

**ESTUDIO DE VIABILIDAD TÉCNICA, ECONÓMICA DE LA APLICACIÓN DE UN
NUEVO PRODUCTO QUÍMICO PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS
INDUSTRIALES EN LA PERFORACIÓN DE POZOS PETROLEROS**

DIANA VANNESSA RIVERA CALVO

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA DE HIDROCARBUROS
BUCARAMANGA**

2017

**ESTUDIO DE VIABILIDAD TÉCNICA, ECONÓMICA DE LA APLICACIÓN DE UN
NUEVO PRODUCTO QUÍMICO PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS
INDUSTRIALES EN LA PERFORACIÓN DE POZOS PETROLEROS.**

DIANA VANNESSA RIVERA CALVO

Monografía para optar al título de Especialista en Gerencia de Hidrocarburos

Director

**JULIO CESAR PÉREZ ANGULO
Especialista en Ingeniería del Gas**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA DE HIDROCARBUROS
BUCARAMANGA**

2017

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por la vida, por su provisión económica mediante mi trabajo, mi Padre y por acompañarme en todo este largo tiempo, abriéndome camino para poder haber hecho cada fase de esta especialización.

Agradezco a la Escuela de Ingeniería de Petróleos UIS por apoyar estos espacios de Academia y aportar al crecimiento profesional y de competencias dentro del sector de hidrocarburos, igualmente a todo el equipo de la universidad, docentes, coordinador y a la auxiliar administrativa Sandra Franco por su seguimiento, gestión, orientación y apoyo en todo el proceso de especialización.

Gracias a mis compañeros de la promoción XI por su compañerismo, amistad y conocimientos compartidos, siempre serán un grato recuerdo.

Gracias a Schlumberger (M-I SWACO), compañía en la que trabajo por haber sido la motivación principal para comenzar este trabajo de Post Grado y por permitirme utilizar los recursos necesarios para realizar este trabajo experimental de monografía.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	13
1. GENERALIDADES SOBRE EL TRATAMIENTO DE DESECHOS LÍQUIDOS EN PERFORACIÓN DE POZOS PETROLEROS	15
1.1 TRATAMIENTO DE DESECHOS LÍQUIDOS EN PERFORACIÓN	15
1.2 DEWATERING Y TRATAMIENTO DE AGUAS	16
1.2.1 Beneficios del Dewatering.....	16
1.2.2 Factores que afectan el Dewatering	17
1.2.3 Variables del proceso de Dewatering	17
1.3 TRATAMIENTO DE AGUAS.....	18
1.3.1 Características físicas del Agua.....	18
1.3.2 Características químicas del agua	19
1.3.3 Manejo y tratamiento de Aguas/Sistema abierto.....	19
1.4 ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICOS.....	20
2. TRATAMIENTO DE AGUAS INDUSTRIALES EN PERFORACIÓN.....	23
2.1 CLARIFICACIÓN DEL AGUA	23
2.2 SEDIMENTACIÓN DE PARTÍCULAS.....	23
2.3 TIPOS DE COLOIDES DE ACUERDO CON SU COMPORTAMIENTO EN EL AGUA	24
2.3.1 Características de las arcillas	25
2.3.2 Propiedades de los coloides	26
2.3.3 Estabilidad e inestabilidad de los colides	27
2.4 COAGULACIÓN DEL AGUA	27
2.4.1 Mecanismos de Coagulación	29
2.4.2 Factores que influyen en la coagulación	31

2.4.3 Tipos de Coagulante	32
2.5 FLOCULACIÓN DEL AGUA	35
2.5.1 Cinética de la Floculación	36
2.5.2 Factores que influyen en la floculación	37
2.6 POTENCIAL Z	39
2.6.1 Balance de Repulsión y Atracción	40
2.6.2 Efecto de tipo y concentración de electrolitos	41
2.6.3 Aplicación del Potencial Zeta en la Coagulación del Agua	41
2.7 PRUEBA DE JARRAS	42
3. ANÁLISIS TÉCNICO DE USO DE COAGULANTES CONVENCIONALES Vs ALTERNATIVOS	43
3.1 CARACTERIZACIÓN DEL FLUIDO A TRATAR	43
3.2 PROCEDIMIENTO DE COAGULACIÓN	44
3.3 PROCEDIMIENTO DE COAGULACIÓN	45
3.4 PROCEDIMIENTO DE FLOCULACIÓN	45
3.5 MATERIALES Y PRODUCTOS Químicos	46
3.6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	47
3.6.1 Caracterización del agua	47
3.6.2 Prueba de jarras FASE I: Selección de la concentración del coagulante y el floculante a utilizar en la segunda fase de estudio.	49
3.6.3 Prueba de Jarras FASE II	55
3.6.4 Cálculos matemáticos para conseguir la dosificación ideal en eficiencia Vs consumo	62
4. ANÁLISIS COMPARATIVO ECONÓMICO DEL USO DE COAGULANTES ALTERNATIVOS VS CONVENCIONALES	67
5. CONCLUSIONES	69
6. RECOMENDACIONES	71
BIBLIOGRAFÍA	72

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Proceso de Separación.....	18
Figura 2. Tratamiento de Aguas en Sistemas Abiertos (Catch Tank).	19
Figura 3. Representación esquemática de una partícula de arcilla.....	25
Figura 4. Proceso de Coagulación.....	29
Figura 5. Proceso de Floculación.....	37
Figura 6. Procesos de Coagulación y Floculación	38
Figura 7 Potencial Zeta contra Potencial Superficial.....	39
Figura 8 Energía Potencial de Interacción entre dos coloides	41
Figura 9. Soluciones de PAC preparadas a diferentes concentraciones (0.5, 1, 5,10%)	51
Figura 10. Prueba de Jarras PAC Platanillo 15.....	51
Figura 11. Concentraciones seleccionadas de Coagulante A (Sulfato) y B (PAC)	53
Figura 12. Medición de Parámetros de Interés	53
Figura 13. Optimización de la prueba con Hipoclorito de Ca	55
Figura 14. Prueba de Jarras al 10% de producto.....	57
Figura 15. Prueba de Jarras al 5% de producto.....	58

LISTA DE GRÁFICAS

	Pág.
Gráfica 1. Comportamiento del pH Vs Concentración de Productos	59
Gráfica 2. Comportamiento de la conductividad Vs Concentración de Productos .	60
Gráfica 3. Comportamiento de la Turbiedad Vs Concentración de Productos	61
Gráfica 4. Cálculos matemáticos a diferentes dosificaciones de sulfato de aluminio al 5%.....	63
Gráfica 5. Cálculos matemáticos a diferentes dosificaciones de PAC al 5%	64

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Parámetros Físicoquímicos.....	20
Tabla 2. Tipos de Coloides	24
Tabla 3. Comparación de características básicas entre sulfato de Aluminio y policloruros de aluminios (PAC's).....	34
Tabla 4. Productos Químicos.....	46
Tabla 5. Caracterización Agua sin tratar Pozo Platanillo 15	47
Tabla 6. Caracterización Agua Pozo Careto 13.....	48
Tabla 7. Prueba con Sulfato y Cyfloc 1143.....	50
Tabla 8. Prueba con Sulfato y Cyfloc 1146.....	50
Tabla 9 Prueba con PAC y Cyfloc 1143.....	50
Tabla 10. Prueba con PAC y Cyfloc 1146.....	50
Tabla 11. Prueba con Sulfato al 5 y 10% y Cyfloc 1146	52
Tabla 12. Prueba con PAC al 5 y 10% y Cyfloc 1146	52
Tabla 13. Prueba con Sulfato al 5 y 10% con Cyfloc 1143	52
Tabla 14. Prueba con PAC al 5 y 10% y Cyfloc 1143	52
Tabla 15. Caracterización de la muestra (mezcla).....	52
Tabla 16. Prueba con Hipoclorito de Calcio.....	54
Tabla 17. Prueba evaluación de coagulantes	56
Tabla 18. Parámetros de interés con coagulantes al 10%.....	56
Tabla 19. Parámetros de interés con coagulantes al 5%.....	57
Tabla 20. Cantidad de producto en Kg para 180 bbl.....	65
Tabla 21. Volúmenes a tratar por cada sección.....	67
Tabla 22. Cantidad de producto por Vol a tratar	67
Tabla 23. Análisis de Costos.....	67

RESUMEN

TITULO: ESTUDIO DE VIABILIDAD TÉCNICA, ECONÓMICA DE LA APLICACIÓN DE UN NUEVO PRODUCTO QUÍMICO PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS INDUSTRIALES EN LA PERFORACIÓN DE POZOS PETROLEROS.

AUTOR: DIANA VANNESSA RIVERA CALVO*

PALABRAS CLAVES: PAC, policloruro de aluminio, sulfato de aluminio, coagulantes, floculantes, conductividad, pH, turbiedad, remoción.

DESCRIPCIÓN:

Por muchos años en las operaciones de tratamiento de aguas de perforación se ha evidenciado poco soporte técnico dentro de las compañías de servicios petroleros, no se han evaluado productos diferentes a los convencionales en el tratamiento de aguas industriales, evidenciándose aumentos en los costos de consumo de productos químicos y teniendo dificultad en los parámetros de disposición final.

Los problemas anteriormente mencionados se deben a la falta de conocimiento técnico en cuanto a la acción y dosificación de los productos químicos utilizados y la tradición de procesos implementados. De continuar con esta situación, los costos asociados de la química consumida seguirán incrementando en las compañías, no se avanzara en el desarrollo de nuevas tecnologías, marcando incompetencia en el mercado y habrá riesgo en incumplir con la normatividad vigente.

El presente trabajo tiene como objeto realizar un análisis de los aspectos técnicos y económicos de alternativas de tratamiento químico para el tratamiento de aguas industriales, realizando pruebas de laboratorio, pruebas en campo, una comparación de costos y resultados para determinar la mejor opción en los aspectos técnicos y económicos para las empresas de servicios petroleros.

1

*Trabajo de grado

**Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director: Julio Cesar Pérez Angulo, Docente.

ABSTRACT

TITLE: STUDY OF ECONOMIC AND TECHNICAL VIABILITY FOR A NEW CHEMICAL PRODUCT APPLICATION IN INDUSTRIAL WATER TREATMENT IN DRILLING.

AUTHOR: DIANA VANNESSA RIVERA CALVO*

KEYWORDS: PAC, aluminum polychloride, aluminum sulfate, coagulants, flocculants, pH, conductivity, turbidity, removal.

CONTENT:

For a many years in drilling water treatment operations there has been little technical support within the oil services companies, different products than conventional ones, have not been evaluated in the treatment of industrial waters, evidencing increase in the consumption cost of chemical and having difficulty in the final disposal parameters.

The problems before mentioned above are due to the lack of technical knowledge regarding the action and dosage of the chemical used and the tradition of processes implemented. If this situation continues, the associated cost of the chemistry consumed will continue increase into the companies, there will be no progress in the development of new technologies, marking incompetence in the market and there will be a risk of not complying with current regulations.

The objective of this is to analyze the technical and economic aspects of chemical treatment alternatives for the treatment of industrial waters, performing laboratory tests, field tests, a comparison of costs and result to determinate the best option in technical and economic aspects for services oil companies. ²

* Bachelor Thesis

** Faculty of Physicochemical Engineering, Petroleum Engineering. Director: Julio Cesar Pérez Angulo, Professor

INTRODUCCIÓN

Las empresas de servicios mantienen un método convencional para el tratamiento de aguas industriales, este sistema consiste en la estabilización de pH del fluido y la aplicación de coagulantes primarios y floculantes para obtener un fluido con parámetros óptimos para su disposición final.

Dentro de los coagulantes más comunes, se utiliza el sulfato de aluminio que es una sal que normalmente se utiliza para arrastrar las partículas en suspensión y por la presencia del aluminio las precipita, es un buen producto en cuanto a lo que confiere la clarificación del fluido, pero su residual de sulfato y aluminio en el agua, suelo o exposición directa a las personas son de gran importancia a nivel de salud y ambiental.

Estos compuestos de interés ambiental deben ser removidos hasta los límites establecidos estipulados en el decreto 1594/84 o aún hasta la reducción más mínima que se pueda lograr.

En los últimos 25 años se ha desarrollado una nueva generación de coagulantes inorgánicos pre-polimerizados tales como PAC's, los cuales se comportan diferentes a los coagulantes convencionales en el proceso de clarificación debido a sus características de especiación química³. Los nuevos coagulantes (sales polihidroxiladas. Polímeros, entre otros) son compuestos complejos de alto peso molecular que se utilizan no propiamente como coagulantes sino como ayudantes de coagulación. La dosificación de estas sustancias se lleva a cabo en concentraciones muy bajas, lo cual es una gran ventaja y compensa el costo del

3

polímero utilizado. Estos coagulantes están siendo ampliamente empleados en el tratamiento de aguas industriales, potables ya que produce una menor cantidad de flocs, además son más fácilmente tratables.

En estos tiempos coyunturales con el precio del petróleo, la demanda de empresas locales y competitividad en el mercado, es indispensable evaluar otro tipo de productos mucho más amigables ambientalmente que pueda en su aplicación disminuir costos y tener la misma o mejor actividad en cuanto a la desestabilización de coloides suspendidos y que una vez este en dispersión puedan flocularse rápidamente. Los PAC's tienen diferentes fases sólidas en las reacciones hidrolíticas respecto a los coagulantes convencionales: los flóculos de PAC's tienden a ser grupos de pequeñas esferas y/o estructuras tipo cadena con tamaño menor a 25 mm, mientras que los flóculos de sulfato de aluminio son usualmente estructuras esponjosas y porosas con tamaño de 25 a 100 mm⁴. Esta diferencia estructural hace que los PAC's produzcan una menor turbiedad en suspensión que el sulfato de aluminio⁵.

Este trabajo de monografía pretende realizar una viabilidad técnica y económica y de la aplicación de un nuevo producto químico para el tratamiento de aguas industriales en la actividad de perforación de pozos petroleros.

⁴ PERNITSKY, D.J. AND EDZWALD, J.K. Selection of alum and polyaluminum coagulants: principles and applications. Journal of Water Supply: Research and Technology, 2006. 121-141 p.

⁵ SINHA, S., YOO, Y, AMY, et al, Determining the effectiveness of conventional and alternative coagulants through effective characterization schemes. Chemosphere: 2004. 1115-1112 p.

1. GENERALIDADES SOBRE EL TRATAMIENTO DE DESECHOS LÍQUIDOS EN PERFORACIÓN DE POZOS PETROLEROS

El principal componente en el tratamiento de aguas residuales en perforación es el Dewatering, el cual consiste en el tratamiento y la completa eliminación de los sólidos en suspensión, de todos aquellos fluidos no reutilizables; como el agua utilizada para limpieza de piletas, lodos contaminados, agua utilizada para la limpieza del equipo, etc. Este volumen de agua producida en el dewatering es mezclada con agua lluvia y/o doméstica y esto es lo que llamamos desechos líquidos de perforación los cuales deben someterse a un proceso de tratamiento para ajustar parámetros de interés y poder hacer en primera instancia re uso de este efluente o para disposición final al ambiente.

1.1 TRATAMIENTO DE DESECHOS LÍQUIDOS EN PERFORACIÓN

Las empresas de servicios, permiten presentar un sistema que se aplicara en el tratamiento de las fases liquidas en cada pozo a tratar. Diseñando un sistema, que con la ayuda de coagulantes primarios, secundarios y ajustadores de propiedades, con sus dosificaciones indicadas, se obtengan resultados óptimos de calidad, sin originar otro tipo de problema ambiental. Un exceso de material o producto o mala dosificación del mismo, dará como resultado un fluido con calidades deficientes para su disposición final.

La forma de manejo, tratamiento y disposición final de los fluidos residuales de perforación es propia de cada compañía, de acuerdo al plan de manejo de desechos que establezcan junto con el servicio que presta las empresas de servicio. Normalmente los fluidos residuales (agua de esorrentía, lavado y todo fluido que

sale del sistema activo del lodo de perforación y/o terminación) resultan en las piscinas o tanques de almacenamiento y se ajustan parámetros requeridos antes de su disposición o evacuación final.

1.2 DEWATERING Y TRATAMIENTO DE AGUAS

El dewatering es la separación físico/química de las fases sólida y líquida de un fluido de desecho. Su principal aplicación está en el tratamiento de volúmenes de lodo en exceso. Remueve la mayoría de los sólidos coloidales de los fluidos de perforación⁶

Cuando hay una solución de sustancias, donde no reaccionan entre sí, no pueden ser separadas por los procesos de coagulación y/o floculación, un ejemplo de estas soluciones son las soluciones salinas o salmueras (NaCl, KCl).

Generalmente en una mezcla homogénea donde hay una suspensión de partículas, pueden ser separadas por los procesos de coagulación y/o floculación, un ejemplo de estas mezclas son los lodos de perforación.

Este tipo de fluidos está compuesto por los fluidos residuales (agua de escorrentía, lavado y todo fluido que salió del sistema activo del lodo de perforación y/o terminación).

1.2.1 Beneficios del Dewatering

- Costo efectivo Vs Transporte y opción de disposición.
- Mejora la reología del lodo.

⁶ RUIZ Christian. Tecnología de descarga cero de los efluentes de los fluidos de perforación en pozos de offshore plataforma Albacora Lote Z-1. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería. Facultad de Ingeniería de petróleo, gas natural y petroquímica, 2012. 17 p.

- Reduce el volumen de desechos líquidos y costos de disposición.
- Reduce el consumo de agua y el impacto ambiental.
- Altamente efectivo en perforación con lodo bentónico.

1.2.2 Factores que afectan el Dewatering

- pH puede afectar los costos del dewatering.
- Los coagulantes pueden ser usados para reforzar las reacciones químicas.
- Los polímeros líquidos generalmente tienen mayor costo que los secos.
- El tiempo de hidratación es crítico en los polímeros secos.

1.2.3 Variables del proceso de Dewatering. Las variables del proceso del tratamiento de los sólidos están representadas en la siguiente imagen

Figura 1. Proceso de Separación



1.3 TRATAMIENTO DE AGUAS

Es un tratamiento y pruebas finales que se le dan al agua industrial, de dewatering, lluvia o domestica para que cumpla con los estándares de disposición al medio ambiente o para re-uso en el equipo puede ser hecho en piscinas, tanques australianos, plantas de depuración, filtración o frack tanks.

1.3.1 Características físicas del Agua

- Turbiedad (Fenómeno óptico que se mide por la mayor o menor resistencia del agua al paso de la luz).
- Color
- Sabor
- Olor
- Sólidos suspendidos

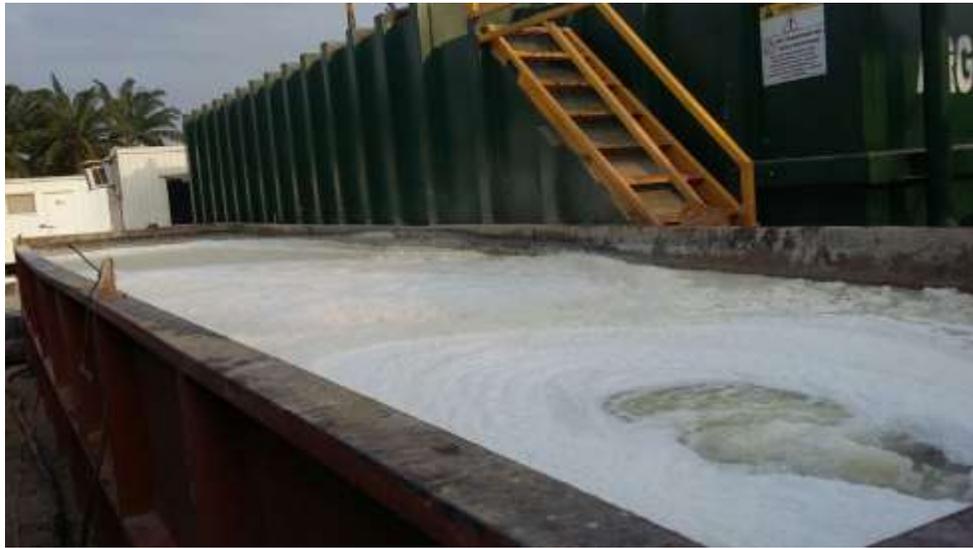
1.3.2 Características químicas del agua

- Sólidos disueltos totales (Iones y Cationes).
- Alcalinidad (pf/mf o relación entre pH de fenolftaleína y pH del metilnaranja. Muestra la concentración de H⁺ y OH⁻).
- Dureza (contenido de calcio y/o magnesio).
- Oxígeno disuelto
- Sulfatos
- Cloruros
- Conductividad (mide la cantidad de iones presentes).
- Demanda química de oxígeno DQO.

1.3.3 Manejo y tratamiento de Aguas/Sistema abierto. Este sistema de tratamiento se realiza a través de tanques australianos, catch tanks y sistema de piscinas.

Figura 2. Tratamiento de Aguas en Sistemas Abiertos (Catch Tank).





1.4 ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICOS

Las empresas de servicios deber realizar diariamente análisis fisicoquímicos de los fluidos antes y después de los tratamientos.

Tabla 1. Parámetros Fisicoquímicos

Parámetro	Discusión
Determinación de pH	El pH indica el grado de acidez o alcalinidad relativa del fluido. La alcalinidad y acidez son las capacidades neutralizantes de ácidos y bases.
Turbiedad	La medición de la turbiedad se lleva a cabo mediante la comparación entre la intensidad de la luz dispersa en la muestra y la intensidad registrada en una suspensión de referencia en las mismas condiciones. Esta determinación se efectúa con un turbidímetro portátil o fijo.
Color	El color puede estar producido por sustancias húmicas, partículas de arcilla o combinaciones de hierro. El color puede estar producido por sustancias húmicas, partículas de arcilla o

Parámetro	Discusión
	combinaciones de hierro. El color puede estar producido por sustancias disueltas, pero también por sustancias finamente dispersas. Esta determinación se efectúa por medio del espectrofotómetro y por kits colorimétricos.
Sólidos Totales	El contenido total de sólidos se define como la materia que se obtiene como residuo después de someter al agua a un proceso de evaporación. Se utiliza la retorta y es reportado en porcentaje en volumen % V/V
Alcalinidad	<p>La alcalinidad de un agua residual está provocada por la presencia de hidroxilos, carbonatos y bicarbonatos de elementos como calcio, magnesio, sodio potasio y amoníaco. La alcalinidad ayuda a regular los cambios de pH producidos a regular los cambios de pH producidos por la adición de ácidos.</p> <p>La alcalinidad se determina por medio de: Espectrofotometría y valoración volumétrica (titulación).</p>
Cloruros	El ión cloruro es siempre el principal anión en salmueras. La concentración del ión cloruro se usa como una medida de la salinidad del agua. Normalmente se determina por medio de espectrofotómetro o por valoración volumétrica (titulación).
Dureza Total	<p>La dureza total de aguas se debe principalmente a los iones de calcio y magnesio presentes y es independiente de los iones ácidos que los acompañan.</p> <p>La dureza total se mide en términos de partes por millón de carbonato de calcio o partes por millón de calcio.</p>

Parámetro	Discusión
	Los métodos empleados para esta determinación son el espectrofotométrico y valoración volumétrica (titulación).
Sulfatos	<p>Este ion se encuentra en el agua debido a la presencia del gas H₂S, el cual reacciona y forma ácido sulfúrico que al disociarse aporta al agua iones de sulfato.</p> <p>Los métodos empleados son el espectrofotométrico y el colorimétrico. Se reporta en ppm de SO₄.</p>
Metales pesados	<p>En los desechos sólidos generados por la perforación se pueden encontrar metales pesados aportados por los productos químicos usados en la fabricación del fluido de perforación o por la formación perforada y/o la grasa usada en la tubería. Estos deben ser controlados para que su concentración no supere los valores exigidos en la norma gubernamental, por tal razón es necesario determinar su presencia cualitativa y cuantitativa. Existen varios métodos para efectuar la determinación de estos metales pesados.</p> <p>Existen varios métodos para determinar la cantidad de metales pesados</p> <ul style="list-style-type: none"> -Método espectrofotométrico. -Método Colorimétrico.

2. TRATAMIENTO DE AGUAS INDUSTRIALES EN PERFORACIÓN

Las aguas industriales de perforación contienen sustancias tanto disueltas y en suspensión, las cuales pueden ser orgánicas o inorgánicas, que provienen de las aguas naturales (de la formación) y de los fluidos sintéticos (productos químicos), estas partículas pueden tener un tamaño y densidad tal que pueden eliminarse por simple sedimentación, pero alguna de ellas tienen una carga eléctrica superficial que les hace repelerse continuamente, impidiendo su aglomeración y evitando su sedimentación, estas partículas se denominan coloides y deberán someterse a un proceso de clarificación para eliminar estas partículas disueltas o en suspensión.

2.1 CLARIFICACIÓN DEL AGUA

La clarificación del agua tiene por objeto retirar los sólidos suspendidos, sólidos finamente divididos y materiales coloidales, convirtiéndolos en partículas más grandes que se pueden remover con mayor facilidad.

La clarificación incluye los subprocesos de coagulación, floculación y sedimentación.

2.2 SEDIMENTACIÓN DE PARTÍCULAS

Es la remoción de partículas más pesadas que el agua por acción de la fuerza de gravedad, mediante este proceso se eliminan materiales en suspensión empleando

un tiempo de retención adecuado⁷. Estos solidos están constituidos generalmente por arenas, limos y coloides agrupados mediante las etapas de coagulación y floculación.

Tabla 2. Tipos de Coloides

DIAMETRO	TIEMPO PARA CAER EN UN METRO DE AGUA
Arena	10 segundos
Arena fina	2 minutos
Limo	2 horas
PARTICULAS COLOIDALES	
0.001 mm	4 días
0.1 Micrón	2 año
0.01 Micrón	10 años

Fuente: Autor

2.3 TIPOS DE COLOIDES DE ACUERDO CON SU COMPORTAMIENTO EN EL AGUA

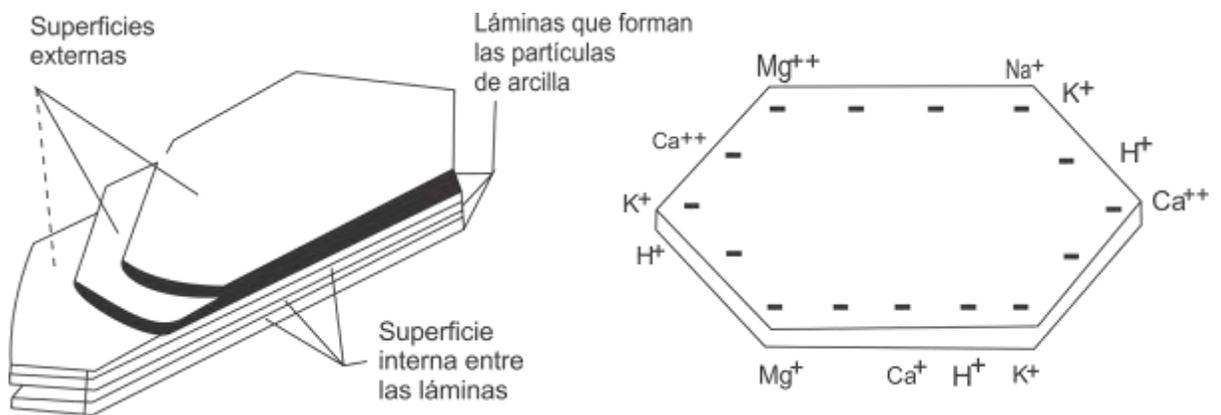
En el tratamiento del agua, es común referirse a los sistemas coloidales como hidrófobos o suspensores cuando repelen el agua, e hidrófilos o emulsores cuando presentan afinidad con ella. Obviamente, los coloides hidrófobos no repelen completamente al agua, pues una película de ella es absorbida por los mismos. En los sistemas coloidales hidrófobos, las propiedades de la superficie de las partículas son muy importante principalmente en las aguas naturales, que pueden contener varios tipos de arcillas.

⁷ COGOLLO J. Clarificación de aguas usando coagulantes polimerizados: caso del hidroxiclورو de aluminio. Medellín: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas, 2010. 20 p.

Las arcillas y algunos óxidos metálicos son coloides hidrófobos muy importantes en el tratamiento del agua. Se caracterizan por ser termodinámicamente inestables con respecto a la formación de grandes cristales no coloidales.

2.3.1 Características de las arcillas Las arcillas están principalmente constituidas por partículas minerales: cuarzo, mica, pirita, cálcica, etcétera. Los constituyentes más importantes de las arcillas son los silicatos hidratados de aluminio y hierro, también algunos elementos alcalinos y alcalino térreos. Morfológicamente, las partículas de arcillas se representan en forma de plaquetas compuestas de láminas muy finas, como muestra la figura 3.

Figura 3. Representación esquemática de una partícula de arcilla



Fuente: BARRENCHEA A, Química de Ada Berrenchea Martel, Capítulo 4 Coagulación

Las arcillas más comunes son caolinita, montmorillonita (bentonita), illita, muscovita.

2.3.2 Propiedades de los coloides

- **Propiedades cinéticas**

Las cinéticas son las propiedades que definen el comportamiento de las partículas coloidales referidas a su movimiento en el agua.

a) Movimiento Browniano: Las partículas coloidales, dentro de la fase líquida, presentan un movimiento constante e irregular, que se ha denominado movimiento browniano.

La teoría cinética explica este fenómeno como resultado del bombardeo desigual y casual de las partículas en suspensión por las moléculas del líquido. Al elevarse la temperatura del líquido, las moléculas adquieren mayor energía cinética y aumenta el movimiento browniano. Este movimiento solo puede explicar la estabilidad de las dispersiones coloidales más pequeñas. Para tamaños de partículas mayores, los factores más importantes son las corrientes de convección termal y las velocidades bajas de sedimentación.

b) Difusión: Debido al movimiento browniano, es decir, al movimiento constante de las moléculas o partículas en el agua, las partículas coloidales tienden a dispersarse por todas partes en el sistema hídrico. A este fenómeno se le llama difusión. La velocidad de difusión es menor que la velocidad media de las partículas en el movimiento browniano.

c) Presión Osmótica: La osmosis es el flujo espontáneo que se produce cuando un disolvente (agua) atraviesa una membrana que la separa de un sistema coloidal (agua + coloides). Al transporte del solvente hacia la solución se le denomina flujo osmótico. A la presión hidrostática necesaria para detener el flujo osmótico, se denomina presión osmótica.

2.3.3 Estabilidad e inestabilidad de los coloides Las suspensiones coloidales están sujetas a ser estabilizadas y desestabilizadas.

Entre las fuerzas de estabilización o repulsión podemos mencionar las siguientes:

- La carga de partículas
- La hidratación, que es generalmente importante para los coloides hidrófilos,

Los factores de atracción o desestabilización son los siguientes:

- La gravedad.
- El movimiento browniano.
- La fuerza de Van der Waals.

2.4 COAGULACIÓN DEL AGUA

Las aguas naturales contienen sustancias tanto disueltas como en suspensión, las cuales pueden ser orgánicas e inorgánicas, estas partículas pueden tener un tamaño y densidad tal que puedan eliminarse del agua por simple sedimentación, pero alguna de ellas tienen una carga eléctrica superficial que les hace repelerse continuamente, impidiendo su aglomeración y evitando su sedimentación. Estas partículas tienen un tamaño que suele estar entre 0.2 y 1 μ , y se denominan coloides⁸.

En el tratamiento del agua, es común referirse a los sistemas coloidales como hidrófobos o suspensores cuando repelen el agua, e hidrófilos o emulsores cuando presentan afinidad con ella. Los coloides hidrófobos no repelen completamente el agua, pues una película de ella es absorbida por los mismos. En los sistemas coloidales hidrófobos, las propiedades de la superficie de las partículas son muy

⁸ ROJAS Christian. Estudio de la aplicabilidad e implementación del Policloruro de aluminio como coagulante primario en la planta La Flora del AMB S.A E.S.P. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingeniería, 2005, 7p.

importantes, principalmente en las aguas naturales, que pueden tener varios tipos de arcillas. Las arcillas y algunos óxidos metálicos son coloides hidrófobos muy importantes en el tratamiento del agua.

Los coloides hidrófilos abarcan varios polímeros tanto sintéticos como naturales y numerosas sustancias de significación biológica como proteínas, ácidos nucleicos, almidones y otras macromoléculas.⁹

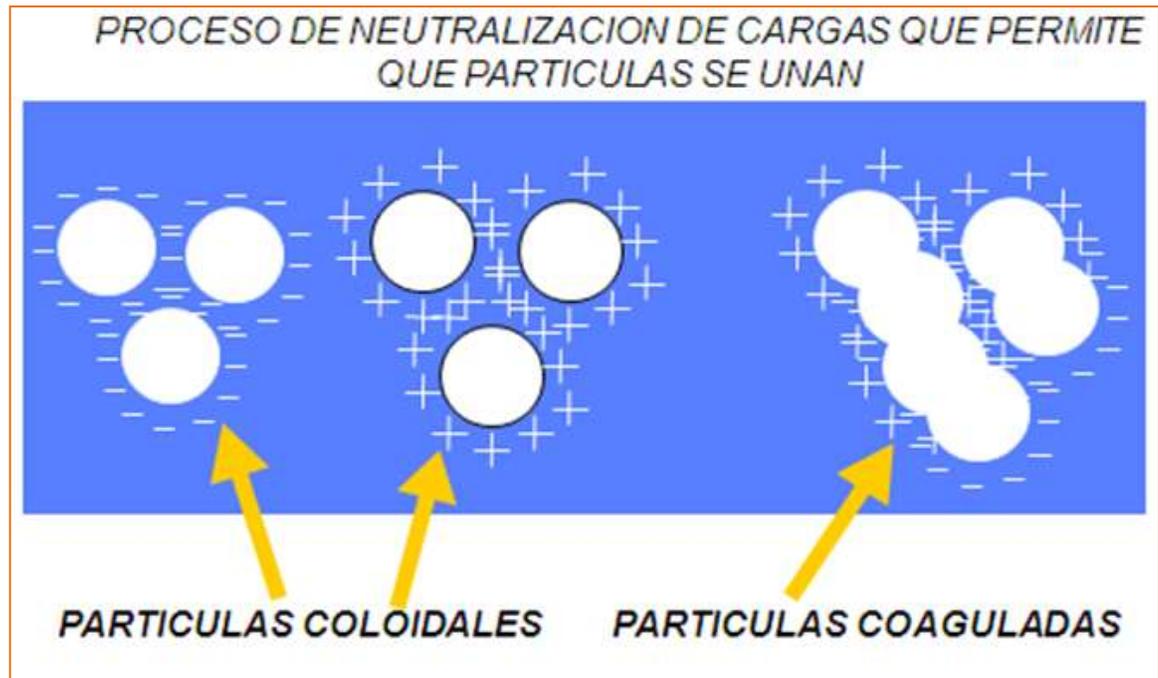
Las partículas coloidales dentro de la fase líquida, presentan un movimiento constante e irregular, que se ha denominado movimiento browniano. La teoría cinética explica este fenómeno como resultado del bombardeo desigual y casual de las partículas en suspensión por las moléculas del líquido. Al elevarse la temperatura del líquido, las moléculas adquieren mayor energía cinética y aumenta el movimiento browniano.

La coagulación consiste en neutralizar la carga, generalmente electronegativa de los coloides presentes en el agua, quedando estos en condiciones de formar floc. Este proceso se consigue introduciendo en el agua un producto químico denominado coagulante, que busca desestabilizar las suspensiones coloidales. Por estabilidad se entiende la propiedad inherente de las partículas coloidales a permanecer en dispersión durante mucho tiempo, mientras que por inestabilidad se expresa la tendencia de dichas partículas a flocularse siempre que entren en contacto entre sí. Los dos parámetros que más influyen en el proceso de coagulación son el pH y la temperatura¹⁰.

⁹ BARRENCHEA Ada, Química de Ada Berrenchea Martel, Capítulo 4 Coagulación. 163 p.

¹⁰ ROSA Virginia. Obtención de la mínima dosis de reemplazo de Policloruro de aluminio en aguas y aguas de Pereira. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira, 2010. 24 p.

Figura 4. Proceso de Coagulación



Fuente: Autor

2.4.1 Mecanismos de Coagulación Cuando hay partículas coloidales con carga negativa en el agua, lo cual impide la aproximación de las mismas. En el tratamiento del agua será necesario alterar esta fuerza iónica mediante la adición de sales de aluminio o de hierro o de polímeros sintéticos que provoquen el fenómeno de la coagulación.

La coagulación es el resultado de la acción de cuatro mecanismos:

- a) Comprensión de capa difusa.
- b) Adsorción y neutralización.
- c) Barrido.
- d) Adsorción y formación del puente.

a) Comprensión de Capa difusa

Este modelo físico de doble capa puede explicar el fenómeno de la desestabilización de un coloide por un coagulante, el fenómeno de la desestabilización lo puede explicar la curva de atracción de Van der Waals¹¹.

b) Adsorción y neutralización de la carga

La desestabilización de una dispersión coloidal consiste en las interacciones entre coagulante-coloide, coagulante-solvente y coloide-solvente. El efecto de adsorción y neutralización de la carga se encuentra estrechamente ligado al de comprensión de la doble capa.

c) Captura en un precipitado de hidróxido

Cuando la dosis de un coagulante de sales metálicas en solución como el $Al_2(SO_4)_3$ y $FeCl_3$ excede el producto de solubilidad de sus hidróxidos metálicos como el $Al(OH)_3$ y el $Fe(OH)_3$, se produce una precipitación rápida de los hidróxidos gelatinosos que explica el fenómeno de remoción de turbiedad.

d) Adsorción y puente Interparticular

La coagulación puede realizarse también usando una variedad significativa de compuestos orgánicos sintéticos y naturales caracterizados por grandes cadenas moleculares, que gozan la propiedad de presentar sitios ionizables a lo largo de la cadena y de actuar como coagulantes. Los polímeros pueden ser clasificados como:

- Catiónicos: presentan sitios ionizables positivos.
- Aniónicos: presentan sitios ionizables negativos.

¹¹ BARRENCHEA Ada, Química de Ada Berrenchea Martel, Capítulo 4 Coagulación

- No iónicos: No presentan sitios ionizables.
- Anfóliticos presentan sitios ionizables positivos y negativos.

2.4.2 Factores que influyen en la coagulación

- **Valencia:** Entre mayor sea la valencia del ion, más efectivo resulta como coagulante.
- **Capacidad de cambio:** Es una medida de la tendencia a reemplazar cationes de baja valencia por otros de mayor valencia, provocando la desestabilización y aglomeración de partículas en forma muy rápida.
- **Tamaño de las partículas:** Las partículas deben poseer el diámetro inferior a una micra. Las partículas con diámetro entre una y cinco micras. Las partículas con diámetro entre una y cinco micras, sirven como núcleos de floc, en cambio de diámetro superior a cinco micra, son demasiado grandes para ser incorporadas en el floc.
- **Temperatura:** La temperatura cambia el tiempo de formación del floc, entre más fría el agua, la reacción es más lenta y el tiempo de formación de floc es mayor.
- **Concentración de iones H⁺ o pH:** Para cada coagulante hay por lo menos una zona de pH óptima, en la cual una buena floculación ocurre en el tiempo más corto y con las mismas dosis de coagulante.
- **Relación Cantidad-Tiempo:** La cantidad de coagulante es inversamente proporcional al tiempo de formación de floc.

- **Alcalinidad:** La alcalinidad guarda la relación con el pH y por lo tanto el contenido de alcalinidad del agua es uno de los factores por considerar en la coagulación.

2.4.3 Tipos de Coagulante

- **Coagulantes Convencionales**

Los coagulantes más comunes que se usan en el tratamiento de aguas son compuestos inorgánicos de aluminio o hierro como sulfato de aluminio, aluminato de sodio, sulfato ferroso, sulfato férrico y cloruro férrico¹². Cada coagulante tiene un rango específico de pH donde tiene la mínima solubilidad y ocurre la máxima precipitación dependiendo, también, de las características del agua. Con excepción del aluminato de sodio, estos coagulantes son sales ácidas que disminuyen el pH del agua.

Por esta razón y dependiendo del agua a tratar, es necesario agregar un álcali como cal, soda ash o soda caústica.

- **Sulfato de Aluminio**

El sulfato de aluminio es conocido comercialmente como “Alumbre” pero este producto, no es un alumbre verdadero: Por definición es un sulfato doble, sal que tiene un metal univalente o radical tal como potasio, sodio y un metal trivalente tal como aluminio, ion férrico, cromo, cobalto, etc. El cual forma cristales definidos como 24 moléculas de agua¹³.

¹² YE C, WANG D, SHI, B YU, QU J, et al. Alkalinity effect of coagulation with polyaluminum chlorides: Role of electrostatic patch. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2007.294 p.

¹³ Arboleda Valencia, Jorge. *Teoría y Práctica de la Purificación del agua*. Tomo 1, 3ª edición. Bogotá Colombia: Mc Graw Hill-Interamericana; 2000. 51-58 p.

Puede estar en forma sólida o líquida. La sólida se presenta en placas compactas, gránulos de diverso tamaño y polvo. Su fórmula teórica es $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18 H_2O$.

Su concentración se define, en general, por su contenido en alúmina, expresada en Al_2O_3 , es decir, 17% aproximadamente. La densidad aparente del sulfato de aluminio en polvo en el orden de 1000 kg/m³.

El sulfato de aluminio es una sal derivada de una base débil (hidróxido de aluminio) y de un ácido fuerte (ácido sulfúrico), por lo que sus soluciones acuosas son muy ácidas, su pH varía entre 2 y 3,8, según la relación molar sulfato/alúmina.

- **Coagulantes alternativos (PAC's).**

Los PAC's o sales polihidroxiladas contienen una gama de especies hidrolíticas de Al (III) preformadas de calidad superior y poseen una estructura que es bastante estable ante hidrólisis posteriores, que contribuye a su mayor eficiencia de coagulación; se consideran más eficientes que el sulfato de aluminio dadas las ventajas de menor producción de lodos y la menor dependencia de la temperatura y el pH. Sin embargo, su eficiencia también se ve afectada por algunos parámetros y condiciones de operación específicas.

Se considera que un PAC es más eficiente que el sulfato de aluminio dada a su mayor capacidad de remoción de sólidos suspendidos y, por tanto, requiere menos dosis; dependiendo del tipo de agua.

Tabla 3. Comparación de características básicas entre sulfato de Aluminio y policloruros de aluminios (PAC's).

Criterio	Sulfato de Aluminio	PAC's
Temperatura	La temperatura afecta la hidrolisis y por ende, la producción de complejos hidroxilos cargados positivamente esenciales para la coagulación.	Menor efecto de la temperatura por la presencia de formas de aluminio prepolimerizadas.
pH	El rango de pH controla cual clase de hidroxilo se produce.	Se espera menor impacto de pH por la presencia de formas de aluminio prepolimerizadas
Especie de Aluminio	La mayoría de especies de son complejos hidroxilos manoméricos con carga catiónica de +1 y +3.	Presencia de formas de aluminio manoméricas y poliméricas.
Cinética	Más lenta.	Más rápida.

Fuente: Autor

- **Policloruro de Aluminio**

El policloruro de aluminio (PAC), es un coagulante que ha tenido cierto uso en tiempos recientes. Es un producto que se comercializa en forma líquida o granulada. Su nombre "policloruro" hace referencia a su verdadera composición química, ya que en realidad no se trata de un compuesto de fórmula definida sino más bien de una mezcla de polímeros o agregados de polímeros de hidróxido de cloruro de aluminio con fórmula $Al_n(1OH)_mCl_{(3n-m)}$ con $0 < m < 3n$. El PAC contiene concentraciones variables de cloruro de aluminio y esta concentración es expresada por convención como "porcentaje en peso de Al". El rango de esa concentración va de 2,5% a 13 %. El PAC puede prepararse a partir de varias sustancias que contengan aluminio, incluido el aluminio metálico, la alúmina trihidratada, el cloruro de aluminio, el sulfato de aluminio y combinaciones de estos.

El PAC contiene concentraciones variables de cloruro de aluminio y esta concentración es expresada por convención como "porcentaje en peso de Al". El rango de esa concentración va de 2,5% a 13 %.

El PAC puede prepararse a partir de varias sustancias que contengan aluminio, incluido el aluminio metálico, la alúmina trihidratada, el cloruro de aluminio, el sulfato de aluminio y combinaciones de estos.

Desde el punto de vista de su uso como coagulante, puede decirse que presenta buenas características, ya que tiene una alta carga eléctrica previa a su agregado al agua que se va a tratar (que es lo típico del sulfato de aluminio). Asimismo, tiene una moderada masa molecular, lo que también es una propiedad deseable.

Estudios comparativos para la remoción de materia orgánica entre el PAC y la alúmina muestran que el PAC es más efectivo a un rango mayor tanto de pH como de temperaturas. La variación de temperatura afecta mucho más a la alúmina que al PAC¹⁴.

2.5 FLOCULACIÓN DEL AGUA

Después de que las partículas coloidales han sido desestabilizadas, estas tienen que trasladarse dentro del líquido para hacer contacto unas con otras y aglutinarse. A este proceso se denomina FLOCULACION, la rapidez con lo que esto ocurra va depender del tamaño de las partículas en relación con el grado de turbulencia del líquido, la concentración de partículas y el grado de desestabilización

¹⁴ EXALL. Using Coagulants to remove organic matter. Journal of the Awwa, Citado por GARCES PAZ, Rosa Obtención de la mínima dosis de reemplazo de policloruro de aluminio en aguas de Pereira. Pereira, 2010. p. 29.

(Coagulación), que es lo que permite que las condiciones sean efectivas para producir adherencia.

Como ayudantes a la coagulación, los polímeros se usan como ayudantes de coagulación, estos se adicionan de 30 a 60 segundos después del agente coagulador cuando las partículas ya se encuentran desestabilizadas, como se mencionó anteriormente, de esta forma se evita que parte de las partículas producidas por los coagulantes metálicos sean adsorbidas por las cadenas poliméricas y pierdan así su propiedad de desestabilización de los coloides causantes de la turbiedad¹⁵.

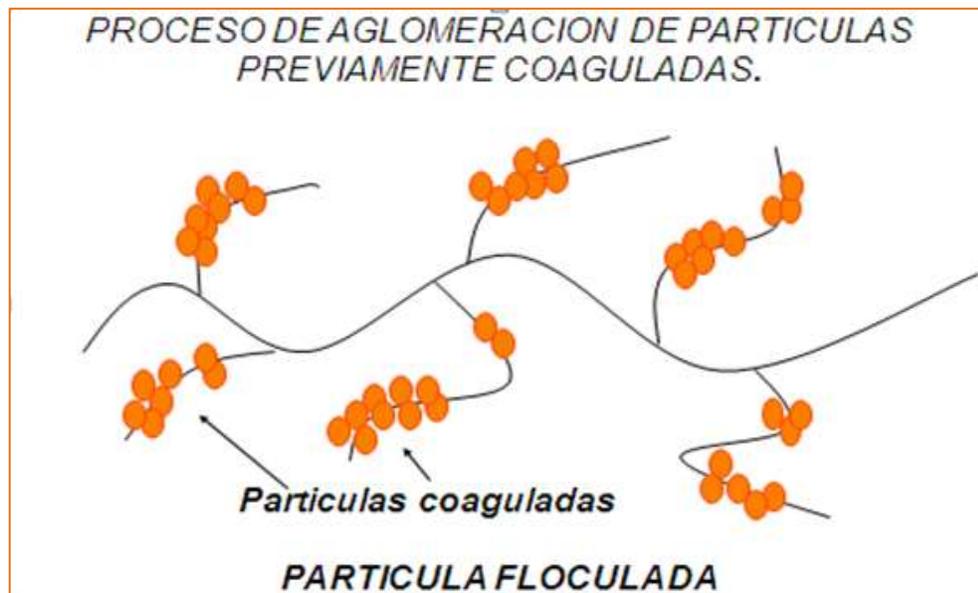
2.5.1 Cinética de la Floculación Tan pronto como se agregan coagulantes a una suspensión coloidal, se inician una serie de reacciones hidrolíticas que adhieren a la superficie de las partículas presentes en la suspensión, las cuales tienen así oportunidad de unirse por sucesivas colisiones hasta formar flóculos que crecen con el tiempo. La rapidez con que ocurre depende del tamaño de las partículas con relación al estado de agitación del líquido, de la concentración de las mismas y de su “grado de desestabilización”, que es el que permite que las colisiones sean efectivas para producir adherencia. Los contactos pueden realizarse por dos modos distintos:

- **Floculación Pericinética:** Contactos por bombardeo de las partículas producidos por el movimiento de las moléculas del líquido (movimiento browniano) que solo influye en partículas de tamaños menores a un micrón. Solo actúa al comienzo del proceso, en los primeros 6-10 s y es independiente del tamaño de partícula.

¹⁵ ARBOLEDA, Jorge. Teoría y Práctica de Purificación del Agua. Bogota, 2000. p. 51-58.

- **Floculación Ortocinética:** 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 solo con partículas mayores a un micrón. Actúa durante el resto del proceso, de 20 a 30 min.

Figura 5. Proceso de Floculación



Fuente: Autor

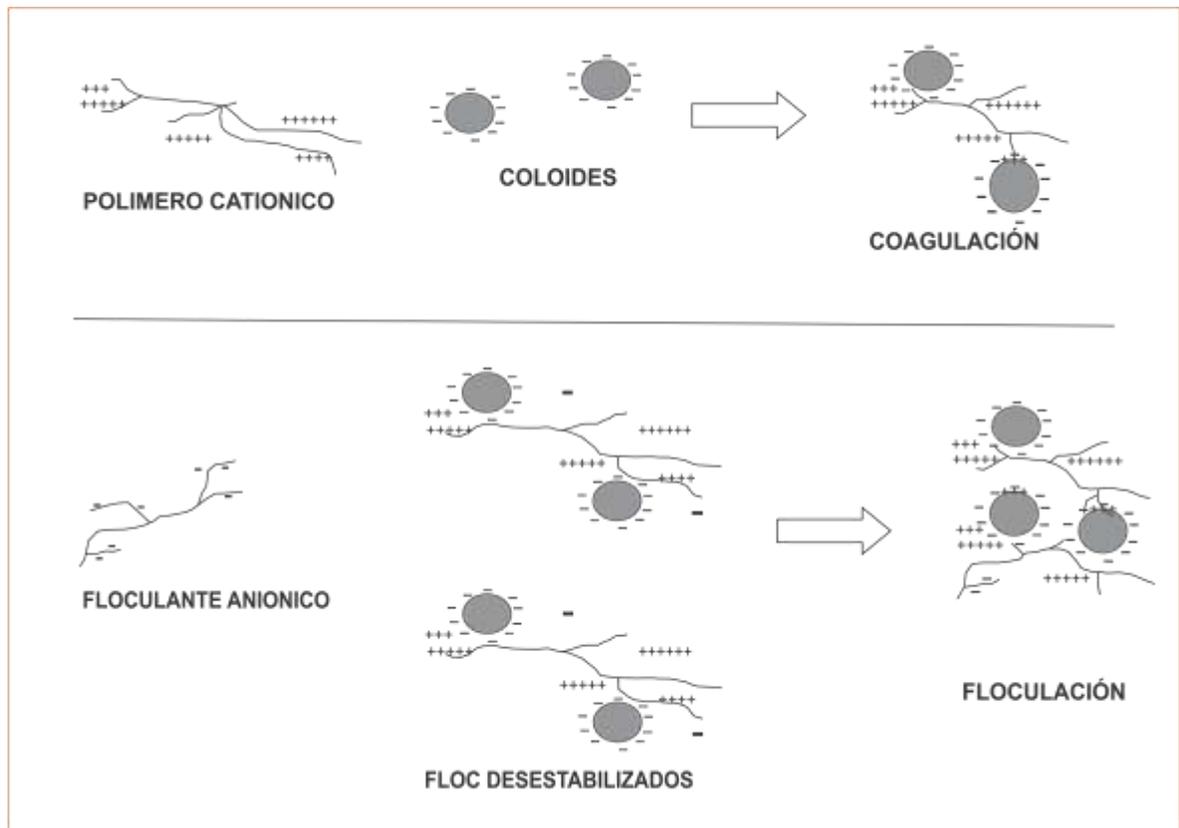
2.5.2 Factores que influyen en la floculación

- **Concentración y naturaleza de las partículas:** La velocidad de formación de floc es proporcional a la concentración de partículas en el agua y del tamaño inicial de estas.
- **Tiempo de detención:** 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 deber ser decreciente y no se deben tener cámaras intermedias con gradientes elevados.

Figura 6. Procesos de Coagulación y Floculación

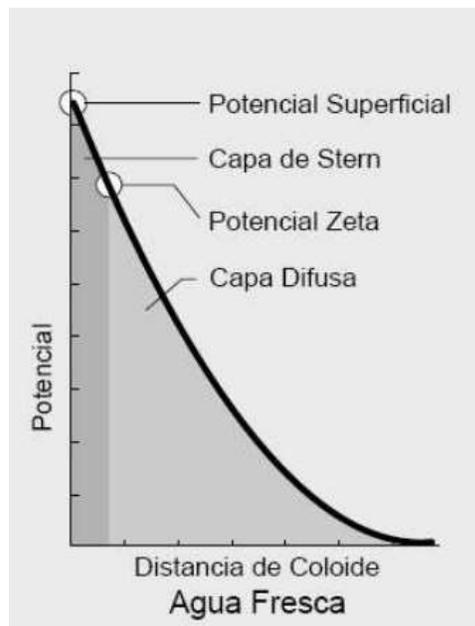


Fuente: Autor

2.6 POTENCIAL Z

El colóide negativo y su atmósfera cargada positivamente producen un potencial eléctrico relativo a la solución. Este tiene un valor máximo en la superficie y disminuye gradualmente con la distancia, aproximándose a cero fuera de la capa difusa. La caída del potencial y la distancia desde el colóide es un indicador de la fuerza repulsiva entre los coloides en función de la distancia a las cuales estas fuerzas entran en juego. Un punto de particular interés es el potencial donde se unen la capa difusa y la de Stern. Este potencial es conocido como el potencial zeta, el cual es importante porque puede ser medido de una manera muy simple, mientras que la carga de superficie y su potencial no pueden medirse. El potencial zeta puede ser una manera efectiva de controlar el comportamiento del colóide puesto que indica cambios en el potencial de la superficie y en las fuerzas de repulsión entre los coloides.

Figura 7 Potencial Zeta contra Potencial Superficial

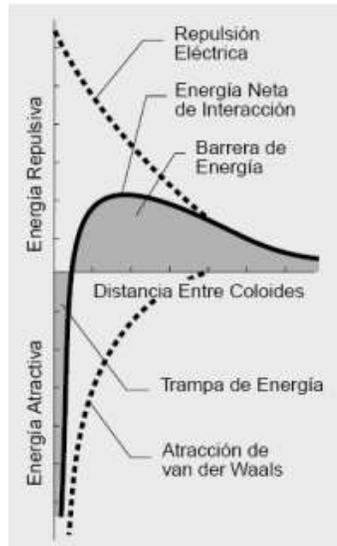


Fuente: RESTREPO OSORNO Hernán. Evaluación del proceso de coagulación-floculación de una planta de agua potable. Tesis de pregrado Medellín: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas, 2009. 17p.

2.6.1 Balance de Repulsión y Atracción La teoría DLVO (llamada así por DeJaguin, Landau, Verwey y Overbeek) es la clásica explicación de los coloides en suspensión. Esta se basa en el equilibrio entre las fuerzas de los coloides en suspensión. Esta se basa en el equilibrio entre las fuerzas opuestas de repulsión electrostática y atracción tipo Van Der Waals y explica por qué algunos coloides se aglomeran mientras que otros no lo hacen. La repulsión electrostática llega a ser importante cuando los coloides se aproximan y la doble capa comienza a interferir. Se requiere energía para sobrepasar y forzar la unión entre las partículas. Esta energía aumenta fuertemente cuando las partículas se acercan. Se usa una curva de repulsión electrostática para indicar la cantidad de energía que hay que vencer para que las partículas puedan ser forzadas a juntarse. Esta energía llega a un valor máximo cuando las partículas están casi juntas y disminuye a cero fuera de la doble capa. Su valor máximo está relacionado con el potencial de superficie.

La teoría DLVO explica la tendencia de los coloides a aglomerarse o permanecer separados al combinar la atracción de Van Der Waals y la curva de repulsión electrostática: la curva combinada es la energía neta de interacción. A cada distancia el pequeño valor se resta del mayor valor para dar energía neta. El valor neto se representa entonces arriba si es repulsivo o abajo si es atractivo, y así se forma la curva.

Figura 8 Energía Potencial de Interacción entre dos coloides



Fuente: RESTREPO OSORNO Hernán. Evaluación del proceso de coagulación-floculación de una planta de agua potable. Tesis de pregrado Medellín: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas, 2009. 19p.

2.6.2 Efecto de tipo y concentración de electrolitos Electrolitos simple e inorgánicos pueden tener un efecto significativo en el potencial zeta. El efecto frecuentemente depende de la valencia relativa de los iones y de su concentración. La valencia relativa también puede considerarse como tipo de electrolito, el cual se atiende como la razón estequiométrica entre el catión y anión.

2.6.3 Aplicación del Potencial Zeta en la Coagulación del Agua El potencial zeta es una manera adecuada de optimizar la dosificación de coagulante en el agua y en tratamientos de desagüe por coagulación. Los sólidos suspendidos más difíciles de remover son los coloides. Por su diminuto tamaño, ellos escapan fácilmente tanto en la sedimentación como a la filtración. El método para remover el coloide es mediante la disminución del potencial zeta con coagulantes tales como el alumbre, cloruro férrico y/o polímeros catiónicos. Una vez reducida o eliminada la carga no existirán fuerzas repulsivas y la ligera agitación del estanque de floculación causara numerosos choques entre los coloides. Esto resulta primero en la formación de

sistemas micro floculados, los cuales crecen hasta llegar a ser sistemas floculados visibles que se acomodan rápidamente y pueden ser filtrados fácilmente.

2.7 PRUEBA DE JARRAS

La coagulación química y la dosificación apropiada de reactivos deben ser seleccionadas por la simulación del paso de clarificación en un laboratorio a escala. La prueba de Jarras es la que mejor simula la química de la clarificación y la opera llevada a cabo. Un arreglo simple de vasos de precipitado y paletas permite comparar varias combinaciones químicas, las cuales todas están sujetas a condiciones hidráulicas similares.

Esta prueba se realiza con el fin de determinar la concentración óptima de coagulante necesaria para obtener un floc de las mejores características.

3. ANÁLISIS TÉCNICO DE USO DE COAGULANTES CONVENCIONALES Vs ALTERNATIVOS

La nueva generación de coagulantes inorgánicos pre-polimerizados PAC's presentan un comportamiento diferente a los convencionales, ya que tienen diferentes fases solidas en las reacciones hidrolíticas y los flóculos tienden a ser grupos de pequeñas esferas y/o estructuras tipo cadena con tamaño menor a los convencionales. Esta diferencia estructural hace que los PAC's produzcan una menor turbiedad en suspensión que los convencionales y hace que sean totalmente atractivos el estudio de este tipo de coagulantes ya que en el tratamiento convencional este parámetro es uno de los problemas críticos a la hora re-utilizar o disponer estos fluidos. En el presente estudio se evaluara el comportamiento del PAC granulado y el Sulfato de Aluminio (convencional), para determinar que producto en este caso específico es más viable técnicamente.

3.1 CARACTERIZACIÓN DEL FLUIDO A TRATAR

La caracterización de los fluidos a tratar se realizó a través de un laboratorio externo y las muestras se seleccionaron aleatoriamente de la perforación de pozos petroleros.

3.2 PROCEDIMIENTO DE COAGULACIÓN

Selección del coagulante

Se realiza ensayo de jarras como se describe en el documento anexo para el coagulante a ensayar y a comparar. La selección del coagulante depende de los siguientes factores:

- **Turbiedad final:** Se selecciona el coagulante que produzca valores de turbiedad finales menores a 10 UNT.
- **pH:** El producto seleccionado debe producir un agua con valores de pH y dentro del intervalo admisible por el decreto 1594/84.
- **Conductividad:** Se seleccionara el producto que produzca menores valores de conductividad.
- **Costos y disponibilidad en el mercado:** Se seleccionara el producto que tenga buena eficiencia en cuanto a los parámetros anteriormente mencionados y que sean de mejor costo y su disponibilidad sea inmediata y nacional.

Dosis Óptima de Coagulante

Se realiza el ensayo de jarras como se describe en el procedimiento *ES-COL-OP-W022 Desarrollo de la prueba de Jarras o tratrabilidad para el Dewatering*, para los dos productos a comparar y evaluar. La dosis óptima corresponde a aquella que produzca la menor turbiedad fina, conductividad baja y mantenga el pH dentro del rango de valores del 1594/84.

Corrección de pH

Cuando la alcalinidad del agua no es suficiente para reaccionar con el coagulante se añade al agua sustancias para amortiguar el pH, en este caso se utilizó hipoclorito de sodio al 70%.

Se realiza el ensayo de jarras según el procedimiento *ES-COL-OP-W022*, aplicando a cada jarra la dosis optima de producto encontrada en la prueba de dosis óptima.

3.3 PROCEDIMIENTO EN EL LABORATORIO DE COAGULACIÓN

Se realizan ensayos de jarras empleando 2 tipos de coagulantes, el convencional Sulfato de Aluminio (*C1*) y el Policloruro de aluminio granulado (*C2*), *que es el producto que se quiere evaluar*. Se probaron concentraciones de ambos productos al 0.5%, 1%, 5% y 10%, estos ensayos se realizó para ambos fluidos (Platanillo 15 y Careto 13). Como resultado de estas primeras corridas se descartaron las soluciones preparadas al 0.5% y 1% de ambos productos ya que no tuvieron ningún efecto sobre el fluido.

3.4 PROCEDIMIENTO DE FLOCULACIÓN

Se realizan ensayos de jarras empleando las concentraciones y dosificaciones óptimas de coagulante *C1* y *C2* previamente encontradas. Los floculantes utilizados fueron 2 tipos de poliacrilamidas Cyfloc 1143 y 1146. La mezcla rápida se hace durante 1 min a 100 rpm. La floculación se lleva con el mismo gradiente (40 s-1) y se establece un tiempo de floculación (*t*) de 10 min, luego se deja sedimentar durante 10 min y se determina la turbiedad, pH y conductividad.

Una vez ya seleccionado el floculante y con las concentración de coagulante seleccionadas a evaluar se realiza un último ensayo donde se inyecta 0.1ml de hipoclorito de calcio al 0.5% al final de la prueba para ayudar al proceso de tratamiento mejorando el color del fluido ayudando a que algunos sólidos suspendidos se adhieran a los flocs ya formados.

Se grafica turbiedad residual (NTU), conductividad (mS/cm) y pH contra dosificación de la solución seleccionada de los coagulantes, para evaluar el desempeño de ambos productos.

3.5 MATERIALES Y PRODUCTOS Químicos

- Floculador E&Q 4 puestos
- pH metro HANNA 8314
- Conductivímetro HANNA 1140
- Turbidímetro E&Q T-1000
- Beakers plásticos de 600 ml
- Beakers plásticos de 500 ml
- Jeringas de 5 ml

Tabla 4. Productos Químicos

Producto Químico	Tipo	Concentración
Sulfato de Aluminio	Coagulante	0.5%; 1%; 5%; 10%
Policloruro de Aluminio	Coagulante	0.5%; 1%; 5%; 10%
WT-1143	Floculante	0.1%
WT-1146	Floculante	0.1%
Hipoclorito de Calcio	Blanqueador y desinfectante	0.5%

3.6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.6.1 Caracterización del agua

Tabla 5. Caracterización Agua sin tratar Pozo Platanillo 15

REPORTE DE RESULTADOS				
PARÁMETRO	UNIDAD	MÉTODO ANALITICO	LIMITE DE CUANTIFICACION CHEMILAB	AGUA SIN TRATAR MI 6995
Alcalinidad total*	mg/L	SM 2320 B	6,04	406
Arsénico total	mg/L	EPA 7062, S, 3114 C	0,01	<0,01
Bario Total*	mg/L	SM 3030 E modificado, SM 3111D	0,5	<0,5
Cadmio total*	mg/L	SM 3030 E modificado, SM 3113B	0,5	<0,05
Cloruros*	mg/L	SM 4500 CR B	9,9	600
Coliformes fecales	NPM/100mL	SM 9223 B	10	3410
Coliformes totales	NPM/100mL	SM 9223 B	10	>241960
Color aparente (sin filtrar, agua residuales)*	UPC	SM 2120 C	5,0	9075
Conductividad*	uS/cm	SM 2510 B	1,0	6650
Cloro libre	mg/L	SM 4500-CI G ADOPTADO POR HACH 8021	0,02	1,14
Cloro total	mg/L	SM 4500-CI G ADOPTADO POR HACH 8167	0,02	1,18
Cromo Hexavalente*	mg/L	SM 3500 CR B	0,04	0,304
DBO5 (Demanda Bioquímica de Oxígeno)	mg/L	SM 5210 B, ASTM 888-09 METODO C	5,0	4050
DQO rango alto (demanda Química de Oxígeno)*	mg/L	SM 5220 D	30,0	8231
Dureza total*	mg/L	SM 2340 C	4,08	524
Fenoles totales*	mg/L	SM 5530 B, D	0,1	0,772
Grasas y Aceites*	mg/L	NTC 3362: 2005-06-29, Numeral 4, Método C	0,2	16,6
Hidrocarburos totales (TPH)*	mg/L	NTC 3362: 2005-06-29 Método C y numeral 7, Método F	0,2	1,20
Mercurio Total*	mg/L	SM 3112 B	0,002	<0,002
Nitratos*	mg/L	SM4500 NO3 B	0,5	83,3
Nitritos*	mg/L	SM 4500 NO2 B	0,02	<0,02
Oxígeno disuelto*	mg/L	ASTM D888-09 METODO C	0,1	0,180
pH*	Unidades de pH	SM 4500 H+B	N.A	6,02
Plata Total*	mg/L	SM 3030 E MODIFICADO, SM 3111 B	0,05	<0,05
Plomo Total*	mg/L	SM 3030 E MODIFICADO, SM 3111 B	0,5	<0,5
RAS (Relación de Adsorción de Sodio)	---	CALCULO	N.A	25,3
Selenio Total*	mg/L	EPA 7742, SM 3114 C	0,005	<0,005

REPORTE DE RESULTADOS				
PARÁMETRO	UNIDAD	MÉTODO ANALITICO	LIMITE DE CUANTIFICACION CHEMILAB	AGUA SIN TRATAR
				MI 6995
Sodio Total*	mg/L	SM 3030 E MODIFICADO, SM 3111 B	0,05	169
Sólidos disueltos Totales*	mg/L	SM 2540 C	10,0	3111
Sólidos suspendidos totales*	mg/L	SM 2540 D	10,0	480
Sulfatos*	mg/L	SM 4500 SO4 E	2,0	852
Turbidez*	NTU	SM 2130 B	1,0	608
Zinc Total*	mg/L	SM 3030 E MODIFICADO, SM 3111 B	0,05	<0,05

Fuente: Laboratorio externo Chemilab

Tabla 6. Caracterización Agua Pozo Careto 13

REPORTE DE RESULTADOS				
PARÁMETRO	UNIDAD	MÉTODO ANALITICO	LIMITE DE CUANTIFICACION CHEMILAB	SIN TRATAR
				MI 6995
Acidez Total	mg/L	SM 2310 B	2,54	<2,54
Alcalinidad total*	mg/L	SM 2320 B	6,04	354
Arsénico total	mg/L	EPA 7062, S, 3114 C	0,01	<0,01
Bario Total*	mg/L	SM 3030 E modificado, SM 3111D	0,5	<0,5
Bicarbonatos	mg/L	SM 2320 B	6,0	354
Calcio Total*	mg/L	SM 3030 E MODIFICADO, SM 3111 B	0,1	62,7
Carbono orgánico total (COT)	mg/L	SM 5220 D + CALCULO	5,0	908
Carbonatos	mg/L	CALCULO	6,0	<6,0
Cloruros*	mg/L	SM 4500 CL - B	9,9	355
Coliformes fecales	NPM/100mL	SM 9223 B	10,0	>241960
Coliformes totales	NPM/100mL	SM 9223 B	10,0	>241960
Color aparente (sin filtrar, agua residuales)*	UPC	SM 2120 C	3,0	1710
Conductividad*	uS/cm	SM 2510 B	1,0	2870
DBO5 (Demanda Bioquímica de Oxígeno)	mg/L	SM 5210 B, ASTM 888-09 METODO C	5,0	792
Detergentes - Tensoactivos (SAAM)*	mg/L	SM 5540 C	0,5	1,19
DQO rango alto (demanda Química de Oxígeno)*	mg/L	SM 5220 D	30,0	2214
Fenoles totales*	mg/L	SM 5530 B, D	0,1	<0,1
Fósforo orgánico	mg/L	SM4500-P E	0,07	0,667
Fósforo inorgánico (ortofosfatos)*	mg/L	SM4500-P E	0,21	2,04
Grasas y Aceites*	mg/L	NTC 3362:2005-06-29, NUMERAL 4	0,2	24,4
Hidrocarburos totales (TPH)*	mg/L	NTC 3362:2005-05-29 NUMERAL 4	0,2	5,30

REPORTE DE RESULTADOS				
PARÁMETRO	UNIDAD	MÉTODO ANALITICO	LIMITE DE CUANTIFICACION CHEMILAB	SIN TRATAR
				MI 6995
Hierro Total*	mg/L	SM 3030 E MODIFICADO, SM 3111 B	0,2	22,9
Magnesio Total*	mg/L	SM 3030 E MODIFICADO, SM 3111 B	0,02	0,994
Mercurio Total*	mg/L	SM 3112 B	0,002	<0,02
Nitratos*	mg/L	SM 4500 NO3 B	0,05	16,0
Nitritos*	mg/L	SM 4500 NO2 B	0,02	0,404
Nitrógeno amoniacal	mg/L NH3-N	SM 4500-NH3 B, Asian Journal of	0,05	17,8
Oxígeno disuelto*	mg/L	ASTM D 888-09 METODO C	0,1	0,120
pH*	und	SM 4500 H+B	N.A	6,64
Plomo Total*	mg/L	SM 3030 E MODIFICADO, SM 3111 B	0,5	<0,5
Potasio Total*	mg/L	SM 3030 E MODIFICADO, SM 3111 B	0,125	33,4
Sodio Total*	mg/L	SM 3030 E MODIFICADO, SM 3111 B	0,05	428
Sólidos disueltos Totales*	mg/L	SM 2540 C	8,0	1343
Sólidos sedimentables*	mg/L	SM 2540 F	0,1	0,600
Sólidos suspendidos totales*	mg/L	SM, 2540 D	10,0	337
Sulfatos*	mg/L	SM 4500 SO4 E	2,0	359
Temperatura*	°C	SM 2550 B	N.A	27,0
Turbidez*	NTU	SM 2130 B	1,0	173

Fuente: Laboratorio externo Chemilab

3.6.2 Prueba de jarras FASE I: Selección de la concentración del coagulante y el floculante a utilizar en la segunda fase de estudio.

Ensayo #1

- Se corrió 4 pruebas para cada muestra (Platanillo y Careto) tomando 400 ml de muestra, bajo las condiciones estipuladas en las tablas 7, 8, 9,10.
- Se seleccionó las 2 concentraciones más óptimas de los coagulantes para continuar con la evaluación técnica de los productos, esto mediante una evaluación visual del resultado en la prueba de jarras, se evaluó el floc formado, estabilidad y tiempo de floculación de estos, de igual manera la calidad del agua tratada.

Tabla 7. Prueba con Sulfato y Cyfloc 1143

Test	
Producto Químico	Concentraciones
Sulfato de Aluminio	0.5%, 1%, 5%, 10%
WT 1143	0.1%

Tabla 8. Prueba con Sulfato y Cyfloc 1146

Test	
Producto Químico	Concentraciones
Sulfato de Aluminio	0.5%, 1%, 5%, 10%
WT 1146	0.1%

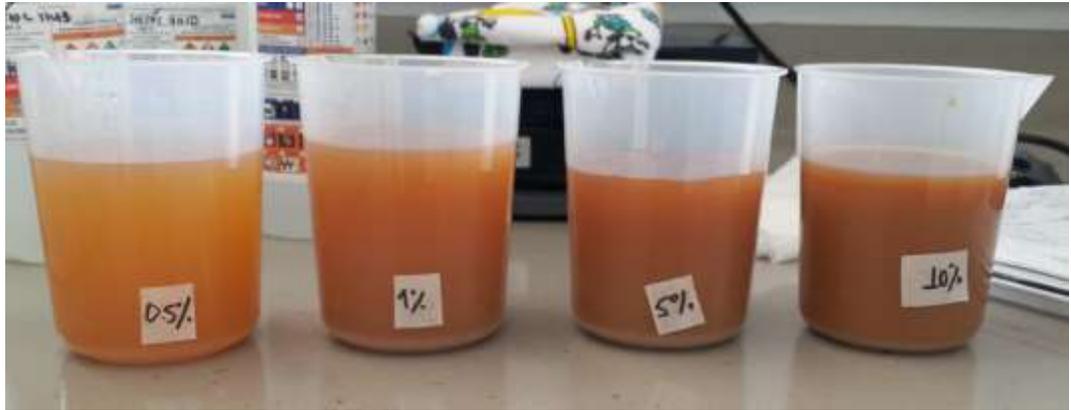
Tabla 9 Prueba con PAC y Cyfloc 1143

Test	
Producto Químico	Concentraciones
Policloruro de Aluminio	0.5%, 1%, 5%, 10%
WT 1143	0.1%

Tabla 10. Prueba con PAC y Cyfloc 1146

Test	
Producto Químico	Concentraciones
Policloruro de Aluminio	0.5%, 1%, 5%, 10%
WT 1146	0.1%

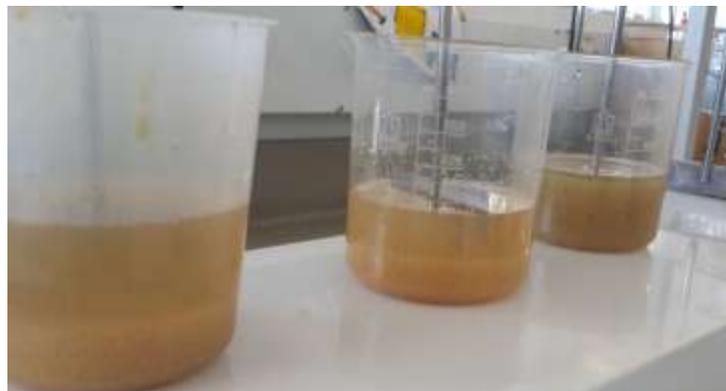
Figura 9. Soluciones de PAC preparadas a diferentes concentraciones (0.5, 1, 5,10%)



Resultados:

- Se encontró que para el fluido de Platanillo 15 las concentraciones de PAC y sulfato más óptimas fue la de 5% y 10% con floculante cyfloc1146 al 0.1%.
- Se encontró que para el fluido de Careto 13 ST1 las concentraciones más óptimas de sulfato y PAC fue de 5% y 10% con cyfloc 1143 y 1146 al 0.1%.

Figura 10. Prueba de Jarras PAC Platanillo 15



Ensayo #2:

- Se realizaron 2 nuevas corridas mezclando el fluido de ambos pozos y se corrió bajo las condiciones de las tablas 11, 12, 13 y 14.

Tabla 11. Prueba con Sulfato al 5 y 10% y Cyfloc 1146

Test	
Producto Químico	Concentraciones
Sulfato de Aluminio	5%, 10%
WT 1146	0.1%

Tabla 12. Prueba con PAC al 5 y 10% y Cyfloc 1146

Test	
Producto Químico	Concentraciones
Polícloruro de Aluminio	5%, 10%
WT 1146	0.1%

Tabla 13. Prueba con Sulfato al 5 y 10% con Cyfloc 1143

Test	
Producto Químico	Concentraciones
Polícloruro de Aluminio	5%, 10%
WT 1143	0.1%

Tabla 14. Prueba con PAC al 5 y 10% y Cyfloc 1143

Test	
Producto Químico	Concentraciones
Polícloruro de Aluminio	5%, 10%
WT 1143	0.1%

Tabla 15. Caracterización de la muestra (mezcla)

Parámetro	Valor
Turbiedad	602 NTU
Conductividad	3800
pH	6.5

Figura 11. Concentraciones seleccionadas de Coagulante A (Sulfato) y B (PAC)



Figura 12. Medición de Parámetros de Interés



Resultados:

- Se encontró que las mejores concentraciones de coagulante fue el 5% y 10% con Cyfloc 1143 al realizar medición de turbidez, conductividad y pH.

Ensayo #3

- Se corrió una prueba adicional para ajustar un poco el pH ya que tiene un pH básico y mejorar la calidad del agua en cuanto a color y turbidez. Esta se corrió bajo los parámetros de la tabla 16.

Tabla 16. Prueba con Hipoclorito de Calcio

Test	
Producto Químico	Concentraciones
Sulfato de Aluminio	5%, 10%
Policloruro de Aluminio	5%, 10%
WT 1143	0.1%
Hipoclorito de Calcio	0.5%

Figura 13. Optimización de la prueba con Hipoclorito de Ca



Resultados:

- La adición de hipoclorito al 0.5% mejoro la turbidez y color del efluente determinado así la mezcla para llevar a cabo las pruebas de evaluación técnica y optimización de dosificación de productos.

3.6.3 Prueba de Jarras FASE II Como parte final del estudio se realizó los últimos 2 ensayos de jarras con el mismo fluido del ensayo #2 de la fase I, tabla #15 para comparar la eficiencia entre el sulfato de aluminio y el policloruro de aluminio, se grafica turbiedad residual (NTU), conductividad (mS/cm) y pH contra dosificación de producto en ml para evaluar el comportamiento de ambos productos en el fluido.

Se analiza las tendencias de los parámetros de interés y se selecciona la mejor concentración de producto en cuanto a eficiencia de tratamiento. Estas pruebas se realizaron bajo las condiciones estipuladas en la tabla#15, como se mencionó anteriormente.

Tabla 17. Prueba evaluación de coagulantes

Test	
Producto Químico	Concentraciones
Sulfato de Aluminio	5%, 10%
Policloruro de Aluminio	5%, 10%
WT 1143	0.1%
Hipoclorito de Calcio	0.5%

Resultados:

Tabla 18. Parámetros de interés con coagulantes al 10%

Jarra No.	Coagulantes 10 %		Resultados					
	Sulfato de Aluminio (C1) (ml)	PAC (ml) (C2)	pH_{C1}	pH_{C2}	Cond. (us/cm)_{C1}	Cond. (us/cm)_{C2}	Turbiedad (NTU)_{C1}	Turbiedad (NTU)_{C2}
1	0.1	0.1	6.7	6.4	3200	3500	448	450
2	0.5	0.5	6.9	6.4	3500	2900	360	350
3	1	1	7.8	7.5	3800	2500	230	220
4	1.5	1.5	8	8.1	3900	3400	343	360

- La concentración al 10% con sulfato de aluminio y PAC, no mostro ningún efecto sobre el efluente a tratar, tal como muestra la figura#14.

Figura 14. Prueba de Jarras al 10% de producto

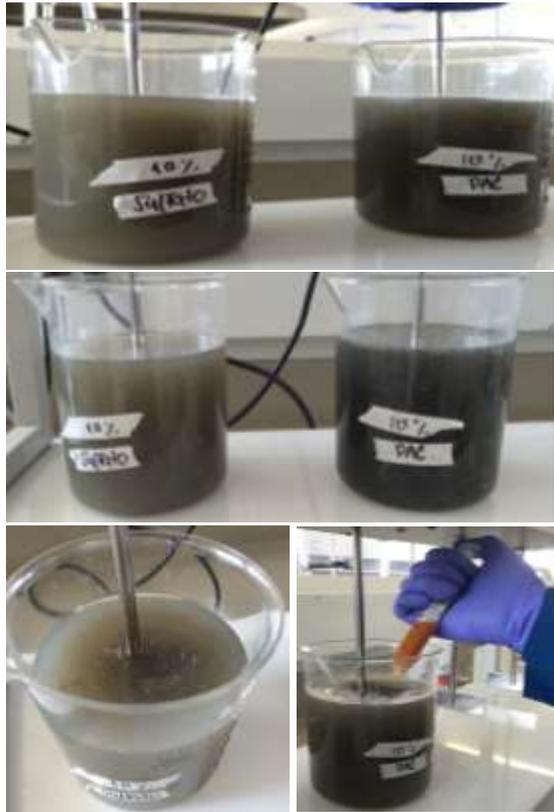
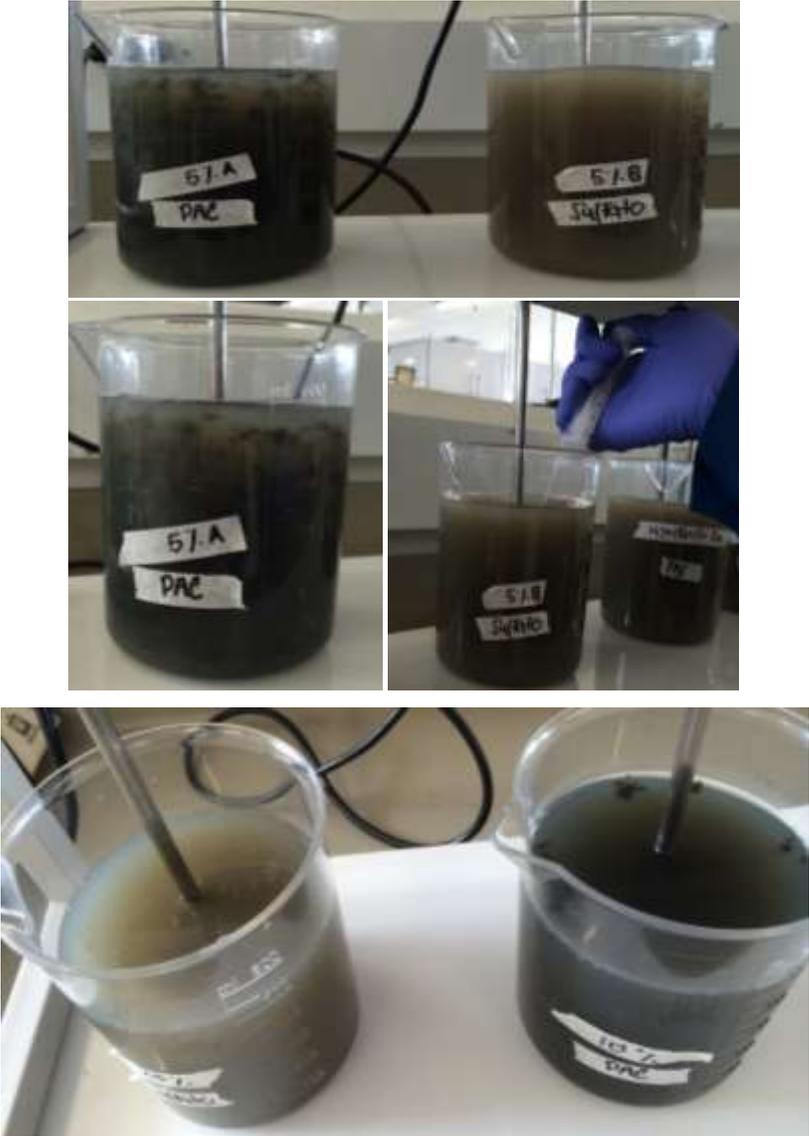


Tabla 19. Parámetros de interés con coagulantes al 5%

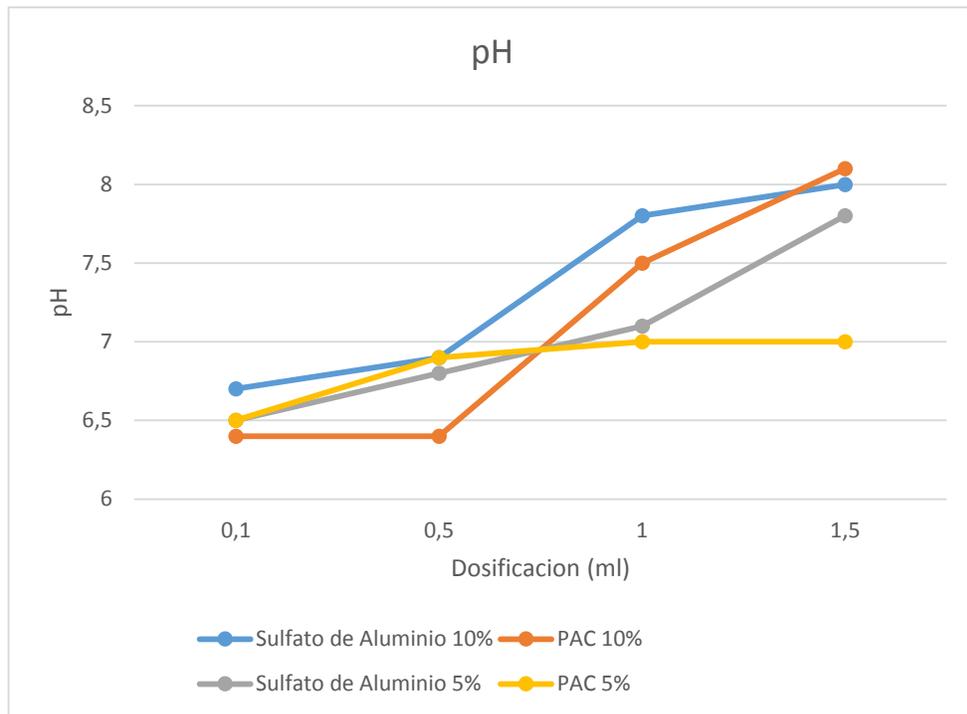
Jarra No.	Coagulantes 5 %		Resultado					
	Sulfato de Aluminio (C1) (ml)	PAC (ml) (C2)	pH C1	pH C2	Cond. (us/cm)C1	Cond. (us/cm)C2	Turbiedad (NTU)C1	Turbiedad (NTU)C2
1	0.1	0.1	6.5	6.5	3200	3500	350	330
2	0.5	0.5	6.8	6.9	3000	2720	270	248
3	1	1	7.1	7	3400	2500	200	180
4	1.5	1.5	7.8	7	3600	3200	290	240

La concentración al 5% de ambos productos mostro los mejores resultados en cuanto a la formación de flóculos, calidad de estos en consistencia y estabilidad.

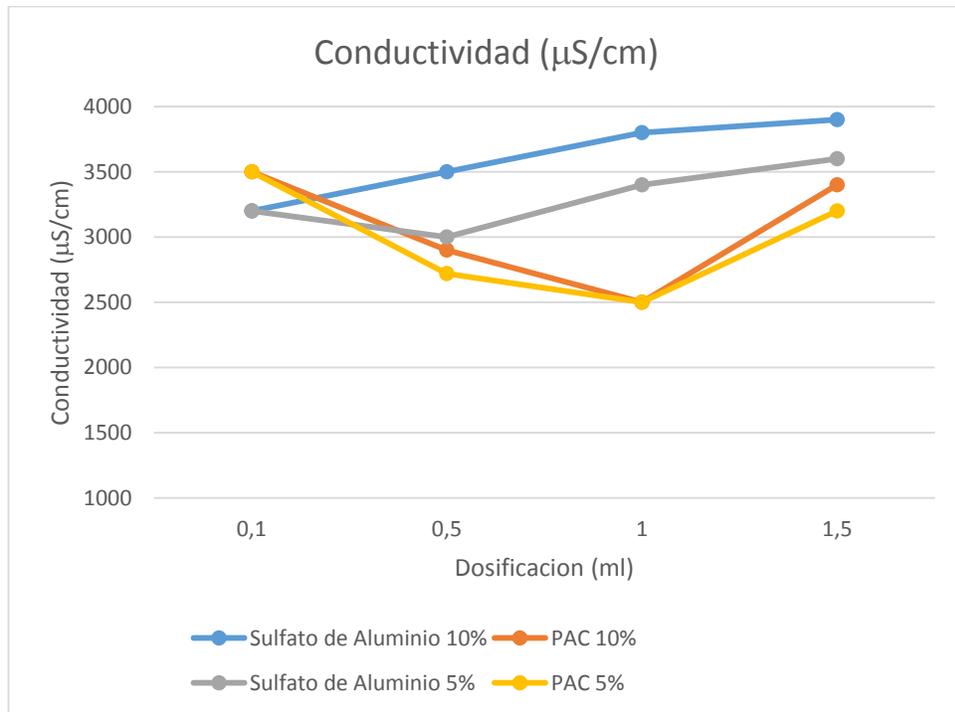
Figura 15. Prueba de Jarras al 5% de producto



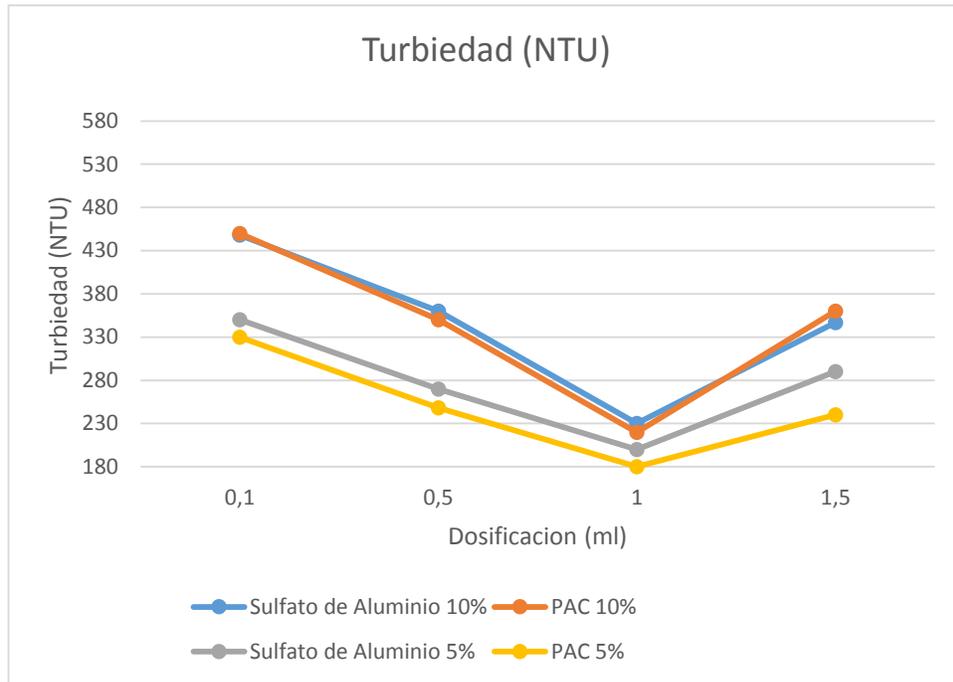
Gráfica 1. Comportamiento del pH Vs Concentración de Productos



Gráfica 2. Comportamiento de la conductividad Vs Concentración de Productos



Gráfica 3. Comportamiento de la Turbiedad Vs Concentración de Productos



Discusión de Resultados:

pH: Al evaluar el comportamiento del pH con la aplicación de los 2 productos a las diferentes concentraciones, estos no tuvieron mayor influencia en la variación del pH y se mantuvo en un rango adecuado al pH de un fluido de perforación y dentro de la normatividad nacional vigente (5-9). Se evidencia que a una mayor concentración de producto trata de elevar el pH por lo que se concluye que es mejor aplicar estos productos a concentraciones no mayores a 10% en peso.

Conductividad: Al evaluar el comportamiento de la conductividad que es la capacidad del agua para conducir la corriente eléctrica se observa que el sulfato de aluminio es el que más eleva este parámetro y esto se debe a que la conductividad puede incrementar por la cantidad de iones sulfato presentes en el fluido, ya que iones como este son una medida indirecta de la conductividad de un cuerpo de agua. Al analizar el tratamiento con policloruro de aluminio se evidencia que hay

disminución de este parámetro y que no lo aumenta como el sulfato pero es casi la misma eficiencia de tratamiento al 5% y 10%.

Turbiedad: Las sustancias responsables de la turbiedad del agua son las partículas en suspensión, tales como arcillas, minerales, sedimentos, materia orgánica e inorgánica. Estas partículas causantes de la turbiedad pueden ser coloidales o materia insoluble de mayor tamaño. Los componentes más frecuentes y comunes de las aguas turbias son las arcillas. Otro parámetro muy asociado a la turbiedad es el color que diferentes investigadores afirman que este es aportado por partículas coloidales hidrofóbicos, es decir aquellos que tienen poca afinidad con el agua y causan turbiedad de esta¹⁶.

Se evidencia en los ensayos realizados que para la remoción de turbiedad tanto el sulfato y el policloruro de aluminio, se comportan muy similar en cuanto a porcentajes de remoción siendo el mejor el del PAC ya que el porcentaje de remoción fue del 70% al 5%.

3.6.4 Cálculos matemáticos para conseguir la dosificación ideal en eficiencia Vs consumo. Se realizó un análisis matemático para escalar la cantidad de producto a utilizar para el tratamiento de un catch tank con un volumen aproximado de 180 bbl (Vol. aproximado de agua industrial a tratar por día de perforación). Se determinó de igual manera la concentración en mg/l (ppm) de producto.

¹⁶ BARRENCHEA A, Química de Ada Berrenchea Martel, Capítulo 4 Coagulación. 163 p.

Gráfica 4. Cálculos matemáticos a diferentes dosificaciones de sulfato de aluminio al 5%

Sulfato (%)	5	
1 L	1000	ml
$V_{preparar}$ (bbl)	180	
1 gal	3.72	L
X	0.4	L
X (gal)	0.107526882	
1 bbl	42	gal
Y (bbl)	0.002560164	
$V_{gastado}$ (ml)	0.1	
$V_{gastado}$ (gal)	2.68817E-05	
Al 100%	1.89	gal
Al 5%	0.0945	gal → 0.35154 L 351.54 ml
ρ (gr/ml)	2.67	
	938.6118	gr → 0.938612 kg
ppm (mg/L)	12.50025	

Sulfato (%)	5	
1 L	1000	ml
$V_{preparar}$ (bbl)	180	
1 gal	3.72	L
X	0.4	L
X (gal)	0.107526882	
1 bbl	42	gal
Y (bbl)	0.002560164	
$V_{gastado}$ (ml)	0.5	
$V_{gastado}$ (gal)	0.000134409	
Al 100%	9.45	gal
Al 5%	0.4725	gal → 1.7577 L 1757.7 ml
ρ (gr/ml)	2.67	
	4693.059	gr → 4.693059 kg
ppm (mg/L)	62.50125	

Sulfato (%)	5	
1 L	1000	ml
$V_{preparar}$ (bbl)	180	
1 gal	3.72	L
X	0.4	L
X (gal)	0.107526882	
1 bbl	42	gal
Y (bbl)	0.002560164	
$V_{gastado}$ (ml)	1	
$V_{gastado}$ (gal)	0.000268817	
Al 100%	18.9	gal
Al 5%	0.945	gal → 3.5154 L 3515.4 ml
ρ (gr/ml)	2.67	
	9386.118	gr → 9.386118 kg
ppm (mg/L)	125.0025	

Sulfato (%)	5	
1 L	1000	ml
$V_{preparar}$ (bbl)	180	
1 gal	3.72	L
X	0.4	L
X (gal)	0.107526882	
1 bbl	42	gal
Y (bbl)	0.002560164	
$V_{gastado}$ (ml)	1.5	
$V_{gastado}$ (gal)	0.000403226	
Al 100%	28.35	gal
Al 5%	1.4175	gal → 5.2731 L 5273.1 ml
ρ (gr/ml)	2.67	
	14079.177	gr → 14.07918 kg
ppm (mg/L)	187.50375	

Gráfica 5. Cálculos matemáticos a diferentes dosificaciones de PAC al 5%

PAC (%)	5	
1 L	1000	ml
$V_{preparar}$ (bbl)	180	
1 gal	3.72	L
X	0.4	L
X (gal)	0.107526882	
1 bbl	42	gal
Y (bbl)	0.002560164	
$V_{gastado}$ (ml)	0.1	
$V_{gastado}$ (gal)	2.68817E-05	
Al 100%	1.89	gal
Al 5%	0.0945	gal → 0.35154 L 351.54 ml
ρ (gr/ml)	1.41	
	495.6714	gr → 0.495671 kg
ppm (mg/L)	12.50025	

PAC (%)	5	
1 L	1000	ml
$V_{preparar}$ (bbl)	180	
1 gal	3.72	L
X	0.4	L
X (gal)	0.107526882	
1 bbl	42	gal
Y (bbl)	0.002560164	
$V_{gastado}$ (ml)	0.5	
$V_{gastado}$ (gal)	0.000134409	
Al 100%	9.45	gal
Al 5%	0.4725	gal → 1.7577 L 1757.7 ml
ρ (gr/ml)	1.41	
	2478.357	gr → 2.478357 kg
ppm (mg/L)	62.50125	

PAC (%)	5	
1 L	1000	ml
$V_{preparar}$ (bbl)	180	
1 gal	3.72	L
X	0.4	L
X (gal)	0.107526882	
1 bbl	42	gal
Y (bbl)	0.002560164	
$V_{gastado}$ (ml)	1	
$V_{gastado}$ (gal)	0.000268817	
Al 100%	18.9	gal
Al 5%	0.945	gal → 3.5154 L 3515.4 ml
ρ (gr/ml)	1.41	
	4956.714	gr → 4.956714 kg
ppm (mg/L)	125.0025	

PAC (%)	5	
1 L	1000	ml
$V_{preparar}$ (bbl)	180	
1 gal	3.72	L
X	0.4	L
X (gal)	0.107526882	
1 bbl	42	gal
Y (bbl)	0.002560164	
$V_{gastado}$ (ml)	1.5	
$V_{gastado}$ (gal)	0.000403226	
Al 100%	28.35	gal
Al 5%	1.4175	gal → 5.2731 L 5273.1 ml
ρ (gr/ml)	1.41	
	7435.071	gr → 7.435071 kg
ppm (mg/L)	187.50375	

Tabla 20. Cantidad de producto en Kg para 180 bbl

Dosificación (ml)	Sulfato 5% Cant. (Kg)	PAC 5% Cant. (Kg)	mg/lit (ppm) Sulfato de Al	mg/lit (ppm) PAC
0.1	0.93	0.49	12.5	12.5
0.5	4.69	2.47	62.5	62.5
1	9.38	4.95	125	125
1.5	14.07	7.43	187	187

Evaluación técnica del Policloruro de Aluminio

Esta evaluación se hizo de acuerdo a los resultados obtenidos en las anteriores pruebas y a partir de estos resultados se determinó la viabilidad de utilizar como coagulantes los dos productos evaluados, sulfato de aluminio y policloruro de aluminio al 5%.

Las concentraciones de del policloruro de aluminio al 5% muestra los mejores resultados en cuanto a % de remoción en la turbiedad y no afecta el incremento de la conductividad y el pH no se ve influenciado y en cambio se logra acercar más a la neutralidad, por lo tanto se podría concluir que para este caso puntual de estudio tomando una muestra aleatoria de dos pozos se podría evaluar la viabilidad técnica de reemplazar el sulfato de aluminio por el policloruro de aluminio, aunque se debe evaluar económicamente esta alternativa para concluir cual producto es más viable técnicamente y económicamente.

Reducción en el consumo de coagulante: La reducción en el consumo de coagulante al usar el policloruro de aluminio tal como muestra la tabla #20, hace viable el cambio.

Forma de dosificación: El PAC se puede preparar y dosificar de la misma manera que el Sulfato, ya que ambos productos son granulados su sistema de preparación es el mismo y no incrementa el costo del proyecto.

Reducción del consumo de hipoclorito de Ca: Las gráficas 3 y 5 muestran que el hipoclorito de Ca no es necesario para mantener el pH en los rangos permitidos y que en la turbiedad ayuda pero no representativamente, mientras que con el sulfato de aluminio debe casi siempre la mayoría de las veces aplicarse.

Efectividad en el rango del pH: El policloruro trabaja en un rango de pH más amplio, lo cual garantiza que para cualquier valor de pH en el agua, este trabajara adecuadamente, lo cual lo hace viable técnicamente.

Parámetros de calidad de agua tratada: Los parámetros de interés evaluados para el agua tratada con los dos coagulantes cumplen con lo estipulado en el decreto 1594/84 en cuanto a pH, la conductividad y turbiedad se evaluaran según los parámetros de disposición de cada proyecto, la conductividad en la mayoría de los casos debe ajustarse con tratamiento de dilución para disposición.

Corrosión: El policloruro tiene mayor poder corrosivo que el sulfato de aluminio, por lo cual se debe tener cuidado con las vasijas donde se almacena el fluido tratado, en el recipiente que se prepara y si es un fluido con alta cantidad de hierro evaluar la dosificación mínima de tratamiento.

Como conclusión se determinó que la opción más viable técnicamente para tratamiento es el PAC al 5% con una dosificación de 125 ppm.

4. ANÁLISIS COMPARATIVO ECONÓMICO DEL USO DE COAGULANTES ALTERNATIVOS VS CONVENCIONALES

El consumo de productos químicos que habría con el uso de cada coagulante se predijo de la siguiente manera: Se realizó los cálculos de volumen de agua producida por la perforación de 1 pozo de profundidad 16860 ft, con 55 días de operación, se calculó el volumen producido por cada sección (26, 17 ½, 12 ¼, 8 ½,) y se calculó el costo por consumo de coagulante en kg en base a los cálculos realizados anteriormente para 180 bbl.

Tabla 21. Volúmenes a tratar por cada sección

Sección	Volumen (bbl)	Profundidad (ft)	bbl / Ft
26	1577	500	3.15
17 ½	4935	10000	0.49
12 ¼	4941	4200	1.18
8 ½	4276	2160	1.98
Total	15,730	16,860	0.93

Tabla 22. Cantidad de producto por Vol. a tratar

Vol. preparar en bbl	PAC (Kg)	Sulfato (Kg)
180	4.96	9.39
15,730	433.456	820.26

Tabla 23. Análisis de Costos

Volumen a tratar	PAC a utilizar (Kg)	Sulfato a utilizar (Kg)	Costo unitario PAC (COP\$)	Costo unitario Sulfato (COP\$)	Total COP\$ PAC	Total COP\$ Sulfato
15,730	433.456	820.26	38,750.00	31,250.00	671,856.51	1,025,319.63

La tabla anterior muestra que desde el punto de vista económico no es viable utilizar sulfato de aluminio para este caso de estudio, pero si es viable utilizar el policloruro de aluminio ya que el costo por consumo de productos químicos usando este coagulante en forma granulada representa menor costo frente al sulfato de aluminio. A nivel técnico en perforación se puede presentar diferentes caracterizaciones de fluidos y por experiencia generalmente el sulfato de aluminio trabaja muy bien clarificando cualquier tipo de fluidos aunque sus desventajas a nivel ambiental lo hacen menos amigable este producto también podría ser una opción para el tratamiento de este fluido a la misma concentración del PAC (5%), pero al realizar un análisis de ganancias en ahorro para las empresas de servicio usar el policloruro de aluminio representa un margen de 30% en ahorro para este caso de estudio puntual.

5. CONCLUSIONES

1. Para este estudio se tomó muestras de 2 pozos de campos diferentes, por esta razón la caracterización de ambos fluidos era muy diferente y lo que se quería lograr era tener una muestra heterogénea de lo que se puede presentar en campo, por esta razón a partir del ensayo #2 se continuo con trabajando con esta mezcla, aunque es muy difícil simular una muestra real de campo, pues cada campo tiene yacimientos y formaciones diferentes que hace que los iones y partículas coloidales sean diferente y estos se comporten muy diferente con los productos químicos tanto con coagulantes y floculantes, por lo tanto se concluye que para un estudio técnico y económico para una compañía de servicios se debe realizar un estudio específico para poder determinar si el producto es viable o no.
2. Al realizar las pruebas de laboratorio para determinar soluciones o concentraciones de los productos se determinó que ambos coagulantes muestran un buen rendimiento a concentraciones menores entre 5 y 10%, mostrando al final del estudio que la concentración óptima de producto para ambos coagulantes fue de 5%.
3. Las pruebas de jarras confirmaron que la dosificación adecuada para el estudio a grande escala fue de 1 ml de solución de ambos productos al 5%, como el estudio se corrió a dosificaciones previamente establecidas, la concentración en mg/lit de esta dosificación para ambos productos fue de 125 ppm para tratar un volumen aproximado de 180 bbl que equivale a un catch tank de tratamiento.
4. Al evaluar la influencia del pH de los productos en la muestra se observa un poco de aumento pero sin salir del rango establecido por la normatividad vigente, aunque cuando se realizó el ensayo con la adición de hipoclorito este ayudo al

sulfato de aluminio a mantener el pH cercano a la neutralidad y en ambos casos ayudo a mejorar el color del agua por su acción blanqueadora.

5. Una vez seleccionado el producto, con la concentración y dosificación necesaria, se evaluó económicamente los dos productos con base al consumo por proyecto y se determinó que para este caso puntual de estudio el policloruro de aluminio granulado es una mejor opción, pues representa un 30% de ahorro en el caso de estudio de este pozo de 16860 ft de profundidad.
6. Aunque el PAC granulado es una mejor opción económica para este estudio, se debe evaluar posibles efectos como el problema de la corrosión que este podría aportar, también la presencia de cloruros podría aportar en algún momento conductividad al igual que la presencia de iones sulfato con el sulfato de aluminio.
7. Para generalizar los hallazgos en este estudio el sulfato de aluminio y el policloruro de aluminio son agentes coagulantes buenos y la eficiencia de tratamiento en cuanto a remoción de turbiedad, conductividad y no afectación del pH es similar, pero técnicamente el PAC mostro un mejor rendimiento en cuanto a la conductividad ya que la redujo y el sulfato tendió a incrementarla, en cuanto a la turbiedad ambos productos mostraron buen rendimiento en remoción de iones y partículas coloidales, aunque ninguno presento un porcentaje $\geq 80\%$, que es lo que siempre se espera en un tratamiento de aguas, por lo tanto la calidad y color del agua no fue muy buena, llegando a la conclusión que difícilmente este fluido podría disponerse después del tratamiento, lo que llevaría a que se tuviera que hacer un tratamiento de dilución o un re tratamiento lo que traería costos adicionales y ya no sería técnicamente viable.

6. RECOMENDACIONES

1. Para un próximo estudio de la actividad de estos productos se recomienda realizarlo con la muestra de un solo pozo para poder determinar si es viable técnicamente y económicamente para el proyecto, también porque esto pudo influir en la eficiencia de tratamiento de los productos por incompatibilidad de fluidos.
2. Se podría incluir un estudio adicional con diferentes clases de policloruros de aluminio frente al sulfato de aluminio, de igual manera realizar estudios con PAC líquido que por literatura y experiencia este es un buen agente coagulante y trabajar sobre la dosificación ayuda con PAC granulado y sulfato con el fin de optimizar consumos y costos asociados pero lograr una mejor en el tratamiento y parámetros de disposición.
3. Realizar un estudio de viabilidad ambiental, para determinar si los policloruros pueden aportar también iones contaminantes y que afecten los parámetros de disposición final.
4. Realizar siempre las pruebas de jarras para optimizar en todo caso la dosificación de producto y no aumentar costos por sobre dosificación que también podría influir en la eficiencia de tratamiento por parte de los productos por sobre carga de producto en el fluido.
5. Evaluar métodos de dosificación diferentes a la convencional pues esto también podría estar afectando la acción del coagulante y floculante.

BIBLIOGRAFÍA

ARBOLEDA Jorge. Teoría y Práctica de la Purificación del agua. Tomo 1, 3ª edición. Bogotá Colombia: Mc Graw Hill-Interamericana; 2000. 51-58 p.

BARRENCHEA A, Química de Ada Berrenchea Martel, Capítulo 4 Coagulación. 163 p.

COGOLLO J. Clarificación de aguas usando coagulantes polimerizados: caso del hidroxiclورو de aluminio. Medellín: 2010. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, 2010 20 p.

EXALL. Using Coagulants to remove organic matter. Journal of the Awwa, Citado por GARCES PAZ, Rosa Obtención de la mínima dosis de reemplazo de policloruro de aluminio en aguas de Pereira. Pereira, 2010. p. 29.

PERNITSKY, D.J. AND EDZWALD, J.K. Selection of alum and polyaluminum coagulants: principles and applications. Journal of Water Supply: Research and Technology, 2006. 121-141 p.

ROJAS Christian. Estudio de la aplicabilidad e implementación del Policloruro de aluminio como coagulante primario en la planta La Flora del AMB S.A E.S.P. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingeniería, 2005. 7p.

ROSA Virginia. Obtención de la mínima dosis de reemplazo de Policloruro de aluminio en aguas y aguas de Pereira. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira, 2010. 24 p.

RUIZ Christian. Tecnología de descarga cero de los efluentes de los fluidos de perforación en pozos de offshore plataforma Albacora Lote Z-1. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería. Facultad de Ingeniería de petróleo, gas natural y petroquímica, 2012.17 p.

SINHA, S., YOO, Y, AMY, et al, Determining the effectiveness of conventional and alternative coagulants through effective characterization schemes, 2004 Chemosphere.1115-1112 p.

TZOUPANOS, N.D., ZOUBOULIS, et al. A systematic study for the characterization of a novel coagulant (polyaluminium silicate chloride). Colloids and surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2009.342 p.

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