

**ESTUDIO PRELIMINAR DEL USO DEL SULFATO DE ALUMINIO LÍQUIDO EN
EL PROCESO DE CLARIFICACIÓN DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DEL
ACUEDUCTO DE PIEDECUESTA**

CARLOS ANDRES CAMACHO URIBE

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2010

**ESTUDIO PRELIMINAR DEL USO DEL SULFATO DE ALUMINIO LÍQUIDO EN
EL PROCESO DE CLARIFICACIÓN DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DEL
ACUEDUCTO DE PIEDECUESTA**

AUTOR:

CARLOS ANDRES CAMACHO URIBE

**Trabajo de grado para optar por el
título de ingeniero químico**

DIRECTOR DEL PROYECTO DE GRADO:

CRISÓSTOMO BARAJAS FERREIRA

Ingeniero Químico, MSc.

CODIRECTOR

ELSA VICTORIA CARVAJAL JAIMES

Ingeniera Sanitaria y Ambiental

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2010

DEDICATORIA

*A DIOS QUE ES LA LUZ EN MIS SOMBRAS Y MI GUÍA EN ESTA
META Y EN MI VIDA*

*A MI FAMILIA POR ACOMPAÑARME EN LOS MOMENTOS
DIFICILES Y BRINDARME SIEMPRE SU CARIÑO*

*A MI FUTURA ESPOSA QUE FUE INCONDICIONAL EN SU APOYO Y
POR ESE AMOR QUE ME INSPIRÓ*

AGRADECIMIENTOS

A LA UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER POR SU LEGADO
INSTITUCIONAL

A LA ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA Y EL CUERPO DOCENTE POR
TODA LA ENSEÑANZA QUE ME DIERON

AL PROFESOR CRISÓSTOMO BARAJAS POR SU TIEMPO Y TUTORIA EN
ESTE PROYECTO

AL ACUEDUCTO DE PIEDECUESTA POR ABRIR SUS PUERTAS Y
PERMITIRME EL DESARROLLO DE ESTE TRABAJO

A LA INGENIERA ELSA VICTORIA CARVAJAL JEFE DE PLANTA DEL
ACUEDUCTO DE PIEDECUESTA POR SU COLABORACIÓN Y TIEMPO

A TODO EL PERSONAL QUE OPERAN EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE
AGUA DE PIEDECUESTA POR SU DISPONIBILIDAD PRESTADA

TABLA DE CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	16
1. CONCEPTOS TEÓRICOS.....	17
1.1 PROCESOS Y OPERACIONES UNITARIAS EN LA CLARIFICACIÓN DEL AGUA	17
1.2 TRANSFERENCIA DE IONES.....	18
1.2.1 Coagulación química	18
1.2.1.1 Química del coagulante sulfato de aluminio (alumbre).	18
1.3 FLOCULACIÓN	20
1.4 TRANSFERENCIA DE SÓLIDOS.....	20
1.4.1 Sedimentación	20
1.5 SIMULACIÓN PARA EL CONTROL DEL PROCESO DE COAGULACIÓN ...	21
1.5.1 Prueba de jarras.	21
1.6 DESCRIPCIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE LA PLANTA DE POTABILIZACIÓN “LA COLINA” DEL MUNICIPIO DE PIEDECUESTA	21
1.6.1 Captación.....	21
1.6.2 Sistema de Aducción	21
1.6.3 Medición de flujo	22
1.6.4 Dosificación de coagulante	22
1.6.5 Floculadores	23
1.6.6 Sedimentadores.....	23
1.6.7 Filtros	23
1.6.8 Dosificadores para la desinfección	24
1.6.9 Tanques de almacenamiento.....	24
2. DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	25

2.1 ENTRENAMIENTO EN TÉCNICAS DE ANÁLISIS Y ENSAYOS DE JARRAS	26
2.2 RECOPIACIÓN BASE DE DATOS ESTADÍSTICO DEL CONTROL DE OPERACIONES DEL ACUEDUCTO (2008 – 2009) PARA EL SULFATO DE AI SÓLIDO.....	26
2.3 RECOLECCIÓN DE MUESTRAS DE AGUAS	26
2.4 EVALUACIÓN DE COAGULANTES INORGÁNICOS	27
2.4.1 Determinación de la dosis óptima de coagulante.....	28
2.5 PRE-EVALUACIÓN ECONÓMICA DE LA MEJOR ALTERNATIVA DE COAGULANTE INORGÁNICO.....	29
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS	30
3.1 Comportamiento de los coagulantes inorgánicos	30
3.1.1 Análisis de los comportamientos.....	38
4. CONCLUSIONES	40
5. RECOMENDACIONES.....	42
BIBLIOGRAFÍA.....	43
ANEXOS	45

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Diagrama en bloques del proceso de potabilización del agua.....	17
Figura 2. Medición por caudalímetro de ultrasonido.....	22
Figura 3. (a) Unidades dosificadoras de coagulante y (b) canaleta Parshall de la Planta de Potabilización de Piedecuesta.....	22
Figura 4. (a) Floculador vertical y (b) floculador horizontal.....	23
Figura 5. (a) Sedimentadores de flujo acelerado y (b) filtros de flujo con lecho dual de arena y antracita.....	24
Figura 6. (a) Dosificadores de cloro y (b) tanques de almacenamiento.....	24
Figura 7. Diagrama de bloques de la metodología desarrollada.....	25
Figura 8. Montaje para la prueba de jarras.....	28
Figura 9. Dosis óptima (Turb= 5,3 NTU).....	30
Figura 10. Dosis óptima (Turb= 8,5 NTU).....	30
Figura 11. Dosis óptima (Turb= 10 NTU).....	30
Figura 12. Dosis óptima (Turb= 12 NTU).....	30
Figura 13. Dosis óptima (Turb= 19 NTU).....	31
Figura 14. Dosis óptima (Turb= 20 NTU).....	31
Figura 15. Dosis óptima (Turb= 23 NTU).....	31
Figura 16. Dosis óptima (Turb= 30 NTU).....	31
Figura 17. Dosis óptima (Turb= 35 NTU).....	32
Figura 18. Dosis óptima (Turb= 40 NTU).....	32
Figura 19. Dosis óptima (Turb= 50 NTU).....	32
Figura 20. Dosis óptima (Turb= 60 NTU).....	32
Figura 21. Dosis óptima (Turb= 63 NTU).....	33
Figura 22. Dosis óptima (Turb= 70 NTU).....	33
Figura 23. Dosis óptima (Turb= 80 NTU).....	33
Figura 24. Dosis óptima (Turb= 90 NTU).....	33

Figura 25. Dosis óptima (Turb= 250 NTU).....	34
Figura 26. Dosis óptima (Turb= 300 NTU).....	34
Figura 27. Dosis óptima (Turb= 370 NTU).....	34
Figura 28. Dosis óptima (Turb= 500 NTU).....	34
Figura 29. Dosis óptima (Turb= 600 NTU).....	35
Figura 30. Dosis óptima (Turb= 700 NTU).....	35
Figura 31. Dosis óptima (Turb= 720 NTU).....	35
Figura 32. Dosis óptima (Turb= 850 NTU).....	35
Figura 33. Dosis óptima (Turb= 1100NTU).....	36
Figura 34. Dosis óptima (Turb= 1150NTU).....	36
Figura 35. Dosis óptima (Turb= 1320NTU).....	36
Figura 36. Dosis óptima (Turb= 1500NTU).....	36
Figura 37. Dosis óptima (Turb= 1900NTU).....	37
Figura 38. Comportamiento de costos coagulantes inorgánicos.....	37
Figura 39. Turbidímetro HACH 2100 A.....	39
Figura 40. PH-metro Mettler Toledo.....	50
Figura 41. Titulador Electrométrico Metrohm.....	51
Figura 42. Espectrofotómetro HACH DR-2800.....	52
Figura 43. pH óptimo (Turb= 5,3 NTU).....	62
Figura 44. pH óptimo (Turb= 8,5 NTU).....	62
Figura 45. pH óptimo (Turb= 10 NTU).....	62
Figura 46. pH óptimo (Turb= 12 NTU).....	62
Figura 47. pH óptimo (Turb= 19 NTU).....	62
Figura 48. pH óptimo (Turb= 20 NTU).....	62
Figura 49. pH óptimo (Turb= 23 NTU).....	63
Figura 50. pH óptimo (Turb= 30 NTU).....	63
Figura 51. pH óptimo (Turb= 35 NTU).....	63
Figura 52. pH óptimo (Turb= 40 NTU).....	63
Figura 53. pH óptimo (Turb= 50 NTU).....	63
Figura 54. pH óptimo (Turb= 60 NTU).....	63

Figura 55. pH óptimo (Turb= 70 NTU).....	64
Figura 56. pH óptimo (Turb= 80 NTU).....	64
Figura 57. pH óptimo (Turb= 250 NTU).....	64
Figura 58. pH óptimo (Turb= 300 NTU).....	64
Figura 59. pH óptimo (Turb= 370 NTU).....	64
Figura 60. pH óptimo (Turb= 500 NTU).....	64
Figura 61. pH óptimo (Turb= 600 NTU).....	65
Figura 62. pH óptimo (Turb= 700 NTU).....	65
Figura 63. pH óptimo (Turb= 720 NTU).....	65
Figura 64. pH óptimo (Turb= 850 NTU).....	65
Figura 65. pH óptimo (Turb= 1100 NTU).....	65
Figura 66. pH óptimo (Turb= 1150 NTU).....	65

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Intervalos de turbiedad utilizados en la recolección de muestras de aguas.	27
Tabla 2. Costo de coagulante S.Q de 2010.....	29
Tabla 3. Ficha técnica de Sulfato de Aluminio Líquido Tipo B.....	56
Tabla 4. Ficha técnica de Sulfato de Aluminio Sólido Tipo B	57
Tabla 5. Características Físicas	59
Tabla 6. Características químicas que tienen reconocido efecto adverso en la salud humana.....	60
Tabla 7. Características químicas que tienen consecuencias económicas e indirectas sobre la salud humana.....	61
Tabla 8. Datos de las variables de entrada y salida en las pruebas de jarras	66

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. MARCO CONCEPTUAL.....	48
Anexo B. MÉTODOS ANALÍTICOS.....	54
Anexo C. FICHAS TÉCNICAS DE LOS SULFATOS DE ALUMINIO TIPO B, LÍQUIDO Y SÓLIDO	63
Anexo D. MARCO LEGAL.....	58
Anexo E. RESULTADOS DE PRUEBAS FISICOQUÍMICAS.....	62

RESUMEN

TITULO: ESTUDIO PRELIMINAR DEL USO DEL SULFATO DE ALUMINIO LÍQUIDO EN EL PROCESO DE CLARIFICACIÓN DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DEL ACUEDUCTO DE PIEDECUESTA*

AUTOR: Carlos Andrés Camacho Uribe **

PALABRAS CLAVES: Sulfato de aluminio, coagulante, acueducto de Piedecuesta, agua cruda, turbiedad, color, aluminio residual.

DESCRIPCIÓN: El sulfato de aluminio es el coagulante estándar usado en el proceso de clarificación del agua para consumo humano. Actualmente la planta de potabilización “La Colina” del municipio de Piedecuesta, propiedad de la Empresa Piedecuestana de Servicios E.S.P, utiliza sulfato de aluminio granular tipo B. En busca de favorecer a la comunidad se inicia el estudio de viabilidad de uso del sulfato de aluminio líquido como una alternativa para optimizar el proceso productivo de la empresa en términos de operatividad, control y manejo del coagulante, teniendo en cuenta que el uso de coagulantes líquidos va en aumento por los acueductos del país y presenta ventajas como: dosificación más exacta, ofrece una mejor seguridad y salud ocupacional a los operarios, manipulación más sencilla y fácil de controlar; entre otras y de esta forma mantener y mejorar los estándares de calidad en el tratamiento de agua potable. El presente trabajo analiza y expone la factibilidad del uso del sulfato de aluminio líquido en la potabilización del Río de Oro (fuente captada por el acueducto de Piedecuesta) desde el punto de vista técnico, económico y ambiental.

A través de pruebas de jarras en el laboratorio para 29 muestras de agua cruda en los intervalos de turbiedad [0 NTU, 30 NTU], [31 NTU, 100 NTU], [101 NTU, 1000 NTU] y [> 1000 NTU] se evaluaron dos coagulantes inorgánicos (sulfato de aluminio tipo B, granular y líquido) suministrados por la empresa Sulfoquímica sa, con los cuales se realizaron estudios comparativos de la determinación de dosis óptima en criterios de remoción de turbiedad, color, pH, aluminio residual y alcalinidad.

El estudio estableció que el sulfato de aluminio líquido tipo B presenta mejores resultados en remoción de turbiedad, color y aluminio residual, además la dosis óptima aplicada presentó favorabilidad económica en costo de consumo de coagulante.

* Proyecto de grado

** Escuela de Ingeniería Química. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, Universidad Industrial de Santander. Director MSc. Crisóstomo Barajas. Codirector Ing. Elsa Victoria Carvajal Jaimes

ABSTRACT

TITLE: PRELIMINARY STUDY OF THE USE OF LIQUID ALUMINUM SULFATE IN THE PROCESS OF THE CLARIFICATION TREATMENT PLANT'S PIEDECUESTA AQUEDUCT*

AUTHOR: Carlos Andrés Camacho Uribe**

KEY WORDS: Aluminum sulfate, coagulant, aqueduct of Piedecuesta, hard water, turbid water, color, residual aluminum.

DESCRIPTION: Aluminum sulfate is the standard used coagulant in the clarification process of drinking water. Currently water treatment plant "La Colina" of Piedecuesta's municipality, owned by the Company Piedecuestana de Servicios E.S.P., uses granular aluminum sulfate type B. Seeking to encourage the community starts feasibility study on use of liquid aluminum sulfate as an alternative to optimize the production process of the company in terms of operability, control and management of the coagulant, taking into account that the use of coagulants liquid is increasing by the aqueducts of the country and has advantages such as more accurate dosing, offers better security and occupational health to workers, handling simple and easy to control, among others and thus maintain and improve quality standards in the treatment of drinking water. This work analyzes and discusses the feasibility of using liquid aluminum sulfate in the purification of the Rio de Oro (source captured by the Piedecuesta aqueduct) from the standpoint of technical, economic and environmental.

Through jar tests in the laboratory for 29 samples of hard water turbidity in the intervals [0 NTU, 30 NTU], [31 NTU, 100 NTU], [101 NTU, 1000 NTU] and [$>$ 1000 NTU] were evaluated two inorganic coagulants (aluminum sulfate type B, granular and liquid) supplied by the company Sulfoquímica sa, with which we performed comparative studies to determine optimal dose criteria for removal of turbidity, color, ph, alkalinity, residual aluminum.

The study found that liquid aluminum sulfate type B presented better results in removal of turbidity, color and residual aluminum also the optimal applied dose presented economic favorability coagulant consumption cost.

* Degree project

** Faculty of Physics and Mechanical Engineering. School of Chemical Engineering. Project Director: MSc. Crisóstomo Barajas. Coodirector: Ing. Elsa Victoria Carvajal Jaimes.

INTRODUCCIÓN

El tratamiento y suministro de agua es una tarea que ha venido siendo realizada por la Empresa Piedecuestana de Servicios Públicos E.S.P cumpliendo los lineamientos que enmarcan la legislación colombiana, relativos al tratamiento de agua para consumo humano, garantizando la calidad del recurso hídrico potable que distribuye a sus usuarios.

Dentro de los procesos del tratamiento se encuentra la coagulación química del agua donde se emplea sustancias para tal efecto como son los coagulantes. Actualmente la empresa utiliza el sulfato de aluminio granular tipo B como coagulante y para su dosificación emplea unidades dosificadoras en seco de tipo volumétrico de tornillo sinfín.

Debido a que los equipos utilizados en la dosificación de sulfato granular presentan constantes problemas de funcionamiento y existe el interés de renovar y optimizar esta operación y proceso unitario (coagulación) en la cual, la Empresa está dispuesta a invertir en términos de modernización, salud ocupacional, viabilidad económica y operacional; surge la necesidad de realizar este estudio.

Este trabajo de grado tuvo como objetivo la evaluación de una alternativa en el proceso de coagulación de la Planta de Tratamiento del Acueducto de Piedecuesta con el uso de un sulfato de aluminio líquido, cumpliendo con el mejoramiento de la calidad del agua tratada en los tópicos de turbiedad, pH, color y aluminio residual.

1. CONCEPTOS TEÓRICOS

1.1 PROCESOS Y OPERACIONES UNITARIAS EN LA CLARIFICACIÓN DEL AGUA

En el proceso de potabilización del agua para consumo humano requiere que este factor abiótico pase por una serie de etapas conocidas como procesos y operaciones unitarias donde su objetivo es cumplir con la normatividad* vigente de la región a la hora de ser distribuida para su consumo. Para este proceso principalmente se lleva a cabo en las siguientes etapas (Figura 1):

Figura 1. Diagrama en bloques del proceso de potabilización del agua



Fuente: Acueducto de Piedecuesta

Las etapas de tratamiento en la clarificación del agua se pueden clasificar de acuerdo a los medios que se utilizan. Cuando la remoción de sustancias se hace mediante el desarrollo de reacciones biológicas y químicas se considerará un proceso unitario como es el caso de la coagulación y cuando el tratamiento consiste en la aplicación de fuerzas físicas como la sedimentación, filtración, decantación, etc. se le llamará operación unitaria.

* La normatividad por la cual se rige actualmente el acueducto de Piedecuesta es de acuerdo al decreto 1575 de 2007^[1] y la resolución 2115 de 2007^[2].

1.2 TRANSFERENCIA DE IONES

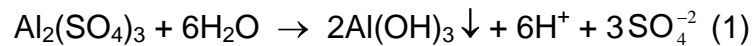
1.2.1 Coagulación química. La coagulación química puede definirse como un proceso unitario usado para causar la coalescencia o agregación de material suspendido no sedimentable y partículas coloidales del agua y de aguas residuales; es el proceso por el cual se reducen las fuerzas repelentes existentes entre partículas coloidales para formar partículas mayores de buena sedimentación. El proceso consiste en la adición de sustancias químicas al agua, su distribución uniforme en ella y la formación de un “*floc*” fácilmente sedimentable. La coagulación prepara el agua para la sedimentación, incrementa grandemente la eficiencia de los sedimentadores y tiene como función principal desestabilizar, agregar y unir las sustancias coloidales presentes en el agua. La coagulación es el proceso más ampliamente usado para remover las sustancias que producen turbiedad en el agua ^[6].

Los factores de mayor influencia en el desarrollo del proceso de coagulación son la naturaleza del agua cruda (concentración de coloides*, la alcalinidad y el pH) y las variables químicas (dosis óptima, el pH óptimo y la alcalinidad del coagulante)^[5].

1.2.1.1 Química del coagulante sulfato de aluminio (alumbre). El sulfato de aluminio es el coagulante estándar usado en tratamiento de aguas. El producto comercial tiene usualmente la fórmula $Al_2(SO_4)_3 \cdot 14H_2O$ con masa molecular de 600. El material es empacado en diversas formas: en polvo, molido, en terrones, en granos parecidos al arroz y en forma líquida ^[6]. La química de la coagulación es compleja, pero el proceso se puede ilustrar por medio de ecuaciones simplificadas. Se considera que el proceso de coagulación con alumbre, se verifica en las tres etapas siguientes:

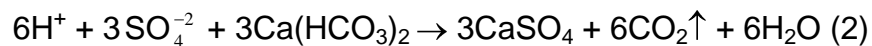
* Medida normalmente mediante la cantidad de turbiedad o color presente en el agua.

1. El alumbre se ioniza en el agua y produce iones Al^{+3} y SO_4^{-2} . El Al^{+++} puede combinarse con coloides cargados negativamente para neutralizar parte de la carga de la partícula coloidal posibilitando la unión entre ellas. Algunos de los iones $\text{Al}(\text{OH})_3$ neutraliza la carga negativa, pero
2. La mayor parte de los iones Al^{+3} se combinan con iones OH^- (del agua) para formar $\text{Al}(\text{OH})_3$ coloidal el cual absorbe iones positivos de la solución:



3. Entonces, el $\text{Al}(\text{OH})_3$ en solución con carga positiva ayuda a neutralizar los coloides negativos, y el exceso es neutralizado por el SO_4^{-2} para producir un precipitado de $\text{Al}(\text{OH})_3$ y sulfatos adsorbidos.

Se puede observar que el exceso de H^+ que se forma en la etapa 2 tiende a disminuir el pH, lo cual detendría la formación del $\text{Al}(\text{OH})_3$ puesto que depende del pH. Normalmente, el exceso de iones H^+ es neutralizado por la alcalinidad (HCO_3^-) presente en el agua de acuerdo con la ecuación:



La reacción global que combina las ecuaciones (1) y (2) es:



El efecto químico global es una disminución del pH del agua, una conversión de parte de la dureza de calcio [$\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$] en dureza de sulfato (CaSO_4), y la producción de CO_2 . Si la alcalinidad presente en el agua es insuficiente para que esta reacción se lleve a cabo, se debe aumentar el pH adicionando cal [$\text{Ca}(\text{OH})_2$], carbonato de sodio (Na_2CO_3) o sosa (NaOH)^[4].

1.3 FLOCULACIÓN

La floculación es un proceso físico que se realiza en el tratamiento de agua potable en seguida de la coagulación. Por medio del proceso químico y físico combinado de coagulación/floculación, las partículas coloidales que no se asientan por sedimentación simple, se aglomeran para formar sólidos más grandes llamados *flóculos*^[4]; una vez estos aumentan de tamaño se sedimentan con facilidad. Se lleva a cabo un mezclado suave de la suspensión, a fin de favorecer el contacto entre partículas. Esto se consigue por mezclado mecánico o por mezclado hidráulico dentro de un tanque que recibe la mezcla coagulante-agua cruda. La floculación puede ser mejorada por la adición de un reactivo de floculación o ayudante de floculación^[4].

Los principales factores que influyen en la eficiencia de este proceso son: la naturaleza del agua, las variaciones de caudal, la intensidad de agitación, el tiempo de floculación y el número de compartimientos de la unidad^[5].

1.4 TRANSFERENCIA DE SÓLIDOS

1.4.1 Sedimentación. La sedimentación se encuentra entre las principales operaciones unitarias empleadas en el tratamiento del agua para consumo humano. Consiste en promover condiciones en el agua que contiene materia particulada, para remover mediante la fuerza gravitacional, las partículas en suspensión más densas. El agua fluye con lentitud a través de un tanque de sedimentación, y de esta manera se retiene el tiempo suficiente para que las partículas más grandes se asienten en el fondo antes de que el agua clarificada salga del tanque por un vertedero en el extremo de salida. Es un método relativamente sencillo y económico que se puede aplicar en estanques redondos, cuadrados o rectangulares y se puede hacer después de una

coagulación/floculación (para aguas muy turbias) u omitirse por completo (con aguas de turbidez moderada*)^[4].

1.5 SIMULACIÓN PARA EL CONTROL DEL PROCESO DE COAGULACIÓN

1.5.1 Prueba de jarras. Es un ensayo ampliamente utilizado en la simulación del proceso de coagulación en una planta de tratamiento. Adicionalmente simula los procesos de floculación y sedimentación a escala de laboratorio, lo que hace de sus resultados tengan una gran aplicabilidad en el control y optimización de las unidades de tratamiento, así como para obtener los datos de diseño para el proyecto de nuevas unidades de potabilización del agua para consumo humano. La prueba de jarras se realiza, entre otros, con los propósitos de seleccionar el tipo de coagulación más efectivo, determinar la dosis óptima de coagulante, ajustar el pH, determinar la dosis de ayudas de coagulación; determinar los niveles óptimos de mezcla, gradientes de velocidad y tiempos de mezcla.

1.6 DESCRIPCIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE LA PLANTA DE POTABILIZACIÓN “LA COLINA” DEL MUNICIPIO DE PIEDECUESTA

1.6.1 Captación. El agua para consumo de la Comunidad de la zona urbana de Piedecuesta es tomada mediante captación lateral del Río de Oro (fuente superficial). En la bocatoma existen tres desarenadores con capacidad para captar 514 litros por segundo y están ubicadas a un (1) kilómetro de la Planta de Tratamiento.

1.6.2 Sistema de Aducción. El agua llega a la Planta por gravedad por dos tuberías de 14 y 18 pulgadas de diámetro.

* La turbidez moderada se considera de 5 a 20 unidades.

1.6.3 Medición de flujo. En la canaleta Parshall se hace la medición de caudal de agua cruda que ingresa a la Planta por medio de un caudalímetro de ultrasonido, Figura 2.

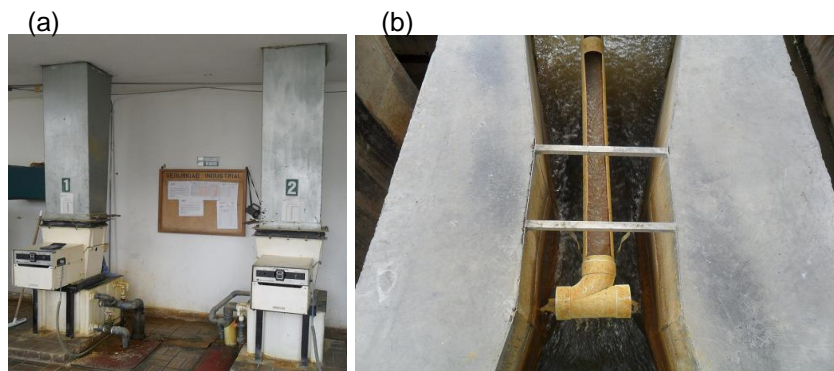
Figura 2. Medición por caudalímetro de ultrasonido



Fuente: El Autor

1.6.4 Dosificación de coagulante. Dos unidades dosificadoras en seco de tipo volumétrico de tornillo sinfín (ver Figura 3 a) controlan la dosis de coagulante (sulfato de aluminio granular Tipo B), la cual es conducida hasta la canaleta Parshall (ver Figura 3 b) donde ocurre el proceso de mezcla rápida* gracias a la turbulencia generada por el resalto hidráulico.

Figura 3. (a) Unidades dosificadoras de coagulante y (b) canaleta Parshall de la Planta de Potabilización de Piedecuesta

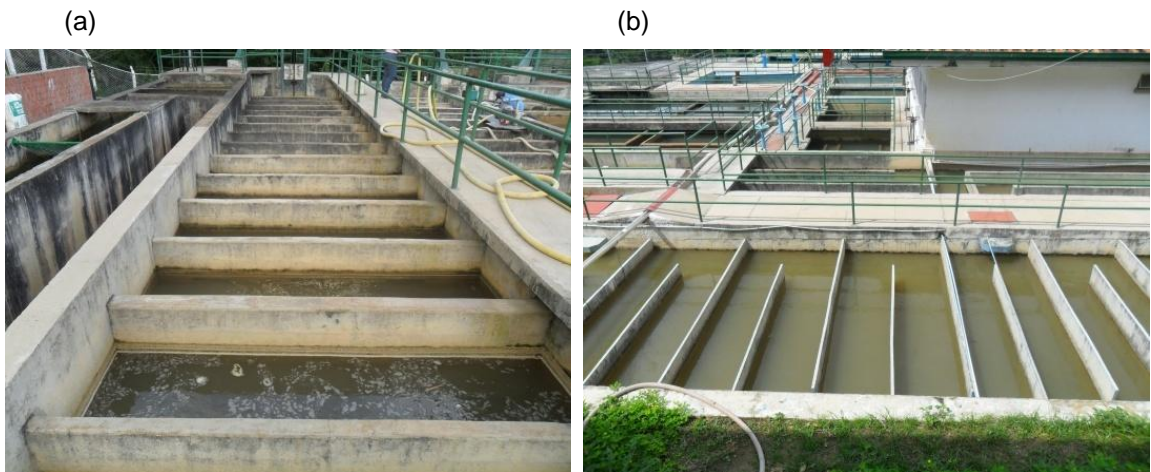


Fuente: El Autor

* Este proceso tiene como finalidad de que las reacciones de coagulación se den en la unidad de mezcla rápida como la canaleta Parshall y se produzca la coagulación y floculación en las condiciones óptimas.

1.6.5 Floculadores. Se cuenta con tres (3) floculadores hidráulicos dos (2) verticales (ver Figura 4 a) y uno horizontal (ver Figura 4 b). Por medio de ellos se realiza la agitación lenta del agua que aglutina las partículas más pequeñas en grandes denominadas flocs.

Figura 4. (a) Floculador vertical y (b) floculador horizontal

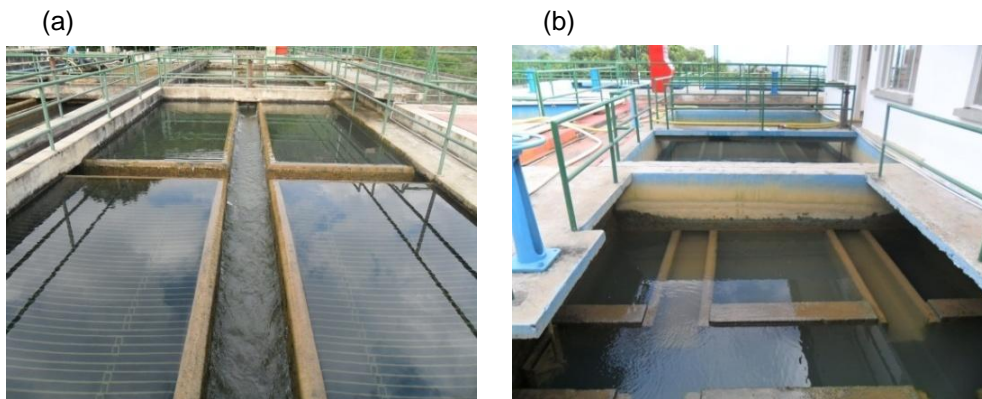


Fuente: El Autor

1.6.6 Sedimentadores. Cuenta con cinco (5) sedimentadores de flujo acelerado (Figura 5 a). El agua se separa de los flocs los cuales se decantan en el fondo de los tanques de sedimentación.

1.6.7 Filtros. En la planta de tratamiento de agua del municipio de Piedecuesta existen nueve (9) filtros de flujo con lecho dual de arena y antracita (Figura 5 b).

Figura 5. (a) Sedimentadores de flujo acelerado y (b) filtros de flujo con lecho dual de arena y antracita

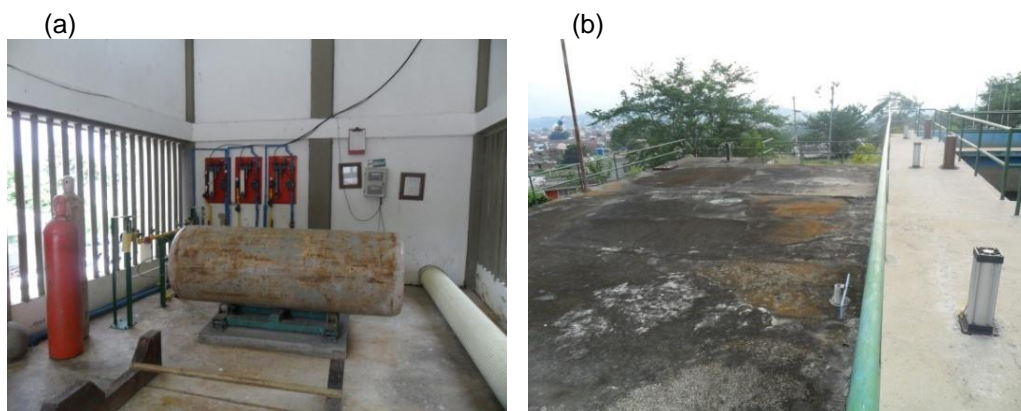


Fuente: El Autor

1.6.8 Dosificadores para la desinfección. Se utiliza cloro gaseoso y contenedores de una tonelada. Se cuenta con tres (3) cloradores marca WALLACE AND TIERNON (Figura 6 a).

1.6.9 Tanques de almacenamiento. En las instalaciones de la planta existen tres (3) tanques de almacenamiento (Figura 6 b). Tanque número 1 con capacidad de 700 metros cúbicos, tanque número 2 con capacidad de 800 metros cúbicos y tanque número 3 con capacidad de 3500 metros cúbicos.

Figura 6. (a) Dosificadores de cloro y (b) tanques de almacenamiento

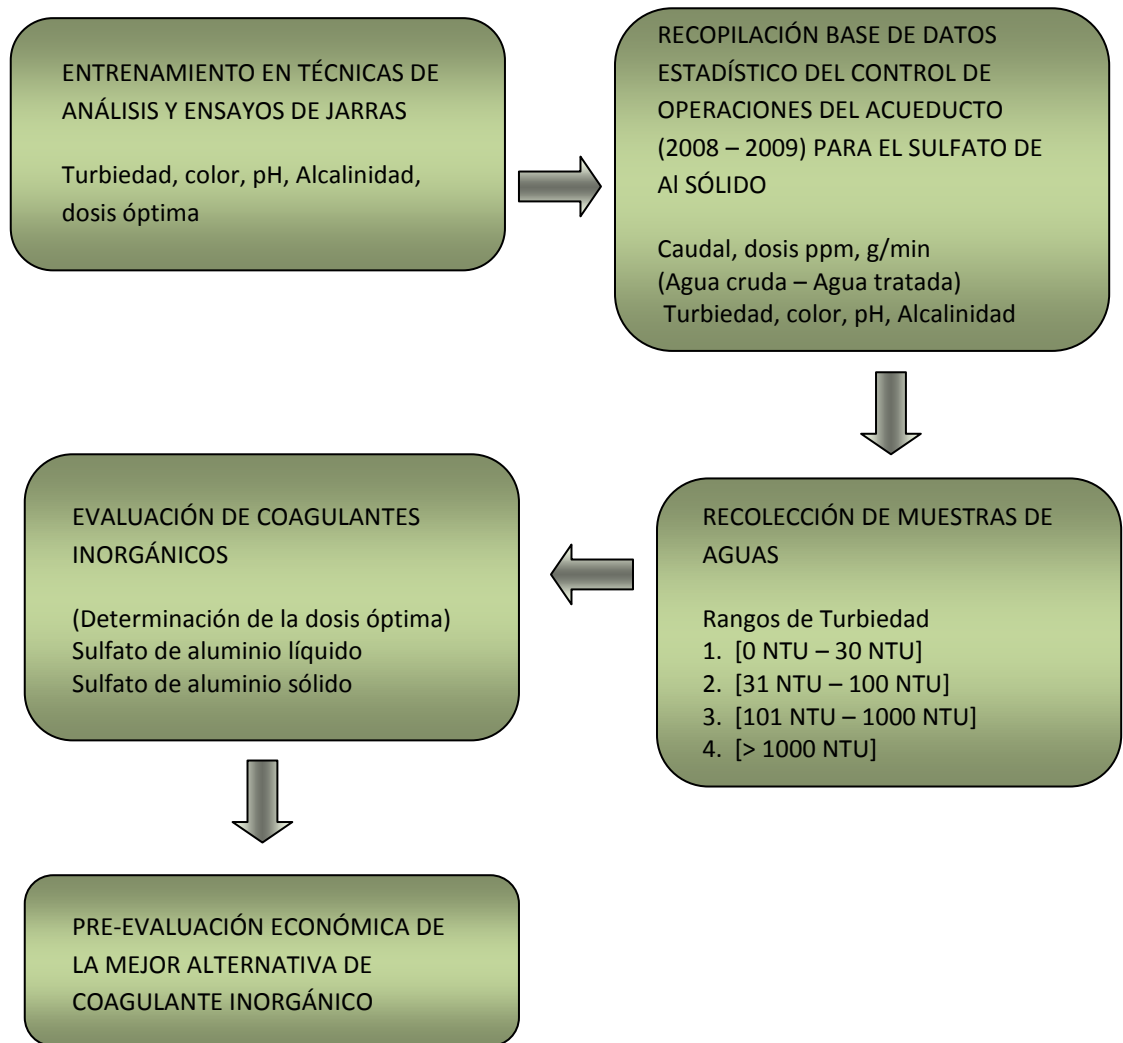


Fuente: El Autor

2. DESARROLLO EXPERIMENTAL

A continuación se presenta el diagrama de bloques con las etapas realizadas en la Planta de Potabilización La Colina de Piedecuesta para el estudio preliminar del uso de sulfato de aluminio líquido en el proceso de coagulación del agua.

Figura 7. Diagrama de bloques de la metodología desarrollada



Fuente: El Autor

2.1 ENTRENAMIENTO EN TÉCNICAS DE ANÁLISIS Y ENSAYOS DE JARRAS

En un tiempo de un mes aproximadamente se realizó un adiestramiento con la colaboración de los operadores de la Planta de Tratamiento del Acueducto de Piedecuesta en las técnicas y equipos empleados en los análisis de laboratorio que se efectúan rutinariamente. Frecuentemente se realizaron pruebas de jarras y se determinaron propiedades como turbiedad, alcalinidad, pH, color verdadero y aluminio residual. Estos procedimientos se desarrollaron según lo descrito en el Anexo B.

2.2 RECOPIACIÓN BASE DE DATOS ESTADÍSTICO DEL CONTROL DE OPERACIONES DEL ACUEDUCTO (2008 – 2009) PARA EL SULFATO DE AL SÓLIDO

Se realizó una recopilación de datos de acuerdo al historial que maneja la Planta de Tratamiento del Acueducto de Piedecuesta del control de operaciones con el objetivo de crear una base de datos digital sobre el comportamiento del sulfato de aluminio sólido tipo B como coagulante, los cuales se utilizaron como base para estimar los volúmenes de dosificación de la solución de trabajo (ver Anexo B) en los vasos de precipitados (volumen 1000ml) de la prueba de jarras.

2.3 RECOLECCIÓN DE MUESTRAS DE AGUAS

Las muestras de aguas utilizadas para la evaluación de los coagulantes inorgánicos fueron tomadas del río de Oro del cual se capta el agua que entra a la Planta de Tratamiento de Piedecuesta. Se tomaron 29 muestras de agua cruda en el periodo comprendido entre enero y junio de 2010 los intervalos de turbiedad que se presentan en la Tabla 1:

Tabla 1. Intervalos de turbiedad utilizados en la recolección de muestras de aguas.

NÚMERO TOTAL DE MUESTRAS DE AGUAS	INTERVALO DE TURBIEDADES
8	[0 NTU – 30 NTU]
8	[31 NTU – 100 NTU]
8	[101 NTU – 1000 NTU]
5	[> 1000 NTU]

Fuente: El Autor

2.4 EVALUACIÓN DE COAGULANTES INORGÁNICOS

En esta etapa experimental tuvo como objeto efectuar comparaciones entre los dos coagulantes inorgánicos, evaluando sus comportamientos por medio de la determinación de la dosis óptima, la cual permite encontrar los valores en la adición de los coagulantes al agua que cause la desestabilización más eficiente del material coloidal y promuevan la formación de un floc fácilmente sedimentable.

Los coagulantes inorgánicos que se utilizaron para realizar las comparaciones fueron: Sulfato de Aluminio Sólido tipo B (SASB) y Sulfato de Aluminio Líquido tipo B (SALB) suministrados por Sulfoquímica sa (ver Anexo C).

Para este análisis se utilizó el equipo PHIPPS & BIRD STIRRER modelo 7790-400 para Prueba de Jarras que consta de un set de seis (6) agitadores mecánicos controlados por un aparato que regula su velocidad simultáneamente y una lámpara de iluminación que se encuentra en la base donde soporta los vasos o “jarras” para el ensayo (Figura 8). Utilizando esta unidad se simulan las condiciones en las cuales se desarrollan los procesos de coagulación, floculación y sedimentación en el sistema de potabilización de la Planta de Tratamiento de Piedecuesta, las cuales son:

TMR (Tiempo de mezcla rápida) = 30 seg.

VMR (Velocidad de mezcla rápida) = 100 rpm

TML (Tiempo de mezcla lenta) = 15 - 20 min.

VML (Velocidad de mezcla lenta) = 40 rpm

TS (Tiempo de sedimentación) = 40 min

Figura 8. Montaje para la prueba de jarras



Fuente: El Autor

2.4.1 Determinación de la dosis óptima de coagulante

1. Se midió la turbiedad, el pH, el color verdadero y la alcalinidad del agua cruda.
2. Se vertieron porciones de 1 litro de agua cruda en 6 “jarras” o vasos de precipitado, se colocaron en la base del aparato de prueba de jarras haciéndolos coincidir con las paletas mecánicas, que a su vez se introdujeron en los vasos.
3. Se ajustó la unidad de mezcla a 100 rpm.
4. Inmediatamente del paso anterior se añadió a cada vaso de precipitado por medio de una pipeta, dosis de diferente concentración y progresivamente de la solución del coagulante al 1% de sulfato de aluminio (ver Anexo B).

5. Terminado el tiempo de mezcla rápida fijado, se disminuyó la velocidad de los agitadores mecánicos a 40 rpm y se permitió flocular la mezcla durante 15 minutos.
6. Una vez corrido el tiempo de floculación se detuvo la velocidad de las paletas de agitación, se retiraron de los vasos y se dejó sedimentar por un tiempo de 15 minutos durante los cuales se observó la apariencia y consistencia del floc y su velocidad de sedimentación.
7. Luego se tomaron muestras aproximadamente de 20 ml con una pipeta introduciéndola a 4 cm de profundidad para cada vaso de precipitado y se procedió a determinar la turbidez a cada muestra.
8. Posteriormente se determinaron el pH, color verdadero, alcalinidad y aluminio residual (ver Anexo B) a muestras de la jarra que arrojó los valores más bajos de turbidez.
9. Finalmente se procedió a graficar la turbiedad residual en [NTU] versus dosis de sulfato de aluminio suministrado en [ppm] ^[3].

2.5 PRE-EVALUACIÓN ECONÓMICA DE LA MEJOR ALTERNATIVA DE COAGULANTE INORGÁNICO

Teniendo en cuenta los valores de costos de los reactivos cotizados y enviados por Sulfoquímica sa, Tabla 2, se graficó los costos dosis óptima en [\$] de todas las muestras analizadas versus turbiedad en [NTU], evaluando la curva que mostró mejor costo beneficio en la administración del coagulante inorgánico.

Tabla 2. Costo de coagulante S.Q de 2010

Coagulante	Costo unitario (\$/Kg)	IVA (%)	Costo total (\$/Kg)
Sulfato de aluminio sólido B	655	16	759,8
Sulfato de aluminio líquido B	398	16	461,68

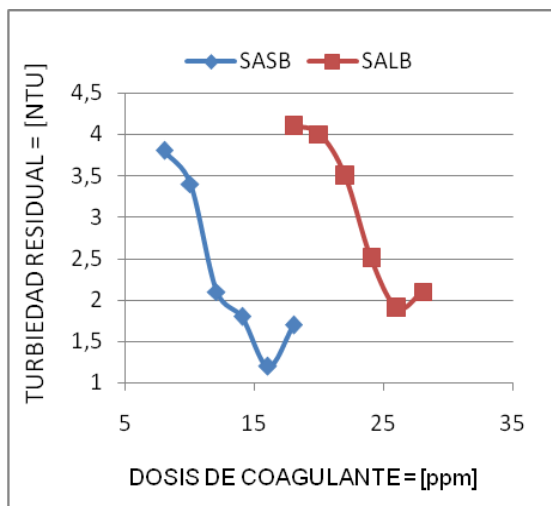
Fuente: Sulfoquímica sa

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Comportamiento de los coagulantes inorgánicos

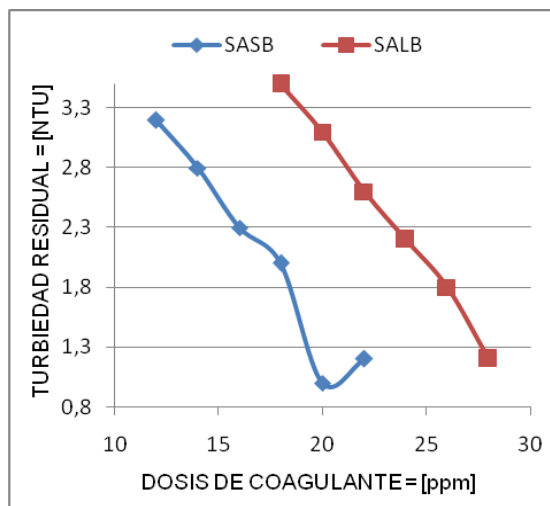
1. Ensayos de jarras para turbiedades entre [0-30 NTU]

Figura 9. Dosis óptima (Turb= 5,3 NTU)



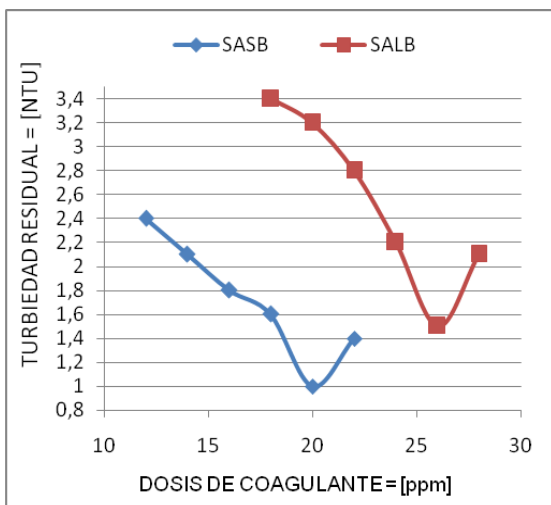
Fuente: El Autor

Figura 10. Dosis óptima (Turb= 8,5 NTU)



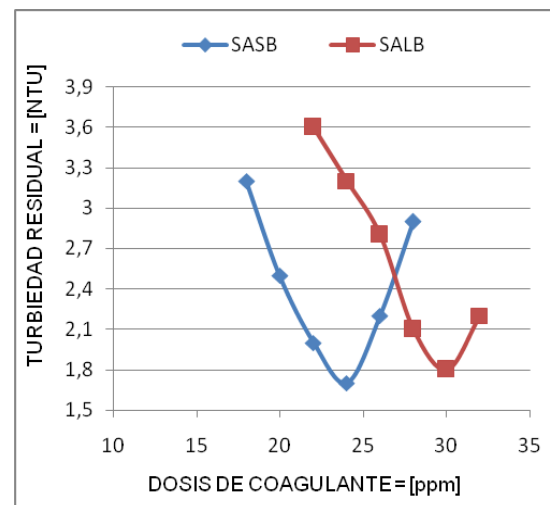
Fuente: El Autor

Figura 11. Dosis óptima (Turb= 10 NTU)



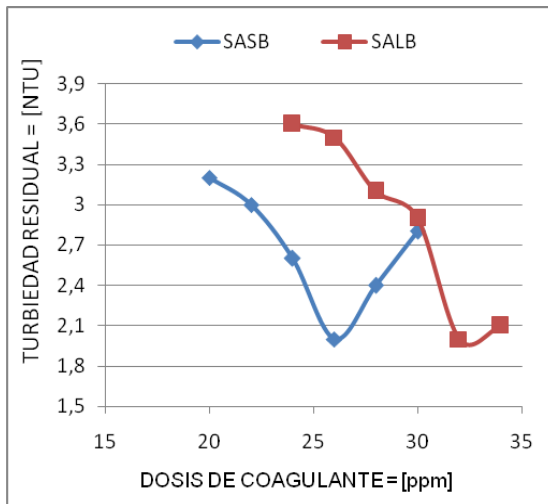
Fuente: El Autor

Figura 12. Dosis óptima (Turb= 12 NTU)



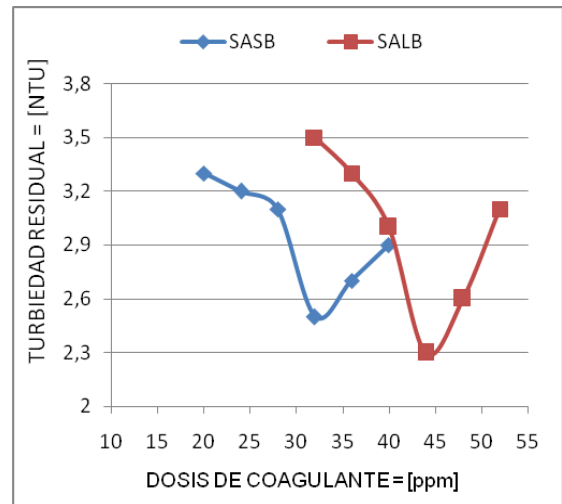
Fuente: El Autor

Figura 13. Dosis óptima (Turb= 19 NTU)



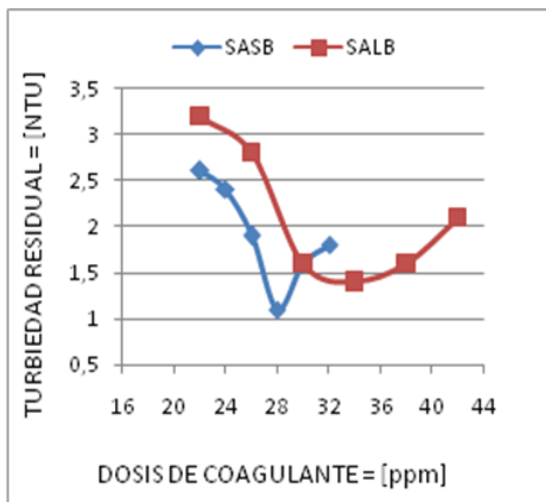
Fuente: El Autor

Figura 14. Dosis óptima (Turb= 20 NTU)



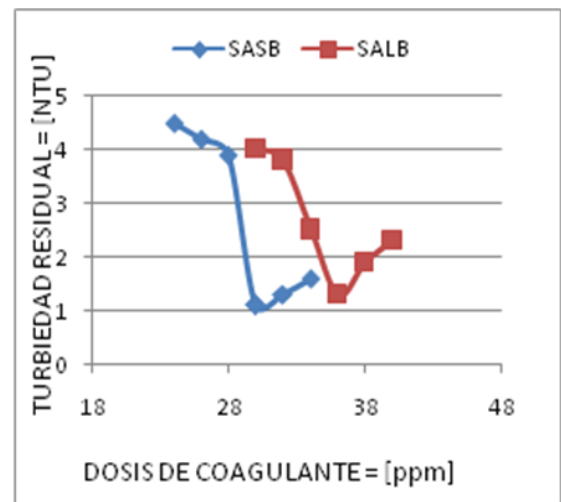
Fuente: El Autor

Figura 15. Dosis óptima (Turb= 23 NTU)



Fuente: El Autor

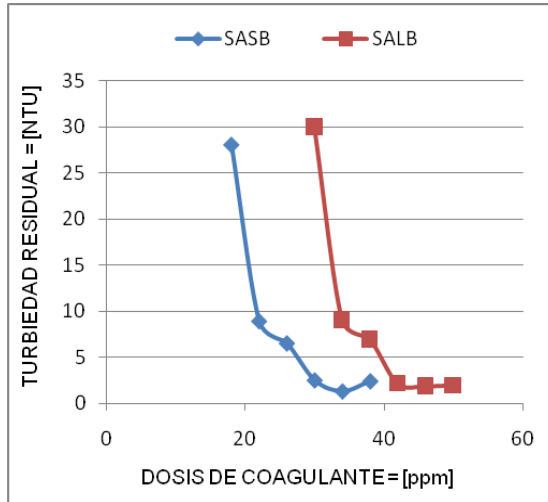
Figura 16. Dosis óptima (Turb= 30 NTU)



Fuente: El Autor

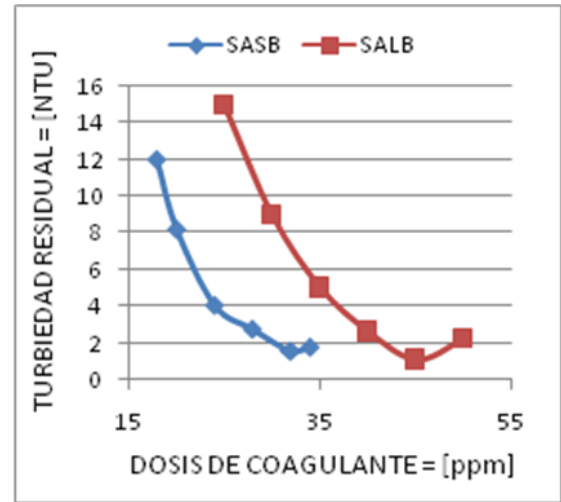
2. Ensayos de jarras para turbiedades entre [31-100 NTU]

Figura 17. Dosis óptima (Turb= 35 NTU)



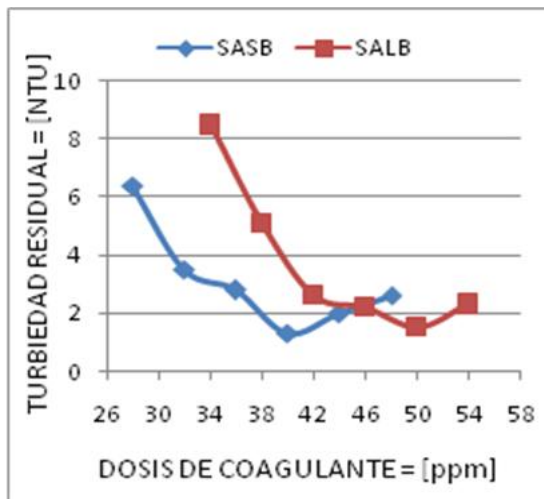
Fuente: El Autor

Figura 18. Dosis óptima (Turb= 40 NTU)



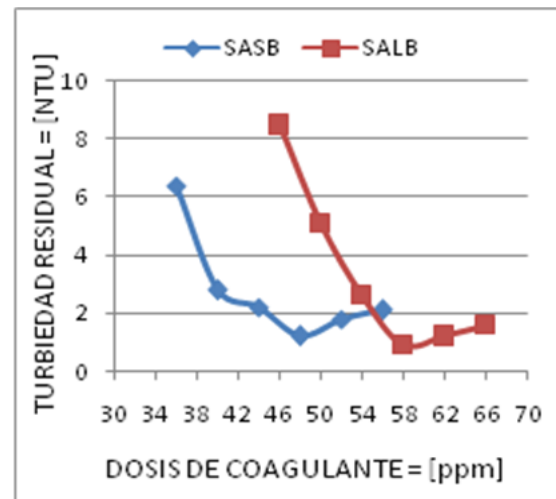
Fuente: El Autor

Figura 19. Dosis óptima (Turb= 50 NTU)



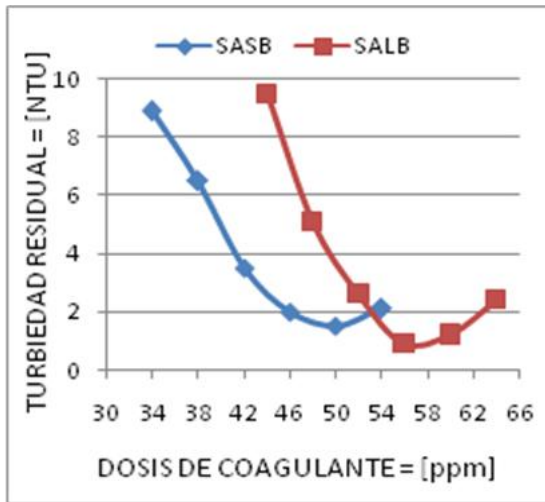
Fuente: El Autor

Figura 20. Dosis óptima (Turb= 60 NTU)



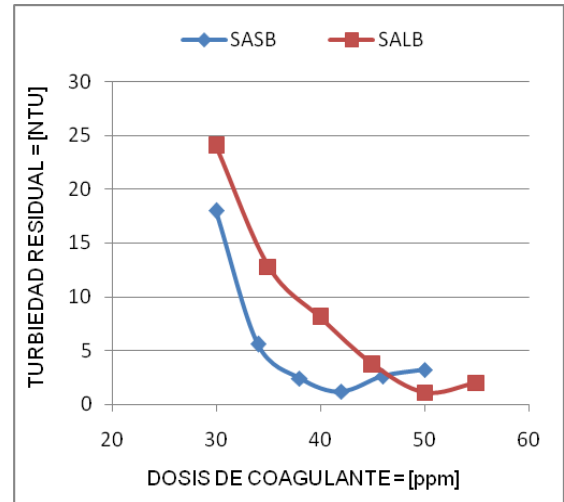
Fuente: El Autor

Figura 21. Dosis óptima (Turb= 63 NTU)



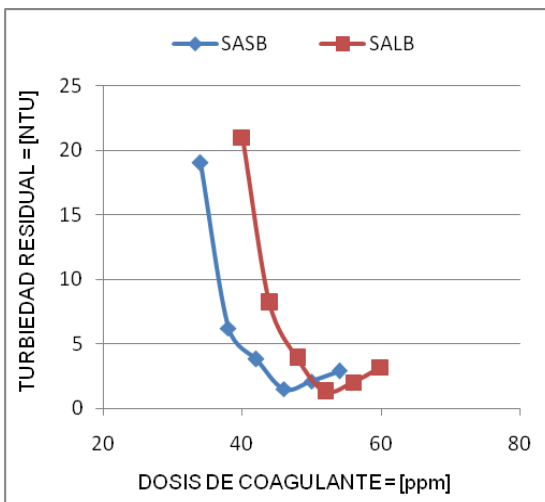
Fuente: El Autor

Figura 22. Dosis óptima (Turb= 70 NTU)



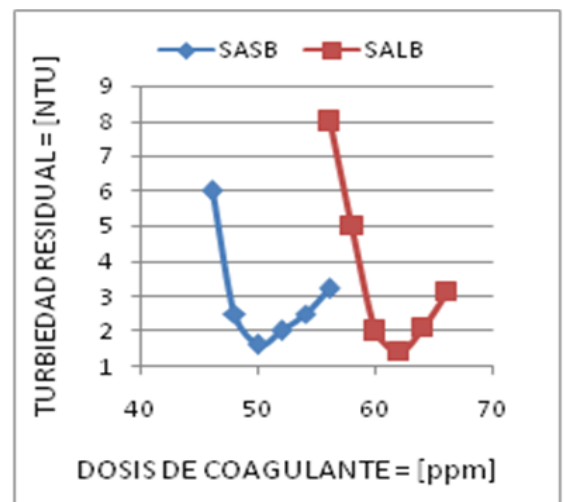
Fuente: El Autor

Figura 23. Dosis óptima (Turb= 80 NTU)



Fuente: El Autor

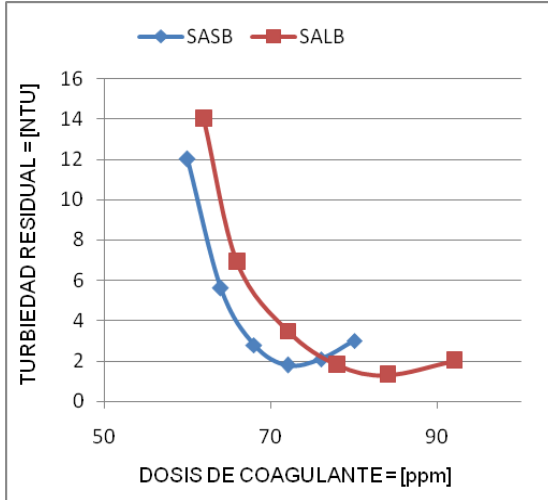
Figura 24. Dosis óptima (Turb= 90 NTU)



Fuente: El Autor

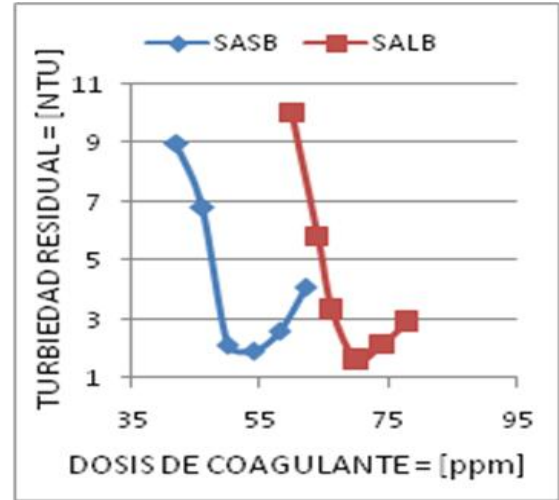
3. Ensayos de jarras para turbiedades entre [101-1000 NTU]

Figura 25. Dosis óptima (Turb= 250 NTU)



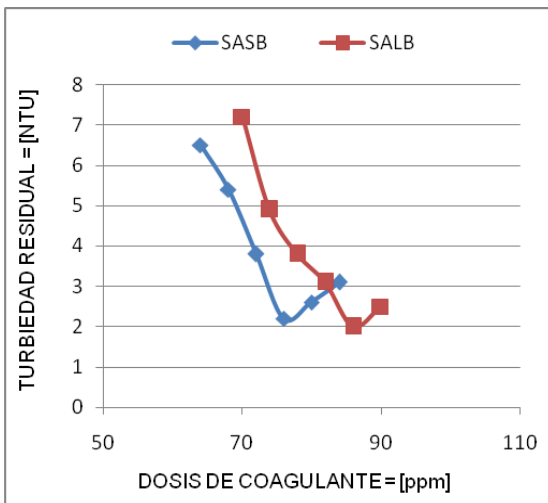
Fuente: El Autor

Figura 26. Dosis óptima (Turb= 300 NTU)



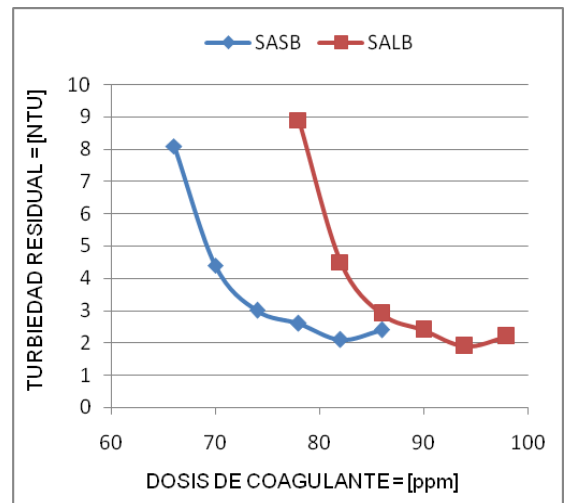
Fuente: El Autor

Figura 27. Dosis óptima (Turb= 370 NTU)



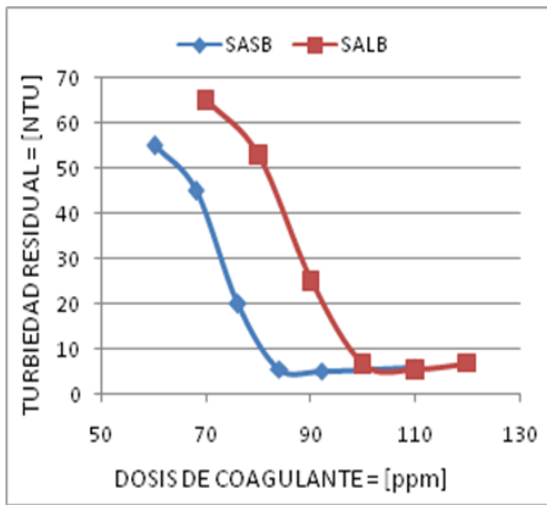
Fuente: El Autor

Figura 28. Dosis óptima (Turb= 500 NTU)



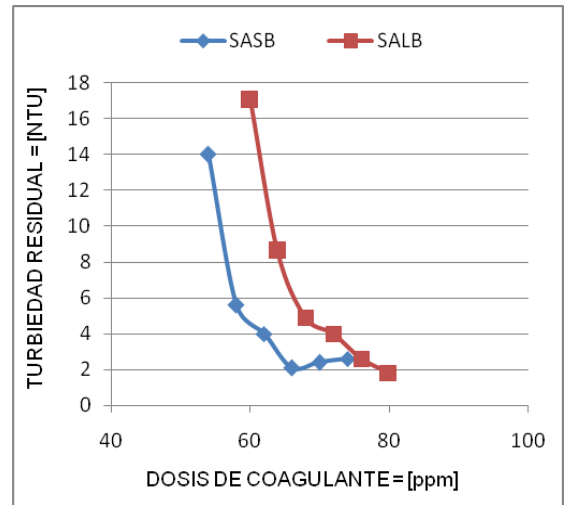
Fuente: El Autor

Figura 29. Dosis óptima (Turb= 600 NTU)



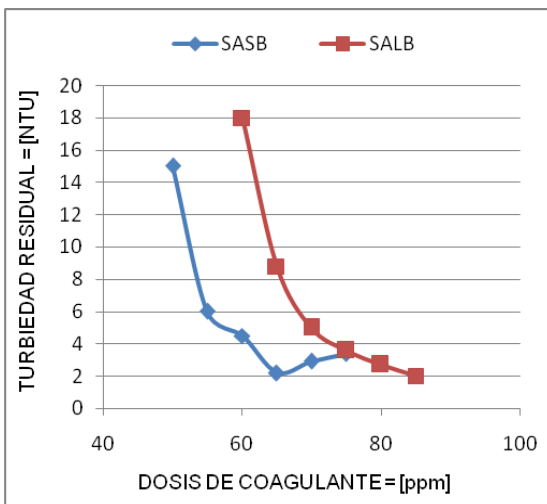
Fuente: El Autor

Figura 30. Dosis óptima (Turb= 700 NTU)



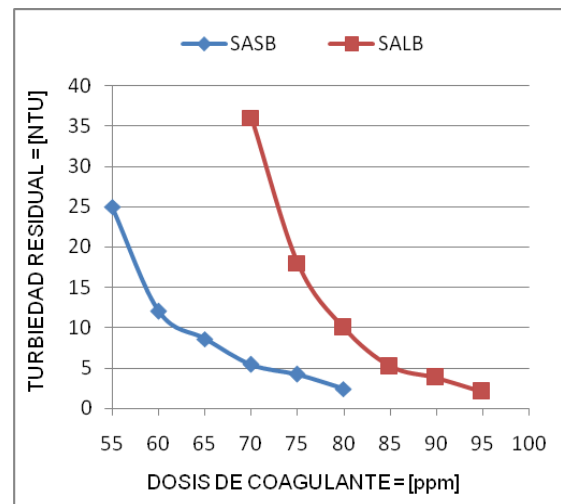
Fuente: El Autor

Figura 31. Dosis óptima (Turb= 720 NTU)



Fuente: El Autor

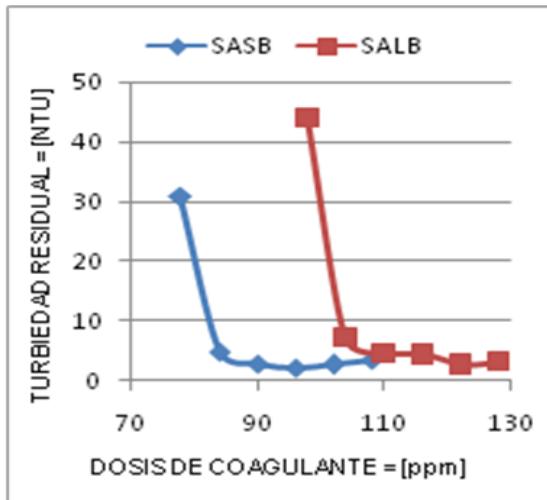
Figura 32. Dosis óptima (Turb= 850 NTU)



Fuente: El Autor

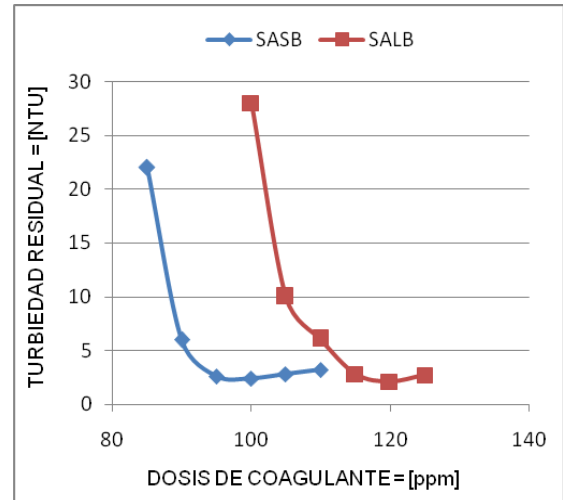
4. Ensayos de jarras para turbiedades > 1000 NTU

Figura 33. Dosis óptima (Turb= 1100NTU)



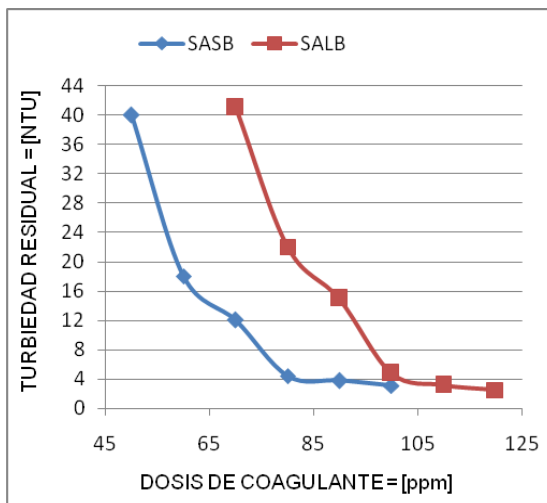
Fuente: El Autor

Figura 34. Dosis óptima (Turb= 1150NTU)



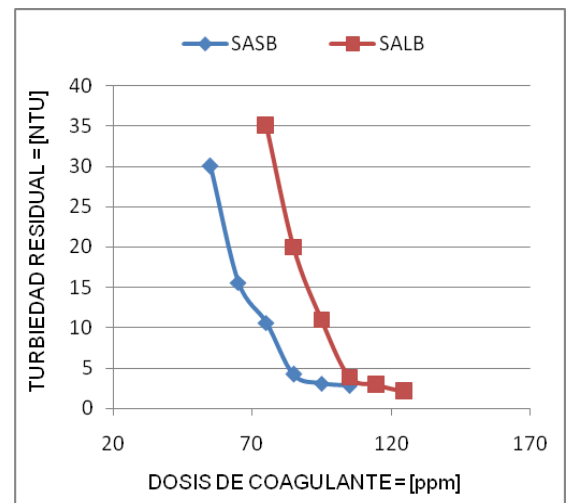
Fuente: El Autor

Figura 35. Dosis óptima (Turb= 1320NTU)



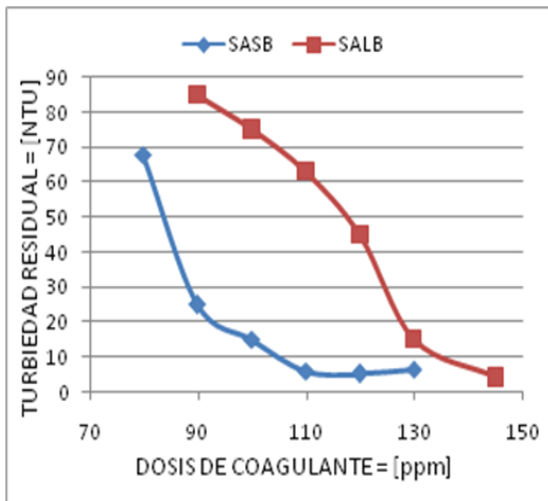
Fuente: El Autor

Figura 36. Dosis óptima (Turb= 1500NTU)



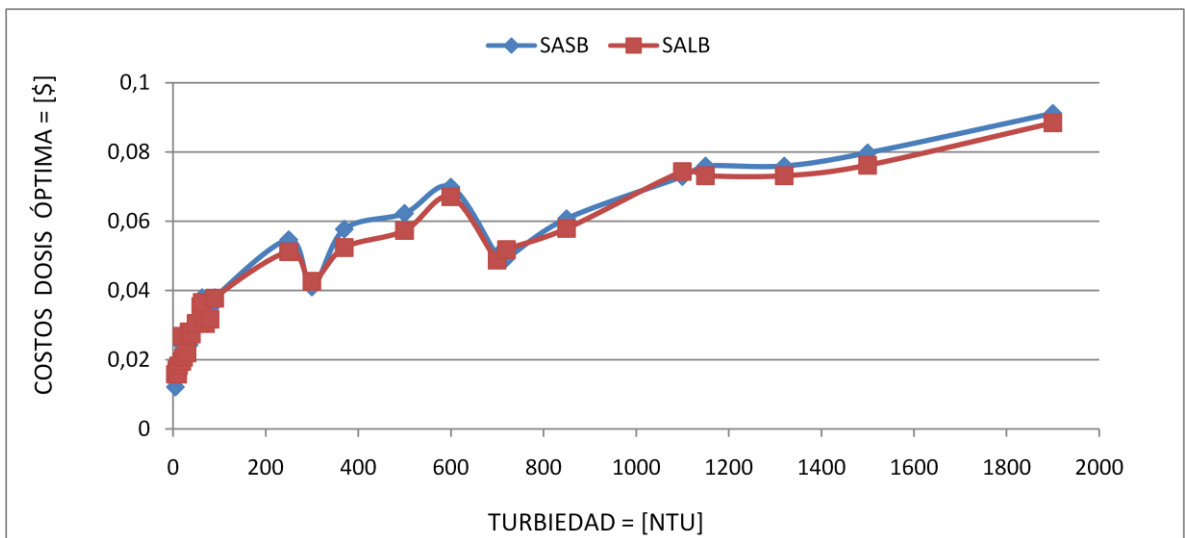
Fuente: El Autor

Figura 37. Dosis óptima (Turb= 1900NTU)



Fuente: El Autor

Figura 38. Comportamiento de costos coagulantes inorgánicos



Fuente: El Autor

Los resultados de las demás pruebas fisicoquímicas (pH, color, alcalinidad y aluminio residual) se muestran en el Anexo E.

3.1.1 Análisis de los comportamientos

Para muestras de 0 a 30 NTU se observa que el producto SALB presenta un buen comportamiento en la remoción de la turbiedad sin alejarse considerablemente de los valores determinados para el SASB con una diferencia promedio de 0,225 NTU. Esto quiere decir que el SASB para este intervalo de turbiedades presentó un valor promedio mayor en la remoción de la turbidez en comparación con el SALB. En cuanto a su dosificación óptima del SALB presenta una diferencia promedio de 7,5 ppm de consumo por encima del SASB.

Para muestras de 31 a 100 NTU se observa una mayor remoción de la turbidez por parte del producto SALB, mostrando valores cercanos a los arrojados por el SASB, con una diferencia promedio de “-0,1 NTU” (el signo negativo indica que en promedio los valores de turbidez para la jarra óptima del SALB fueron menores en 0,1 comparados con el SASB). En el consumo se observa una diferencia promedio de 10,125 ppm aproximadamente del SALB por encima del SASB.

Para muestras de 101 a 1000 NTU se observa en la remoción de la turbidez una mejor diferencia promedio, mostrando un valor de “-0,2125 NTU” por parte del SALB con respecto al SASB y en el consumo la diferencia promedio fue aproximadamente de 14,625 ppm por encima del SASB.

Para muestras mayores a 1000 NTU se observa que el SALB tiene una diferencia promedio de “-0,4 NTU” en la remoción de la turbidez con respecto al SASB y a su vez en el consumo la diferencia fue de 20 ppm aproximadamente.

En términos de costos de operación el SALB presenta mayor beneficio económico en las escalas de turbiedad examinadas ya que en un 62% aproximadamente de los ensayos realizados obtuvo el menor costo en la dosificación.

Según Anexo E la utilización del SALB cumple dentro de la normatividad colombiana ^[2] en los valores de las pruebas fisicoquímicas en la gran mayoría de ellas, adicionalmente mejorando estas variables en comparación con el SASB.

4. CONCLUSIONES

- Se demostró que el tratamiento fisicoquímico es una opción técnicamente factible y acertada para la potabilización del agua del Río de Oro captada en el acueducto de Piedecuesta, adicional a esto los resultados indican que el SALB presenta mayor viabilidad económica y operativa como coagulante (en comparación con el SASB).
- Con relación a la turbiedad el producto de mayor eficiencia es el SALB, debido a que en un 62% del número de ensayos obtuvo un mayor porcentaje de remoción en comparación con el SASB. Sin embargo este resultado también indica que el SASB se comporta de manera aceptable sin alejarse mucho en la evaluación de este parámetro.
- En algunos de los ensayos realizados con los dos coagulantes inorgánicos se obtuvieron concentraciones de aluminio residual mayores a 0,200 mg/L (valores por encima de los parámetros expuestos en la resolución 2115 de 2007^[2] de la legislación colombiana). Sin embargo a nivel de planta, el agua sedimentada que pasa por los filtros presenta concentraciones considerablemente menores a las obtenidas a escala de laboratorio mediante las pruebas de jarras.
- De acuerdo con los resultados de Color y Turbiedad, se puede decir que existe una relación directa entre la remoción de estos dos parámetros (a mayor remoción de turbiedad hay mayor remoción de color), siendo esto aplicable para el tratamiento fisicoquímico del agua en la planta de tratamiento del acueducto de Piedecuesta.
- Para el agua tratada del Río de Oro durante el periodo de tiempo que comprendió el estudio; el SALB presenta mejores resultados en su contenido

de aluminio residual, parámetro a tener en cuenta en términos ambientales y de la salud.

- En cuanto al manejo y la dosificación de los coagulantes, el SALB representa una mejor opción debido a su estado líquido que permite aplicar directamente a diferencia del SASB en el que es necesario solubilizarlo.

5. RECOMENDACIONES

- Se sugiere realizar la prueba a escala industrial por un tiempo determinado con el SALB, con el fin de obtener datos más representativos en condiciones variadas y concretar una evaluación técnica, económica y ambiental lo más acertada posible.
- El SALB presenta rentabilidad económica en cuanto a la dosificación necesaria frente al SASB ya que el precio del coagulante líquido es más bajo, sin embargo, requeriría de una inversión inicial que no haría rentable su utilización pero sería una inversión en mejoramiento en cuanto a salud ocupacional o seguridad para los operarios, manipulación más sencilla y fácil de controlar, fácil mantenimiento y disposición de repuestos permanentes y su precio tenderá a la baja por la mayor oferta de los proveedores debido al aumento del uso de los coagulantes líquidos en las plantas de tratamiento del país.
- Es de vital importancia mantener bien conservadas las muestras en el caso de no realizarse los análisis de inmediato con el fin de que sus propiedades fisicoquímicas no se alteren debido a las condiciones climáticas a las que se expongan.
- Se sugiere seguir los protocolos establecidos para el aseo de los instrumentos y equipos así como el de caracterización, para evitar posibles contaminaciones de las muestras a analizar en el laboratorio.

BIBLIOGRAFÍA

[1] COLOMBIA. MINISTERIO DE LA PROTECCIÓN SOCIAL. Decreto número 1575 (9, mayo, 2007). Por el cual se establece el Sistema para la Protección y Control de la Calidad del Agua para Consumo Humano. Diario Oficial. Bogotá D.C., 2007. No. 46.623. p. 1-15.

[2] COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL Y MINISTERIO DE PROTECCIÓN SOCIAL. Resolución número 2115 (22, junio, 2007). Por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano. Diario Oficial. Bogotá D.C., 2007. No. 46.679. p. 1-37.

[3] DELGADO, Carlos Alberto y MORENO, Jaime Alfonso. Evaluación del proceso de coagulación en la Planta de Tratamiento de Bosconia, utilizando coagulantes inorgánicos y polímeros orgánicos. Trabajo de grado Ingeniero Químico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química, 2009. 47p.

[4] HENRY, J. Glynn y HEINKE, Gary W. Ingeniería Ambiental. 2 ed. México: Prentice Hall, 1999. p. 395-401.

[5] MALDONADO YACTAYO, Víctor; BARRENECHEA MARTEL, Ada; AURAZO DE ZUMAETA, Margarita. CEPIS; OPS. Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida. Manual I: teoría. Tomo I. Lima, CEPIS, 2004, p. 213-219, 282.

[6] ROMERO ROJAS, Jairo Alberto. Acuiquímica. 1 ed. Bogotá D.C.: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, 1996. 226p.

[7] ARBOLEDA VALENCIA, Jorge. Teoría y práctica de la purificación del agua. 3 ed. Bogotá D.C.: Mc Graw Hill, 2000. Tomo 1, p 12-81,163-192

[8] FAIR, Gordon y GEYER, John. Purificación de aguas y tratamiento y remoción de aguas residuales. 13 ed. México: Editorial Limusa, 1997. p. 74-75, 375-385.

[9] MCGYEE, Terence. Abastecimiento de agua y alcantarillado. 6 ed. Bogota D.C.: Mc Graw Hill, 1999. p. 420-430.

[10] DAVIS, Mackenzie y MASTEN, Susan. Ingeniería y ciencias ambientales. 1 ed. México: Mc Graw Hill, 2005. p. 349-355.

[11] HUERTAS, Ana y QUINTERO, Henderson. 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 de grado Ingeniero Químico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química, 2007. 70p.

[12] STANDAR MHETODS; for the examination of water and wastewater. Producido por la APHA. 21 ed.2005.

ANEXOS

ANEXO A. MARCO CONCEPTUAL

Aducción

Es el proceso por el cual se conduce el agua cruda desde su captación a la planta de tratamiento.

Agua cruda

Agua que ha de ser tratada antes de convertirse en agua potable.

Agua apta para consumo humano

Agua que reúne los requisitos según los parámetros para la calidad del agua exigidos en el decreto 1575/2007^[1] y resolución 2115 de 2007^[2] de la legislación colombiana y la cual puede ser consumida por la población humana sin reparos para su salud.

Alcalinidad

La alcalinidad de un agua puede definirse como la medida de su contenido total de sustancias alcalinas (OH^-). En aguas naturales la alcalinidad es debida generalmente a la presencia de bicarbonatos, carbonatos e hidróxidos.

Ayudas de coagulación

Son sustancias químicas agregadas para optimizar la coagulación, formar un floc más fuerte y más sedimentable, superar caídas de temperatura que retardan la coagulación, reducir la cantidad de coagulante requerido y disminuir la cantidad de lodo producido.

Calidad del agua

Es el conjunto de parámetros físicos, químicos y biológicos propias del agua

Coagulación

Proceso químico por el cual se añade un coagulante al agua con el objeto de destruir la estabilidad de los coloides y promover su agregación.

Coagulante

Son aquellos compuestos de hierro o aluminio capaces de formar un floc y que pueden efectuar coagulación al ser añadidos al agua.

Coloide

Son partículas cuyo diámetro varía entre 1 y 100 nm, finamente divididos que no sedimentan por la simple acción de la gravedad, pero que pueden removerse del agua mediante coagulación, filtración o acción biológica.

Color Aparente

Es el color natural que incluye no solamente el color de las sustancias en solución y coloidales sino también el color debido al material suspendido. Se determina sobre la muestra sin filtración previa.

Color Verdadero

Es el color de la muestra de agua una vez que su turbidez ha sido removida.

Conductividad eléctrica

La conductividad del agua es una expresión numérica de su habilidad para transportar una corriente eléctrica.

Dosificación

Proceso por el cual se suministra el coagulante a la planta de tratamiento de agua por medio de dosificadores.

Dosis óptima

Concentración óptima que produce la mayor eficiencia del coagulante en el proceso de coagulación, determinada y evaluada en el ensayo de jarras.

Filtración

Operación unitaria utilizada para remover las partículas de tamaño pequeño que no alcanzaron a ser removidas en los procesos de coagulación, floculación y sedimentación de la clarificación del agua.

Floc

Masa pequeña que surge mediante el crecimiento de partículas coaguladas donde se espera que su peso específico supere a la del agua y pueda precipitar y sedimentar.

Floculación

Proceso físico de mezcla rápida y lenta, por medio del cual se incrementa la posibilidad de choque entre partículas y por consiguiente la formación del floc.

pH

Término con el que se expresa la concentración del ion hidrógeno y se usa generalmente para expresar la intensidad de la condición ácida o alcalina de una solución, sin que esto quiera decir que mida la acidez total o la alcalinidad total. En la clarificación de aguas es un factor que debe considerarse con respecto a la coagulación química.

Polielectrolitos

Son compuestos orgánicos sintéticos que tienen la habilidad de causar la agregación de suelos y sólidos, finamente divididos, en suspensiones acuosas.

Planta de tratamiento

Una planta de tratamiento es una secuencia de operaciones o procesos unitarios, convenientemente seleccionados con el fin de remover totalmente los contaminantes microbiológicos presentes en el agua cruda y parcialmente los físicos y químicos, hasta llevarlos a los límites aceptables estipulados por las normas.

Prueba de jarras

Es un ensayo de laboratorio para el control del proceso de coagulación, floculación y sedimentación. Esta simulación de estos procesos se realiza, entre otros, con el propósito de evaluar la dosis óptima de coagulante.

Sedimentación

Es una operación unitaria de transferencia de sólidos que consiste en promover condiciones de reposo en el agua, para remover, mediante la fuerza gravitacional, las partículas en suspensión más densas. Este proceso se realiza en los desarenadores, presedimentadores, sedimentadores y decantadores; en estos últimos, con el auxilio de la coagulación.

Tratamiento

Son los procesos y operaciones aplicadas a la clarificación de un agua cruda, con el fin de modificar sus parámetros organolépticos, físicos, químicos y microbiológicos de acuerdo a la legislación colombiana relativa al agua para el consumo humano.

Turbiedad

Es la propiedad óptica causado por la dispersión e interferencia de los rayos luminosos que pasan a través de una muestra de agua y es función del número, tamaño y forma de las partículas o materiales en suspensión.

ANEXO B. MÉTODOS ANALÍTICOS

DETERMINACIÓN DE LA TURBIEDAD

1. Encender el equipo (Turbidímetro).
2. Introducir el primer patrón dentro del equipo iniciando con el menor y colocando el tapón.
3. Limpiar la celda antes de introducirla con la muestra.
4. Ajustar la lectura entre 0,2 y 1 NTU (posición 1).
5. Introducir la muestra y leer, si la turbiedad es mayor a 1 UNT (la aguja no se mueve), cambia de patrón (6,8), y repetir paso 3-4-5 hasta que el valor de la lectura entre en el rango del patrón.

Figura 39. Turbidímetro HACH 2100 A



Fuente: El Autor

Nota:

- En el caso de tener que utilizar los patrones 82 y 500 (turbiedades mayores) utilizar el “resalto” para las lecturas.
- Para turbiedades con valores mayores a 1000 NTU, hacer diluciones en agua destilada y multiplicar el resultado del equipo por el factor de dilución.

DETERMINACIÓN DEL PH

1. Tomar una muestra representativa en un vaso de precipitado de 100 ml.
2. Lavar el electrodo con agua destilada e introducirlo en la muestra.
3. Oprimir el botón de encendido y el botón Read.
4. Leer directamente cuando se establezca la lectura en el pHmetro y expresar en unidades de pH.

Nota:

- Lavar con agua destilada después de cada lectura el electrodo y sumergirlo en KCl 3M y apagar el equipo.

Figura 40. PH-metro Mettler Toledo.



Fuente: El Autor

DETERMINACIÓN DE LA ALCALINIDAD TOTAL

1. Tomar 50 ml de muestra en un vaso precipitado de 100 ml.
2. Agregar 3-4 gotas de verde bromocresol.
3. Titular con ácido sulfúrico 0,02N, hasta que vire (azul a amarillo).
4. Tomar la lectura de mililitros de ácido consumido.
5. Calcular la alcalinidad total por medio de la siguiente fórmula:

$$\text{mgCaCO}_3 / \text{l} = \frac{\text{Vol.H}_2\text{SO}_4 * \text{N} * 50 * 1000}{\text{Vol. MUESTRA}}$$

Figura 41. Titulador Electrométrico Metrohm



Fuente: El Autor

Nota:

- Si se toman 50 ml de muestra se puede reducir la ecuación a la siguiente fórmula:

$$\text{Alcalinidad mgCaCO}_3 / \text{l} = A * 20$$

Donde:

A: Volumen del ácido estándar gastado

DETERMINACIÓN DEL COLOR VERDADERO

1. Filtrar una muestra representativa. Mínimo 25 ml.
2. Encender el espectrofotómetro HACH DR-2800.
3. Ingrese el método 120 o ajustar longitud de onda en 455 nm.
4. Ajustar el blanco con agua destilada y presionar CERO y leer.
5. Trasvasar la muestra a la celda del equipo hasta el aforo de llenado (10 ml) y realizar la lectura.

Figura 42. Espectrofotómetro HACH DR-2800



Fuente: El Autor

Nota:

- Verificar que la celda del equipo esté limpia y seca antes de introducirla.
- La lectura es directa y los resultados se expresan en unidades platino cobalto (UPC).
- Hacer dilución para valores mayores de 500 UPC.

DETERMINACIÓN DEL ALUMINIO RESIDUAL POR EL MÉTODO ESPECTROFOTOMÉTRICO (ERIOCROMO CIANINA R)

1. Filtrar aproximadamente 80 ml de la muestra con un filtro de membrana 0,45 μm .
2. Tomar 25 ml de la muestra en un matraz, añada 5 gotas de anaranjado de metilo y valorar con ácido sulfúrico 0,02N hasta un color rosa tenue, tome lectura y descarte la muestra.
3. Tomar dos muestras similares, añadir la misma cantidad de ácido valorado más 1ml de exceso.
4. Añadir 1 ml de solución EDTA a una de las dos muestras (servirá de blanco).
5. Añadir a ambas muestras 1 ml de ácido ascórbico (recién preparado).
6. Finalmente se les adiciona a ambas muestras 10 ml de reactivo tampón y 5 ml de reactivo de tinción de trabajo.
7. Aforar a 50 ml con agua destilada, mezclar inmediatamente y dejar reposar de 5 a 10 minutos.
8. Leer la concentración del aluminio en la muestra utilizando el espectrofotómetro HACH DR-2800 método aluminio residual a una longitud de onda de 535 nm.

Nota:

- Si se deja reposar más de 15 minutos empieza a desaparecer el color.
- La prueba es directa en el espectrofotómetro y se expresa en mg/l de Al^{+++} residual.

PREPARACIÓN DE REACTIVOS QUÍMICOS

REACTIVOS QUÍMICOS PARA DETERMINACIÓN DE ALCALINIDAD TOTAL

Solución H_2SO_4 0,02 N: Tomar 100 ml de H_2SO_4 0,1 N se lleva a 500 ml con agua destilada.

Indicador de verde bromocresol: Tomar 0,1 g de verde de bromocresol en 100 ml de Etanol al 20%. Guardar en recipiente oscuro.

REACTIVOS QUÍMICOS PARA DETERMINACIÓN DE ALUMINIO RESIDUAL

Solución de ácido ascórbico: diluir 1,0 g de ácido ascórbico a 100 ml de agua destilada.

Nota: Recomendable prepararla diariamente.

Reactivo tampón: disolver 136 g de acetato de sodio trihidratado y 40 ml de solución de ácido acético 1 N y aforar a 1000 ml de agua destilada.

Solución de tinción de reserva: diluir 100 mg de eriocromo cianina a 100 ml de agua destilada.

Nota:

- Esta solución habrá de tener un pH aproximadamente de 2,9.
- Esta solución es estable por 1 año.

Solución de tinción de trabajo: tomar 100 ml de solución de tinción de reserva y aforar a 1L de agua destilada.

Nota: esta solución es estable durante 6 meses.

Solución indicadora de anaranjado de metilo: disolver 0,04 g de anaranjado de metilo en 100 ml de etanol (20%).

Solución de EDTA 0,01 M: Tomar 3,722 g de EDTA y llevar a 1L de agua destilada.

REACTIVOS QUÍMICOS PARA LAS PRUEBAS DE JARRAS

Solución de trabajo SASB (1% p/v): pesar 10 g de sulfato de aluminio sólido tipo B y llevar a 1 L de agua.

Nota:

- Agitar siempre antes de utilizar.
- El tiempo de preservación de esta solución es de 8 horas.

Solución de trabajo SALB (1% v/v): tomar 2 ml de sulfato de aluminio líquido tipo B y llevar a 200 ml de agua y agitar.

ANEXO C. FICHAS TÉCNICAS DE LOS SULFATOS DE ALUMINIO TIPO B, LÍQUIDO Y SÓLIDO



Sulfato de Aluminio Líquido

Ficha Técnica del Producto

Propiedades Químicas (Norma NTC 531 5ª revisión)

Tabla 3. Ficha técnica de Sulfato de Aluminio Líquido Tipo B

Parámetro	Libre de Hierro*1	Grado A	Grado B
Fórmula Química	$Al_2(SO_4)_3$ (a)	$Al_2(SO_4)_3$ (a)	$Al_2(SO_4)_3$ (a)
Contenido de Alúmina	8,20% Al_2O_3 mín.	8,0% Al_2O_3 mín.	7,30% Al_2O_3 mín.
Contenido de Hierro	0,004% Fe_2O_3 máx.	0,4% Fe_2O_3 máx.	1,2% Fe_2O_3 máx.
Contenido de Insolubles	0,05% máx.	0,1% máx.	0,1% máx.
Basicidad	0,025% Al_2O_3 mín.	*2	*2
Densidad	1,324 – 1,332 g/ml	1,315 – 1,334 g/ml	1,320 – 1,335 g/ml
*1 Este producto satisface las necesidades del sulfato grado papel.			
*2 La basicidad es un acuerdo entre el cliente y el proveedor			

Fuente: SULFOQUIMICA sa

Condiciones de Manejo

El producto debe ser almacenado y conducido empleando acero inoxidable, fibra de vidrio, PVC, Polietileno o cualquier otro material termoplástico. También es compatible con EPDM, Caucho Natural y Vitón. El producto no debe ponerse en contacto con materiales ferrosos ni poliuretano.

Es deseable que el Sulfato de Aluminio Líquido sea dosificado como se entrega o diluido hasta un 50%; concentraciones menores pueden ser utilizadas con el apoyo técnico de Sulfoquímica. Para la dosificación exacta y uniforme, debe ser usada una bomba de desplazamiento positivo.

El producto no se deteriora con el tiempo mientras sea manejado bajo las condiciones explicadas.

Precauciones y Seguridad

El producto no presenta alto riesgo en su manejo pero, por ser una sal ácida debe tratarse con cuidado. Se recomienda el uso de guantes y gafas protectoras.

En los ojos y mucosas causa irritación; en caso de contacto debe enjuagarse con agua abundante.

El producto no emite gases y por lo tanto no causa efectos nocivos al ser inhalado.



Sulfato de Aluminio Sólido

Ficha Técnica del Producto

Propiedades Químicas (Norma NTC 531 5ª revisión)

Tabla 4. Ficha técnica de Sulfato de Aluminio Sólido Tipo B

Parámetro	Libre de Hierro ¹	Libre de Hierro Impalpable ¹	Grado A	Grado B	Grado B Polvo
Fórmula Química	$Al_2(SO_4)_3 \cdot 14.3H_2O$		$Al_2(SO_4)_3 \cdot 14.3H_2O$	$Al_2(SO_4)_3 \cdot 14.3H_2O$	
Alúmina	17,00% Al_2O_3 mín.		17,00% Al_2O_3 mín.	15,2% Al_2O_3 mín.	
Hierro	0,008% Fe_2O_3 máx.		0,75% Fe_2O_3 máx.	1,2% Fe_2O_3 máx.	
Insolubles	0,1% máx.		0,5% máx.	8,0% máx.	
Basicidad	0,05% Al_2O_3 mín.		0,05% Al_2O_3 mín.	0,05% Al_2O_3 mín.	
Granulometría (US Std.)					
Pasa 4	100%				
Pasa 10	90% mín.				
Pasa 100	10% máx.	90% mín.			
*1 Este producto satisface las necesidades del sulfato de aluminio grado papel.					

Fuente: SULFOQUIMICA sa

Condiciones de Manejo

El producto, empacado en sacos de polipropileno de 25kg y 50kg para los productos grado B), debe ser almacenado en un área seca, protegido de la intemperie.

Por ser moderadamente higroscópico, el Sulfato de Aluminio Sólido debe ser protegido de la humedad mientras se está utilizando con el fin de evitar empastamientos que dificultan su manejo.

El producto no se deteriora con el tiempo mientras sea manejado bajo las condiciones explicadas.

Precauciones y Seguridad

El producto no presenta alto riesgo en su manejo pero, por ser una sal ácida debe tratarse con cuidado. Se recomienda el uso de guantes, gafas protectoras y mascarillas para evitar inhalar el material fino.

En los ojos y mucosas causa irritación; en caso de contacto debe enjuagarse con agua abundante.



ANEXO D. MARCO LEGAL

CALIDAD DEL AGUA

Los criterios organolépticos físicos y químicos de la calidad del agua potable en las plantas de tratamiento de los municipios se rigen actual y principalmente de acuerdo a los valores permitidos en el Decreto 1575 de 2007^[1] y la resolución 2115 de 2007^[2].

Las características fisicoquímicas mínimas del agua potable y de consumo humano que se consignan en el decreto son:

Capítulo II

Artículo 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 5. Características Físicas

CARACTERÍSTICAS	EXPRESADAS EN	VALOR MAXIMO ACEPTABLE
Color aparente	Unidades de Platino Cobalto (UPC)	15
Olor y sabor	Aceptable o no aceptable	Aceptable
Turbiedad	Unidades Nefelométricas de turbiedad (UNT)	2

Fuente: Resolución 2115 de 2007^[2].

Artículo 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.

Artículo 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.

Artículo 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 6. Características químicas que tienen reconocido 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 de 2007^[2].

Artículo 7°. *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 humana se señalan a continuación:

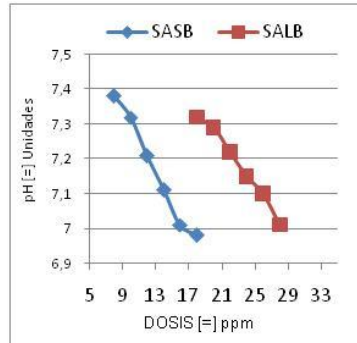
Tabla 7. Características químicas que tienen consecuencias económicas e indirectas sobre la salud humana

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

Fuente: Resolución 2115 de 2007^[2].

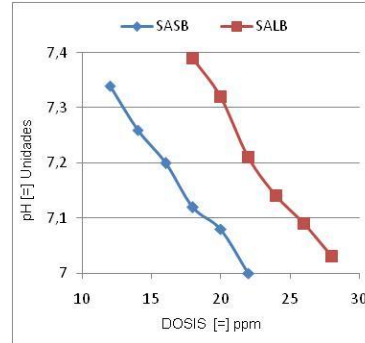
ANEXO E. RESULTADOS DE PRUEBAS FÍSICOQUÍMICAS

Figura 43. pH óptimo (Turb= 5,3 NTU)



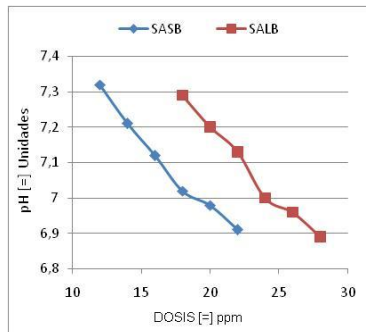
Fuente: El Autor

Figura 44. pH óptimo (Turb= 8,5 NTU)



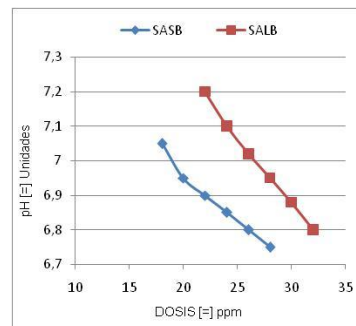
Fuente: El Autor

Figura 45. pH óptimo (Turb= 10 NTU)



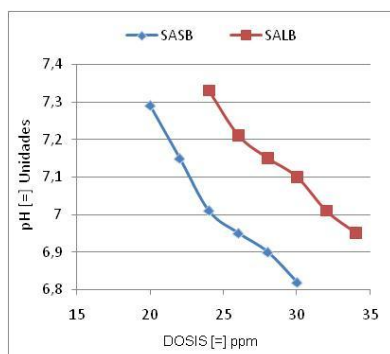
Fuente: El Autor

Figura 46. pH óptimo (Turb= 12 NTU)



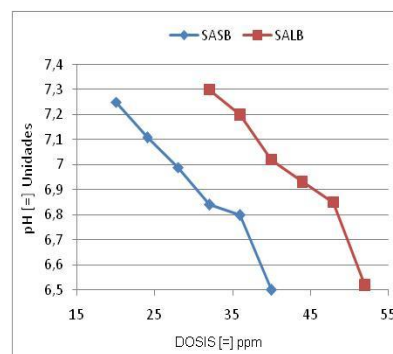
Fuente: El Autor

Figura 47. pH óptimo (Turb= 19 NTU)



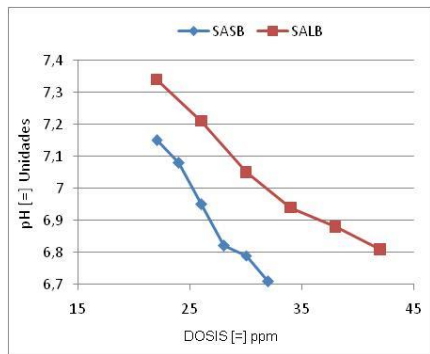
Fuente: El Autor

Figura 48. pH óptimo (Turb= 20 NTU)



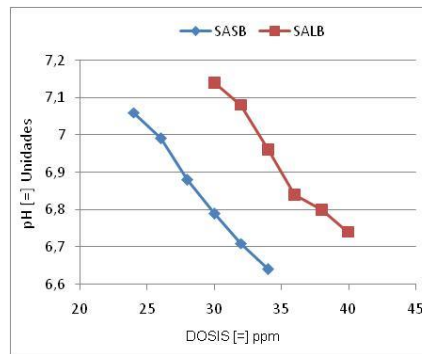
Fuente: El Autor

Figura 49. pH óptimo (Turb= 23 NTU)



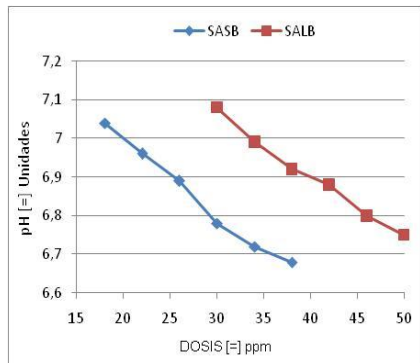
Fuente: El Autor

Figura 50. pH óptimo (Turb= 30 NTU)



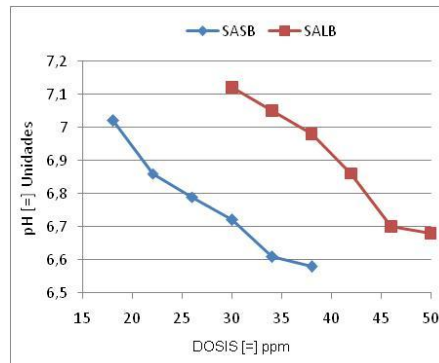
Fuente: El Autor

Figura 51. pH óptimo (Turb= 35 NTU)



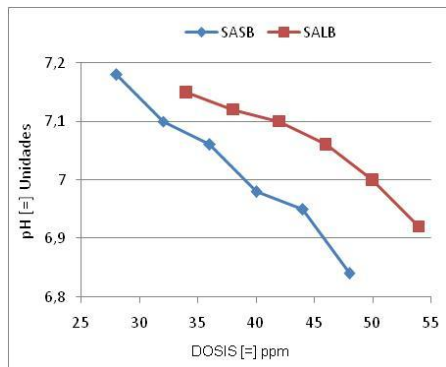
Fuente: El Autor

Figura 52. pH óptimo (Turb= 40 NTU)



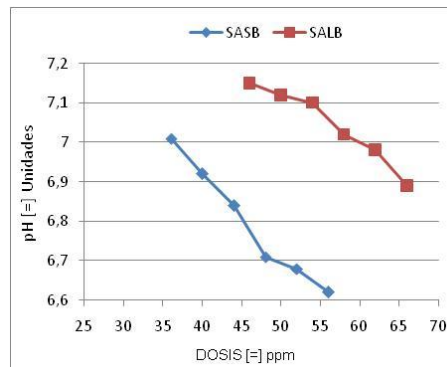
Fuente: El Autor

Figura 53. pH óptimo (Turb= 50 NTU)



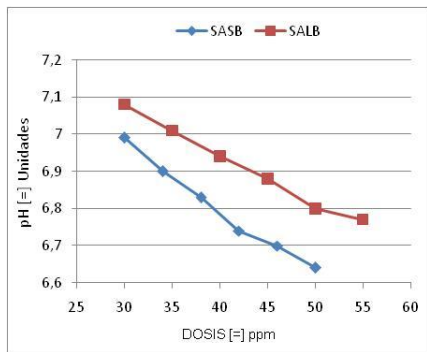
Fuente: El Autor

Figura 54. pH óptimo (Turb= 60 NTU)



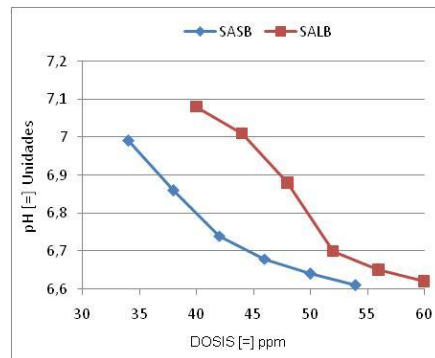
Fuente: El Autor

Figura 55. pH óptimo (Turb= 70 NTU)



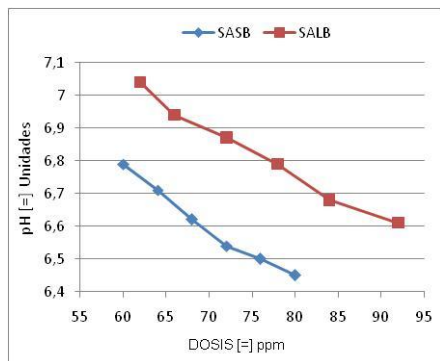
Fuente: El Autor

Figura 56. pH óptimo (Turb= 80 NTU)



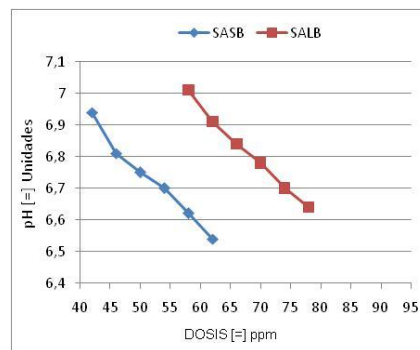
Fuente: El Autor

Figura 57. pH óptimo (Turb= 250 NTU)



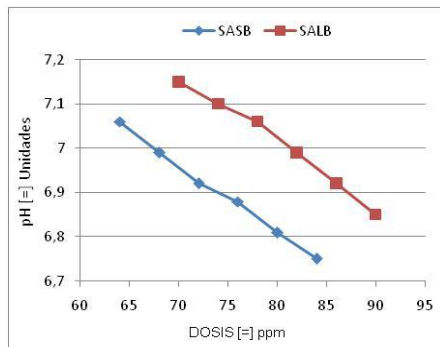
Fuente: El Autor

Figura 58. pH óptimo (Turb= 300 NTU)



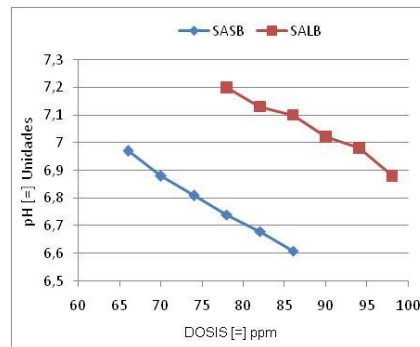
Fuente: El Autor

Figura 59. pH óptimo (Turb= 370 NTU)



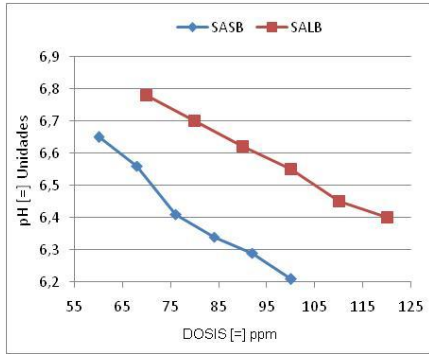
Fuente: El Autor

Figura 60. pH óptimo (Turb= 500 NTU)



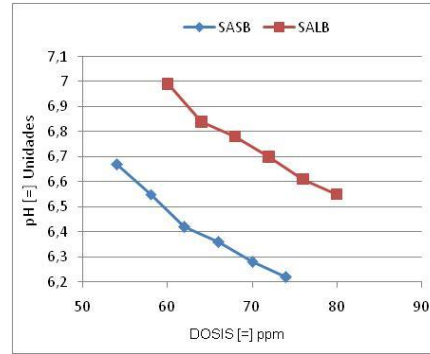
Fuente: El Autor

Figura 61. pH óptimo (Turb= 600 NTU)



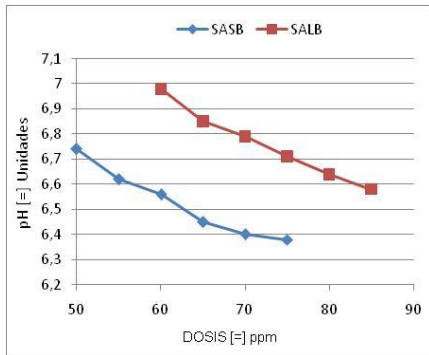
Fuente: El Autor

Figura 62. pH óptimo (Turb= 700 NTU)



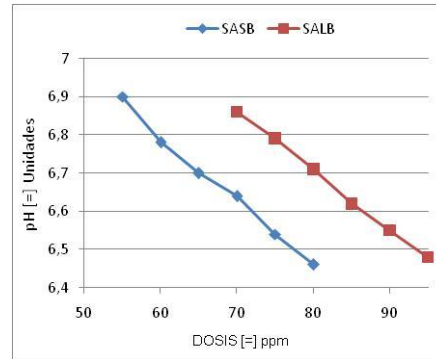
Fuente: El Autor

Figura 63. pH óptimo (Turb= 720 NTU)



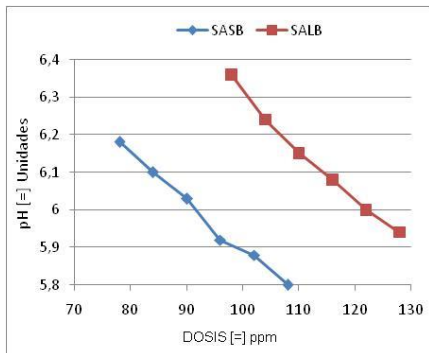
Fuente: El Autor

Figura 64. pH óptimo (Turb= 850 NTU)



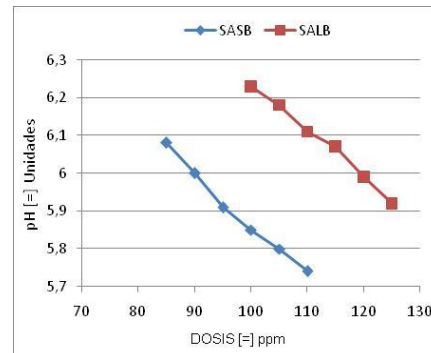
Fuente: El Autor

Figura 65. pH óptimo (Turb= 1100 NTU)



Fuente: El Autor

Figura 66. pH óptimo (Turb= 1150 NTU)



Fuente: El Autor

Tabla 8. Datos de las variables de entrada y salida en las pruebas de jarras

Agua cruda				Agua tratada									
Turbiedad [NTU]	Color [UPC]	pH	Alcalinidad [mg/L]	Turbiedad [NTU]		Color [UPC]		pH		Alcalinidad [mg/L]		Aluminio residual [mg/L]	
				SASB	SALB	SASB	SALB	SASB	SALB	SASB	SALB	SASB	SALB
5,3	34	7,85	48	1,2	1,9	5	8	7,01	7,10	34	38	0,15	0,12
8,5	57	7,89	46	1	1,2	8	7	7,08	7,03	38	36	0,08	0,07
10	42	7,73	38	1	1,5	8	7	6,98	6,96	34	34	0,09	0,10
12	109	7,70	38	1,7	1,8	12	13	6,85	6,88	28	30	0,12	0,10
19	120	7,60	38	2	2	9	6	6,95	7,01	30	32	0,08	0,07
20	122	7,70	48	2,5	2,3	10	8	6,84	6,93	28	30	0,10	0,09
23	128	7,64	46	1,1	1,4	11	8	6,82	6,94	34	38	0,12	0,09
30	130	7,88	48	1,1	1,3	7	7	6,79	6,84	30	30	0,07	0,06
35	68	7,71	40	1,3	1,9	10	8	6,72	6,80	32	30	0,08	0,07
40	128	7,60	32	1,6	1,1	12	9	6,61	6,70	28	28	0,09	0,08
50	145	7,64	30	1,3	1,5	9	6	6,98	7,00	26	28	0,09	0,07
60	168	7,12	42	1,2	0,9	7	3	6,71	6,98	30	32	0,08	0,06
63	188	7,64	44	1,5	1,2	11	8	6,60	6,80	30	32	0,10	0,09
70	287	7,50	34	1,2	1,1	11	8	6,70	6,80	28	28	0,11	0,09
80	187	7,60	36	1,5	1,3	11	7	6,68	6,70	30	30	0,08	0,08
90	208	7,77	40	1,6	1,4	12	8	6,70	6,81	34	30	0,11	0,08
250	1135	7,69	38	1,8	1,3	11	10	6,54	6,68	28	30	0,09	0,07
300	625	7,61	38	1,9	1,6	13	10	6,70	6,78	32	30	0,12	0,09
370	1950	7,15	32	2,2	2	14	8	6,88	6,92	26	28	0,06	0,05
500	1640	7,75	48	2,1	1,9	16	14	6,68	6,98	32	34	0,11	0,11
600	1420	7,58	34	5,1	5,4	15	14	6,29	6,45	28	28	0,23	0,19
700	1341	7,45	36	2,1	1,8	14	11	6,36	6,55	26	26	0,24	0,21
720	1581	7,62	38	2,2	2	20	14	6,42	6,58	20	20	0,14	0,10
850	1930	7,50	32	2,4	2,1	18	16	6,46	6,48	20	22	0,16	0,14
1100	1915	6,81	30	2,1	2,7	18	14	5,92	6,01	22	24	0,20	0,15
1150	2250	6,75	30	2,4	2,1	20	15	5,85	5,99	20	24	0,19	0,10
1320	2850	6,95	30	3,1	2,5	22	18	5,82	5,98	20	22	0,18	0,14
1500	2150	6,50	28	2,8	2,1	24	16	5,86	5,99	20	24	0,22	0,18
1900	2650	6,36	30	5,2	4,2	20	18	5,46	5,88	20	20	0,31	0,15

Fuente: El Autor