientes de almacenamiento, de preparación y de distribución. ^[13]

Por otra parte, en el tratamiento de agua, al reaccionar el cloruro férrico como coagulante con el agua, actúa sobre los bicarbonatos presentes hasta formar hidróxido férrico precipitado a través de sucesivas reacciones de hidrólisis, donde predominan las especies iónicas Fe³⁺; Fe(OH)²⁺; Fe(OH)₂⁺; Fe₂(OH)₂⁴⁺; Fe(OH)₃; Fe(OH)₄⁻ y Fe(OH)₆³⁻

La reacción general es:



La coagulación con cloruro férrico se produce a partir de pH 5,5 sin peligro de redisolución del hidróxido precipitado a pH altos, como ocurre con el aluminio. Al precipitado se llega tras sucesivas etapas donde se generan los hidroxocomplejos ferroxilados anteriores, que polimerizan a través de reacciones de olación (deshidratación) y de oxolación (pérdida de protones que ocasiona descensos del pH). Estas reacciones son reversibles pero generan complejos relativamente estables en algunas zonas de pH. ^[4]

⁴ ROMERO, Mynor. Tratamientos utilizados en potabilización de agua. Facultad de ingeniería. Universidad Rafael Landívar.

Policloruro de aluminio

Policloruro de Aluminio (PAC) es un coagulante inorgánico líquido base policloruro de aluminio, indicado principalmente para remover materia coloreada y coloidal en suspensión en sistemas acuosos, plantas potabilizadoras de agua, afluentes y plantas de tratamiento de efluentes líquidos industriales, como reemplazo de sulfato de aluminio, cloruro férrico y otras sales inorgánicas. Mientras el ácido es neutralizado en el proceso de producción, la parte de aluminio del producto se vuelve más polimerizada, resultando en una mayor carga catiónica y en un aumento de la capacidad de desempeño. [8]

El PAC es producido adicionando una base al cloruro de aluminio hasta lograr la fórmula empírica $Al(OH)_nCl_{3-n}$, donde n toma valores que van de 1 a 2.5. [29]. El policloruro de aluminio ofrece una rápida formación de flóculos, tiempos cortos para reaccionar y sedimentar y es muy versátil para tratar aguas de variada turbiedad, alcalinidad y contenido de materia orgánica. [30]

El PAC tienen diferentes fases sólidas en las reacciones hidrolíticas respecto a los coagulantes convencionales: los flóculos de PAC tienden a ser grupos de pequeñas esferas y/o estructuras tipo cadena con tamaño menor a 25 μm , mientras que los flóculos de sulfato de aluminio son usualmente estructuras esponjosas y porosas con tamaño de 25 a 100 μm [31].

Comparado con el sulfato de aluminio, presenta un mejor efecto de coagulación, aun cuando se trata agua a bajas temperaturas ($<10^\circ C$). El PAC se emplea como el coagulante primario en plantas de tratamiento de agua potable municipales e industriales, reemplazando la necesidad de otros coagulantes, como alumbre, y en muchos casos eliminando o al menos reduciendo notablemente la necesidad de químicos reguladores de pH, ayudas de coagulación y ayudas de filtración. [32]

El PAC contiene una gama de especies hidrolíticas de Al^{3+} preformadas de calidad superior y poseen una estructura que es bastante estable ante hidrólisis posteriores, que contribuye a su mayor eficiencia de coagulación; [8] se consideran más eficientes que el sulfato de aluminio dado las ventajas de menor producción de lodos y la menor dependencia de la temperatura y el pH [33].

⁸ Garcés Paz Rosa Virginia. Obtención de la mínima dosis de reemplazo de policloruro de aluminio en aguas y aguas de Pereira. Tesis Química Industrial Pereira-Risaralda, Universidad Tecnológica de Pereira. 2010

²⁹ SHEN, YH. AND DEMPSEY, B. Synthesis and speciation of polyaluminum chloride for water treatment. Environment International, 24 (8), 899910, 1998.

³⁰ YE, C., WANG, D., SHI, B., YU, J., QU, J. et al . Alkalinity effect of coagulation with polyaluminum chlorides: Role of electrostatic patch. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 294, 163173, 2007

³¹ VAN BENSCHOTEN, J.E. AND EDZWALD, J.K. Chemical aspects of coagulation using aluminum salts: Hydrolytic reaction of alum and polyaluminum chloride. Water Research, 24, 1519–1526, 1990

³² COGOLLO FLÓREZ, Juan MIGUEL. Clarificación De Aguas Usando Coagulantes Polimerizados: Caso Del Hidroxicloruro De Aluminio. DYNA, [S.l], V. 78, n .165, p. 18-27, nov 2011. ISSN 2346-2183. Disponible en: <<http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/25636/39133>>

³³ WANG, Y., ZHOU, WZ., GAO, BY., XU, XM. AND XU, GY. The effect of total hardness on the coagulation performance of aluminum salts with different Al species. Separation and Purification Technology, 66,457462, 2009.

La reacción de hidrólisis de un PAC se da por etapas. Dependiendo de las condiciones del proceso, se forman los siguientes productos intermedios:

- Dímeros $[Al_2(OH)_2(H_2O)_8]^{4+}$
- Complejos polihidroxilo $[Al_8(OH)_{20}]$, $[Al_8(OH)_{22}]^{2+}$, $[Al_8(OH)_{24}]$, $[Al_{13}O_4(OH)_{24}(H_2O)_{12}]^{7+}$, $[Al_{14}(OH)_{38}]^{8+}$, $[Al_{30}Cl_9(OH)_{81}(H_2O)_{38}]^{5+}$
- Compuestos complejos $[Al_8(OH)_{20}(H_2O)_{10}]Cl_4$
- Partículas y agregados en la forma original del PAC ^[34].

Beneficios consistentemente reconocidos de PAC son:

- Deja menor aluminio residual
- Mejoras en la remoción de turbidez
- Mejoras en la remoción de color
- Aumento en la remoción de Carbón Orgánico Total
- Menor turbidez en la filtración
- Aumento de la operación de filtros
- Reducción en la frecuencia de retrolavados en los filtros
- Reducción de lodos de un 25-75%
- Operación simplificada al eliminar reguladores de pH y ayudas de coagulación
- Menor costo de operación.

2.2.7 MARCO NORMATIVO

2.2.7.1 Constitución Política de 1991.

Ley 142 de 1994 por la cual se establece el régimen de los servicios públicos domiciliarios y se dictan otras disposiciones. En su artículo 11 determinó como obligaciones de las Entidades Prestadoras del servicio entre otras:

Asegurar que el servicio se preste en forma continua y eficiente, y sin abuso de la posición dominante que la Entidad pueda tener frente al usuario.

Cumplir con su función ecológica, protegiendo la diversidad e integridad del ambiente, y conservación de las áreas de especial importancia ecológica, conciliando estos objetivos con la necesidad de aumentar la cobertura y la costeabilidad de los servicios por la comunidad.

³⁴ BOCHKAREV, G.R., KURBATOV, P.V. AND KONDRAT'EV, S.A. Intensification of coagulation purification of highly colored waters. Journal of Mining Science, 39 (1), 94101, 2003.

En el decreto 1275/2007 y resolución 2115/2007 se establecen lo siguiente:

Decreto Número 1575 De 2007: Por el cual se establece el Sistema para la Protección y Control de la Calidad del Agua para Consumo Humano

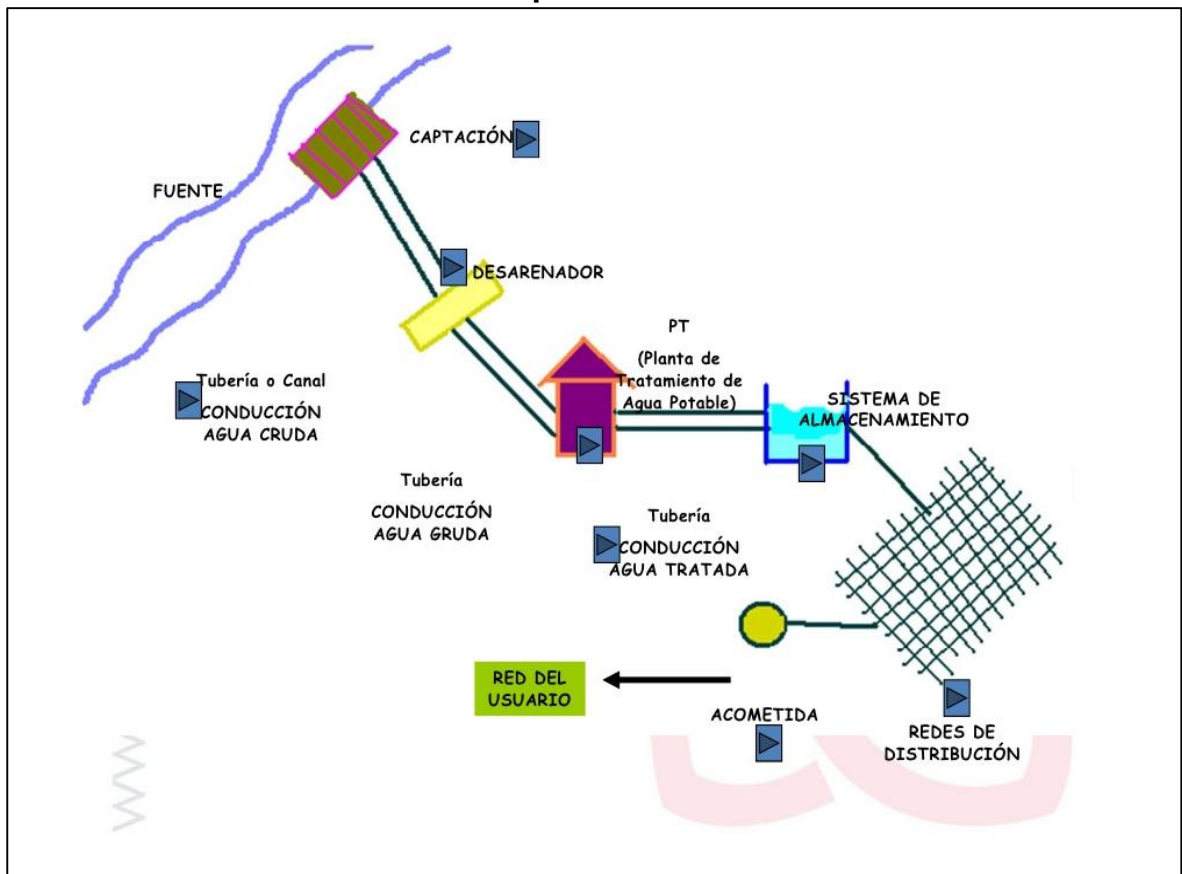
Resolución Número 2115 De 2007: Por medio de la cual se señalan características del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano

2.2.7.2 Acueducto Urbano

El acueducto urbano de Ipiales fue construido hace 56 años, durante los cuales se han realizado mejoras y ampliaciones que permiten una prestación del servicio, acordes con las necesidades actuales y la dinámica del crecimiento urbano y poblacional.

El acueducto de Ipiales, actualmente presenta la siguiente infraestructura para el servicio (Esquema No. 6)

ESQUEMA No. 6: Diseño general de un sistema de abastecimiento de agua potable.



Fuente: Servicios públicos y municipios ANDESCO

Captación

El acueducto urbano de Ipiales con el propósito de mejorar el servicio a través de los años viene utilizando tres sistemas de captación por bocatoma del agua del río Blanco como fuente abastecedora.

- PRIMERA: Derivación del río hasta el desarenador por canal abierto, sin obras de toma que garanticen un caudal permanente.
- SEGUNDA: Bocatoma lateral, con estructuras de concreto presenta buenas condiciones físicas de funcionamiento.
- TERCERA Bocatoma de captación lateral, que complementa la estructura de la toma anterior, su estado físico y de funcionamiento es adecuado.

Aducción

Es la conducción del agua desde la bocatoma al desarenador. La aducción correspondiente a la primera toma es un canal abierto en tierra. Las aducciones de las tomas restantes están construidas en dos tuberías paralelas de cemento, el transporte de agua se hace por escurrimiento libre.

Desarenador

Es la estructura que por acción de la gravedad permite sedimentar las arenas, gravas y piedras que arrastra el agua desde la fuente. Para la primera toma, además del desarenador inicial, se construyeron 16 cajas de inspección a lo largo de la conducción. Las otras tomas cuentan con tres desarenadores en buenas condiciones de mantenimiento.

Conducciones

Son las líneas de tubería que transportan el agua hasta la planta de tratamiento. El acueducto de Ipiales, cuenta con cuatro (4) líneas de conducción

Bombeo de Agua Cruda

Esta actividad se realiza con tres motobombas de 87 HP. La actividad de bombeo, implica costos de operación adicionales principalmente representados por consumo de combustible.

Planta de Tratamiento

Abarca el conjunto de procesos o etapas para acondicionar el agua, produciendo en ella los cambios físicos, químicos y bacteriológicos necesarios para que sea potable. En 1942 se construyó la primera planta de tratamiento convencional para el acueducto de Ipiales, el diseño original se hizo con 35 L.P.S. En 1965 construyó una nueva planta en el mismo lote de la primera, con capacidad nominal de 72 L.P.S. Posteriormente se amplió su capacidad a 170 L.P.S. El sistema de mezcla rápida existente fue cambiado a un canal rectangular con resalto, se amplió la unidad de floculación y se sustituyó por un sistema hidráulico, se optimizaron las dos unidades de sedimentación y se construyeron dos nuevas unidades de filtración

mediante el cual el agua es separada de la materia en suspensión pasando a través de una sustancia porosa. Después del proceso de potabilización se procede a la desinfección del agua que es el proceso por el cual se destruyen los agentes microbianos, por medio de productos químicos. Este es el último paso en la potabilización del agua superficial.

Almacenamiento

Cerca de la planta de tratamiento se encuentran: dos (2) tanque de almacenamiento de concreto con capacidad de 550 m³, intercomunicados y subterráneos, dos tanques elevados uno con capacidad de 50 m³ y otro de 70 m³ y un tanque de almacenamiento nuevo subterráneo con una capacidad de 2.150 m³.^[35]

Red de Distribución

Es el conjunto de tuberías, válvulas y accesorios que distribuyen el agua a los diferentes sectores de la ciudad. La red existente tiene longitud aproximada de 80 Km, con diámetros que varían entre 2 y 16 pulgadas en materiales de hierro fundido, fibra o cemento y PVC.

2.2.7.3 Fuente Hídrica del Acueducto de Ipiales.

El acueducto Municipal de Ipiales toma el agua del Río Blanco en el Municipio de Carlosama. Este río presenta un preocupante caudal mínimo según estudios hidrológicos de 730 L.P.S en épocas de verano. En análisis físico – químicos y bacteriológicos de las aguas del río se ha establecido que tienen problemas de contaminación bacteriológica causado por la descarga del alcantarillado del Municipio de Cumbal 8 kilómetros aguas arriba de la bocatoma del acueducto Municipal de Ipiales. El resultado de los análisis de agua ha arrojado valores de color y turbiedad que generalmente exceden la norma legal (Tabla No. 4).

Tabla No. 4: Resultados de análisis de agua

	Rango de características fisicoquímicas en agua cruda	Unidades	Valor permisible
Turbiedad	4-50	UNT	2
Color	15 - 35	UPC	15

El Río Blanco presenta una alta contaminación por agroquímicos principalmente fosfatos, carbonatos, y pesticidas utilizados en la agricultura que se incorporan en la corriente como consecuencia de la escorrentía en campos y tierras cultivadas. Una característica importante y positiva del Río Blanco, es su capacidad de autopurificación debido a que mantiene casi invariable la concentración de oxígeno disuelto presente en el agua; además en relación al pH registra valores menores de 7 unidades que se encuentran dentro del rango establecido por las normas de calidad.^[35]

³⁵ Recursos Naturales y Medio Ambiente Ipiales [En línea] disponible en: <<http://www.ipitimes.com/medioambiente9.htm>>

2.2.7.4 Calidad del Agua

El decreto 1575, establece los lineamientos de potabilización e indicadores de producción, la resolución 2115 de 2007 establece los valores máximos aceptables de calidad que debe cumplir el agua para el consumo humano con respecto a las características físicas, químicas y microbiológicas, que afectan directa o indirectamente a la salud humana determinados por los Ministerios de la Protección Social y de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial

Para tal efecto, definirán, entre otros, los elementos, compuestos químicos y mezclas de compuestos químicos y otros aspectos que puedan tener un efecto adverso o implicaciones directas o indirectas en la salud humana, buscando la racionalización de costos así como las técnicas para realizar los análisis microbiológicos y adoptarán las definiciones sobre la materia.

Características físicas y químicas del agua para consumo Humano

La resolución 2115 de 2007 especifica las características fisicoquímicas del agua especificadas en los artículos mencionados a continuación:

ARTICULO 2° Características Físicas. *“El agua para consumo humano no podrá sobrepasar los valores máximos aceptables para cada una de las características físicas que se señalan a continuación:”*

Tabla No. 5: Características físicas del agua para consumo humano

Características físicas	Expresadas como	Valor máximo aceptable
Color aparente	Unidades de Platino Cobalto (UPC)	15
Olor y sabor	Aceptable ó no aceptable	Aceptable
Turbiedad	Unidades Nefelométricas de turbiedad (UNT)	2

Fuente: Resolución 2115/2007

ARTICULO 3° “Conductividad. *El valor máximo aceptable para la conductividad puede ser hasta 1000 microsiemens/cm. Este valor podrá ajustarse según los promedios habituales y el mapa de riesgo de la zona. Un incremento de los valores habituales de la conductividad superior al 50% en el agua de la fuente, indica un cambio sospechoso en la cantidad de sólidos disueltos y su procedencia debe ser investigada de inmediato por las autoridades sanitaria y ambiental competentes y la persona prestadora que suministra o distribuye agua para consumo humano.”*

ARTICULO 4° “Potencial De Hidrógeno. *El valor para el potencial de hidrógeno pH del agua para consumo humano, deberá estar comprendido entre 6,5 y 9,0.”*

ARTICULO 5° “Características químicas de sustancias que tienen Reconocido efecto adverso en la salud humana. Las características químicas del agua para consumo humano de los elementos, compuestos químicos y mezclas de compuestos químicos diferentes a los plaguicidas y otras sustancias que al sobrepasar los valores máximos aceptables tienen reconocido efecto adverso en la salud humana, deben enmarcarse dentro de los valores máximos aceptables que se señalan a continuación:”

Tabla No. 6: Características químicas que tiene efecto adverso en la salud humana

Elementos, compuestos químicos y mezclas de compuestos químicos diferentes a los plaguicidas y otras sustancias	Expresados como	Valor máximo aceptable (mg/L)
Antimonio	Sb	0,02
Arsénico	As	0,01
Bario	Ba	0,7
Cadmio	Cd	0,003
Cianuro libre y disociable	CN ⁻	0,05
Cobre	Cu	1,0
Cromo total	Cr	0,05
Mercurio	Hg	0,001
Níquel	Ni	0,02
Plomo	Pb	0,01
Selenio	Se	0,01
Trihalometanos totales	THMs	0,2
Hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP)	HAP	0,01

Fuente: Resolución 2115/2007

ARTICULO 6° “Características químicas de sustancias que tienen Implicaciones sobre la salud humana. Las características químicas del agua para consumo humano en relación con los elementos, compuestos químicos y mezclas de compuestos químicos que tienen implicaciones sobre la salud humana se señalan en el siguiente cuadro:”

Tabla No. 7: Características químicas que tienen implicaciones sobre la salud humana

Elementos, compuestos químicos y mezclas de compuestos químicos que tienen implicaciones sobre la salud humana	Expresados como	Valor máximo aceptable (mg/L)
Carbono Orgánico Total	COT	5,0
Nitritos	NO ₂ ⁻	0,1
Nitratos	NO ₃ ⁻	10
Fluoruros	F ⁻	1,0

Fuente: Resolución 2115/2007

ARTÍCULO 7º “Características Químicas Que Tienen Consecuencias Económicas e Indirectas Sobre La Salud Humana. *Las características químicas del agua para consumo humano en relación con los elementos y compuestos químicos que tienen consecuencias económicas e indirectas sobre la salud se señalan a continuación”:*

Tabla No. 8: Características químicas que tienen mayores consecuencias económicas e indirectas sobre la salud humana

Elementos y compuestos químicos que tienen implicaciones de tipo económico	Expresadas como	Valor máximo aceptable (mg/L)
Calcio	Ca	60
Alcalinidad total	CaCO ₃	200
Cloruros	Cl ⁻	250
Aluminio	Al ³⁺	0,2
Dureza total	CaCO ₃	300
Hierro total	Fe	0,3
Magnesio	Mg	36
Manganeso	Mn	0,1
Molibdeno	Mo	0,07
Sulfatos	SO ₄ ²⁻	250
Zinc	Zn	3
Fosfatos	PO ₄ ³⁻	0,5

Fuente: Resolución 2115/2007

Los análisis físico – químicos y bacteriológicos son de gran importancia para mantener características organolépticas (color, olor y sabor) óptimas al consumidor y controlar límites admisibles de sustancias químicas, con el fin de evitar efecto adverso en la salud humana. El análisis bacteriológico es fundamental para la prevención de epidemias.

La Dirección Local de Seguridad Social en Salud - D.L.S.S.S a través de su división de Saneamiento es la entidad encargada de realizar la vigilancia sobre la calidad del agua potable, como parte de sus acciones del Plan de Atención Básica (PAB), y tomar las medidas preventivas y correctivas necesarias para dar cumplimiento al Decreto 1575 de 2007. Igualmente adelantar campañas y procesos de capacitación orientados a ilustrar sobre los beneficios de la calidad del agua potable para la comunidad y naturalmente para la salud.

En la red de distribución del sistema de suministro de agua la empresa prestadora del servicio de acueducto, debe practicar como mínimo los siguientes análisis físico-químicos: pH, color, olor, sustancias flotantes, turbiedad, nitritos, cloruros, sulfatos, hierro total, dureza total y cloro residual libre.

Los mayores problemas en aguas del río Blanco se presentan en los parámetros de: color, turbiedad, dureza y contenidos de Fe, que exceden los rangos establecidos en la norma. Estos inconvenientes se derivan principalmente de las condiciones de conservación de la subcuenca, siendo necesario que la empresa prestadora del servicio realice periódicas inspecciones sanitarias complementadas con análisis de laboratorio, con el propósito de conocer el estado real de la fuente abastecedora, caracterizando los riesgos que pueden llegar a afectar la cantidad, calidad y continuidad del agua de abastecimiento y tomar los correctivos necesarios.
[35]

2.2.8 Pruebas de tratabilidad

Ensayo De Jarras

La prueba de jarras es la técnica más extensamente usada para determinar la dosis de químicos y otros parámetros para la potabilización del agua. En ella se tratan de simular los procesos de coagulación, floculación y sedimentación a nivel de laboratorio. Existe en el mercado una gran variedad de equipos para pruebas de jarras, pero en toda su versatilidad debe radicar en utilizar una serie de jarras al mismo tiempo y la posibilidad de variación de la velocidad de agitación (r.p.m) En este proceso influyen factores químicos e hidráulicos. Entre éstos se tiene:

- pH
- Temperatura
- Concentración de coagulante
- Secuencia de aplicación de las sustancias químicas
- Grado de agitación
- Tiempo de sedimentación

³⁵ Recursos Naturales y Medio Ambiente Ipiales [En línea] disponible en: <<http://www.ipitimes.com/medioambiente9.htm>>

El pH desempeña un papel muy importante en el estudio de los fenómenos de coagulación- floculación, es así como una parte de la carga de las partículas coloidales que han absorbido iones OH^- , queda destruida por un aumento de la concentración de iones H_3O^+ que ocasiona una disminución de la estabilidad de la suspensión coloidal.

Preferiblemente el pH debe quedar dentro de la zona correspondiente al mínimo de solubilidad de los iones metálicos del coagulante usado. ^[36]

La temperatura del agua también influye en la efectividad de la coagulación y en la velocidad de formación del flóculo. Según disminuye la temperatura del agua debe aumentarse la dosis de productos químicos usados para coagular, con el objetivo de lograr o asegurar la formación de flóculos adecuados.

El tiempo de mezclado del coagulante en el agua a tratar será el necesario para que el producto utilizado se difunda con la mayor rapidez posible. El tiempo de coagulación es extraordinariamente breve, menos de un segundo y la utilización óptima del coagulante exige que la neutralización sea total antes de que una parte del coagulante haya comenzado a precipitar.

El ensayo de jarras ha sido ampliamente usado; sus resultados tienen gran aplicabilidad en el diseño y la operación real de las unidades de tratamiento, así como en la optimización de plantas existentes. El procedimiento requiere como datos previos los valores de pH, turbiedad, color y alcalinidad del agua cruda.

La unidad de mezcla típica consiste en una serie de agitadores de paletas acoplados mecánicamente para operar a la misma velocidad, generalmente entre 10 a 300 rpm.

Como jarras de coagulación se recomienda, jarras rectangulares de 1 a 2 litros en acrílico transparente ^[37]

³⁶ Water Poll. Inhibition of flocculation processes in systems containing organic matter. Vol 55 N 07. P 947, 1983

³⁷ Teoría diseño y control de los procesos de clarificación del agua [En línea] Disponible en: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/scan/002320/002320-04a.pdf>

3. MATERIALES Y METODOS

3.1 Preparación de las disoluciones

Se prepararon disoluciones madre de concentración 10% p/v para el STBS y 10% v/v para el caso de PAC, STBL y FeCl_3 , las cuales se prepararon cada 15 días. De estas disoluciones se realizó una dilución al 1%p/v y 1%v/v respectivamente.

Estas diluciones se prepararon diariamente, puesto que al conservarse por más de 24 horas tienden a la hidrolización y pueden perder la capacidad de coagulación.

3.2 Muestreo

Se realizó un muestreo simple para lo cual se tomó muestras de 25 L de agua cruda superficial del vertedero de entrada de planta 2 proveniente del Rio Blanco, el agua cruda se depositó en canecas plásticas para su posterior traslado al laboratorio de control de calidad de agua potable de EMPOOBANDO E.S.P



3.3 Medición de parámetros iniciales

Se midieron los parámetros iniciales de acuerdo a las siguientes especificaciones:

3.3.1. Alcalinidad Total

La titulación se realizó inmediatamente recolectada la muestra para minimizar interferencias que pudieran afectar la medición.

Se realizó por técnica titulométrica de acuerdo a lo establecido en el método 2320 de Standard methods for the examination of water and Wastewater^[38].

³⁸ Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 21th Edition. New York, 2-27 a 2-29, método 2320.

Se valoró una muestra de 50mL empleando un indicador mixto (0,02g de rojo de metilo y 0,1g de verde de bromocresol disueltos en alcohol etílico al 95%) y se tituló con ácido sulfúrico 0.02 N previamente estandarizado con un patrón primario de Na₂CO₃ 0.02 N.

Se determinó el volumen de ácido gastado y se calculó la alcalinidad de la muestra de acuerdo a la fórmula 7.

$$\text{Alcalinidad como mg CaCO}_3/\text{L} = \frac{A*N*50000}{V_{\text{muestra}}} \quad (7)$$

Donde:

A: mL de ácido sulfúrico gastado en la titulación

N: Normalidad del ácido sulfúrico

V: mL de la muestra

50000: Factores de conversión de eq/L a mg CaCO₃/L, y de mL a L

Nota. La alcalinidad a la fenolftaleína siempre reportó valores de cero, por lo cual se describe únicamente el procedimiento para alcalinidad total. [38]

3.3.2. Determinación de pH

Se realizó la medición mediante la técnica electrométrica según el método D-1293 standard methods for pH of water. La medición se realizó en un pHmetro HACH sensION mm 374.



pHmetro HACH sensION Fuente: Este trabajo

Se reportó la lectura directa obtenida en el equipo, se midieron valores por duplicado, registrando el promedio de las medidas. [39]

³⁸ Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 21th Edition. New York, 2-27 a 2-29, método 2320.

³⁹ Standard Methods for the Examination of Water and Wasterwater. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Pollution Control Federation. 21 ed. United States of America, 2005

3.3.3. Determinación de Turbiedad

Se realizó de acuerdo a la técnica nefelométrica acorde al método 2130B de standard methods for de examination of water, empleando el turbidímetro HACH 2100 Q.

Se tomó una alícuota del analito a temperatura ambiente y se agitó para romper los agregados de floculación. Se introdujo el analito en el vial de vidrio previamente purgado y se introdujo la muestra en el turbidímetro, se dio lugar a la lectura obteniendo el resultado directamente en la pantalla; la lectura se realizó por triplicado, se tomó como valor de referencia el promedio de las medidas. [40]



Turbidímetro HACH 2100Q Fuente: Este trabajo

3.3.4. Determinación de color

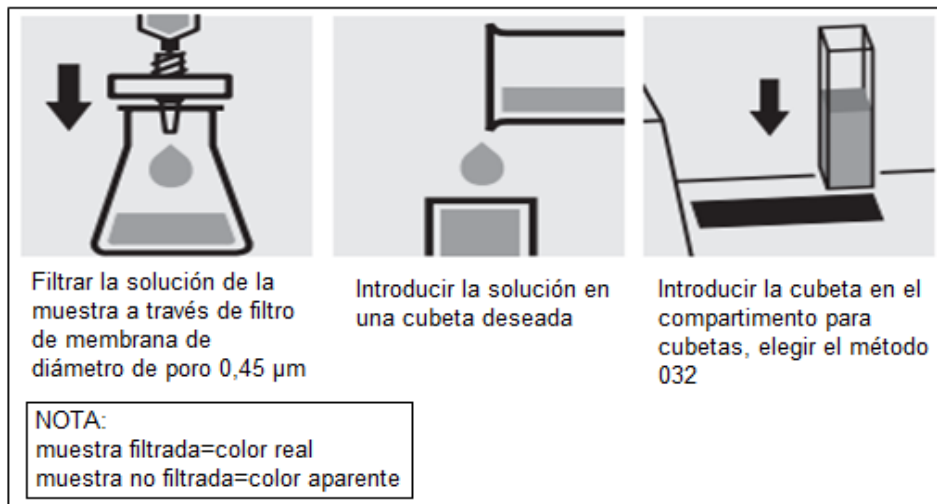
Se midió este parámetro según la técnica Hazen Pt/Co – Fotométrica, para ello se empleó un espectrofotómetro Spectroquant NOVA 60.

Para esta medición se siguió el protocolo del kit fotométrico del Spectroquant NOVA 60 para coloración Hazen (método platino-cobalto) análogo a APHA 2120B, DIN 53409, water research Vol. 30, No. 11,2771-2775, 1996; como se muestra en el esquema No. 7: [41]

⁴⁰ Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 18th Edition, pp. 2-9, Method 2130B, (1992)

⁴¹ Manual NOVA 60 Métodos de Análisis – AMCO Instruments, srl. Método 032

Esquema No. 7 Procedimiento para medir color por el método Hazen (Pt/Co)



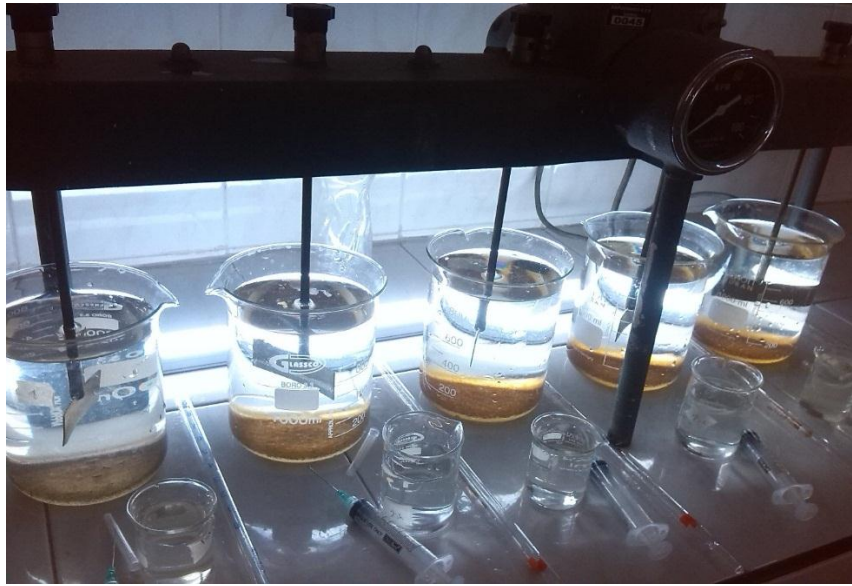
Fuente: Manual NOVA 60 Métodos de Análisis – AMCO método 032



Espectrofotómetro Spectroquant NOVA 60 Fuente: Este trabajo

3.4. Ensayo De Coagulación (JAR TEST)

Este ensayo consistió en la adición de dosis crecientes de coagulante a una serie de porciones del agua a ensayar, determinando después algunas propiedades físicas y químicas (turbiedad, color) en las porciones tratadas, que permitieron establecer las dosis óptimas de coagulante que deben añadirse al agua para su tratamiento. Se utilizó un equipo de jarras con agitación máxima de 100 rpm, provisto de paletas agitadoras, una luz de 21W y vasos de precipitado de vidrio borosilicatado fino con capacidad de 1L.



Equipo de jarras. Fuente: Este trabajo

3.4.1 Técnica para el test de jarras

- Se colocó en cada uno de los vasos 1L del agua cruda (previamente agitada para suspender las partículas fácilmente sedimentables); se trabajó un máximo 100rpm y añadiendo en forma sucesiva a los distintos vasos cantidades crecientes de la disolución de coagulación, las cantidades estudiadas fueron 10, 20, 30, 40 y 50 ppm
- Después de un 1 min de mezcla rápida en la cual se llevó a cabo la coagulación, se procedió a bajar la velocidad de agitación a 40 rpm durante 20 min para la mezcla lenta.
- Se dejó sedimentar el coágulo formado durante 20 min. Durante este período se observó las características físicas del coágulo, así como la velocidad relativa de sedimentación en los distintos vasos.
- Se tomó un volumen de sobrenadante para efectuar la determinación de turbiedad, color y pH finales de acuerdo al numeral 3.3.2; 3.3.3 y 3.3.4.

3.5 Tratamiento estadístico de datos

Una vez obtenidos los resultados, se los procesó en el paquete estadístico STATGRAPHICS centurión XVI teniendo en cuenta como factores principales el tipo de coagulante y dosis de coagulante (ppm)

Para los tipos de coagulantes se analizaron 4 niveles correspondientes a PAC, STBS, STBL y FeCl₃.

Para la dosis de coagulante se analizaron 5 niveles correspondientes a 10, 20, 30, 40 y 50 ppm.

Como covariables se tomaron turbiedad inicial (UNT), color inicial (UPC) y pH inicial.

Las variables de respuesta fueron turbiedad residual (UNT), color residual (UPC) y pH final.

Empleando la técnica estadística ANOVA se analizó la hipótesis dada por:

$$H_0 = \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = \mu_k$$

H₀ = Hipótesis nula

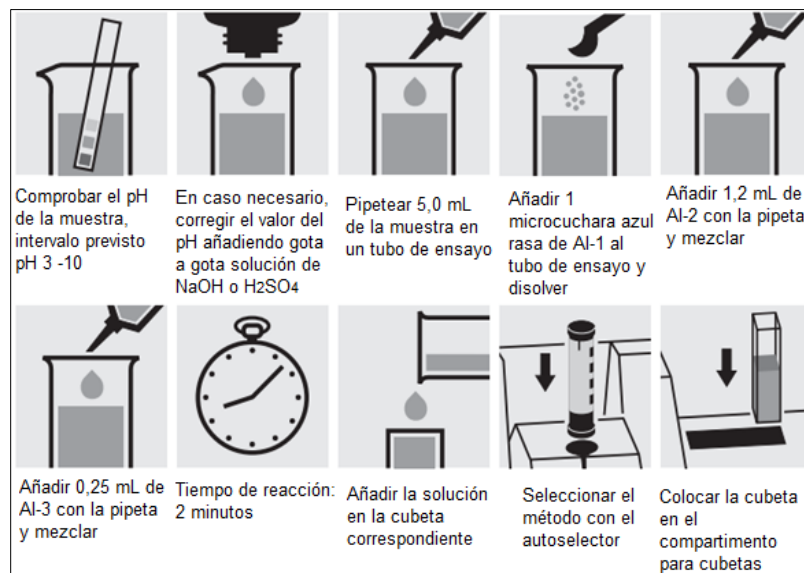
μ = Media poblacional

Donde la afirmación a probar fue que la respuesta media poblacional lograda con cada tratamiento es la misma para los k tratamientos, de esta manera se logró determinar el mejor coagulante y la dosis óptima de éste, frente a las variables de respuesta, observando que factores tuvieron mayor efecto sobre ellos.

3.6 Determinación de aluminio ^[42]

Para la determinación de aluminio en un intervalo de medida de 0,020 – 0,200 mg/L de Al, el procedimiento se puede observar en el esquema No. 8:

Esquema No. 8: Determinación de Al



Fuente: Manual NOVA 60 Métodos de Análisis – AMCO método 043

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se describirá la comparación de 4 coagulantes y la dosis más adecuada para el que presente mejores resultados en el proceso de clarificación de agua cruda del Rio Blanco que abastece el municipio de Ipiales.

El desarrollo experimental se desarrolló entre los meses de Abril hasta Agosto de 2015, posteriormente se realizaron ensayos en el mes de Diciembre del mismo año con el coagulante que presentó mejores resultados frente a remoción de turbiedad y color y el coagulante actualmente utilizado en la planta de tratamiento para determinar los niveles de aluminio residual. Durante el periodo de experimentación, se trabajó con un rango en los valores de turbiedad, color y pH de agua cruda que se muestran a continuación.

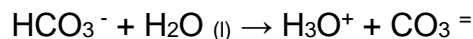
Tabla No. 9: Rangos de características físico-químicas de agua cruda

Parámetro	Rango de trabajo	Unidades
Turbiedad	4,00 – 25,60	UNT
Color	19,80 – 30,60	UPC
pH	7,01 – 8,40	

Una vez recolectada la muestra de agua cruda, se midió los parámetros iniciales alcalinidad, turbiedad, color y pH (ANEXO 1)

La alcalinidad inicial de agua cruda es un parámetro que se tomó en cuenta ya que la alcalinidad natural influye en la coagulación cuando reacciona con los coagulantes, puesto que la alcalinidad actúa como un estabilizador produciendo un pH donde el coagulante puede ser efectivo debido a que para esos valores de pH, la alcalinidad junto con el coagulante forma un producto estable que favorece la coagulación.

El equilibrio iónico en la alcalinidad debida a carbonatos $\text{CO}_3^{=}$ y bicarbonatos, HCO_3^- será:



La constante de equilibrio, por lo tanto, es dada por:

$$K_a = \frac{[\text{H}_3\text{O}^+][\text{CO}_3^{=}]}{[\text{HCO}_3^-]}$$

Donde:

$[\text{H}_3\text{O}^+]$ = concentración molar del ion hidronio

$[\text{CO}_3^{=}]$ = concentración molar del ion carbonato

$[\text{HCO}_3^-]$ = concentración molar del ion bicarbonato

Por tanto:

$$[\text{H}_3\text{O}^+] = K_a = [\text{HCO}_3^-] / [\text{CO}_3^{=}]$$

Lo que demuestra que la concentración del ion hidronio depende de la de los iones de bicarbonato y carbonato. El efecto del bicarbonato y el carbonato es resistir un cambio en el pH. Esta resistencia o capacidad amortiguadora alcanza su máximo nivel cuando las concentraciones de carbonato y bicarbonato son iguales ^[13]

4.1 RESULTADOS EXPERIMENTALES

4.1.1 Determinación de la dosis óptima de coagulante

Para estos ensayos se tomaron muestras representativas de agua cruda superficial que presentaron diversos valores de turbiedad, color y pH. Los ensayos se diseñaron teniendo en cuenta como factores principales el tipo de coagulante, siendo estos el PAC, STBL, STBS y el FeCl₃ y la dosificación de los mismos correspondientes a 10, 20, 30, 40 y 50 ppm y se evaluó la interacción entre ellos en un modelo de bloques aleatorizados, y se evaluó como variable de respuesta, la turbiedad residual, color residual y efectos sobre el pH final.

Para evaluar la dosis óptima de coagulantes, se realizaron ensayos previos en los cuales se establecieron condiciones de gradientes y tiempos de mezcla rápida, mezcla lenta y sedimentación, las cuales permanecieron fijas en todos los ensayos según se indica en la tabla No. 10

Tabla No. 10: Condiciones de gradientes y tiempos

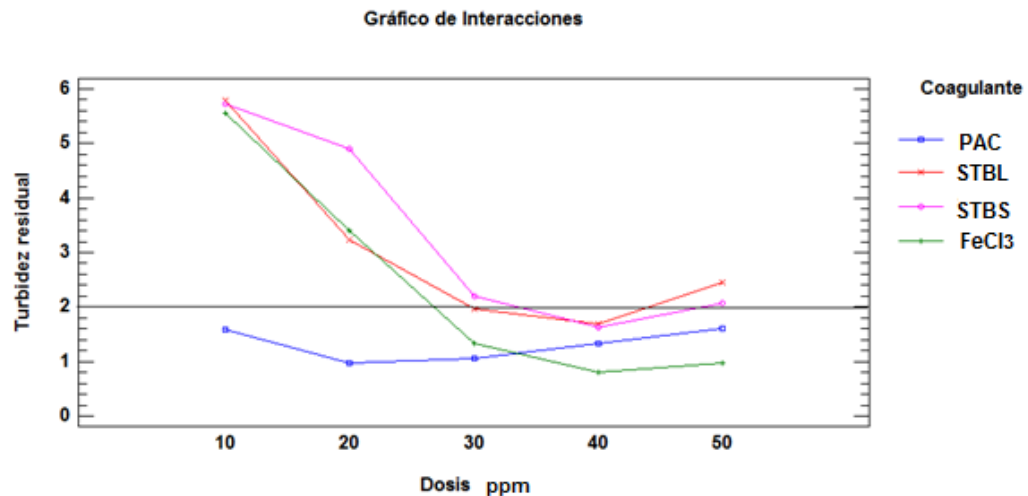
	Gradiente (rpm)	Tiempo (min)
Mezcla rápida	100	1
Mezcla lenta	40	20
Sedimentación	0	20

¹³ BARRENECHEA, Ada. OPS/CEPIS. Tratamiento de Agua para Consumo Humano. Manual I, Tomo I Capítulo 4 y 8: Coagulación. Versión en PDF. Lima, 2004

4.1.1.1 Determinación de dosis óptima de acuerdo a la Turbiedad

En el gráfico 1 se puede observar el comportamiento de la turbiedad residual en función de la dosis de cada uno de los coagulantes.

Gráfica No. 1 Gráfico de interacciones en relación a la turbiedad



Para el caso del PAC presenta buenos resultados en cualquiera de las dosis estudiadas y a su vez cumplen la normatividad de acuerdo resolución 2115 de 2007 que establece niveles máximos de turbiedad en 2 UNT, sin embargo, el mejor resultado se presenta en la dosis de 20ppm. El PAC, es una sal inorgánica de aluminio multinuclear capaz de formar con mayor rapidez y perfección flócs con mayor velocidad de sedimentación y poder clarificante logrando remociones más altas de turbiedad respecto a otras sales de aluminio mononuclear. ^{[29] [32] [43]}.

Los otros tres coagulantes presentan un comportamiento inadecuado puesto que sobrepasa los límites permisibles consignados en la resolución 2115/2007, a dosis bajas, sin embargo a una dosis de 30 y 40 ppm, muestran un comportamiento descendiente, obteniendo para los 3 coagulantes un valor de turbiedad mínima en dosis de 40 ppm teniendo en cuenta también, que a esta dosis se encuentran dentro de la norma establecida, estos resultados se analizarán con mayor precisión en el apartado más adelante.

²⁹ SHEN, YH. AND DEMPSEY, B. Synthesis and speciation of polyaluminum chloride for water treatment. Environment International, 24 (8), 899910, 1998.

³² COGOLLO FLÓREZ, Juan MIGUEL. Clarificación De Aguas Usando Coagulantes Polimerizados: Caso Del Hidroxicloruro De Aluminio. DYNA, [S.I.], V. 78, n .165, p. 18-27, nov 2011. ISSN 2346-2183. Disponible en: <http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/25636/39133>

⁴³ ROMERO, C., SOLÓRZANO, R., ABREU, O., BRIZUELA, L. AND PÉREZ, Z. Síntesis de un polímero inorgánico de aluminio y su uso para clarificación de agua. Revista Ingeniería UC, 14 (3), 16 – 23, 2007.

La dosis de coagulante es un parámetro crítico dado que si éste se adiciona por debajo de la cantidad requerida, no se neutralizan totalmente las cargas de las partículas, la formación de microflocs es escasa y la turbiedad del agua tratada es elevada; si se adiciona exceso de coagulante, se produce la inversión de las cargas de las partículas y la sucesiva formación de gran cantidad de microflocs con tamaños muy pequeños y velocidades de sedimentación muy bajas y la turbiedad del agua tratada es, igualmente, elevada. [29]

Tabla No. 11: Análisis de Varianza para Turbiedad residual - Suma de Cuadrados Tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
COVARIABLES					
Turbiedad inicial	0,00203387	1	0,00203387	0,00	0,9652
Color inicial	10,885	1	10,885	10,19	0,0014
pH inicial	3,15532	1	3,15532	2,95	0,0856
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:Dosis	1218,26	4	304,564	285,21	0,0000
B:Coagulante	469,361	3	156,454	146,51	0,0000
INTERACCIONES					
AB	454,516	12	37,8764	35,47	0,0000
RESIDUOS	829,737	777	1,06787		
TOTAL (CORREGIDO)	2985,58	799			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

La tabla ANOVA descompone la variabilidad de Turbiedad residual en contribuciones debidas a varios factores. Puesto que se ha escogido la suma de cuadrados Tipo III (por omisión), la contribución de cada factor se mide eliminando los efectos de los demás factores. Los valores-P prueban la significancia estadística de cada uno de los factores. Puesto que 4 valores-P correspondientes a color inicial, dosis, tipo de coagulante y la relación entre dosis y tipo de coagulante son menores que 0,05, estos factores tienen un efecto estadísticamente significativo sobre la turbiedad residual con un 95,0% de nivel de confianza.

Tabla No. 12: Pruebas de Múltiple Rangos para Turbiedad residual por coagulante

Método: 95,0 porcentaje LSD

Coagulante	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
PAC (1)	200	1,3088	0,073071	X
STBL (2)	200	2,40465	0,073071	X
STBS (3)	200	3,0234	0,073071	X
FeCl ₃ (4)	200	3,30325	0,073071	X

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
1 - 2	*	-1,7146	0,202539
1 - 3	*	-1,99445	0,202539
1 - 4	*	-1,09585	0,202539
2 - 3	*	-0,27985	0,202539
2 - 4	*	0,61875	0,202539
3 - 4	*	0,8986	0,202539

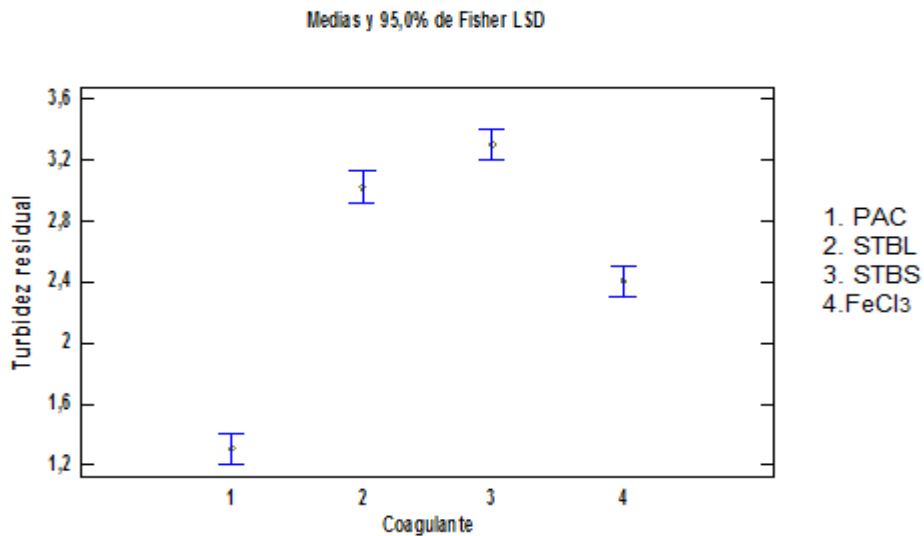
* indica una diferencia significativa.

Esta tabla No. 11 se aplica un procedimiento de comparación múltiple para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras.

En la parte inferior de la tabla se muestra las diferencias estimadas entre cada par de medias. El asterisco que se encuentra al lado de los 6 pares indica que estos pares muestran diferencias estadísticamente significativas con un nivel del 95,0% de confianza.

En la parte superior, se han identificado 4 grupos homogéneos según la alineación de las "X" en columnas. No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que comparten una misma columna de "X", por ello se concluye que todos los coagulantes presentan un comportamiento estadísticamente diferente. El método empleado actualmente para discriminar entre las medias es el procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher. Con este método hay un riesgo del 5,0% al decir que cada par de medias es significativamente diferente, cuando la diferencia real es igual a 0.

Gráfico No. 2: Gráfico de medias y de turbiedad residual con el método LSD para determinar el mejor coagulante



En el gráfico No. 2 se aprecia que los mejores niveles de remoción de turbiedad se presentan con el PAC. Aunque los intervalos no se traslapan y esto los hace estadísticamente diferentes, se observa que en el caso de STBL, STBS y FeCl₃ no presentan una remoción de turbiedad adecuada en muchos casos sobrepasando la normatividad permitida.

Se procedió a determinar la mejor dosis de cada uno de los coagulantes estudiados:

Tabla No. 13: ANOVA para turbiedad residual por dosis de PAC

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Entre grupos	13,1452	4	3,28629	26,84	0,0000
Intra grupos	23,8783	195	0,122453		
Total (Corr.)	37,0235	199			

La tabla ANOVA descompone la varianza de Turbiedad final en dos componentes: un componente entre-grupos y un componente dentro-de-grupos. La razón-F, que en este caso es igual a 26,8372, es el cociente entre el estimado entre-grupos y el estimado dentro-de-grupos. Puesto que el valor-P de la prueba-F es menor que 0,05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de turbiedad final entre un nivel de dosis y otro, con un nivel del 95,0% de confianza. Para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras, se aplicó la prueba de múltiples rangos

Tabla No. 14: Pruebas de Múltiple Rangos para Turbiedad residual por dosis con PAC

Método: 95,0 porcentaje LSD

<i>Dosis ppm</i>	<i>Casos</i>	<i>Media</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
20	40	0,97825	X
30	40	1,062	X
40	40	1,32425	X
10	40	1,5765	X
50	40	1,603	X

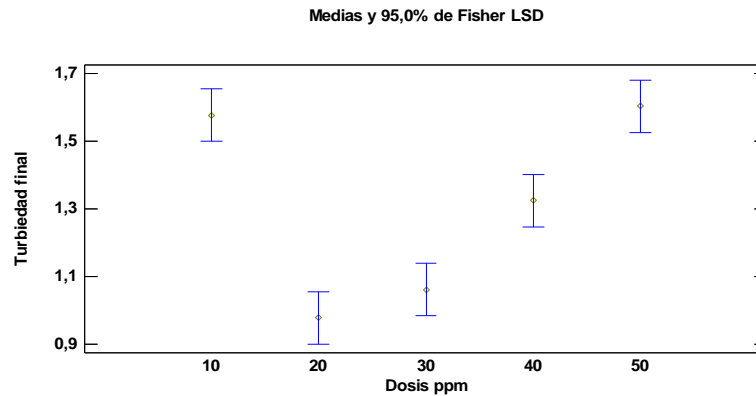
<i>Contraste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>
10 - 20	*	0,59825	0,15432
10 - 30	*	0,5145	0,15432
10 - 40	*	0,25225	0,15432
10 - 50		-0,0265	0,15432
20 - 30		-0,08375	0,15432
20 - 40	*	-0,346	0,15432
20 - 50	*	-0,62475	0,15432
30 - 40	*	-0,26225	0,15432
30 - 50	*	-0,541	0,15432
40 - 50	*	-0,27875	0,15432

* indica una diferencia significativa.

En la parte inferior de la tabla No. 14 se muestra las diferencias estimadas entre cada par de medias. El asterisco que se encuentra al lado de los 8 pares indica que estos pares muestran diferencias estadísticamente significativas con un nivel del 95,0% de confianza. En la parte superior, se han identificado 3 grupos homogéneos según la alineación de las X's en columnas. No existen diferencias estadísticamente significativas entre las dosis de 20-30 ppm y 10 - 50 ppm. Se empleó el procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher. Con este método

hay un riesgo del 5,0% al decir que cada par de medias es significativamente diferente, cuando la diferencia real es igual a 0.

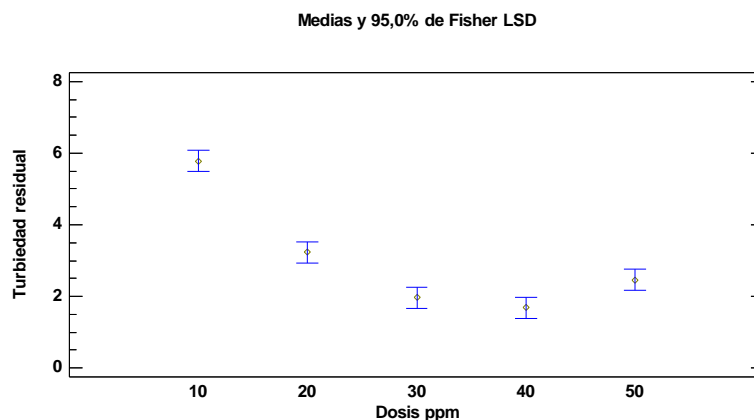
Grafico No. 3: Gráfico de medias y de turbiedad con el método LSD para determinar la dosis óptima con PAC



En el gráfico No. 3 se aprecia que los mejores niveles de remoción de turbiedad se presentan con la dosis de **20ppm**, aunque este valor se traslapan con la dosis de 30ppm, lo que los hace estadísticamente iguales, se escoge la dosis de 20ppm puesto que implica una menor cantidad de coagulante que se ve representada en ahorro en costos de operación.

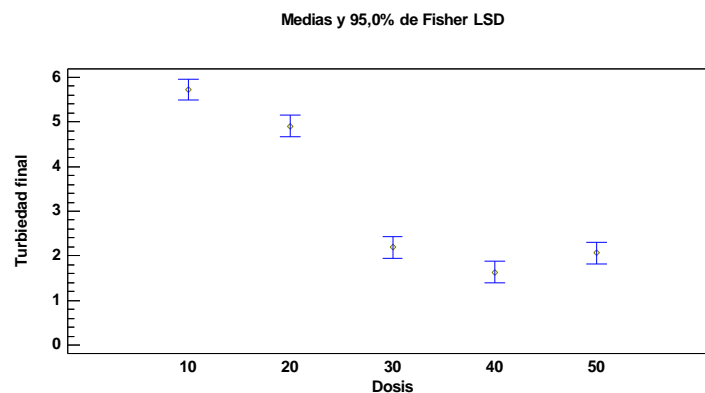
De manera análoga se realizaron pruebas ANOVA para turbiedad final por dosis ANEXO 3 y de múltiple rangos para turbiedad final por dosis con STBL, STBS Y FeCl₃ observadas en el ANEXO 5

Grafico No. 4: Gráfico de medias y de turbiedad con el método LSD para determinar la dosis óptima con STBL



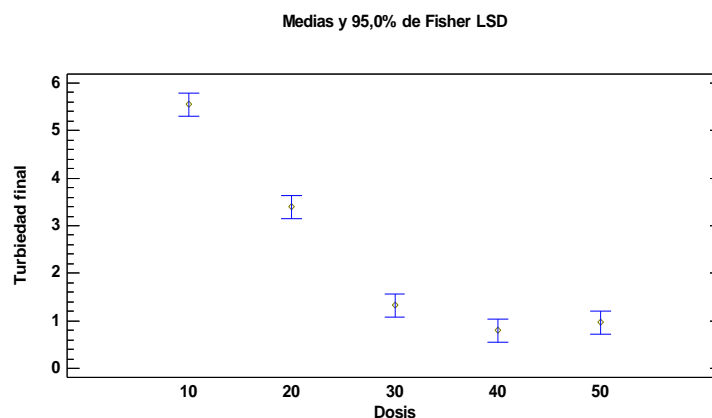
Observando el gráfico 4 y teniendo en cuenta ANEXO 5 se determina la dosis óptima para STBL; teniendo en cuenta que los valores de 30ppm y 40ppm son estadísticamente iguales, se opta por escoger la dosis de **40ppm** puesto que experimentalmente presenta mejores valores de remoción de turbiedad acordes a de la norma 2115 de 2007, en el caso de la dosis 30ppm sobrepasa dichos valores en algunos casos estudiados.

Grafico No. 5: Gráfico de medias y de turbiedad con el método LSD para determinar la dosis óptima con STBS



Se determina la dosis óptima para el STBS de acuerdo al gráfico 5 y al ANEXO 5. Se observa homogeneidad en los pares de dosis 40 – 50ppm y 30-50ppm, a pesar de que sus valores se traslapan y los hace estadísticamente iguales, se escoge la dosis de **40ppm** dado que presenta valores más bajos de remoción de turbiedad acorde a la resolución 2115 de 2007.

Grafico No. 6: Gráfico de medias y de turbiedad con el método LSD para determinar la dosis óptima con FeCl₃

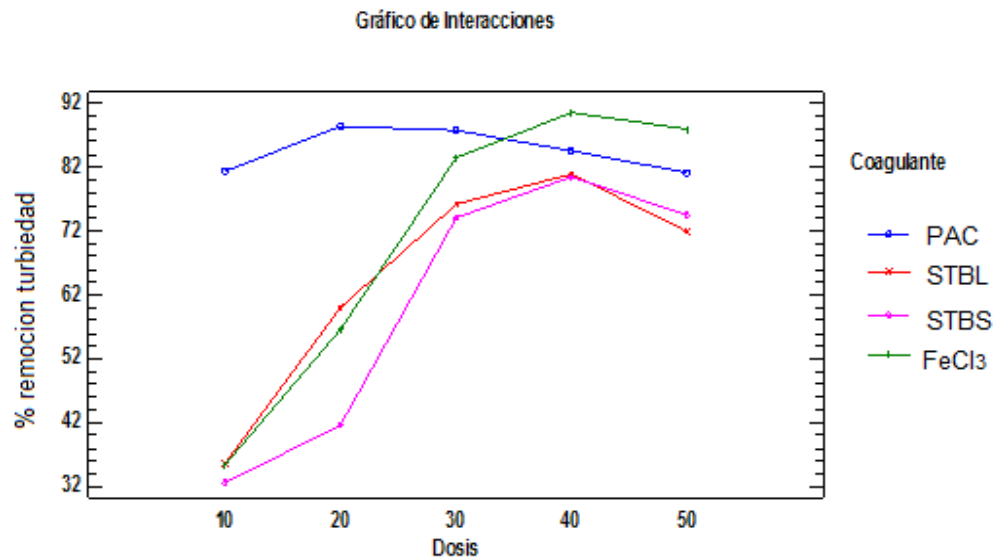


En el ANEXO 5 se observa homogeneidad entre pares de dosis de 40-50ppm y 30-50ppm, dado que los valores de remoción de turbiedad en las 3 dosis, cumple la resolución 2115 de 2007 y determinando que sus valores se traslapan en los pares anteriormente mencionados, se escoge la dosis más baja **30ppm** que implica una reducción en costos de operación y un menos aporte de iones Fe^{3+} que pudiesen aportar color al agua tratada.

4.1.1.2 Porcentaje de remoción de turbiedad por coagulante

En el gráfico 7 se puede observar el comportamiento de la turbiedad residual en función de la dosis de cada uno de los coagulantes.

Gráfica No. 7: Gráfico de interacciones respecto al porcentaje de remoción de turbiedad



Graficando los datos consignados en el ANEXO 2 se observa la eficiencia del PAC en cuanto porcentaje de remoción de turbiedad, obteniendo buen rendimiento en el proceso de clarificación de agua cruda a una dosis menor comparado con los otros coagulantes.

Para el caso del $FeCl_3$ muestra el mejor rendimiento en cuanto a porcentaje de remoción de turbiedad, sin embargo si se compara con el PAC, se observa que la dosis es el doble, lo que implica un aumento de costos.

Tabla No. 15: Pruebas de Múltiple Rangos para % remoción de turbiedad por Coagulante

Método: 95,0 porcentaje LSD

Coagulante	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
STBS	200	60,6586	1,05466	X
STBL	200	64,9029	1,05466	X
FeCl ₃	200	70,7776	1,05466	X
PAC	200	84,6581	1,05466	X

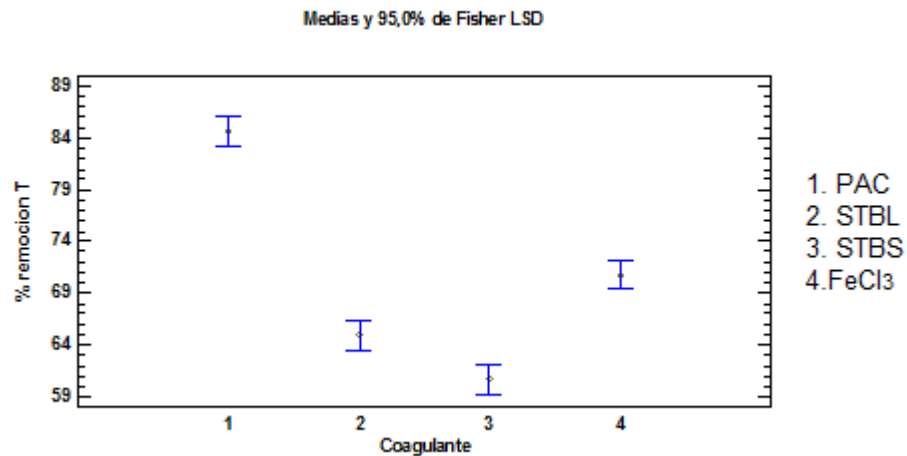
Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
1 - 2	*	19,7552	2,92332
1 - 3	*	23,9995	2,92332
1 - 4	*	13,8805	2,92332
2 - 3	*	4,24425	2,92332
2 - 4	*	-5,8747	2,92332
3 - 4	*	-10,119	2,92332

* indica una diferencia significativa.

En la tabla No. 15 el asterisco que se encuentra al lado de los 6 pares indica que estos pares muestran diferencias estadísticamente significativas con un nivel del 95,0% de confianza.

En la parte superior, se han identificado 4 grupos homogéneos según la alineación de las "X" en columnas. Observando la alineación de las "X" en las columnas, se infiere que estadísticamente todos los coagulantes tienen un comportamiento diferente frente al porcentaje de turbiedad removida.

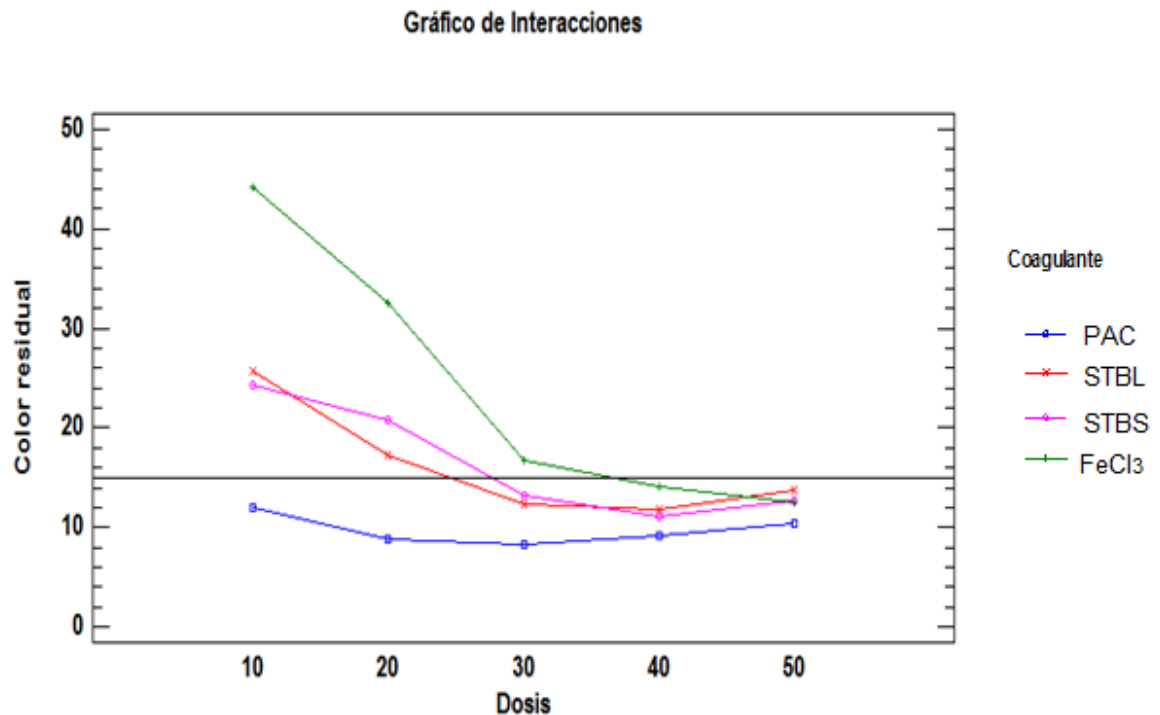
Gráfico No. 8: Gráfico de medias y 95% de Fisher LSD para determinar el mejor coagulante respecto al porcentaje de remoción de turbiedad



En el gráfico de medias se ratifica lo descrito en la tabla No. 15, puesto que se observa que ninguno de los valores de las medias se traslapa lo que los hace estadísticamente diferentes, de esta manera el PAC, presenta mejor comportamiento en remoción de turbiedad.

4.1.2. Determinación de dosis óptima de acuerdo al color residual

Gráfico No. 9: gráfico de interacciones en relación al color residual



El color en el agua se debe a la presencia de varios iones metálicos característicos como el hierro y el manganeso, materia orgánica diversa y en algunos casos residuos contaminantes de tipo industrial.

La presencia de hierro puede afectar el sabor del agua, producir manchas indelebles sobre los artefactos sanitarios y la ropa blanca. También puede formar depósitos en las redes de distribución y causar obstrucciones, así como alteraciones en la turbiedad y el color del agua. ^[13]

Como se indica en el gráfico 9 en el caso del PAC todas las dosis cumplen con el valor mínimo establecido para color en agua potable consignados en la resolución 2115 de 2007 con un valor de 15 UPC, sin embargo el resultado más adecuado se encuentra a una dosis de 30ppm.

¹³ BARRENECHEA, Ada. OPS/CEPIS. Tratamiento de Agua para Consumo Humano. Manual I, Tomo I Capítulo 4 y 8: Coagulación. Versión en PDF. Lima, 2004.

Para el caso de los coagulantes STBL y STBS, tienen un comportamiento similar en cuanto a la remoción de color, obteniendo los mínimos valores de remoción de color a una dosis de 40 ppm.

Finalmente en el gráfico se observa que para el FeCl_3 presenta buena coagulación y valores bajos de remoción de color a una dosis de 50 ppm, sin embargo presenta una tendencia descendiente lo cual podría indicar que a valores superiores a esta dosis, pueda presentar una remoción más alta de color.

A valores menores que esta dosis, el color del FeCl_3 presenta una remoción pobre y por el contrario, el agua sedimentada presenta mayor problemas estéticos de color, esto se debe a que cuando se disuelve en agua, el FeCl_3 sufre hidrólisis formando un complejo de coordinación con 6 moléculas de agua, $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$ y libera calor en una reacción exotérmica. De ello resulta una solución ácida y corrosiva de color marrón. Al disolverse en agua, se precipita formando $\text{Fe}(\text{OH})_3$, insoluble; sin embargo, forma una disolución coloidal de ese compuesto, que presenta el típico color pardo de las disoluciones de sales de Fe^{3+}

[13] [44]

Tabla No. 16: Análisis de varianza para color residual - suma de cuadrados tipo III

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
COVARIABLES					
Turbidez	172,562	1	172,562	11,12	0,0009
Color	322,294	1	322,294	20,76	0,0000
pH	36,9394	1	36,9394	2,38	0,1229
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:Dosis	27133,6	4	6783,4	436,96	0,0000
B:Coagulante	20457,0	3	6818,99	439,26	0,0000
INTERACCIONES					
AB	14376,1	12	1198,01	77,17	0,0000
RESIDUOS	12062,1	777	15,524		
TOTAL (CORREGIDO)	74484,7	799			

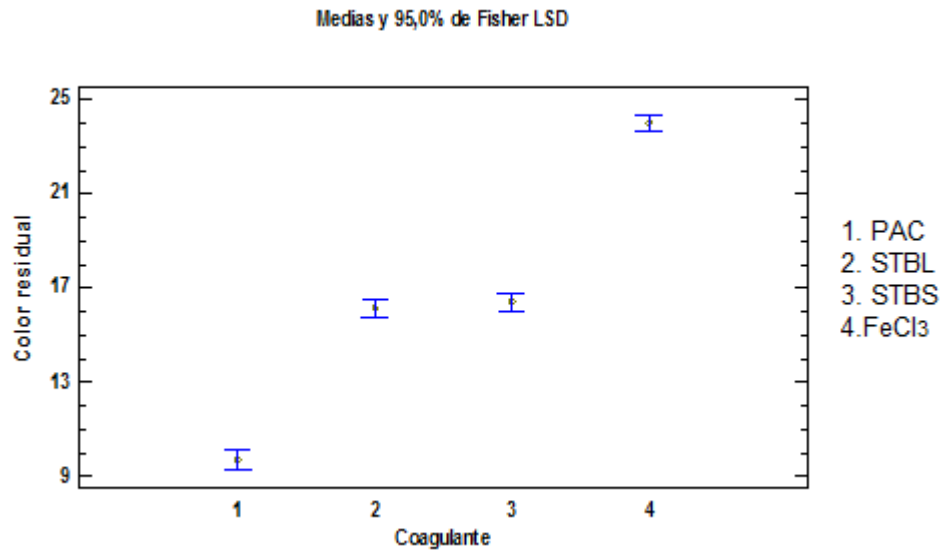
Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

La tabla ANOVA descompone la variabilidad de Color residual en contribuciones debidas a varios factores. Puesto que se ha escogido la suma de cuadrados Tipo III (por omisión), la contribución de cada factor se mide eliminando los efectos de los demás factores. Los valores-P prueban la significancia estadística de cada uno de los factores. Puesto que 5 valores-P son menores que 0,05, estos factores tienen un efecto estadísticamente significativo sobre Color residual con un 95,0% de nivel de confianza.

¹³ BARRENECHEA, Ada. OPS/CEPIS. Tratamiento de Agua para Consumo Humano. Manual I, Tomo I Capítulo 4 y 8: Coagulación. Versión en PDF. Lima, 2004.

⁴⁴ Química general moderna. Joseph Babor y José Ibarz. Barcelona, 1973. ISBN 84-7102-997-9

Grafico No. 10: Gráfico de medias y de color residual con el método LSD para determinar el mejor coagulante



En el gráfico 10 se corrobora que dos de los coagulantes STBL y STBS son estadísticamente iguales ya que las medias se traslapan denotando así, que poseen un comportamiento similar en cuanto a remoción de color de agua cruda.

Las medias estadísticas de PAC y FeCl₃ son diferentes, mostrando que el PAC tiene un comportamiento óptimo en remoción de color en muestras de agua cruda, obteniendo valores dentro de la norma y el FeCl₃ sobrepasa los límites establecidos en la resolución 2115 de 2017, esto puede deberse a que las características del agua del río Blanco es alta en contenido de hierro y al tratarla con FeCl₃, la concentración de Fe³⁺ aumenta aportando color al agua.

Tabla No. 17 ANOVA para Color residual por dosis de PAC

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	363,258	4	90,8145	26,22	0,0000
Intra grupos	675,4	195	3,46359		
Total (Corr.)	1038,66	199			

La tabla ANOVA descompone la varianza de Color final en dos componentes: un componente entre-grupos y un componente dentro-de-grupos. La razón-F, que en este caso es igual a 26,2198, es el cociente entre el estimado entre-grupos y el estimado dentro-de-grupos. Puesto que el valor-P de la prueba-F es menor que 0,05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de Color final entre un nivel de dosis y otro, con un nivel del 95,0% de confianza.

Tabla No. 18: Pruebas de Múltiple Rangos para Color residual por dosis de PAC

Método: 95,0 porcentaje LSD

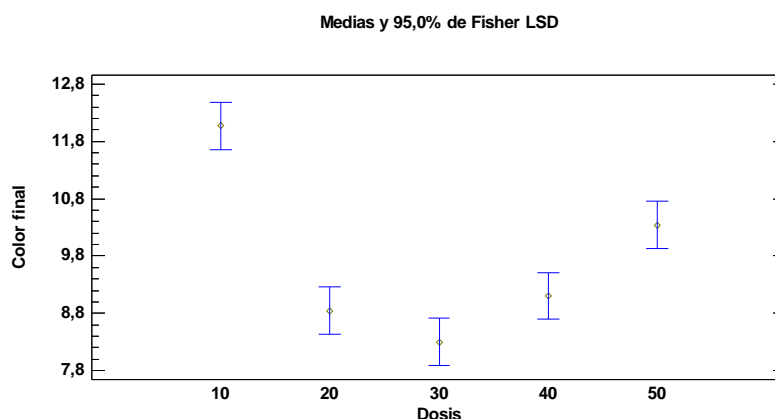
Dosis	Casos	Media	Grupos Homogéneos
30	40	8,301	X
20	40	8,845	X
40	40	9,1025	X
50	40	10,3425	X
10	40	12,0725	X

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
10 - 20	*	3,2275	0,820731
10 - 30	*	3,7715	0,820731
10 - 40	*	2,97	0,820731
10 - 50	*	1,73	0,820731
20 - 30		0,544	0,820731
20 - 40		-0,2575	0,820731
20 - 50	*	-1,4975	0,820731
30 - 40		-0,8015	0,820731
30 - 50	*	-2,0415	0,820731
40 - 50	*	-1,24	0,820731

* indica una diferencia significativa.

En la tabla No.18 se puede observar 7 pares que muestran diferencias estadísticamente significativas con un nivel del 95,0% de confianza. En la parte superior de la tabla, se han identificado 3 grupos homogéneos correspondientes a las dosis de 20,30 y 40 ppm las cuales no tienen diferencias estadísticamente significativas.

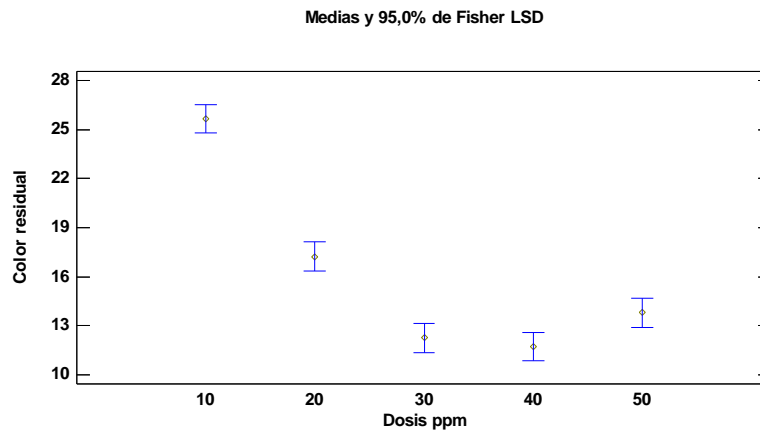
Gráfico No. 11: Gráfico de medias y de color residual con el método LSD para determinar dosis óptima con PAC



En el gráfico se puede observar que con todas las dosis, los niveles de color residual quedan por debajo de la norma establecida en la resolución 2115 de 2007 que

plantea niveles adecuados de color en 15 UPC. Para la dosis de 30ppm se presenta la mejor remoción de color, pero dado que sus medias se traslapan con las dosis de 20 y 40 ppm, se infiere que no poseen diferencias estadísticamente significativas, por lo cual, se opta por escoger la dosis de **20ppm**, la cual coincide con la dosis de remoción de turbiedad.

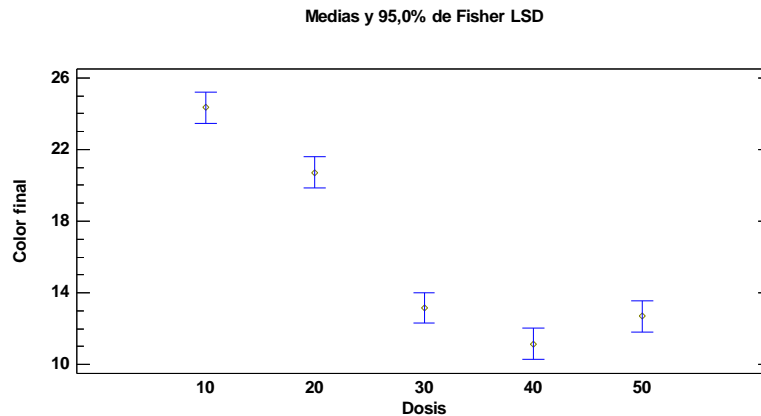
Gráfico No. 12: Gráfico de medias y de color con el método LSD para determinar la dosis óptima con STBL



Teniendo en cuenta prueba de múltiples rangos ANEXO 6 y el gráfico 12, se observan 4 grupos homogéneos en donde la dosis de 10ppm presenta valores inadecuados de remoción de color de agua cruda al igual que la dosis de 20ppm, arrojando valores por encima de la norma, también se observa que las medias de la dosis de 30ppm se traslapan con la dosis de 40 ppm y la dosis de 50ppm las cuales no presentan diferencias estadísticamente significativas.

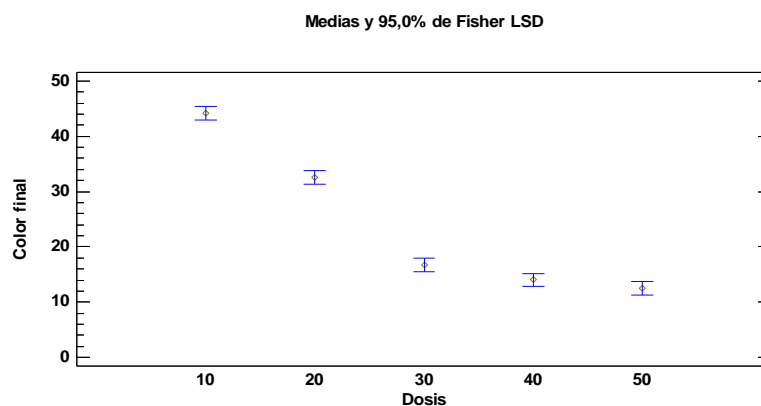
En este caso, aunque a la dosis de **30ppm** se obtiene valores adecuados de remoción de color con menor gasto de coagulante, esta dosis no coincide con la dosis de STBL para remover turbiedad, en cuyo caso se elige la dosificación que presente mejores resultados en cuanto a remoción de turbiedad se refiere, obteniendo la dosis adecuada de STBL con **40ppm**

Gráfico No. 13: Gráfico de medias y de color con el método LSD para determinar la dosis óptima con STBS



De acuerdo al ANEXO 6 y al gráfico 13, se observan 4 grupos homogéneos en los cuales los pares 40 - 50ppm y 30 - 50ppm no presentan diferencias estadísticamente significativas y presentan buenos valores de remoción de color acordes a la normatividad, aunque la dosis más baja, en este caso la dosis de **30ppm** implica un menor consumo de coagulante, esta dosis no concuerda con la dosis óptima para remoción de turbiedad, se elige como adecuada la dosis que produzca menor turbiedad residual, así entonces la dosis óptima de STBS será **40ppm**

Gráfico No. 14: Gráfico de medias y de color con el método LSD para determinar la dosis óptima con FeCl₃



Se observan 4 grupos homogéneos, en donde las medias de 40 y 50 ppm se traslapan y no tienen diferencia estadísticamente significativa. Para la dosis de

30ppm experimentalmente se observa que en pocos casos sobrepasa el valor normativo para color, en cuanto a las dosis de 10 y 20ppm se observa una remoción de color pobre, dadas estas observaciones, se opta por la dosis de 40ppm como dosis óptima para remoción de color, puesto que este resultado no es acorde a la dosis óptima de remoción de turbiedad, se toma como valor de referencia, con la que se obtenga menor turbiedad, es decir, **30ppm**

Gráfico No. 15: Grafico de interacciones respecto al porcentaje de remoción de color

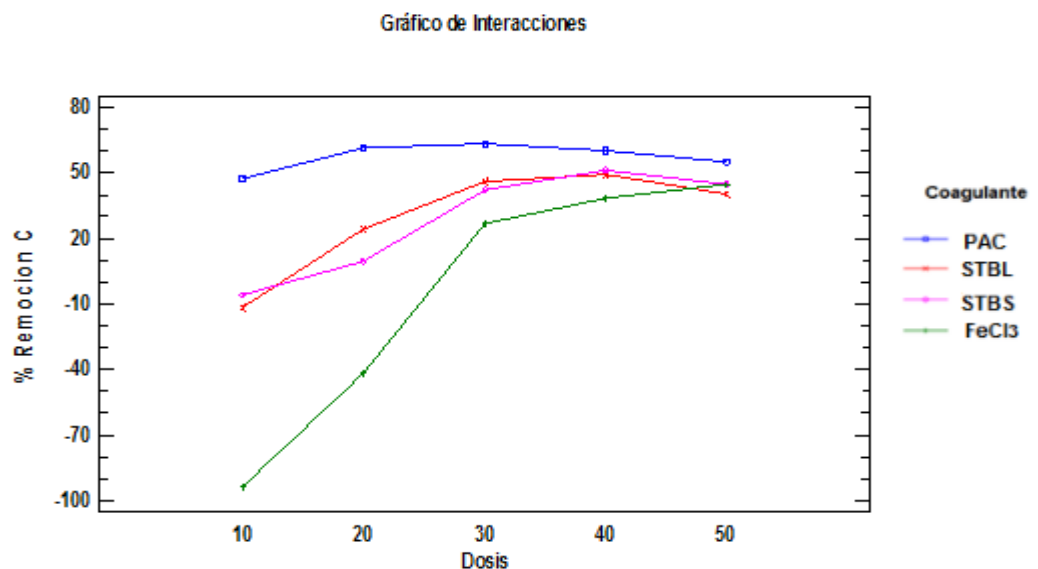


Tabla No. 19: Análisis De Varianza Para % Remoción C - Suma De Cuadrados Tipo III

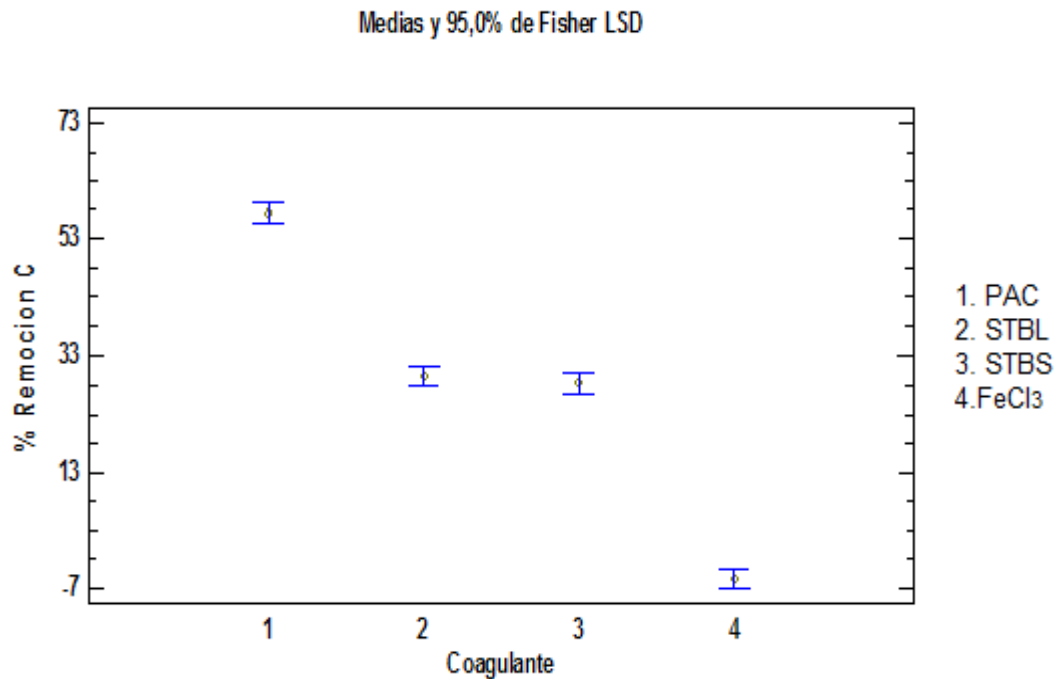
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
COVARIABLES					
Turbiedad inicial	3656,68	1	3656,68	12,14	0,0005
Color inicial	24223,0	1	24223,0	80,43	0,0000
pH inicial	880,769	1	880,769	2,92	0,0872
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:Coagulante	394741,	3	131580,	436,90	0,0000
B:Dosis	515089,	4	128772,	427,58	0,0000
INTERACCIONES					
AB	274302,	12	22858,5	75,90	0,0000
RESIDUOS	234006,	777	301,166		
TOTAL (CORREGIDO)	1,44904E6	799			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

La tabla ANOVA descompone la variabilidad de % Remoción C en contribuciones debidas a varios factores. Puesto que se ha escogido la suma de cuadrados Tipo III (por omisión), la contribución de cada factor se mide eliminando los efectos de los demás factores. Los valores-P prueban la significancia estadística de cada uno de los factores. Puesto que 5 valores-P son menores que 0,05, estos factores tienen

un efecto estadísticamente significativo sobre % Remoción C con un 95,0% de nivel de confianza.

Grafico No. 16: Gráfico de medias y 95% de Fisher LSD para determinar el mejor coagulante respecto al porcentaje de remoción de color



En la gráfica de medias se observa que el mayor porcentaje de remoción de color se realiza con el coagulante PAC mientras que FeCl₃ presenta resultados deficientes.

Dado que las medias de STBL y STBS se traslapan, el comportamiento para porcentaje de color removido en el agua clarificada es estadísticamente igual y no presentan remoción adecuada de color.

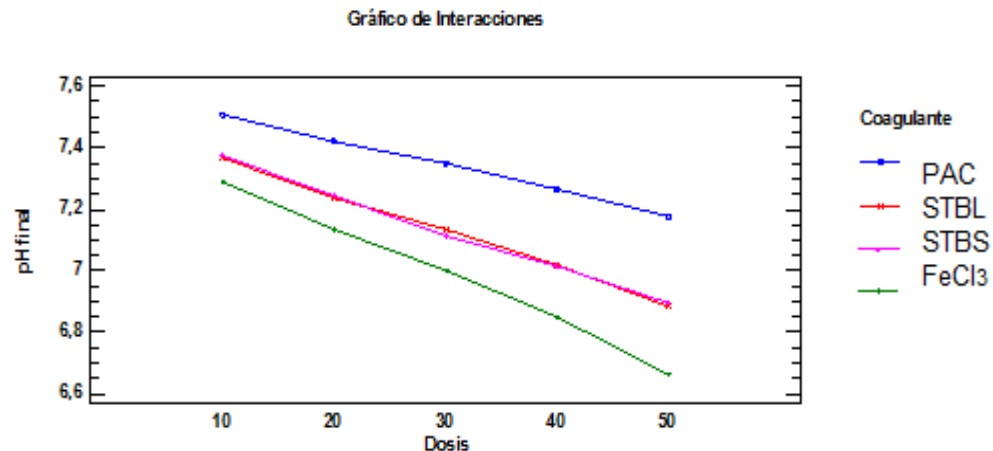
Tabla No. 20: Dosis óptima de cada coagulante frente a remoción de turbiedad y color

Dosis óptima	Turbiedad	Color
PAC	20	20
STBL	40	30
STBS	40	30
FeCl ₃	40	40

4.1.3. Influencia de la dosis en el pH

Los resultados de estos ensayos se encuentran consignados en el ANEXO 1. Teniendo en cuenta la gráfica, se observa una tendencia clara que a medida que se aumenta la dosis de coagulante, el pH decrece.

Gráfico No. 17: Gráfico de interacciones en relación al pH



Al agregarse sulfato de aluminio al agua este se hidroliza provocando una disminución del pH. Después de la dosificación con sulfato de aluminio el pH de las muestras disminuye, se puede observar que a mayor dosificación de STBS menor pH, lo mismo sucede con el STBL. Muchas veces el pH del agua después del tratamiento con Sulfato de aluminio queda por fuera del rango permisible por lo cual en la planta de tratamiento se debe contar con una etapa de post-cal para ajustarlo.

En el caso del PAC ayuda a disminuir el gasto alcalinizante necesario para ajustar el pH del agua entre 6,5 y 9 según resolución 2115 de 2007 ^[10], esto debido a que el mecanismo de acción de los polielectrolitos no involucra su acción con los iones que componen la alcalinidad del agua como si sucede en el caso de alumbre, además el PAC ejerce un efecto buffer que disminuye la caída del pH durante la coagulación ^[8] manteniendo casi invariable la alcalinidad del agua especialmente para dosis que producen turbiedad baja.

Finalmente en el caso del FeCl₃ se observa un descenso mayor en el pH que en el tratamiento con los otros coagulantes lo cual hace necesario el uso de alcalinizantes que estabilicen el pH.

⁸ Garcés Paz Rosa Virginia. Obtención de la mínima dosis de reemplazo de policloruro de aluminio en aguas y aguas de Pereira. Tesis Química Industrial Pereira-Risaralda, Universidad Tecnológica de Pereira. 2010

¹⁰ Castrillón Bedoya Daniela; Giraldo María de los Ángeles. Determinación de las dosis óptimas del coagulante Sulfato de Aluminio granulado tipo B en función de la turbiedad y el color para la potabilización del agua en la planta de tratamiento de Villa Santana. Tesis Tecnología Química. Pereira-Risaralda, Universidad Tecnológica de Pereira, Facultad de Tecnologías. 2012

Tabla No. 21: Análisis de Varianza para pH final - Suma de Cuadrados Tipo III

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
COVARIABLES					
Turbiedad	1,59025	1	1,59025	54,77	0,0000
Color	0,0667168	1	0,0667168	2,30	0,1296
pH	19,1956	1	19,1956	661,09	0,0000
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:Coagulante	12,528	3	4,176	143,82	0,0000
B:Dosis	22,0626	4	5,51565	189,96	0,0000
INTERACCIONES					
AB	1,04059	12	0,0867162	2,99	0,0004
RESIDUOS	22,5611	777	0,0290361		
TOTAL (CORREGIDO)	77,4357	799			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

La tabla ANOVA descompone la variabilidad de pH final en contribuciones debidas a varios factores. Puesto que se ha escogido la suma de cuadrados Tipo III (por omisión), la contribución de cada factor se mide eliminando los efectos de los demás factores. Los valores-P prueban la significancia estadística de cada uno de los factores. Puesto que la turbiedad inicial, pH inicial, tipo de coagulante, dosis y la interacción entre tipo de coagulante y dosis son menores que 0,05, estos factores tienen un efecto estadísticamente significativo sobre pH final con un 95,0% de nivel de confianza.

Tabla No. 22: Pruebas de Múltiple Rangos para pH final por Coagulante

Método: 95,0 porcentaje LSD

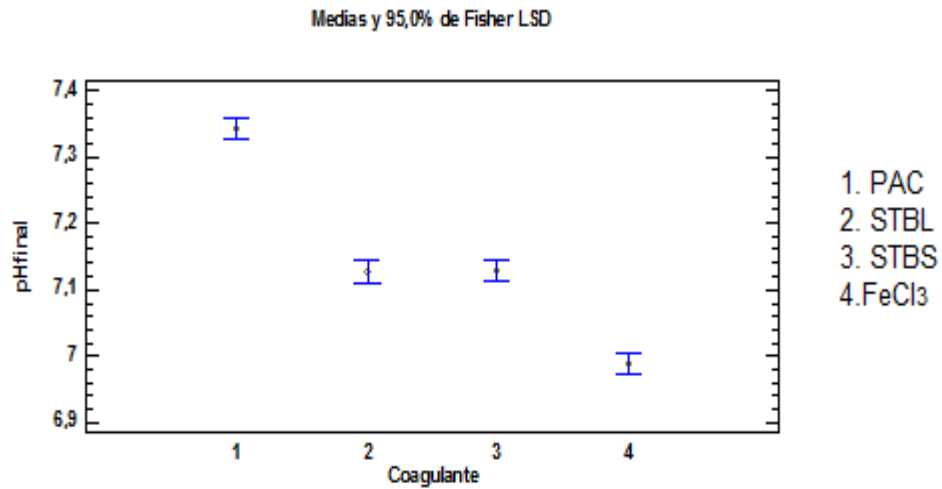
<i>Coagulante</i>	<i>Casos</i>	<i>Media LS</i>	<i>Sigma LS</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
FeCl ₃ (4)	200	6,9886	0,011788	X
STBL (2)	200	7,128	0,011788	X
STBS (3)	200	7,12885	0,011788	X
PAC (1)	200	7,34335	0,011788	X

<i>Contraste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>
1 - 2	*	0,21535	0,0326742
1 - 3	*	0,2145	0,0326742
1 - 4	*	0,35475	0,0326742
2 - 3		-0,00085	0,0326742
2 - 4	*	0,1394	0,0326742
3 - 4	*	0,14025	0,0326742

* indica una diferencia significativa.

En la tabla No. 22, el asterisco que se encuentra al lado de los 5 pares indica que estos pares muestran diferencias estadísticamente significativas con un nivel del 95,0% de confianza. En la parte superior de la tabla, se han identificado 3 grupos homogéneos según la alineación de las "X" en columnas. No existen diferencias estadísticamente significativas entre STBS y STBL. Se aplicó el procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher. Con este método hay un riesgo del 5,0% al decir que cada par de medias es significativamente diferente, cuando la diferencia real es igual a 0.

Gráfico No. 18: Gráfico de medias con el método LSD en relación al pH



En la gráfica de medias se observa con claridad que el caso correspondiente al PAC hay poca variación en el descenso de pH debido al efecto buffer.

Para los casos de STBL y STBS se observa una similitud en el descenso de pH, lo cual se evidencia en que los intervalos se traslapan lo que hace que estadísticamente sean iguales.

En cuanto al caso del FeCl₃ presenta una diferencia estadística frente a los otros coagulantes mostrando un comportamiento inadecuado puesto que sobrepasa los valores permisibles propuestos en la resolución 2115/2207.

4.1.4 Determinación De Aluminio Residual

El ensayo de aluminio residual se realizó en el mes de Diciembre de 2015, teniendo en cuenta el coagulante que presentó mejores resultados frente a las variables de estudio: turbiedad, color y pH y el coagulante actualmente usado en la plata de potabilización de agua EMPOOBANDO E.S.P.

Para que la muestra fuera representativa, se analizaron 18 muestras de agua cruda con rangos de turbiedad, color y pH mostrados en la tabla No.23:

Tabla No. 23: Rangos de características fisicoquímicas de agua cruda para determinación de Al residual

Parámetro	Rango de trabajo	Unidades
Turbiedad	4,40 – 23,2	UNT
Color	17,2 – 19,1	UPC
pH	7,44 – 7,62	

En el municipio de Ipiales, los registros indican que durante los meses de marzo y abril las lluvias son mayores, disminuyendo en la mitad del año, es decir, en los meses de julio y agosto y aumentando nuevamente hacia los meses de octubre, noviembre y diciembre con un promedio mensual de 72.57 mm y un promedio anual de 970.8 mm. El fenómeno anterior se explica por presentarse en el municipio de Ipiales un régimen pluviométrico bimodal, que se caracteriza por registrar dos períodos de mayor pluviosidad (marzo-abril) y (octubre-diciembre) con un período de menor pluviosidad en la mitad del año (julio y agosto). ^[45]

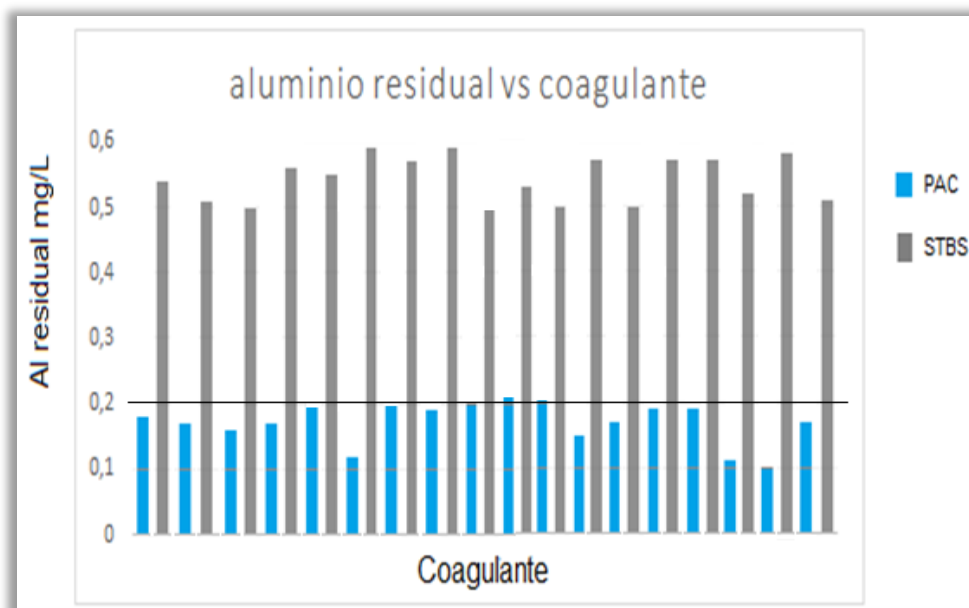
En la tabla No. 24 se consignan los datos obtenidos en los 18 ensayos, donde se observa que el fenómeno pluviométrico del municipio de Ipiales no es un factor que afecta en gran medida la efectividad en cuanto remoción de turbiedad y color con el coagulante más efectivo determinado anteriormente (PAC) y su respectiva dosis óptima (20ppm), se puede observar que dichos parámetros se encuentran por debajo de la normatividad establecida. En cuanto a determinación de aluminio residual, se infiere que el PAC presenta mejores resultados frente al STBS utilizado actualmente en EMPOOBANDO E.S.P

Tabla No. 24: Determinación de aluminio residual empleando PAC con dosis óptima 20ppm y STBS con dosis óptima 40ppm

No.	AGUA CRUDA				AGUA SEDIMENTADA							
					PAC (20ppm)				STBS (40ppm)			
	pH	Alc.	Turbiedad	Color	pH	Turbiedad	Color	Al residual	pH	Turbiedad	Color	Al residual
1	7,62	75	4,40	17,9	7,55	1,09	9,2	0,18	7,19	1,23	10,6	0,54
2	7,53	72	5,77	17,2	7,47	0,65	7,6	0,17	7,06	1,11	8,8	0,51
3	7,44	77	4,98	17,6	7,39	0,56	6,7	0,16	7,02	1,00	8,3	0,50
4	7,56	74	5,28	17,3	7,48	0,62	7,4	0,17	7,12	1,12	9,0	0,56
5	7,50	70	14,6	18,1	7,42	0,61	6,9	0,20	7,28	1,18	8,4	0,55
6	7,45	73	19,8	17,5	7,37	0,69	7,2	0,12	7,19	1,19	9,0	0,59
7	7,56	75	17,3	17,4	7,48	0,76	7,4	0,19	7,29	1,22	9,4	0,57
8	7,50	72	4,88	18,1	7,44	0,67	6,8	0,18	7,15	1,00	8,5	0,59
9	7,44	73	13,2	18,9	7,36	0,53	8,0	0,20	7,17	1,01	9,4	0,50
10	7,43	75	15,8	18,7	7,40	0,73	8,2	0,22	7,14	1,02	9,8	0,53
11	7,46	77	23,2	19,1	7,41	1,02	7,5	0,21	7,15	1,57	9,6	0,50
12	7,45	76	7,25	17,6	7,39	0,52	8,3	0,15	7,06	1,12	9,2	0,56
13	7,48	73	5,49	18,3	7,35	0,55	9,1	0,17	7,11	1,09	10,0	0,50
14	7,42	71	10,2	18,5	7,32	0,59	9,2	0,19	7,08	1,12	9,6	0,57
15	7,60	72	16,1	19,0	7,51	0,70	9,5	0,19	7,26	1,15	9,8	0,57
16	7,56	74	18,3	18,1	7,49	0,72	8,9	0,13	7,15	1,10	9,1	0,52
17	7,49	71	10,7	17,5	7,38	0,56	7,5	0,11	7,01	1,09	8,7	0,58
18	7,51	70	11,4	18,7	7,42	0,59	7,8	0,18	7,12	1,11	8,6	0,51

Los datos obtenidos de aluminio residual consignados en la tabla No. 24 se graficaron como se muestran a continuación.

Gráfico No. 19: Aluminio residual vs coagulante



Como puede observarse en el gráfico No. 19, el sulfato provoca una disminución importante del pH, por lo que puede existir el riesgo de que este parámetro sobrepase el rango óptimo para que la decantación sea eficaz, como consecuencia, pasará aluminio en disolución en el agua decantada que tampoco será retenido en los filtros y en última instancia pasará al agua tratada. A la dosis utilizadas, el PAC al ser un policloruro y presentar una hidrólisis menos ácida que el sulfato, conlleva una menor reducción de pH, circunstancia que puede ser interesante en aguas de baja mineralización pues puede permitir, en determinados casos, la supresión del ajuste de pH a la salida de la planta. La resolución 2115 de 2007 establece para el aluminio un valor máximo admisible de 0.2 mg/L en agua potable. Así mismo, la OMS recomienda no sobrepasar este valor basándose fundamentalmente en criterios organolépticos.

La eficacia del proceso de clarificación es de suma trascendencia en la concentración de aluminio residual en el agua tratada. Si esta cantidad es elevada, durante la distribución, una parte de este aluminio puede reducirse en el agua por sedimentación de nuevos flócs en las tuberías de la red y, de hecho, se observa una disminución progresiva de este metal a lo largo del sistema de abastecimiento. Este elemento se acumula en distintos puntos, sobre todo donde el caudal es débil, y forma sedimentos con hierro, manganeso, sílice, materias orgánicas y microorganismos, sedimentos que pueden ser perturbados por variaciones de caudal y hacer organolépticamente inaceptable el agua del grifo del usuario. ^[46]

⁴⁵ Recursos Naturales y Medio Ambiente Ipiales [En línea] disponible en: <http://www.ipitimes.com/climatologiaipiales.htm>

⁴⁶ Sangrador Fontecha, R.; Gutiérrez Fernández, Y.; Rivas Gonzalo, J.C. Ensayos con distintos coagulantes para reducir el aluminio residual en agua potabilizada. Revista Tecnología del Agua, Mayo de 1999.

El PAC es el agente más idóneo para ser utilizado como coagulante en estas circunstancias de calidad de agua sedimentada que presenta valores menores al de la normatividad, salvo en 2 casos en que sobrepasan el valor establecido por muy poco en comparación a valores de aluminio residual presentados con el sulfato de aluminio.

4.1.5. Evaluación Técnica Del STBS Vs PAC

Teniendo en cuenta que el PAC fue el coagulante que presentó mejores resultados frente a remoción de turbidez y color, se realizó la evaluación técnica y viabilidad desde el punto de vista técnico y ambiental de reemplazo de éste en relación al STBS actualmente empleado en EMPOOBANDO para el tratamiento de agua potable.

Almacenamiento

El STBS debe almacenarse en lugares ventilados, frescos y secos. Lejos de fuentes de ignición. Separado de materiales incompatibles.

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 vuelve inestable. La adquisición de estos tanques implica en un principio aumento en costos.

Forma de dosificación

En el caso del STBS se emplean dosificadores volumétricos de productos sólidos para coagulantes metálicos.

Para PAC es necesario un sistema de tanque y bombas de desplazamiento positivo para su dosificación, además de ellos tuberías resistentes al medio ácido que implica incremento en costos.

Reducción en el consumo de coagulante

La reducción en el consumo de coagulante al usar el policloruro de aluminio en relación 1:2 frente al sulfato de aluminio tipo B sólido hace viable el cambio de coagulante.

Reducción en el consumo de estabilizadores de pH

Teniendo en cuenta el gráfico 17 se observa un descenso significativo en el pH con el STBS lo cual implica el uso de estabilizadores de pH aumentando costos de operación; por otro lado el PAC mantiene un pH casi invariante lo cual suprime el uso de estabilizadores por lo cual hace viable el uso de este coagulante.

Efectividad en el rango de pH

El PAC trabaja a un rango más amplio de pH, lo cual garantiza que a cualquier valor de pH de agua cruda, éste trabajará adecuadamente, lo cual hace viable su uso en la planta de tratamiento.

Parámetros de calidad de agua tratada

Los parámetros evaluados: turbiedad, color, pH y aluminio residual tuvieron un cumplimiento adecuado para el caso del PAC en relación a lo establecido en la resolución 2115 de 2007, caso contrario a lo sucedido con el uso de STBS, lo cual hace que el policloruro tenga una viabilidad técnica y ambientalmente favorable para su implementación.

Análisis Económico

El análisis para la viabilidad económica de la implementación de PAC en la planta de potabilización de agua de Ipiales se hizo comparando costos de consumo del STBS, coagulante actualmente empleado en la planta y el PAC que mostró los resultados más adecuados frente a las variables de respuesta estudiados.

Teniendo en cuenta las dosis óptimas predichas en los ensayos de laboratorio, se determinó la dosificación a nivel planta.

Tabla No. 25: Calculo de dosis para aplicar en planta

	PAC	STBS
Dosis	20ppm	40ppm
Caudal	150 L/s	150 L/s
Densidad	1,34kg/L	-
Dosificación en planta	8,05L/h	21,6kg/h

Tabla No. 26: Costos operacionales

		Hora	Día	Mes	Año
PAC	Dosis (L/h)	8,05	193,2	5796	69552
	Costo (COP)	23200	556800	16704000	200'448.000
STBS	Dosis (Kg/h)	21,6	518,4	15552	186624
	Costo (COP)	16000	384000	11520000	138'240.000

Tabla No. 27: Instalaciones y equipos para PAC

Equipo	Capacidad	Costo (COP)
Tanque de fibra de vidrio	14m3	20000000
Accesorios	Tuberías y codos	4000000
Muro de contención	Triturado, arena, cemento, mano de obra	5000000

En un principio habría una inversión en la adecuación de la planta de potabilización para poder dosificar PAC, sumado a esto, el PAC tiene un precio en mercado más elevado que el STBS por lo cual desde el punto de vista económico, su implementación no es viable visto como operación unitaria. Si se tiene en cuenta el proceso global, el PAC presenta ventajas frente al STBS actualmente usado en la planta de tratamiento de agua potable de EMPOOBANDO E.S.P. puesto que el PAC elimina la necesidad de estabilizantes de pH como la cal apagada necesaria con el STBS, además el PAC genera una menor cantidad de lodos lo cual representa un menor gasto en mantenimiento de filtros y consumo de agua en retrolavados.

CONCLUSIONES

- Para el agua del río Blanco que abastece a Ipiales, el PAC presenta una mejor eficiencia frente a la remoción de turbiedad y color de agua cruda que el STBS actualmente empleado en la planta de tratamiento, esto se debe a su mayor poder de coagulación y floculación. Tanto los valores de turbiedad residual como de color residual están dentro de los parámetros establecidos estipulados en la resolución 2115 de 2007
- En cuanto a la evaluación de pH el PAC exhibe un mejor comportamiento, puesto que actúa como buffer manteniéndolo casi invariable, esto se traduce en operaciones simplificadas que eliminan los reguladores de pH, para el caso de los otros coagulantes objetos de estudio, se observa un descenso de pH que representa costos de inversión en alcalinizantes para su estabilización.
- La viabilidad del cambio de coagulante de STBS a PAC, es efectivo desde el punto de vista técnico y ambiental, mas no desde el punto de vista económico; no obstante en el análisis aquí expuesto no se tiene en cuenta el costo del alcalinizante para estabilizar el pH cuando se usa STBS, por tanto, habría que estudiar la dosis óptima del alcalinizante para hacer la comparación de costos relativo.
- El uso de PAC en la potabilización de agua en la planta de tratamiento del municipio de Ipiales, redujo considerablemente los niveles de Al residual en comparación al coagulante actualmente empleado, la mayoría los valores arrojados en el estudio, estaban dentro de la normatividad de que establece niveles máximos de Al en 0,2mg/L, en comparación al STBS, los valores de Al residual fueron bastante altos, lo que significa que se deberían adoptar medidas para su remoción y brindar un mejor servicio a los consumidores.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar estudios en un rango entre 10 y 20 ppm, para obtener una dosis más baja e igual de efectiva para remoción de turbiedad y color que la establecida en este trabajo.
- En caso de no darse el cambio de coagulante de STBS a PAC, se recomienda realizar estudios sobre dosis óptima de alcalinizante para la estabilización de pH.

BIBLIOGRAFIA

ANDIA CARDENAS, Yolanda. Evaluación de plantas y desarrollo tecnológico. Tratamiento de agua: coagulación-floculación. Lima. Abril del 2000

ARBOLEDA, J. Teoría y práctica de la purificación del agua. Tercera Edición. Bogotá, Asociación Colombiana de Ingenierías sanitaria y ambiental "ACODAL" Vol. I, 2000

BABOR Joseph; IBARZ José. Química general moderna. Barcelona, 1973. ISBN 84-7102-997-

BARRENECHEA, Ada. OPS/CEPIS. Tratamiento de Agua para Consumo Humano. Manual I, Tomo I Capítulo 4 y 8: Coagulación. Versión en PDF. Lima, 2004.

BOCHKAREV, G.R., KURBATOV, P.V. AND KONDRAT'EV, S.A. Intensification of coagulation purification of highly colored waters. Journal of Mining Science, 39 (1), 94101, 2003.

CAÑAS ROJAS Christian. Estudio de aplicabilidad e implementación del policloruro de aluminio como coagulante primario en la planta la flora del AMB. S.A E.S.P. Tesis Ingeniería química. Bucaramanga – Santander, facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Universidad Industrial de Santander. 2005

CASTRILLÓN BEDOYA Daniela; GIRALDO María de los Ángeles. Determinación de las dosis óptimas del coagulante Sulfato de Aluminio granulado tipo B en función de la turbiedad y el color para la potabilización del agua en la planta de tratamiento de Villa Santana. Tesis Tecnología Química. Pereira-Risaralda, Universidad Tecnológica de Pereira, Facultad de Tecnologías. 2012

COGOLLO FLÓREZ, Juan Miguel. Clarificación De Aguas Usando Coagulantes Polimerizados: Caso Del Hidroxicloruro De Aluminio. DYNA, [S.I], V. 78, n .165, p. 18-27, nov 2011. ISSN 2346-2183. Disponible en:
<http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/25636/39133>

Eliminación de Contaminantes: Test de Jarras y Adsorción [En línea] Disponible en:
<<http://ocw.uc3m.es/ingenieria-quimica/quimica-ii/practicas-1/PR-F-005.pdf>>

El agua potable y el saneamiento básico en los planes de desarrollo. [En línea] Disponible en:
http://www.procuraduria.gov.co/portal/media/file/descargas/publicaciones/parte3_agua.pdf

Estudios Y Diseños Para La Construcción De La Ciudadela Alvaro Uribe Velez En El Municipio De Girón, Planta de tratamiento de agua potable. Volumen IIIa. Pa. 4-6

GARCÉS PAZ Rosa Virginia. Obtención de la mínima dosis de reemplazo de policloruro de aluminio en aguas y aguas de Pereira. Tesis Química Industrial Pereira-Risaralda, Universidad Tecnológica de Pereira. 2010

GARCÍA-REY Santos Margarita Rosa. Ajuste Matemático Del Comportamiento De La Turbiedad Residual En Los Procesos De Floculación-Coagulación Del Agua Realizados En La Planta La Flora Del A.M.B S.A E.S.P Empleando Policloruro De Aluminio Líquido. Tesis Ingeniera Química. Bucaramanga – Santander, facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Universidad Industrial de Santander. 2011

HUERTAS ROJAS Ana Fernanda; Quintero Pérez Henderson Ivan. Estudio Aplicabilidad e Implementación del Sulfato de Aluminio tipo B, Líquido como coagulante en la planta de tratamiento de agua potable del municipio de Lebrija (Santander). Tesis Ingeniería química. Bucaramanga- Santander, Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. 2007

KEMMER, Frank N; McCallon, Jhon. Manual del agua, tratamiento y aplicaciones. 1ed. México. NalcoChemicalCompany. Mc Graw Hill, 1989. Pa. 8-21

Lenntech Agua & Tratamiento del Aire. [En línea] disponible en: <<http://www.lenntech.com/espanol/home-esp.htm>>

LORENZO-ACOSTA, Yaniris. Estado del arte del tratamiento de aguas por coagulación-floculación. Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar, 2006. P 3,4

Manual NOVA 60 Métodos de Análisis - AMCO Instruments, srl. método 032

Manual NOVA 60 Métodos de Análisis - AMCO Instruments, srl. método 043

MINISTERIO DE SALUD. Decreto 1594 de 1998. República de Colombia. Capítulos I y IV

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. Pa. 66, 67, 69, 70

Norma Técnica Colombiana NTC 531. Productos Químicos para uso Industrial. Sulfato de Aluminio. 1995-11-29

Plan De Ordenamiento Del Recurso Hídrico - PORH Del Rio Blanco. Corponariño 2011. [En línea] Disponible en:
<http://corponarino.gov.co/expedientes/descontaminacion/porhrioblanco.pdf>

PLANTA CONTINUA. Sistemas hidráulicos y sanitarios Ltda. "SIHSA".

P, Química, Eliminación de Contaminantes: Test de Jarras y Adsorción [En línea] Disponible en: <<http://ocw.uc3m.es/ingenieria-quimica/quimica-ii/practicas-1/PR-F-005.pdf>>

Recursos Naturales y Medio Ambiente Ipiates [En línea] disponible en:
<<http://www.ipitimes.com/medioambiente9.htm>>

ROMERO ROJAS, Jairo Alberto. Calidad del Agua. Primera Edición, 2002. P 67, 69, 70, 71.

RODRÍGUEZ, Carlos. Operación y mantenimiento de plantas de tratamiento de agua. Santafé de Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 1995. P 115.

ROMERO, Mynor. Tratamientos utilizados en potabilización de agua. Facultad de ingeniería. Universidad Rafael Landívar.

SANGRADOR FONTECHA, R.; Gutiérrez Fernández, Y.; Rivas Gonzalo, J.C. Ensayos con distintos coagulantes para reducir el aluminio residual en agua potabilizada. Revista Tecnología del Agua, Mayo de 1999.

SENA. "Operación de Sistemas de Potabilización de Aguas", código 280201010 norma 3 Monitorear y Ajustar la Operación de Sistemas de Tratamiento de Aguas

SHEN, YH. AND DEMPSEY, B. Synthesis and speciation of polyaluminum chloride for water treatment. Environment International, 24 (8), 899910, 1998

Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 21th Edition. New York, 2-27 a 2-29, método 2320.

Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Pollution Control Federation. 21ed., United States of America, 2005.

Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 18th Edition, pp. 2-9, Method 2130B, (1992).

STEEL, e. w; MCGHEE, Terence. J. Abastecimiento de agua y alcantarillado, Barcelona, 1991. P 252-254.

Teoría diseño y control de los procesos de clarificación del agua [En línea]
Disponble en: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/scan/002320/002320-04a.pdf>

Universidad Libre Pereira, 2011. [En línea] Disponible en:
<www.unilibrepereira.edu.co/portal/archivos/pdf/inftecnico.pdf>

VALENCIA, Jorge Arboleda. Teoría y práctica de la purificación del agua Tomo I,
Colombia, 2000. P 43-47.

VAN BENSCHOTEN, J.E. AND EDZWALD, J.K. Chemical aspects of coagulation
using aluminum salts: Hydrolytic reaction of alum and polyaluminum chloride. *Water
Research*, 24, 1519–1526, 1990.

WANG, Y., ZHOU, WZ., GAO, BY., XU, XM. AND XU, GY. The effect of total
hardness on the coagulation erformance of aluminum salts with different Al
species. *Separation and Purification Technology*, 66,457462, 2009.

Water Poll. Inhibition of flocculation processes in systems containing organic watter.
Vol 55 N 07. P 947, 1983

YE, C., WANG, D., SHI, B., YU, J., QU, J. et al . Alkalinity effect of coagulation with
polyaluminum chlorides: Role of electrostatic patch. *Colloids and Surfaces A:
Physicochemical and Engineering Aspects*, 294, 163173, 2007

ANEXO 1: DATOS DE MUESTREO DE AGUA CRUDA Y RESULTADOS DE AGUA TRATADA

No.	AGUA CRUDA				DOSIS	AGUA SEDIMENTADA											
	pH	ALC.	TURBIEDAD	COLOR		PAC			STBL			STBS			FeCl3		
						pH	TURBIDEZ	COLOR	pH	TURBIDEZ	COLOR	pH	TURBIDEZ	COLOR	pH	TURBIDEZ	COLOR
1	8,4	78	12,4	28,5	10	7,92	1,17	8,30	7,62	6,08	29,30	7,75	4,29	27,10	7,59	4,12	45,30
					20	7,78	0,95	6,60	7,60	3,46	18,60	7,71	4,20	24,10	7,42	3,21	39,80
					30	7,67	1,03	6,00	7,55	1,99	11,00	7,68	2,45	18,70	7,35	0,94	13,20
					40	7,52	1,29	7,30	7,53	2,02	14,30	7,64	1,82	12,90	7,12	0,89	11,60
					50	7,33	1,32	8,80	7,46	3,41	18,10	7,57	2,06	16,00	6,99	0,76	10,10
2	7,01	72	10	25,3	10	6,99	1,62	14,00	6,92	6,39	27,40	6,84	4,08	17,20	6,91	3,95	44,40
					20	6,95	0,99	12,10	6,84	1,36	11,20	6,75	3,57	10,80	6,64	3,06	39,40
					30	6,83	1,06	11,00	6,78	1,32	9,10	6,56	2,77	9,20	6,34	0,97	11,40
					40	6,79	1,22	9,80	6,57	2,15	11,30	6,42	1,49	8,80	6,03	0,72	10,70
					50	6,78	1,45	9,20	6,38	2,42	12,30	6,11	1,57	15,30	5,27	0,84	10,90
3	7,28	75	6,62	22,8	10	7,24	2,01	14,30	7,20	5,02	23,70	7,17	6,07	24,10	7,02	5,51	44,00
					20	7,16	1,27	12,30	7,05	5,67	24,60	7,14	6,55	17,90	6,84	5,88	45,50
					30	7,11	1,31	10,00	7,01	3,01	16,30	6,98	2,32	14,60	6,72	3,85	16,30
					40	6,98	1,47	11,80	6,92	1,96	15,70	6,95	1,77	13,50	6,56	0,72	12,50
					50	6,84	1,50	13,40	6,80	2,87	12,70	6,90	2,00	10,80	6,49	0,82	10,80
4	7,73	77	8,3	22,7	10	7,68	1,22	10,60	7,51	2,69	27,60	7,42	5,33	23,20	7,27	5,57	43,60
					20	7,65	0,88	9,50	7,41	1,77	12,20	7,18	4,83	16,00	7,22	5,20	55,80
					30	7,63	1,08	3,90	7,38	1,29	9,00	7,16	4,50	15,30	7,07	3,28	22,20
					40	7,52	1,14	8,40	7,35	0,84	8,40	7,09	1,79	12,60	7,05	0,53	19,80
					50	7,51	1,19	9,00	7,33	1,74	9,30	7,05	2,08	10,90	6,94	1,24	12,60
5	7,52	71	7,3	23,1	10	7,43	2,01	14,30	7,20	5,02	23,70	7,17	6,07	24,10	7,02	5,51	44,00
					20	7,16	1,27	12,30	7,05	5,67	24,60	7,14	6,55	17,90	6,84	5,88	45,50
					30	7,11	1,31	10,00	7,01	3,01	16,30	6,98	2,32	14,60	6,72	3,85	16,30
					40	6,98	1,47	11,80	6,92	1,96	15,70	6,95	1,77	13,50	6,56	0,72	12,50
					50	6,84	1,50	13,40	6,80	2,87	12,70	6,90	2,00	10,80	6,49	0,82	10,80

No.	AGUA CRUDA				DOSIS	AGUA SEDIMENTADA											
	pH	ALC.	TURBIEDAD	COLOR		PAC			STBL			STBS			FeCl3		
						pH	TURBIDEZ	COLOR	pH	TURBIDEZ	COLOR	pH	TURBIDEZ	COLOR	pH	TURBIDEZ	COLOR
6	7,32	70	8	24,3	10	7,26	1,16	12,90	7,21	2,45	29,90	7,27	5,21	25,50	7,18	5,48	50,80
					20	7,21	0,82	11,80	7,11	1,68	14,50	7,22	4,29	18,30	7,11	5,22	45,20
					30	7,17	1,03	6,20	7,08	1,17	11,30	7,07	4,16	17,60	6,95	3,12	24,50
					40	7,11	1,24	10,70	7,05	0,80	10,70	7,05	1,68	14,90	6,88	0,60	22,10
					50	7,02	1,29	11,30	6,99	1,56	11,60	6,94	2,01	13,20	6,81	1,33	14,90
7	7,43	72	11,2	24,6	10	7,37	2,12	13,10	7,30	6,19	26,50	7,22	4,88	16,30	7,29	4,75	43,50
					20	7,33	1,79	11,20	7,22	2,16	10,30	7,13	4,37	9,90	7,02	3,86	38,50
					30	7,21	1,86	10,10	7,16	2,12	8,20	6,94	3,57	8,30	6,72	1,77	10,50
					40	7,17	2,02	8,90	6,95	2,41	10,40	6,80	2,19	7,90	6,41	1,52	9,80
					50	7,16	2,15	8,30	6,76	2,56	11,40	6,49	2,27	14,40	5,95	1,34	10,00
8	7,32	75	5,66	21,2	10	7,31	0,93	8,60	7,30	5,38	22,50	7,28	5,54	22,70	7,23	5,60	43,20
					20	7,27	0,92	6,70	7,16	5,01	21,00	7,24	6,32	23,30	7,15	5,29	55,10
					30	7,25	0,77	7,00	7,02	4,71	16,80	7,22	1,99	12,40	7,01	1,30	18,60
					40	7,19	1,17	7,20	7,00	1,70	14,20	7,13	1,25	9,40	6,89	0,90	13,90
					50	7,09	1,50	8,20	6,94	2,40	11,30	7,02	2,96	12,90	6,72	1,68	11,30
9	7,64	78	4	20,1	10	7,54	1,57	9,40	7,51	3,25	20,90	7,53	5,08	23,90	7,19	4,20	39,70
					20	7,49	0,81	8,90	7,38	1,67	11,10	7,46	4,88	20,20	7,08	5,45	42,40
					30	7,39	0,96	8,50	7,30	1,26	7,70	7,33	1,46	10,40	6,99	1,22	16,20
					40	7,34	1,02	7,80	7,26	1,20	8,20	7,10	1,13	8,50	6,86	0,86	11,60
					50	7,22	1,05	7,20	7,13	2,01	10,00	6,90	1,58	9,10	6,75	1,34	10,00
10	8,03	79	5,62	20,9	10	7,95	1,82	11,50	7,75	4,82	25,10	7,62	5,30	23,40	7,60	5,28	50,60
					20	7,90	0,90	7,40	7,70	3,99	23,50	7,58	4,03	22,50	7,53	5,19	41,30
					30	7,87	0,76	8,40	7,57	2,09	17,30	7,55	2,12	20,10	7,41	1,02	19,50
					40	7,71	1,15	9,60	7,51	0,96	9,60	7,48	3,01	12,10	7,37	0,89	12,70
					50	7,68	1,48	15,60	7,46	1,46	12,10	7,40	3,37	24,20	7,29	1,26	11,40

No.	AGUA CRUDA				DOSIS	AGUA SEDIMENTADA											
	pH	ALC.	TURBIEDAD	COLOR		PAC			STBL			STBS			FeCl3		
						pH	TURBIDEZ	COLOR	pH	TURBIDEZ	COLOR	pH	TURBIDEZ	COLOR	pH	TURBIDEZ	COLOR
11	7,78	76	10,6	28,6	10	7,70	2,09	16,50	7,68	5,90	27,80	7,68	5,95	29,10	7,62	4,53	47,90
					20	7,63	0,98	9,40	7,55	5,92	17,90	7,55	5,86	16,80	7,58	5,90	39,00
					30	7,61	1,13	8,10	7,46	2,46	10,80	7,46	2,38	12,60	7,45	1,67	17,50
					40	7,53	1,72	9,80	7,37	1,39	17,80	7,37	1,26	15,40	7,32	0,96	13,30
					50	7,47	2,01	15,20	7,29	2,07	20,00	7,29	2,00	18,70	7,22	0,58	9,70
12	7,42	70	10,1	21,1	10	7,35	1,65	13,00	7,25	5,46	27,30	7,28	5,11	23,50	7,37	5,18	43,50
					20	7,33	0,88	7,90	7,06	1,79	17,80	7,16	4,55	17,20	7,22	4,87	33,30
					30	7,28	0,90	8,10	6,87	1,29	10,00	6,80	1,74	11,50	7,13	1,15	19,90
					40	7,23	1,01	8,20	6,79	1,69	10,50	6,75	0,97	8,90	6,81	0,97	18,30
					50	7,20	1,22	8,60	6,66	2,11	14,30	6,61	0,76	7,60	6,70	0,79	14,60
13	7,60	73	9,17	29,4	10	7,50	2,02	16,70	7,37	6,68	33,20	7,48	5,78	34,60	7,53	7,98	40,10
					20	7,42	0,67	7,40	7,11	2,06	14,40	7,26	4,02	31,70	7,42	7,12	32,30
					30	7,32	0,77	8,60	6,96	1,28	10,60	7,22	2,09	13,60	7,17	1,47	23,40
					40	7,24	1,00	9,20	6,73	1,60	12,90	7,11	1,42	11,00	6,97	0,61	13,00
					50	6,94	2,36	12,10	6,29	2,37	16,10	6,96	1,63	10,40	5,73	3,95	20,40
14	7,66	74	4,94	22,7	10	7,53	1,73	15,50	7,56	4,48	24,10	7,63	5,73	25,20	7,31	4,40	34,90
					20	7,43	1,31	9,60	7,39	5,28	26,80	7,37	5,99	27,50	7,12	4,02	49,50
					30	7,36	0,88	8,00	7,27	2,44	19,30	7,24	2,56	13,40	6,97	1,19	19,70
					40	7,23	1,36	8,40	7,19	2,00	14,00	7,11	2,04	11,80	6,83	0,69	14,60
					50	7,16	1,83	9,20	7,08	2,16	14,30	6,99	3,55	13,80	6,73	0,73	13,20
15	8,05	79	7,92	25,8	10	7,98	1,45	16,60	7,86	3,35	26,60	7,87	3,30	26,10	7,28	5,99	30,10
					20	7,90	0,80	8,80	7,64	4,52	29,70	7,39	4,12	28,00	7,22	6,11	46,80
					30	7,83	0,50	7,30	7,53	1,81	13,90	7,25	1,62	12,50	7,20	1,15	15,80
					40	7,76	0,61	7,50	7,38	1,01	10,00	7,13	1,11	10,00	7,09	0,72	14,20
					50	7,65	0,75	8,00	7,25	2,07	14,60	6,94	1,47	10,70	6,90	0,59	12,10

No.	AGUA CRUDA				DOSIS	AGUA SEDIMENTADA											
	pH	ALC.	TURBIEDAD	COLOR		PAC			STBL			STBS			FeCl3		
						pH	TURBIDEZ	COLOR	pH	TURBIDEZ	COLOR	pH	TURBIDEZ	COLOR	pH	TURBIDEZ	COLOR
16	7,21	72	6,09	20,5	10	7,16	1,41	11,60	7,19	5,57	21,40	7,18	6,84	23,10	7,19	6,17	38,50
					20	7,07	1,26	8,10	7,16	6,66	23,40	7,13	6,61	23,50	7,11	2,77	22,90
					30	6,87	1,40	8,00	7,02	2,52	13,40	7,08	2,05	11,00	7,01	0,75	14,30
					40	6,79	2,00	9,90	7,00	1,75	11,00	7,03	2,00	10,10	6,89	0,64	14,00
					50	6,70	2,14	12,00	6,94	1,80	9,80	6,91	2,17	10,70	6,72	0,58	12,10
17	7,71	76	5,26	20,3	10	7,64	1,79	11,20	7,49	4,79	25,40	7,47	5,27	24,30	7,46	5,38	48,40
					20	7,53	0,86	7,00	7,36	3,86	23,20	7,33	3,99	22,20	7,31	5,20	40,80
					30	7,48	0,79	8,10	7,27	2,01	16,10	7,20	2,04	19,70	7,18	1,05	18,60
					40	7,37	1,20	10,10	7,16	0,92	9,70	7,12	2,84	12,40	7,02	0,80	12,30
					50	7,28	1,45	15,20	7,03	1,51	12,60	6,97	3,21	20,50	6,94	1,34	10,80
18	7,5	75	10	22,5	10	7,42	1,70	13,70	7,17	5,48	27,40	7,20	5,21	24,70	7,29	5,99	42,80
					20	7,25	0,92	8,50	6,98	1,81	16,90	7,08	4,49	16,80	7,14	4,73	30,10
					30	7,20	1,01	7,90	6,79	1,32	11,20	6,72	1,68	12,60	7,05	1,19	18,70
					40	7,15	1,14	8,60	6,71	1,74	10,10	6,67	0,83	9,20	6,73	0,93	16,90
					50	7,12	1,28	9,20	6,58	2,07	14,90	6,53	0,97	7,30	6,62	0,81	13,20
19	7,71	77	13,1	21,4	10	7,65	0,97	8,50	7,43	5,14	20,20	7,29	5,16	20,60	7,25	2,73	37,80
					20	7,59	0,85	6,70	7,40	1,48	10,80	7,18	3,10	18,10	7,07	1,26	17,10
					30	7,47	0,96	7,50	7,35	1,00	8,30	7,12	1,83	10,80	6,93	0,63	12,90
					40	7,41	1,01	7,80	7,04	0,82	7,50	7,06	1,18	8,90	6,73	0,53	11,10
					50	7,34	1,08	8,00	6,78	1,39	8,90	6,94	1,33	9,90	6,60	0,56	11,90
20	7,54	72	7,09	20,8	10	7,42	1,17	9,20	7,26	4,76	24,00	7,29	4,82	23,80	7,23	3,45	46,80
					20	7,27	0,94	7,50	7,00	1,97	12,10	7,16	1,87	13,50	7,01	2,26	28,10
					30	7,28	0,85	7,10	6,89	1,35	9,30	6,93	1,34	10,40	6,63	0,61	14,00
					40	7,17	0,89	6,70	6,80	1,17	10,70	6,82	1,29	11,80	6,71	0,76	12,20
					50	7,12	1,48	8,10	6,66	2,89	12,80	6,70	2,75	12,60	6,55	0,89	15,20

No.	AGUA CRUDA				DOSIS	AGUA SEDIMENTADA											
	pH	ALC.	TURBIEDAD	COLOR		PAC			STBL			STBS			FeCl3		
						pH	TURBIDEZ	COLOR	pH	TURBIDEZ	COLOR	pH	TURBIDEZ	COLOR	pH	TURBIDEZ	COLOR
21	7,79	78	11,4	22,9	10	7,59	1,19	9,10	7,52	6,26	27,30	7,30	4,72	24,70	7,10	7,27	40,80
					20	7,40	1,13	7,50	7,32	1,69	23,20	6,92	3,75	21,00	6,91	1,62	21,60
					30	7,31	1,02	7,10	7,21	1,17	9,20	6,84	1,41	10,40	6,82	0,87	14,90
					40	7,27	1,45	8,00	7,13	1,19	8,60	6,81	1,14	8,60	6,63	0,59	12,40
					50	7,13	1,63	8,40	6,92	1,79	10,10	6,73	1,23	8,90	6,57	0,60	12,80
22	7,58	70	13,9	28,9	10	7,47	1,93	11,00	7,47	8,50	22,60	7,38	6,50	20,30	7,34	10,80	42,40
					20	7,37	1,31	8,40	7,31	2,09	11,70	7,23	3,55	18,20	7,14	2,19	24,80
					30	7,30	1,34	8,00	7,28	2,30	11,20	7,18	1,47	10,90	7,05	0,90	14,40
					40	7,24	1,59	8,30	7,13	2,53	12,30	7,02	0,88	8,40	6,91	0,71	12,60
					50	7,17	1,80	8,80	6,99	3,06	14,70	6,97	1,14	9,50	6,72	0,61	12,10
23	7,56	72	7,08	27,4	10	7,52	1,43	12,60	7,11	5,07	29,70	7,10	5,26	30,50	6,92	4,33	45,90
					20	7,44	1,19	10,00	6,87	1,24	11,80	6,91	1,32	12,20	6,85	2,01	23,50
					30	7,43	0,63	8,80	6,73	1,31	10,40	6,70	1,49	11,60	6,77	1,36	10,20
					40	7,31	0,87	9,10	6,63	1,02	9,90	6,58	1,56	10,00	6,61	0,97	9,26
					50	7,29	1,02	11,30	6,36	3,16	16,60	6,41	3,20	16,20	6,54	0,82	8,30
24	7,54	75	10,3	21,4	10	7,44	1,79	12,80	7,39	5,23	24,80	7,35	5,13	25,80	7,32	4,62	48,70
					20	7,35	0,58	7,80	7,20	1,93	12,20	7,22	1,96	13,40	7,21	2,31	28,80
					30	7,29	1,10	8,70	6,98	1,96	12,00	6,95	2,01	12,60	7,11	0,86	17,00
					40	7,13	1,20	8,90	6,80	2,64	13,90	6,86	2,56	14,30	6,83	0,80	13,80
					50	7,07	1,74	9,60	6,75	3,06	16,10	6,70	3,51	16,90	6,69	0,75	10,80
25	7,49	70	4,69	19,8	10	7,44	1,26	11,00	7,38	4,42	25,10	7,41	4,74	20,10	7,32	6,25	38,60
					20	7,36	0,62	7,90	7,21	5,65	23,50	7,33	4,39	18,10	7,27	4,02	24,10
					30	7,20	0,84	8,00	7,16	2,36	13,80	7,12	2,71	15,80	7,15	1,97	14,60
					40	7,15	1,20	8,80	7,12	1,45	10,50	7,07	1,68	13,60	6,96	0,99	12,80
					50	7,09	1,90	9,70	7,00	1,63	10,70	6,98	2,22	18,90	6,81	0,83	11,50

No.	AGUA CRUDA				DOSIS	AGUA SEDIMENTADA											
	pH	ALC.	TURBIEDAD	COLOR		PAC			STBL			STBS			FeCl3		
						pH	TURBIDEZ	COLOR	pH	TURBIDEZ	COLOR	pH	TURBIDEZ	COLOR	pH	TURBIDEZ	COLOR
26	7,9	78	10,7	23,1	10	7,85	1,26	9,90	7,44	7,53	25,70	7,34	4,56	22,40	7,14	5,94	43,90
					20	7,81	1,03	8,40	7,41	1,91	11,60	7,18	4,75	21,90	6,96	1,39	20,60
					30	7,79	1,42	8,80	7,27	1,44	9,80	7,14	4,82	19,20	6,83	0,67	13,20
					40	7,73	2,01	10,00	7,20	2,63	12,80	7,09	3,89	22,50	6,68	0,63	12,20
					50	7,68	2,32	10,90	7,07	3,04	14,50	6,99	5,59	22,70	6,53	0,52	10,90
27	7,73	73	4,48	19,9	10	7,62	1,85	11,90	7,47	5,16	22,20	7,47	5,25	21,90	7,33	5,56	48,60
					20	7,59	0,86	8,30	7,39	1,28	10,40	7,39	6,14	23,30	7,23	2,12	28,60
					30	7,57	0,97	7,90	7,14	1,19	9,30	7,27	2,19	12,00	7,08	0,86	17,50
					40	7,44	1,48	8,60	7,08	1,38	9,70	7,14	0,77	8,00	6,89	0,81	16,10
					50	7,38	1,58	9,30	7,01	2,43	13,60	7,01	1,12	9,20	6,69	0,91	16,30
28	7,77	75	9,83	20,7	10	7,28	1,23	10,90	7,13	5,74	23,80	7,05	5,77	22,40	7,00	5,96	48,70
					20	7,17	0,57	7,40	7,09	1,84	12,40	7,00	6,29	23,20	6,81	2,06	25,60
					30	7,07	0,73	7,60	6,96	0,98	9,00	6,88	1,45	11,10	6,77	1,01	16,40
					40	6,98	1,16	8,20	6,79	1,52	10,20	6,76	0,99	8,80	6,69	0,83	15,70
					50	6,94	1,36	8,80	6,67	2,02	13,80	6,65	1,12	9,20	6,60	0,72	15,50
29	7,49	72	13,2	30,6	10	7,38	2,09	14,50	7,26	10,40	27,00	7,30	10,40	35,90	7,25	9,95	57,90
					20	7,33	1,19	9,20	6,98	1,97	17,50	7,13	7,14	37,20	6,91	3,61	40,10
					30	7,24	1,30	8,40	6,86	2,00	15,20	7,01	2,06	14,20	6,79	1,15	16,40
					40	7,21	1,43	9,10	6,64	3,04	16,20	6,87	1,93	13,60	6,59	0,55	12,80
					50	7,08	2,17	12,20	6,51	3,41	17,00	6,74	2,04	18,40	6,40	0,70	12,60
30	7,89	76	12,4	21,3	10	7,57	1,63	11,60	7,25	14,60	43,30	7,60	5,76	22,30	7,53	5,16	47,50
					20	7,48	0,77	8,10	7,21	6,31	24,20	7,49	4,41	19,10	7,35	2,08	27,20
					30	7,42	0,87	8,20	7,14	2,38	14,20	7,35	1,44	11,10	7,20	0,97	18,10
					40	7,34	0,91	9,30	6,97	1,42	12,60	7,22	1,60	11,20	7,14	0,77	14,90
					50	7,23	1,21	9,40	6,74	2,09	10,00	7,09	1,81	10,00	6,96	0,66	13,50

No.	AGUA CRUDA				DOSIS	AGUA SEDIMENTADA											
	pH	ALC.	TURBIEDAD	COLOR		PAC			STBL			STBS			FeCl3		
						pH	TURBIDEZ	COLOR	pH	TURBIDEZ	COLOR	pH	TURBIDEZ	COLOR	pH	TURBIDEZ	COLOR
31	7,74	75	8,04	20,4	10	7,73	1,05	9,40	7,63	4,77	19,60	7,52	11,20	34,90	7,67	4,49	41,50
					20	7,54	0,91	7,70	7,50	2,00	12,90	7,50	5,70	22,00	7,45	1,20	20,00
					30	7,45	0,95	7,80	7,48	1,75	11,40	7,41	1,74	10,90	7,35	0,87	15,10
					40	7,43	0,95	8,20	7,30	0,92	8,80	7,33	1,02	8,40	7,21	0,68	14,20
					50	7,38	1,64	9,00	7,19	1,54	10,10	7,20	1,06	9,10	6,99	0,53	11,90
32	7,59	73	9,83	20,9	10	7,41	1,76	12,70	7,23	5,44	22,30	7,33	7,56	22,00	7,29	5,20	44,60
					20	7,39	1,12	10,40	7,20	5,20	23,50	7,16	6,41	24,10	7,06	1,64	23,70
					30	7,30	1,34	9,40	7,12	4,29	20,10	7,10	2,87	17,10	6,94	0,83	16,00
					40	7,27	1,97	10,90	6,96	2,00	12,20	6,93	2,04	12,00	6,77	0,82	15,00
					50	7,16	2,02	11,30	6,89	2,75	14,50	6,84	2,63	14,50	6,70	1,25	13,40
33	7,53	73	10,1	23,3	10	7,45	0,95	9,70	7,19	5,72	27,00	7,23	6,14	25,20	7,25	6,40	45,00
					20	7,30	0,66	7,30	7,00	6,72	24,80	7,06	6,48	23,90	7,08	2,13	26,40
					30	7,19	0,79	8,20	6,90	2,85	15,50	6,90	2,03	12,60	6,97	0,95	15,50
					40	6,99	1,18	8,30	6,75	1,51	10,90	6,81	1,59	10,20	6,89	0,83	13,60
					50	6,91	1,21	8,70	6,72	1,82	11,90	6,72	1,73	10,50	6,67	0,57	12,20
34	7,51	70	9,2	22,1	10	7,46	1,73	12,30	7,35	6,61	24,20	7,43	6,15	23,10	7,21	5,12	47,90
					20	7,42	1,43	9,90	7,27	2,78	14,00	7,35	4,70	20,10	7,06	2,08	21,50
					30	7,35	1,75	10,20	7,19	1,76	11,40	7,16	1,11	11,20	6,92	1,08	18,20
					40	7,24	1,87	10,70	7,04	2,63	14,30	7,05	1,44	10,30	6,89	0,84	15,00
					50	7,17	2,07	12,30	6,87	4,62	18,60	6,98	1,48	8,90	6,69	1,65	13,20
35	7,88	74	25,6	20,9	10	7,51	2,19	13,00	7,40	6,10	23,20	7,40	5,35	22,00	7,38	5,17	42,70
					20	7,40	0,90	8,80	7,18	1,70	7,20	7,21	5,77	21,60	7,21	2,16	27,80
					30	7,33	1,37	9,00	7,09	1,21	10,00	7,17	2,16	12,40	7,08	0,89	17,00
					40	7,32	1,64	9,10	7,00	1,28	10,20	7,04	0,93	8,90	6,95	0,78	15,70
					50	7,20	2,04	10,10	6,82	2,14	12,50	6,89	1,34	10,20	6,88	0,54	12,90

No.	AGUA CRUDA				DOSIS	AGUA SEDIMENTADA											
	pH	ALC.	TURBIEDAD	COLOR		PAC			STBL			STBS			FeCl3		
						pH	TURBIDEZ	COLOR	pH	TURBIDEZ	COLOR	pH	TURBIDEZ	COLOR	pH	TURBIDEZ	COLOR
36	7,85	76	20,7	20,8	10	7,59	1,49	11,40	7,45	5,98	23,30	7,53	5,43	22,40	7,32	5,57	42,80
					20	7,46	0,78	9,60	7,28	2,36	14,00	7,31	5,89	21,50	7,13	2,12	27,90
					30	7,42	0,93	8,20	7,26	2,39	11,60	7,26	2,27	12,40	7,02	0,83	17,70
					40	7,36	1,08	8,30	7,13	2,61	12,40	7,16	2,04	10,20	6,91	0,82	16,40
					50	7,26	1,11	8,80	6,87	5,12	20,00	7,07	2,31	10,50	6,72	0,98	13,80
37	7,65	73	14,4	21,4	10	7,48	1,79	12,10	7,19	5,61	22,70	7,32	5,94	21,30	7,39	4,63	42,50
					20	7,41	0,64	7,60	7,03	2,21	13,70	7,22	6,09	23,00	7,15	1,98	25,10
					30	7,38	0,70	8,30	6,98	1,03	9,60	7,11	1,79	11,60	7,04	0,96	17,30
					40	7,28	1,17	8,70	6,89	1,89	11,00	6,94	1,43	9,90	6,77	0,83	15,30
					50	7,12	1,87	9,70	6,80	2,81	16,80	6,86	1,80	10,40	6,61	0,61	13,30
38	7,59	75	15,3	22,5	10	7,41	1,98	13,50	7,19	6,02	23,20	7,30	5,21	22,50	7,35	5,89	43,20
					20	7,35	1,01	9,60	7,11	4,56	14,50	7,22	6,09	21,60	7,11	2,02	26,80
					30	7,28	1,23	8,24	6,86	2,18	10,90	7,13	2,21	13,40	6,96	1,63	18,30
					40	7,16	1,32	10,10	6,74	1,23	12,20	6,99	1,78	9,80	6,83	0,94	14,20
					50	7,10	1,67	11,40	6,61	1,76	17,10	6,83	1,97	11,60	6,71	0,86	13,50
39	7,63	70	10,5	24,2	10	7,59	1,03	9,70	7,50	6,32	27,00	7,48	6,50	25,20	7,50	6,29	45,00
					20	7,46	0,72	7,30	7,42	5,25	24,80	7,41	6,30	23,90	7,41	2,11	26,40
					30	7,31	0,89	8,20	7,28	2,65	15,50	7,25	2,01	12,60	7,28	0,90	15,50
					40	7,28	1,34	8,30	7,20	1,49	10,90	7,18	1,48	10,20	7,15	0,76	13,60
					50	7,15	1,46	8,70	7,11	1,77	11,90	7,09	1,83	10,50	7,01	0,52	12,20
40	7,70	72	9,3	25,2	10	7,46	1,82	14,30	7,35	6,81	27,20	7,43	6,35	26,10	7,21	5,32	48,60
					20	7,42	1,64	12,90	7,27	2,79	17,20	7,35	4,87	23,10	7,06	2,29	24,50
					30	7,35	1,95	13,20	7,19	1,96	14,40	7,16	1,31	14,20	6,92	1,23	21,20
					40	7,24	2,02	13,70	7,04	2,83	17,30	7,05	1,74	13,20	6,89	1,04	17,90
					50	7,17	2,27	15,30	6,87	4,55	21,60	6,98	1,78	11,90	6,69	1,82	16,20

ANEXO 2

PORCENTAJES DE REMOCION DE TURBIEDAD Y COLOR

No.	Dosis	PAC		STBL		STBS		FeCl ₃	
		%Remoción T	%Remoción C	%Remoción T	%Remoción C	%Remoción T	%Remoción C	%Remoción T	%Remoción C
1	10	90,56	70,88	50,97	-2,81	65,40	4,91	66,77	-58,95
	20	92,34	76,84	72,10	34,74	66,13	15,44	74,11	-39,65
	30	91,69	78,95	83,95	61,40	80,24	34,39	92,42	53,68
	40	89,60	74,39	83,71	49,82	85,32	54,74	92,82	59,30
	50	89,35	69,12	72,50	36,49	83,39	43,86	93,87	64,56
2	10	83,80	44,66	36,10	-8,30	59,20	32,02	60,50	-75,49
	20	90,10	52,17	86,40	55,73	64,30	57,31	69,40	-55,73
	30	89,40	56,52	86,80	64,03	72,30	63,64	90,30	54,94
	40	87,80	61,26	78,50	55,34	85,10	65,22	92,80	57,71
	50	85,50	63,64	75,80	51,38	84,30	39,53	91,60	56,92
3	10	69,64	37,28	24,17	-3,95	8,31	-5,70	16,77	-92,98
	20	80,82	46,05	14,35	-7,89	1,06	21,49	11,18	-99,56
	30	80,21	56,14	54,53	28,51	64,95	35,96	41,84	28,51
	40	77,79	48,25	70,39	31,14	73,26	40,79	89,12	45,18
	50	77,34	41,23	56,65	44,30	69,79	52,63	87,61	52,63
4	10	85,30	53,30	67,59	-21,59	35,78	-2,20	32,89	-92,07
	20	89,40	58,15	78,67	46,26	41,81	29,52	37,35	-145,81
	30	86,99	82,82	84,46	60,35	45,78	32,60	60,48	2,20
	40	86,27	63,00	89,88	63,00	78,43	44,49	93,61	12,78
	50	85,66	60,35	79,04	59,03	74,94	51,98	85,06	44,49
	10	72,47	38,10	31,23	-2,60	16,85	-4,33	24,52	-90,48
	20	82,60	46,75	22,33	-6,49	10,27	22,51	19,45	-96,97

5	30	82,05	56,71	58,77	29,44	68,22	36,80	47,26	29,44
	40	79,86	48,92	73,15	32,03	75,75	41,56	90,14	45,89
	50	79,45	41,99	60,68	45,02	72,60	53,25	88,77	53,25
6	10	85,50	46,91	69,38	-23,05	34,88	-4,94	31,50	-109,05
	20	89,75	51,44	79,00	40,33	46,38	24,69	34,75	-86,01
	30	87,13	74,49	85,38	53,50	48,00	27,57	61,00	-0,82
	40	84,50	55,97	90,00	55,97	79,00	38,68	92,50	9,05
	50	83,88	53,50	80,50	52,26	74,88	45,68	83,38	38,68
7	10	81,07	46,75	44,73	-7,72	56,43	33,74	57,59	-76,83
	20	84,02	54,47	80,71	58,13	60,98	59,76	65,54	-56,50
	30	83,39	58,94	81,07	66,67	68,13	66,26	84,20	57,32
	40	81,96	63,82	78,48	57,72	80,45	67,89	86,43	60,16
	50	80,80	66,26	77,14	53,66	79,73	41,46	88,04	59,35
8	10	83,57	59,43	4,95	-6,13	2,12	-7,08	1,06	-103,77
	20	83,75	68,40	11,48	0,94	-11,66	-9,91	6,54	-159,91
	30	86,40	66,98	16,78	20,75	64,84	41,51	77,03	12,26
	40	79,33	66,04	69,96	33,02	77,92	55,66	84,10	34,43
	50	73,50	61,32	57,60	46,70	47,70	39,15	70,32	46,70
9	10	60,75	53,23	18,75	-3,98	-27,00	-18,91	-5,00	-97,51
	20	79,75	55,72	58,25	44,78	-22,00	-0,50	-36,25	-110,95
	30	76,00	57,71	68,50	61,69	63,50	48,26	69,50	19,40
	40	74,50	61,19	70,00	59,20	71,75	57,71	78,50	42,29
	50	73,75	64,18	49,75	50,25	60,50	54,73	66,50	50,25
10	10	67,62	44,98	14,23	-20,10	5,69	-11,96	6,05	-142,11
	20	83,99	64,59	29,00	-12,44	28,29	-7,66	7,65	-97,61
	30	86,48	59,81	62,81	17,22	62,28	3,83	81,85	6,70
	40	79,54	54,07	82,92	54,07	46,44	42,11	84,16	39,23
	50	73,67	25,36	74,02	42,11	40,04	-15,79	77,58	45,45

11	10	80,28	42,31	44,34	2,80	43,87	-1,75	57,26	-67,48
	20	90,75	67,13	44,15	37,41	44,72	41,26	44,34	-36,36
	30	89,34	71,68	76,79	62,24	77,55	55,94	84,25	38,81
	40	83,77	65,73	86,89	37,76	88,11	46,15	90,94	53,50
	50	81,04	46,85	80,47	30,07	81,13	34,62	94,53	66,08
12	10	83,66	38,39	45,94	-29,38	49,41	-11,37	48,71	-106,16
	20	91,29	62,56	82,28	15,64	54,95	18,48	51,78	-57,82
	30	91,09	61,61	87,23	52,61	82,77	45,50	88,61	5,69
	40	90,00	61,14	83,27	50,24	90,40	57,82	90,40	13,27
	50	87,92	59,24	79,11	32,23	92,48	63,98	92,18	30,81
13	10	77,97	43,20	27,15	-12,93	36,97	-17,69	12,98	-36,39
	20	92,69	74,83	77,54	51,02	56,16	-7,82	22,36	-9,86
	30	91,60	70,75	86,04	63,95	77,21	53,74	83,97	20,41
	40	89,09	68,71	82,55	56,12	84,51	62,59	93,35	55,78
	50	74,26	58,84	74,15	45,24	82,22	64,63	56,92	30,61
14	10	64,98	31,72	9,31	-6,17	-15,99	-11,01	10,93	-53,74
	20	73,48	57,71	-6,88	-18,06	-21,26	-21,15	18,62	-118,06
	30	82,19	64,76	50,61	14,98	48,18	40,97	75,91	13,22
	40	72,47	63,00	59,51	38,33	58,70	48,02	86,03	35,68
	50	62,96	59,47	56,28	37,00	28,14	39,21	85,22	41,85
15	10	81,69	35,66	57,70	-3,10	58,33	-1,16	24,37	-16,67
	20	89,90	65,89	42,93	-15,12	47,98	-8,53	22,85	-81,40
	30	93,69	71,71	77,15	46,12	79,55	51,55	85,48	38,76
	40	92,30	70,93	87,25	61,24	85,98	61,24	90,91	44,96
	50	90,53	68,99	73,86	43,41	81,44	58,53	92,55	53,10
16	10	76,85	43,41	8,54	-4,39	-12,32	-12,68	-1,31	-87,80
	20	79,31	60,49	-9,36	-14,15	-8,54	-14,63	54,52	-11,71
	30	77,01	60,98	58,62	34,63	66,34	46,34	87,68	30,24

	40	67,16	51,71	71,26	46,34	67,16	50,73	89,49	31,71
	50	64,86	41,46	70,44	52,20	64,37	47,80	90,48	40,98
17	10	65,97	44,83	8,94	-25,12	-0,19	-19,70	-2,28	-138,42
	20	83,65	65,52	26,62	-14,29	24,14	-9,36	1,14	-100,99
	30	84,98	60,10	61,79	20,69	61,22	2,96	80,04	8,37
	40	77,19	50,25	82,51	52,22	46,01	38,92	84,79	39,41
	50	72,43	25,12	71,29	37,93	38,97	-0,99	74,52	46,80
18	10	83,00	39,11	45,20	-21,78	47,90	-9,78	40,10	-90,22
	20	90,80	62,22	81,90	24,89	55,10	25,33	52,70	-33,78
	30	89,90	64,89	86,80	50,22	83,20	44,00	88,10	16,89
	40	88,60	61,78	82,60	55,11	91,70	59,11	90,70	24,89
	50	87,20	59,11	79,30	33,78	90,30	67,56	91,90	41,33
19	10	92,60	60,28	60,76	5,61	60,61	3,74	79,16	-76,64
	20	93,51	68,69	88,70	49,53	76,34	15,42	90,38	20,09
	30	92,67	64,95	92,37	61,21	86,03	49,53	95,19	39,72
	40	92,29	63,55	93,74	64,95	90,99	58,41	95,95	48,13
	50	91,76	62,62	89,39	58,41	89,85	53,74	95,73	44,39
20	10	83,50	55,77	32,86	-15,38	32,02	-14,42	51,34	-125,00
	20	86,74	63,94	72,21	41,83	73,62	35,10	68,12	-35,10
	30	88,01	65,87	80,96	55,29	81,10	50,00	91,40	32,69
	40	87,45	67,79	83,50	48,56	81,81	43,27	89,28	41,35
	50	79,13	61,06	59,24	38,46	61,21	39,42	87,45	26,92
21	10	89,56	60,26	45,09	-19,21	58,60	-7,86	36,23	-78,17
	20	90,09	67,25	85,18	-1,31	67,11	8,30	85,79	5,68
	30	91,05	69,00	89,74	59,83	87,63	54,59	92,37	34,93
	40	87,28	65,07	89,56	62,45	90,00	62,45	94,82	45,85
	50	85,70	63,32	84,30	55,90	89,21	61,14	94,74	44,10
	10	86,12	61,94	38,85	21,80	53,24	29,76	22,30	-46,71

22	20	90,58	70,93	84,96	59,52	74,46	37,02	84,24	14,19
	30	90,36	72,32	83,45	61,25	89,42	62,28	93,53	50,17
	40	88,56	71,28	81,80	57,44	93,67	70,93	94,89	56,40
	50	87,05	69,55	77,99	49,13	91,80	67,13	95,61	58,13
23	10	79,80	54,01	28,39	-8,39	25,71	-11,31	38,84	-67,52
	20	83,19	63,50	82,49	56,93	81,36	55,47	71,61	14,23
	30	91,10	67,88	81,50	62,04	78,95	57,66	80,79	62,77
	40	87,71	66,79	85,59	63,87	77,97	63,50	86,30	66,20
	50	85,59	58,76	55,37	39,42	54,80	40,88	88,42	69,71
24	10	82,62	40,19	49,22	-15,89	50,19	-20,56	55,15	-127,57
	20	94,37	63,55	81,26	42,99	80,97	37,38	77,57	-34,58
	30	89,32	59,35	80,97	43,93	80,49	41,12	91,65	20,56
	40	88,35	58,41	74,37	35,05	75,15	33,18	92,23	35,51
	50	83,11	55,14	70,29	24,77	65,92	21,03	92,72	49,53
25	10	73,13	44,44	5,76	-26,77	-1,07	-1,52	-33,26	-94,95
	20	86,78	60,10	-20,47	-18,69	6,40	8,59	14,29	-21,72
	30	82,09	59,60	49,68	30,30	42,22	20,20	58,00	26,26
	40	74,41	55,56	69,08	46,97	64,18	31,31	78,89	35,35
	50	59,49	51,01	65,25	45,96	52,67	4,55	82,30	41,92
26	10	88,22	57,14	29,63	-11,26	57,38	3,03	44,49	-90,04
	20	90,37	63,64	82,15	49,78	55,61	5,19	87,01	10,82
	30	86,73	61,90	86,54	57,58	54,95	16,88	93,74	42,86
	40	81,21	56,71	75,42	44,59	63,64	2,60	94,11	47,19
	50	78,32	52,81	71,59	37,23	47,76	1,73	95,14	52,81
27	10	58,71	40,20	-15,18	-11,56	-17,19	-10,05	-24,11	-144,22
	20	80,80	58,29	71,43	47,74	-37,05	-17,09	52,68	-43,72
	30	78,35	60,30	73,44	53,27	51,12	39,70	80,80	12,06
	40	66,96	56,78	69,20	51,26	82,81	59,80	81,92	19,10

	50	64,73	53,27	45,76	31,66	75,00	53,77	79,69	18,09
28	10	87,49	47,34	41,61	-14,98	41,30	-8,21	39,37	-135,27
	20	94,20	64,25	81,28	40,10	36,01	-12,08	79,04	-23,67
	30	92,57	63,29	90,03	56,52	85,25	46,38	89,73	20,77
	40	88,20	60,39	84,54	50,72	89,93	57,49	91,56	24,15
	50	86,16	57,49	79,45	33,33	88,61	55,56	92,68	25,12
29	10	84,17	52,61	21,21	11,76	21,21	-17,32	24,62	-89,22
	20	90,98	69,93	85,08	42,81	45,91	-21,57	72,65	-31,05
	30	90,15	72,55	84,85	50,33	84,39	53,59	91,29	46,41
	40	89,17	70,26	76,97	47,06	85,38	55,56	95,83	58,17
	50	83,56	60,13	74,17	44,44	84,55	39,87	94,70	58,82
30	10	86,85	45,54	-17,74	-103,29	53,55	-4,69	58,39	-123,00
	20	93,79	61,97	49,11	-13,62	64,44	10,33	83,23	-27,70
	30	92,98	61,50	80,81	33,33	88,39	47,89	92,18	15,02
	40	92,66	56,34	88,55	40,85	87,10	47,42	93,79	30,05
	50	90,24	55,87	83,15	53,05	85,40	53,05	94,68	36,62
31	10	86,94	53,92	40,67	3,92	-39,30	-71,08	44,15	-103,43
	20	88,68	62,25	75,12	36,76	29,10	-7,84	85,07	1,96
	30	88,18	61,76	78,23	44,12	78,36	46,57	89,18	25,98
	40	88,18	59,80	88,56	56,86	87,31	58,82	91,54	30,39
	50	79,60	55,88	80,85	50,49	86,82	55,39	93,41	41,67
32	10	82,10	39,23	44,66	-6,70	23,09	-5,26	47,10	-113,40
	20	88,61	50,24	47,10	-12,44	34,79	-15,31	83,32	-13,40
	30	86,37	55,02	56,36	3,83	70,80	18,18	91,56	23,44
	40	79,96	47,85	79,65	41,63	79,25	42,58	91,66	28,23
	50	79,45	45,93	72,02	30,62	73,25	30,62	87,28	35,89
	10	90,59	58,37	43,37	-15,88	39,21	-8,15	36,63	-93,13
	20	93,47	68,67	33,47	-6,44	35,84	-2,58	78,91	-13,30

33	30	92,18	64,81	71,78	33,48	79,90	45,92	90,59	33,48
	40	88,32	64,38	85,05	53,22	84,26	56,22	91,78	41,63
	50	88,02	62,66	81,98	48,93	82,87	54,94	94,36	47,64
34	10	81,20	44,34	28,15	-9,50	33,15	-4,52	44,35	-116,74
	20	84,46	55,20	69,78	36,65	48,91	9,05	77,39	2,71
	30	80,98	53,85	80,87	48,42	87,93	49,32	88,26	17,65
	40	79,67	51,58	71,41	35,29	84,35	53,39	90,87	32,13
	50	77,50	44,34	49,78	15,84	83,91	59,73	82,07	40,27
35	10	91,45	37,80	76,17	-11,00	79,10	-5,26	79,80	-104,31
	20	96,48	57,89	93,36	65,55	77,46	-3,35	91,56	-33,01
	30	94,65	56,94	95,27	52,15	91,56	40,67	96,52	18,66
	40	93,59	56,46	95,00	51,20	96,37	57,42	96,95	24,88
	50	92,03	51,67	91,64	40,19	94,77	51,20	97,89	38,28
36	10	92,80	45,19	71,11	-12,02	73,77	-7,69	73,09	-105,77
	20	96,23	53,85	88,60	32,69	71,55	-3,37	89,76	-34,13
	30	95,51	60,58	88,45	44,23	89,03	40,38	95,99	14,90
	40	94,78	60,10	87,39	40,38	90,14	50,96	96,04	21,15
	50	94,64	57,69	75,27	3,85	88,84	49,52	95,27	33,65
37	10	87,57	43,46	61,04	-6,07	58,75	0,47	67,85	-98,60
	20	95,56	64,49	84,65	35,98	57,71	-7,48	86,25	-17,29
	30	95,14	61,21	92,85	55,14	87,57	45,79	93,33	19,16
	40	91,88	59,35	86,88	48,60	90,07	53,74	94,24	28,50
	50	87,01	54,67	80,49	21,50	87,50	51,40	95,76	37,85
38	10	87,06	40,00	60,65	-3,11	65,95	0,00	61,50	-92,00
	20	93,40	57,33	70,20	35,56	60,20	4,00	86,80	-19,11
	30	91,96	63,38	85,75	51,56	85,56	40,44	89,35	18,67
	40	91,37	55,11	91,96	45,78	88,37	56,44	93,86	36,89
	50	89,08	49,33	88,50	24,00	87,12	48,44	94,38	40,00

39	10	90,19	59,92	39,81	-11,57	38,10	-4,13	40,10	-85,95
	20	93,14	69,83	50,00	-2,48	40,00	1,24	79,90	-9,09
	30	91,52	66,12	74,76	35,95	80,86	47,93	91,43	35,95
	40	87,24	65,70	85,81	54,96	85,90	57,85	92,76	43,80
	50	86,10	64,05	83,14	50,83	82,57	56,61	95,05	49,59
40	10	80,43	43,25	26,77	-7,94	31,72	-3,57	42,80	-92,86
	20	82,37	48,81	70,00	31,75	47,63	8,33	75,38	2,78
	30	79,03	47,62	78,92	42,86	85,91	43,65	86,77	15,87
	40	78,28	45,63	69,57	31,35	81,29	47,62	88,82	28,97
	50	75,59	39,29	51,08	14,29	80,86	52,78	80,43	35,71

ANEXO 3

TABLAS ANOVA PARA DETERMINACION DE DOSIS ÓPTIMA DE COAGULANTE RESPECTO A LA TURBIEDAD

Tabla ANOVA para turbiedad residual por dosis de PAC

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Entre grupos	13,1452	4	3,28629	26,84	0,0000
Intra grupos	23,8783	195	0,122453		
Total (Corr.)	37,0235	199			

Tabla ANOVA para Turbiedad residual por dosis STBL

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Entre grupos	341,818	4	85,4545	36,96	0,0000
Intra grupos	624,211	270	2,31189		
Total (Corr.)	966,029	274			

Tabla ANOVA para Turbiedad residual por dosis STBS

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Entre grupos	418,659	4	104,665	46,69	0,0000
Intra grupos	605,267	270	2,24173		
Total (Corr.)	1023,93	274			

Tabla ANOVA para Turbiedad residual por Dosis

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Entre grupos	503,509	4	125,877	70,90	0,0000
Intra grupos	479,368	270	1,77544		
Total (Corr.)	982,878	274			

ANEXO 4

TABLAS ANOVA PARA DETERMINACION DE DOSIS DE COAGULANTE RESPECTO AL COLOR

Tabla ANOVA para Color residual por dosis de PAC

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Entre grupos	363,258	4	90,8145	26,22	0,0000
Intra grupos	675,4	195	3,46359		
Total (Corr.)	1038,66	199			

Tabla ANOVA para Color residual por dosis de STBL

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Entre grupos	4710,37	4	1177,59	51,59	0,0000
Intra grupos	6163,19	270	22,8266		
Total (Corr.)	10873,6	274			

Tabla ANOVA para Color residual por dosis de STBS

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Entre grupos	4611,55	4	1152,89	47,60	0,0000
Intra grupos	6539,28	270	24,2196		
Total (Corr.)	11150,8	274			

Tabla ANOVA para Color residual por dosis de FeCl₃

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Entre grupos	23890,6	4	5972,65	68,06	0,0000
Intra grupos	23692,5	270	87,75		
Total (Corr.)	47583,1	274			

ANEXO 5

PRUEBA DE RANGOS MULTIPLES PARA DOSIS ÓPTIMAS DE LOS COAGULANTES DE ACUERDO A LA TURBIEDAD

Pruebas de Múltiple Rangos para Turbiedad residual con dosis de PAC

Método: 95,0 porcentaje LSD

<i>Dosis ppm</i>	<i>Casos</i>	<i>Media</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
20	40	0,97825	X
30	40	1,062	X
40	40	1,32425	X
10	40	1,5765	X
50	40	1,603	X

<i>Contraste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>
10 - 20	*	0,59825	0,15432
10 - 30	*	0,5145	0,15432
10 - 40	*	0,25225	0,15432
10 - 50		-0,0265	0,15432
20 - 30		-0,08375	0,15432
20 - 40	*	-0,346	0,15432
20 - 50	*	-0,62475	0,15432
30 - 40	*	-0,26225	0,15432
30 - 50	*	-0,541	0,15432
40 - 50	*	-0,27875	0,15432

* indica una diferencia significativa.

Pruebas de Múltiple Rangos para Turbiedad residual con dosis de STBL

Método: 95,0 porcentaje LSD

<i>Dosis ppm</i>	<i>Casos</i>	<i>Media</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
40	40	1,6825	X
30	40	1,96525	XX
50	40	2,45775	X
20	40	3,23175	X
10	40	5,77975	X

<i>Contraste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>
10 - 20	*	2,548	0,593638
10 - 30	*	3,8145	0,593638
10 - 40	*	4,09725	0,593638
10 - 50	*	3,322	0,593638
20 - 30	*	1,2665	0,593638
20 - 40	*	1,54925	0,593638
20 - 50	*	0,774	0,593638
30 - 40		0,28275	0,593638
30 - 50		-0,4925	0,593638
40 - 50	*	-0,77525	0,593638

* indica una diferencia significativa.

Pruebas de Múltiple Rangos para Turbiedad residual con dosis de STBS

Método: 95,0 porcentaje LSD

<i>Dosis</i>	<i>Casos</i>	<i>Media</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
40	40	1,63325	X
50	40	2,06625	XX
30	40	2,1885	X
20	40	4,90475	X
10	40	5,7235	X

<i>Contraste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>
10 - 20	*	0,81875	0,478723
10 - 30	*	3,535	0,478723
10 - 40	*	4,09025	0,478723
10 - 50	*	3,65725	0,478723
20 - 30	*	2,71625	0,478723
20 - 40	*	3,2715	0,478723
20 - 50	*	2,8385	0,478723
30 - 40	*	0,55525	0,478723
30 - 50		0,12225	0,478723
40 - 50		-0,433	0,478723

* indica una diferencia significativa.

Pruebas de Múltiple Rangos para Turbiedad residual con dosis de FeCl₃

Método: 95,0 porcentaje LSD

<i>Dosis</i>	<i>Casos</i>	<i>Media</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
40	40	0,79875	X
50	40	0,9675	XX
30	40	1,32425	X
20	40	3,3905	X
10	40	5,54225	X

<i>Contraste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>
10 - 20	*	2,15175	0,485591
10 - 30	*	4,218	0,485591
10 - 40	*	4,7435	0,485591
10 - 50	*	4,57475	0,485591
20 - 30	*	2,06625	0,485591
20 - 40	*	2,59175	0,485591
20 - 50	*	2,423	0,485591
30 - 40	*	0,5255	0,485591
30 - 50		0,35675	0,485591
40 - 50		-0,16875	0,485591

* indica una diferencia significativa

ANEXO 6

PRUEBA DE RANGOS MÚLTIPLES PARA DOSIS ÓPTIMAS DE LOS COAGULANTES DE ACUERDO AL COLOR

Pruebas de Múltiple Rangos para Color residual con dosis de PAC

Método: 95,0 porcentaje LSD

<i>Dosis</i>	<i>Casos</i>	<i>Media</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
30	40	8,301	X
20	40	8,845	X
40	40	9,1025	X
50	40	10,3425	X
10	40	12,0725	X

<i>Contraste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>
10 - 20	*	3,2275	0,820731
10 - 30	*	3,7715	0,820731
10 - 40	*	2,97	0,820731
10 - 50	*	1,73	0,820731
20 - 30		0,544	0,820731
20 - 40		-0,2575	0,820731
20 - 50	*	-1,4975	0,820731
30 - 40		-0,8015	0,820731
30 - 50	*	-2,0415	0,820731
40 - 50	*	-1,24	0,820731

* indica una diferencia significativa.

Pruebas de Múltiple Rangos para Color residual con dosis de STBL

Método: 95,0 porcentaje LSD

<i>Dosis ppm</i>	<i>Casos</i>	<i>Media</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
40	40	11,74	X
30	40	12,26	XX
50	40	13,7975	X
20	40	17,2425	X
10	40	25,63	X

<i>Contraste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>
10 - 20	*	8,3875	1,73682
10 - 30	*	13,37	1,73682
10 - 40	*	13,89	1,73682
10 - 50	*	11,8325	1,73682
20 - 30	*	4,9825	1,73682
20 - 40	*	5,5025	1,73682
20 - 50	*	3,445	1,73682
30 - 40		0,52	1,73682
30 - 50		-1,5375	1,73682
40 - 50	*	-2,0575	1,73682

* indica una diferencia significativa.

Pruebas de Múltiple Rangos para Color residual con dosis de STBS

Método: 95,0 porcentaje LSD

<i>Dosis</i>	<i>Casos</i>	<i>Media</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
40	40	11,1425	X
50	40	12,695	XX
30	40	13,165	X
20	40	20,715	X
10	40	24,3375	X

<i>Contraste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>
10 - 20	*	3,6225	1,7361
10 - 30	*	11,1725	1,7361
10 - 40	*	13,195	1,7361
10 - 50	*	11,6425	1,7361
20 - 30	*	7,55	1,7361
20 - 40	*	9,5725	1,7361
20 - 50	*	8,02	1,7361
30 - 40	*	2,0225	1,7361
30 - 50		0,47	1,7361
40 - 50		-1,5525	1,7361

* indica una diferencia significativa.

Pruebas de Múltiple Rangos para Color residual con dosis de FeCl₃

Método: 95,0 porcentaje LSD

<i>Dosis</i>	<i>Casos</i>	<i>Media</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
50	40	12,5725	X
40	40	14,014	X
30	40	16,7	X
20	40	32,585	X
10	40	44,1675	X

<i>Contraste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>
10 - 20	*	11,5825	2,40426
10 - 30	*	27,4675	2,40426
10 - 40	*	30,1535	2,40426
10 - 50	*	31,595	2,40426
20 - 30	*	15,885	2,40426
20 - 40	*	18,571	2,40426
20 - 50	*	20,0125	2,40426
30 - 40	*	2,686	2,40426
30 - 50	*	4,1275	2,40426
40 - 50		1,4415	2,40426

* indica una diferencia significativa.