

**EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE UN FLOCULANTE ORGÁNICO PARA EL
TRATAMIENTO DE LAS AGUAS DE PRODUCCIÓN DEL CAMPO B A NIVEL DE
LABORATORIO TOMANDO COMO REFERENCIA LA RESOLUCIÓN 631 DEL 2015.**

LAURA ALEJANDRA ATARA ARAUJO

**Proyecto integral de grado para optar el título de:
Ingeniero de Petróleos**

Orientador:

Nelson Fernández Barrero

Ingeniero Químico

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BOGOTÁ D.C**

2021

NOTA DE ACEPTACIÓN

Nombre
Firma del Director

Firma del Presidente Jurado

Nombre
Firma del Jurado

Nombre
Firma del Jurado

Bogotá D.C. Julio de 2021

DIRECTIVOS DE LA UNIVERSIDAD DE AMÉRICA

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. Mario Posada García Peña

Consejero Institucional

Dr. Luis Jaime Posada García Peña

Vicerrectora Académica y de Investigación

Dra. Alexandra Mejía Guzmán

Vicerrector Administrativo y Financiero

Dr. Ricardo Alfonso Peñaranda Castro

Secretario General

Dra. José Luis Macías Rodríguez

Decano Facultad de Ingeniería

Ing. Julio César Fuentes Arismendi

Director Programa de Ingeniería de Petróleos

Ing. Juan Carlos Rodríguez Esparza

DEDICATORIA

Agradezco principalmente a mis padres Alexandra y Guillermo que siempre me apoyaron a lo largo de este proceso, hicieron todo lo posible para mi crecimiento tanto personal como profesional a lo largo de estos años de carrera y estuvieron para mí tanto en los buenos como en los malos momentos. Gracias a ellos me encuentro en este momento finalizando mi carrera y son mi motivación puesto que quiero que se sientan orgullosos de la persona que criaron y de todo lo que he logrado con su gran ayuda.

Les dedico este triunfo también a mis hermanas Stephanie y Valentina pues ellas hacen parte también de mi motor para continuar y seguir adelante frente las adversidades, siempre estuvieron ahí para escucharme y apoyarme cuando lo necesité. Mis niñas espero este sea el inicio de grandes cosas para las tres, sé que vamos a tener un futuro exitoso y lo vamos a hacer juntas.

Gracias a todos los amigos de la universidad que estuvieron durante este proceso, vivimos juntos tristezas y alegrías que sé que nos hicieron crecer como personas. Entre todas las cosas agradezco a la vida el haberme puesto en mi camino a personas tan talentosas y apasionadas por su carrera que espero encontrarme a futuro.

Laura Alejandra Atara Araujo

AGRADECIMIENTOS

Le agradezco a la Universidad de América por abrirme sus puertas a realizar mis estudios con ellos, fue una buena elección comenzar mi futuro profesional pues me encontré con un buen cuerpo docente que permitió que el aprendizaje fuera muy bueno.

Al ingeniero Jorge Tovar, por su orientación y su gran aporte para poder realizar este proyecto de manera exitosa. Agradezco mucho su buena disposición, apoyo y sugerencia para dar cumplimiento a todos los objetivos planteados.

Al ingeniero Nelson Fernández, por su orientación y aporte a partir de su experiencia que fortaleció de manera significativa en desarrollo de este proyecto, gracias por el tiempo y la buena disposición.

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

TABLA DE CONTENIDO

	pág.
RESUMEN	12
INTRODUCCIÓN	13
1. MARCO TEÓRICO	17
1.1. Flocculante	17
<i>1.1.1. Mecanismos de transporte del proceso de flocculación</i>	
<i>1.1.2. Clasificación de los flocculantes</i>	
<i>1.1.3 Selección de un flocculante</i>	
1.2. Agua de formación	18
<i>1.2.1. Propiedades físicas</i>	
<i>1.2.2. Propiedades químicas</i>	
1.3. Resolución 631 de 2015	20
1.4. Test de jarras	21
<i>1.4.1. Coagulación</i>	
<i>1.4.2. Flocculación</i>	
<i>1.4.3. Sistemas de simulación test de jarras</i>	
<i>1.4.4. Equipo test de jarras</i>	
2. METODOLOGÍA	24
2.1. Fase I: Establecimiento de las variables técnicas para adición del flocculante en el tratamiento del agua de producción	26
2.2. Fase II: Caracterización fisicoquímica del agua de producción a nivel de laboratorio	28
2.3. Fase III: Determinación de los escenarios para el desarrollo del test de jarras para el flocculante orgánico y flocculante convencional	33
<i>2.3.1. Determinación de la concentración óptima de flocculante</i>	
2.4. Fase IV: Comparación del desempeño del flocculante orgánico respecto al flocculante convencional en el tratamiento de las aguas de producción del campo B	39
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	41
3.1. Fase I: Establecimiento de las variables técnicas para adición del flocculante en el tratamiento del agua de producción	41

3.2.	Fase II: Caracterización fisicoquímica del agua de producción a nivel de laboratorio	43
3.3.	Fase III: Determinación de los escenarios para el desarrollo del test de jarras para el floculante orgánico y floculante convencional	45
	3.3.1. Preparación del floculante X	
	3.3.2. Preparación del floculante O	
	3.3.3. Resultados test de jarras	
3.4.	Fase IV: Comparación del desempeño del floculante orgánico respecto al floculante convencional en el tratamiento de las aguas de producción del campo B	54
	3.4.1. Resultados de turbidez para el agua de producción	
	3.4.2. Resultados de SST para el agua de producción	
	3.4.3. Resultados de %O/W para el agua de producción	
	3.4.4. Resultados de Color para el agua de producción	
	3.4.5. Resultados de Conductividad para el agua de producción	
	3.4.6. Resultados de pH para el agua de producción	
	3.4.7. Resultados de Hierro para el agua de producción	
	3.4.8. Resultados de Cloruros para el agua de producción	
	3.4.9. Resultados globales para los floculantes implementados	
	3.4.10. Análisis financiero para la implementación del floculante	
4.	CONCLUSIONES	77
	BIBLIOGRAFIA	79
	ANEXOS	83

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Esquema del equipo para test de jarras	23
Figura 2. Metodología de investigación	25
Figura 3. Procedimiento determinación Sólidos Suspendidos Totales	30
Figura 4. Procedimiento determinación Porcentaje Grasas y Aceites	31
Figura 5. Procedimiento test de jarras	36
Figura 6. Procedimiento determinación de cloruros	38
Figura 7. Medición de pH conductividad para agua destilada	41
Figura 8. Medición de pH y conductividad para agua de producción	42
Figura 9. Medición de la turbidez para el agua de producción	44
Figura 10. Medición de la cantidad de floculante X requerida	46
Figura 11. Dilución al 0.5% de floculante X	47
Figura 12. Medición de la cantidad de floculante O requerida	48
Figura 13. Dilución al 0.5% de floculante O	49
Figura 14. Escenarios del test de jarras para el floculante X	50
Figura 15. Escenarios del test de jarras para el floculante O	50
Figura 16. Grafica Turbidez (NTU) Vs. Dosis de floculante X en ppm	52
Figura 17. Grafica Turbidez (NTU) Vs. Dosis de floculante O en ppm	53
Figura 18. Determinación de hierro FerroVer	62
Figura 19. Solución titulante para determinación de cloruros	64
Figura 20. Viraje de color en la titulación para determinación de cloruros	65
Figura 21. Grafica Turbidez Vs. Tipo de floculante	69
Figura 22. Grafica SST Vs. Tipo de floculante	69
Figura 23. Grafica %O/W Vs. Tipo de floculante	70
Figura 24. Grafica Color Vs. Tipo de floculante	70
Figura 25. Grafica Conductividad Vs. Tipo de floculante	71
Figura 26. Grafica Hierro Vs. Tipo de floculante	71
Figura 27. Grafica Cloruros Vs. Tipo de floculante	72

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Índices de dureza del agua	20
Tabla 2. Parámetros fisicoquímicos del agua y sus máximos permitidos.	21
Tabla 3. Concentración de floculante parat test de jarras	26
Tabla 4. Ficha técnica del floculantes orgánico	27
Tabla 5. Ficha técnica del floculantes convencional	28
Tabla 6. Datos reales curva de calibración	29
Tabla 7. Valores de laboratorio del agua de producción previo al tratamiento	32
Tabla 8. Valores de laboratorio del agua de producción a condiciones de inyección	33
Tabla 9. Cantidades de disolución al 0,5% p/v adicionada por jarra	34
Tabla 10. Concentraciones de floculante para cada jarra	35
Tabla 11. Valores de laboratorio del agua después del tratamiento con el floculante O	37
Tabla 12. Valores de laboratorio del agua después del tratamiento con el floculante X	37
Tabla 13. Valores de laboratorio de caracterización fisicoquímica inicial del agua	43
Tabla 14. Valores de turbidez después del tratamiento con floculante X	51
Tabla 15. Valores de turbidez después del tratamiento con floculante O	53
Tabla 16. Valores de turbidez a la concentración óptima de floculante X	54
Tabla 17. Valores de turbidez a la concentración óptima de floculante O	55
Tabla 18. Valores de SST a la concentración óptima de floculante X	55
Tabla 19. Valores de SST a la concentración óptima de floculante O	56
Tabla 20. Valores de %O/W a la concentración óptima de floculante X	57
Tabla 21. Valores de %O/W a la concentración óptima de floculante O	57
Tabla 22. Valores de Color (PtCo) a la concentración óptima de floculante X	58
Tabla 23. Valores de Color (PtCo) a la concentración óptima de floculante O	59
Tabla 24. Valores de Conductividad a la concentración óptima de floculante X	59
Tabla 25. Valores de Conductividad a la concentración óptima de floculante O	60
Tabla 26. Valor de pH a la concentración óptima de floculante X	60
Tabla 27. Valor de pH a la concentración óptima de floculante O	61
Tabla 28. Valor de Hierro a la concentración óptima de floculante X	62
Tabla 29. Valor de Hierro a la concentración óptima de floculante O	63

Tabla 30. Cantidades de Nitrato de plata usados en la titulación para el floculante X	65
Tabla 31. Cantidades de Nitrato de plata usados en la titulación para el floculante O	66
Tabla 32. Cantidad de Cloruro en el agua tratada con el floculante X	67
Tabla 33. Cantidad de Cloruro en el agua tratada con el floculante O	67
Tabla 34. Consolidado parámetros evaluados en el tratamiento de agua de producción	68
Tabla 35. Análisis financiero floculante X y floculante O	75

RESUMEN

En el proceso de tratamiento de las aguas de producción se utilizan diversos químicos por medio de los cuales se permite la separación final de las trazas de aceite que aún pueden encontrarse emulsionadas con el agua, específicamente este proyecto se centró en la evaluación del tipo de floculante que actualmente se utiliza en el campo B para evaluar la posibilidad de la implementación de un floculante orgánico que contenga la misma facilidad de descontaminación del agua con el beneficio de la reducción de cargas químicas utilizadas con este fin.

Para dar cumplimiento al objetivo general por medio del cual se busca evaluar el desempeño de un floculante orgánico para el tratamiento de las aguas de producción del campo B a nivel de laboratorio tomando como referencia la resolución 631 del 2015 se van a realizar una serie de fases a través de las cuales se permitirá establecer las variables técnicas para la adición del floculante orgánico en el tratamiento del agua de producción bajo el marco regulatorio ambiental, realizar la caracterización fisicoquímica de las aguas de producción a nivel de laboratorio en el cual se evaluará puntalmente las características en cuanto a sólidos suspendidos totales (SST) y porcentaje de grasas y aceites (O/W%) por medio de la evaluación de las mismas con la utilización de un espectrofotómetro, así mismo, se permitirá definir los seis escenarios a realizar para el desarrollo del test de jarras para el floculante orgánico y el floculante convencional y, finalmente, comparar el desempeño del floculante orgánico respecto al floculante convencional en el tratamiento de las aguas de producción del campo B bajo la resolución 631 del 2015. Al realizar esta comparación se obtuvo que el floculante orgánico tuvo mejor rendimiento que el convencional en la eliminación de SST y %O/W lo cual lo posiciona mejor en términos técnicos.

Palabras Claves: Floculante, agua producción, tratamiento aguas, sólidos suspendidos totales, grasas y aceites.

INTRODUCCIÓN

En Colombia a lo largo del tiempo ha ido aumentando la importancia en el factor ambiental y actualmente es uno de los componentes más importantes y el principal pilar para cualquier compañía. Debido a esto, se han venido implementando una serie de alternativas amigables con el ambiente que permiten darle un enfoque diferente a lo que popularmente se cree que es la industria petrolera. Uno de los factores más regulados de la industria son los vertimientos o disposiciones del agua que es producida en los campos, esta regulación se debe a que esta agua debe cumplir ciertas características específicas para garantizar el mínimo impacto bien sea a las fuentes hídricas o al subsuelo como tal.

Teniendo en cuenta esto, se procede a hacer un tratamiento al agua con el fin de eliminar los factores fisicoquímicos que no son deseados como: Turbidez, grasas y aceites, sulfuros, cloruros, sólidos suspendidos, sólidos disueltos, entre otros. Estos factores tienen unos límites máximos permitidos para la disposición del agua y son regulados a través de la resolución 631 del 2015, por ende, se debe asegurar el correcto tratamiento de esta agua de producción para cumplir la normativa. Por medio de este proyecto se busca determinar el rendimiento del floculante orgánico (Floculante O) para la eliminación de sólidos suspendidos totales (SST) y el porcentaje de grasas y aceites (O/W%) en el tratamiento de aguas de producción de un campo de Colombia con el fin de determinar el rendimiento del mismo en la eliminación de dichos parámetros. Además se va a comparar con el floculante convencional (Floculante X) que se utiliza actualmente en el proceso de tratamiento de agua.

La idea de implementar un floculante orgánico parte de que no se ha realizado una evaluación de su rendimiento y los beneficios que podría traer la disminución de las cargas químicas utilizadas en este proceso de descontaminación del agua, adicionalmente, se desea generar una conciencia ambiental en cuanto al uso de aditivos que si bien permiten la eliminación de ciertos factores, podrían incrementar el valor de otros. Por lo tanto, se espera tener valores positivos en cuanto a la eliminación de las propiedades fisicoquímicas en estudio para así ratificar que se puede implementar este tipo de alternativas amigables con el ambiente.

Teniendo en cuenta que esta investigación se centra en el proceso de floculación para tratamiento de aguas, en el trabajo de grado Evaluación del proceso de coagulación-floculación de una planta de tratamiento de agua potable [1] se establecieron todos los parámetros por medio de los cuales se determina la cantidad óptima de coagulantes y floculantes, adicionalmente, se muestran los equipos que generalmente se requieren para que este tipo de proceso sea óptimo. Como resultado a esta investigación se obtuvo que la mejor opción para el proceso de coagulación-floculación es el Sulfato de Aluminio siempre y cuando el agua tenga una alcalinidad apropiada para la implementación del mismo, además, encontraron que el mejor tiempo de floculación es de 30 minutos debido a que permite que el producto químico actúe correctamente sobre las partículas. Este trabajo aporta en esta investigación en sentido de lograr establecer correctamente los escenarios para la elaboración del test de jarras obteniendo el mayor rendimiento de los floculantes a implementar teniendo en cuenta los factores que influyen en la floculación. Adicionalmente, aporta los resultados obtenidos en el proceso de floculación realizado a diferentes tiempos de residencia y distintas revoluciones.

Como complemento a este proyecto, en el documento Tratamiento de aguas - coagulación y floculación [2] se dan a conocer todo lo concerniente a fundamento teórico del proceso de Coagulación y floculación para el Tratamiento de Aguas en el cual se tenía como objetivo mejorar el proceso de tratamiento estableciendo los requerimientos básicos como: Dosis, adición del coagulante, puntos de aplicación, intensidad de mezcla y demás factores con el fin de obtener mejores resultados que permitieran alcanzar altos estándares en calidad de agua. En este caso aplicaron Sulfato de Aluminio, cloruro férrico y solución de polímero aniónico a diferentes concentraciones para las cuales fueron determinadas las dosis óptimas que permitían la mayor eliminación de turbiedad en el agua. Finalmente, para el caso de esta planta se determinó la concentración óptima de Cloruro Férrico que fue de 14ppm con una densidad de 1.42 kg/L teniendo en cuenta el caudal de tratamiento que era de 8.5 m³/seg. Este documento aporta a la investigación a modo de fundamento teórico en cuanto a floculantes teniendo en cuenta su definición, tipos de floculación, parámetros de los floculantes y los requisitos principales para la adición del mismo, además, aporta en sentido de la obtención de resultados a partir de los escenarios establecidos a diferentes concentraciones.

Por otro lado, se tiene la tesis de maestría Coagulantes-floculantes orgánicos e inorgánicos elaborados de plantas y del reciclaje de chatarra para el tratamiento de aguas contaminadas [3]. Se propuso un programa de reciclaje factible y rentable de los principales contaminantes para que dejen de ser un problema y convertirlos en un beneficio al entorno. Luego de la producción de los coagulantes-floculantes por medio de diferentes elementos reciclados se realizó una comparación entre los floculantes elaborados de plantas y los elaborados con chatarra metálica, se determinó que el floculante natural más efectivo es el caulote presentando parámetros normales de turbidez (1.35 NTU) y oxígeno disuelto (89.6 %). El floculante-coagulante sintetizado por la chatarra es el aluminio logrando clarificar el agua contaminada en un 100% y presentando parámetros normales de turbidez (2.15 NTU) y oxígeno disuelto (39.4 %). Esta investigación aporta al proyecto a modo de caracterización del comportamiento con la implementación de un floculante orgánico para descontaminar un agua residual, adicionalmente, sirve para establecer los procedimientos que se deben ejecutar para permitir el completo rendimiento del floculante a implementar.

Con base a esto, se busca que teniendo en cuenta la relevancia del tratamiento de aguas de producción para la industria petrolera la implementación de un floculante orgánico para el tratamiento de la misma permitirá generar un precedente para la utilización de estas alternativas que se ofrecen en el mercado, por medio de la demostración de su desempeño en la eliminación de la cantidad de sólidos suspendidos totales y el porcentaje de grasas y aceites con respecto a los floculantes convencionales que se utilizan actualmente en el proceso.

El objetivo general de este proyecto fue evaluar el desempeño de un floculante orgánico para el tratamiento de las aguas de producción del campo B a nivel de laboratorio tomando como referencia la resolución 631 del 2015. En donde se tenían los siguientes como objetivos específicos:

- **Establecer las variables técnicas para la adición del floculante orgánico en el tratamiento del agua de producción bajo el marco regulatorio ambiental (Resolución 631 del 2015).**
- **Realizar la caracterización fisicoquímica de las aguas de producción a nivel de laboratorio.**
- **Definir los escenarios para el desarrollo del test de jarras para el floculante orgánico y el floculante convencional.**
- **Comparar el desempeño del floculante orgánico respecto al floculante convencional en el tratamiento de las aguas de producción del campo B bajo la resolución 631 del 2015.**

Con el fin de dar cumplimiento a los objetivos específicos, en el capítulo de metodología se describe detalladamente los procedimientos realizados en toda la investigación. La fase I consistió en establecer las variables técnicas para la adición del floculante orgánico en el tratamiento del agua de producción en donde se tuvo en cuenta el marco regulatorio ambiental, en la fase II se realizó la caracterización fisicoquímica del agua de producción a nivel de laboratorio, en la fase III se definieron los escenarios para el desarrollo del test de jarras tanto para el floculante orgánico como para el floculante convencional, finalmente, en el fase IV de este proyecto se comparó el desempeño del floculante orgánico respecto al floculante convencional en el tratamiento de las aguas de producción del campo B la cual consistió en realizar un análisis financiero para determinar los beneficios que generaría la implementación del floculante orgánico.

1. MARCO TEÓRICO

A continuación, se presenta la base teórica y conceptual con el objetivo de hacer una introducción a los temas con los que se desarrolló el presente trabajo de grado. El marco teórico incluye definición de los floculantes, sus clasificaciones y propiedades, aguas de formación que hace referencia al agua de producción resultante del tratamiento primario en las facilidades de producción, así como la definición de general de sus características físicas y químicas para centrarnos principalmente en los sólidos suspendidos totales y porcentaje de grasas y aceites (O/W%) debido a su relevancia en esta investigación.

1.1.Floculante

Un floculante es una sustancia química comúnmente orgánica que aglutina sólidos en suspensión una vez efectuada su coagulación, provocando su precipitación. Para promover la formación de flóculos en el agua que contiene los floculantes suspendidos, se aplican polímeros de los sólidos (polielectrolitos) para promover la formación de los enlaces entre las partículas. Estos polímeros tienen un efecto muy específico, dependiente de sus cargas, su peso molar y su grado molecular de ramificación. Los polímeros son solubles en agua y su peso molar varía entre 10^5 y 10^6 g/mol.

Puede haber varias cargas en un floculante. Hay polímeros catiónicos, basados en el nitrógeno, polímeros aniónicos, basados en los iones del carboxilato y los polianfolitos, que llevan cargas positivas y negativas. [4]

1.1.1. Mecanismos de transporte del proceso de floculación

Normalmente, la floculación se analiza como un proceso causado por la colisión entre partículas. En ella interviene, en forma secuencial, tres mecanismos de transporte:

1.1.1.a. Floculación pericinética o browniana. Está producido por el movimiento natural de las moléculas del agua y esta inducida por la energía térmica, este movimiento es conocido como el movimiento browniano.

1.1.1.b. Floculación ortocinética. Se basa en las colisiones de las partículas debido al movimiento del agua, el que es inducido por una energía exterior a la masa de agua y que puede ser de origen mecánico o hidráulico. Después que el agua es coagulada es necesario que se produzca la

aglomeración de los microfloculos; para que esto suceda se produce primero la floculación pericinética luego se produce la floculación ortocinética.

1.1.1.c. Sedimentación diferencial. Se debe a las partículas grandes, que, al precipitarse, colisionan con las más pequeñas, que van descendiendo lentamente, y ambas se aglomeran [3].

1.1.2. Clasificación de los floculantes

Según su naturaleza química, los floculantes pueden ser inorgánicos y orgánicos. Los floculantes inorgánicos (electrolitos) son sales solubles en agua, normalmente formadas por cationes polivalentes, siendo las más utilizadas las sales de hierro, aluminio y sílice. Los floculantes orgánicos pueden ser: naturales (polisacáridos) y sintéticos (polímeros) que tienen grupos activos distribuidos a lo largo de su cadena. Los floculantes orgánicos sintéticos, son muy utilizados en la industria química moderna; son eficaces a bajas concentraciones y pueden encontrarse como un producto no iónico o como floculantes catiónicos y aniónicos de diversos pesos moleculares (generalmente elevados), distinta densidad de carga y de una eficacia independiente del pH.

1.2. Agua de formación

1.2.1. Propiedades físicas

El agua de formación se encuentra presente en todo el proceso productivo en el sector de hidrocarburos, desde los yacimientos hasta en las facilidades de producción ya en superficie, por lo tanto, es importante caracterizar a la misma con el objetivo de definir si se encuentra dentro de los parámetros establecidos por el marco regulatorio ambiental.

1.2.1.a. Turbidez. La turbidez es una medida del grado en el cual el agua pierde su transparencia debido a la presencia de partículas en suspensión; mide la claridad del agua. Mientras más sucia parecerá que ésta, más alta será la turbidez [9].

1.2.1.b. Gravedad específica. Se define como la relación adimensional entre la densidad de un material y la densidad del mismo volumen de agua. La mayoría de los minerales comunes poseen gravedades específicas oscilantes entre 2 y 7 [10].

1.2.1.c. Temperatura. Es una medida del estado térmico de una sustancia, en este caso el agua, considerado un parámetro operacional en el momento del diseño de cualquier facilidad, esta

propiedad ayuda a determinar el estado natural de un fluido, que llega a afectar la operación, los procesos de tratamiento y su disposición final [8].

1.2.1.d. Sólidos totales. Los sólidos totales son el material residual resultante en un recipiente luego de la evaporación de una muestra y su subsecuente secamiento en un horno a temperatura definida y constante; es decir, representan la suma de los sólidos disueltos o no retenidos a través de un filtro y los sólidos no disueltos o retenibles por filtración. Por tal razón, los diferentes tipos de sólidos son definidos arbitrariamente por el técnico al momento del análisis, según el método usado para su determinación [11].

1.2.1.e. Sólidos suspendidos totales (SST). Hacen referencia al material particulado que se mantiene en suspensión en las corrientes de agua superficial y/o residual. En el recurso hídrico corresponde a la suma de los valores del Total de Sólidos en Suspensión (SST) por punto de muestreo dividido por el número de puntos de muestreo [12].

1.2.1.f. Contenido de grasas y aceites. Es la cantidad de petróleo disperso en el agua producida que actúa como aglomerante para algunos sólidos incrementando la probabilidad de taponamiento y creando una saturación de aceite que se debe tratar de recuperar en el proceso, reducen la inyectividad al generar emulsiones en la formación [8].

1.2.2. *Propiedades químicas*

El agua es una solución inodora, sin sabor e incolora que está compuesta químicamente por dos moléculas de Oxígeno y por una molécula de Hidrogeno, pero por su disolvencia toda el agua que se encuentra en la naturaleza, en los yacimientos o pozos se encuentra con cantidades diversas de sustancias en solución y en suspensión [8]. En este caso, vamos a mencionar las características químicas más relevantes para el desarrollo de este proyecto de investigación.

1.2.2.a. pH. Se debe al equilibrio carbónico y a la actividad vital de los microorganismos acuáticos. Respecto a lo primero, la secuencia de equilibrios de disolución de CO₂ en un agua, y la disolución de CO₃²⁻ e insolubilización de HCO₃⁻, determinan el pH de un agua. El valor de pH de aguas superficiales está entre 6-8,5, siendo las aguas subterráneas más ácidas que las superficiales. En lagos y embalses, el pH varía cíclicamente, disminuyendo con la profundidad del agua [13].

1.2.2.b. Alcalinidad. La alcalinidad es la suma de todos los componentes del agua a estudiar principalmente el contenido de carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos, esta tiene de a elevar el valor de pH, también se puede definir como la capacidad del agua para neutralizar ácidos o aceptar

protones, esta propiedad representa el principal sistema amortiguador de agua dulce haciendo posible la productividad de cuerpos naturales de agua [8].

1.2.2.c. Dureza. La alcalinidad es la suma de todos los componentes del agua a estudiar principalmente el contenido de carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos, esta tiene de a elevar el valor de pH, también se puede definir como la capacidad del agua para neutralizar ácidos o aceptar protones, esta propiedad representa el principal sistema amortiguador de agua dulce haciendo posible la productividad de cuerpos naturales de agua.

Tabla 1.

Índices de dureza del agua.

Denominación	Ppm de CaCO₃
Muy suaves	0-15
Suaves	16-75
Medias	76-150
Duras	150-300
Muy duras	Mayor a 300

Nota. La tabla representa la clasificación general de la dureza del agua. Tomado de: Manual de laboratorio de la asignatura Tecnología Ambiental [14].

1.3.Resolución 631 de 2015

Es la resolución por medio de la cual se va a regir a través de la investigación los parámetros que se deben tener en cuenta para el proceso de reinyección que se realiza específicamente en el campo B. Por medio de esta resolución se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones. Específicamente, en el artículo 11 donde explican acerca del sector de hidrocarburos donde indica los parámetros fisicoquímicos a monitorear y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas

residuales no domésticas (ARnD) a cuerpos de aguas superficiales de actividades asociadas con hidrocarburos (petróleo crudo, gas natural y derivados) [15].

Tabla 2.

Parámetros fisicoquímicos del agua y sus máximos permitidos.

PARÁMETRO	UNIDADES	EXPLORACIÓN (UPSTREAM)	PRODUCCIÓN (UPSTREAM)	REFINO	VENTA Y DISTRIBUCIÓN (DOWNSTREAM)	TRANSPORTE Y ALMACENAMIENTO (MIDSTREAM)
pH	Unidades de pH	6,00 a 9,00	6,00 a 9,00	6,00 a 9,00	6,00 a 9,00	5,00 a 9,00
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L O ₂	400,00	180,00	400,00	180,00	180,00
Demanda bioquímica de Oxígeno (DBO)	mg/L O ₂	200,00	60,00	200,00	60,00	60,00
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg/L	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00
Sólidos sedimentables (SSED)	mg/L	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Grasas y aceites	mg/L	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00
Fenoles	mg/L	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20

Nota. La tabla evidencia los valores máximos permitidos para los principales parámetros fisicoquímicos del agua. Tomado de: Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, “Resolución 631 de 2015”. Diario Oficial No. 49.486 de 18 de abril de 2015. [En línea]. Disponible en: https://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/d1-res_631_marz_2015.pdf

Para conocer la tabla completa de valores máximos permitidos para otros parámetros fisicoquímicos dirigirse a la sección A de anexos.

1.4. Test de jarras

El ensayo de jarras es uno de los más importantes en el control del proceso de coagulación química de aguas. Este proceso requiere como datos previos mínimos los valores de pH, turbiedad, color y alcalinidad del agua cruda. En la prueba de jarras se utilizan variaciones en la dosis del coagulante y/o floculante en cada jarra (generalmente se usan equipos de seis (6) jarras), permitiendo la reducción de los coloides en suspensión y materia orgánica a través del proceso de

floculación; es decir, simula los procesos unitarios de coagulación, floculación y sedimentación, permitiendo además realizar el ajuste en el pH de cada muestra hasta llegar a los valores en los que la floculación alcanza sus mejores resultados, los cuales dependerán del tipo de reactivo a utilizar, aunque generalmente se maneja un pH entre 7,3 a 7,6 [16].

1.4.1. Coagulación

La coagulación es un proceso que permite incrementar la tendencia de las partículas de agregarse unas a otras para formar partículas mayores y así precipitar más rápidamente. Los coagulantes son agentes que ayudan a la precipitación. Muchas partículas, como los coloides son sustancias tan pequeñas que no sedimentarán en un tiempo razonable y además no pueden ser eliminadas por filtración. La coagulación es un proceso que implica muchas reacciones de transferencia de masa. El proceso consta de varias etapas: 1) la desestabilización de las partículas, lo que permite 2) la interacción contaminante-coagulante y 3) favorece la agrupación de partículas o floculación [17].

1.4.2. Floculación

Es un proceso químico mediante el cual, con la adición de sustancias denominadas floculantes, se aglutinan las sustancias coloidales presentes en el agua, facilitando de esta forma su decantación y posterior filtrado [17].

1.4.3. Sistemas de simulación test de jarras

Estos sistemas consisten en simular en unos vasos de precipitado o jarras el proceso de coagulación que se produce en la planta de tratamiento y evaluar distintos parámetros durante o al final de los ensayos para caracterizar su funcionamiento. Las pruebas de jarras pueden utilizarse tanto para controlar la coagulación-floculación de una planta de tratamiento existente como para obtener los datos de diseño para el proyecto de nuevas unidades [17]. Por medio de estos sistemas se permiten determinar las siguientes variables de gran importancia:

1.4.3.a. Determinación de la dosis óptima de floculante. Esta se hace por medio de dos evaluaciones:

- Evaluaciones cuantitativas: Consiste específicamente en la observación del tamaño del floc producido y el tiempo inicial de formación del floc.

- Evaluaciones cuantitativas: Consiste en realizar una serie de determinaciones físicas (Turbiedad y color residual) y unas determinaciones químicas (pH, alcalinidad, hierro, aluminio residual) [17].

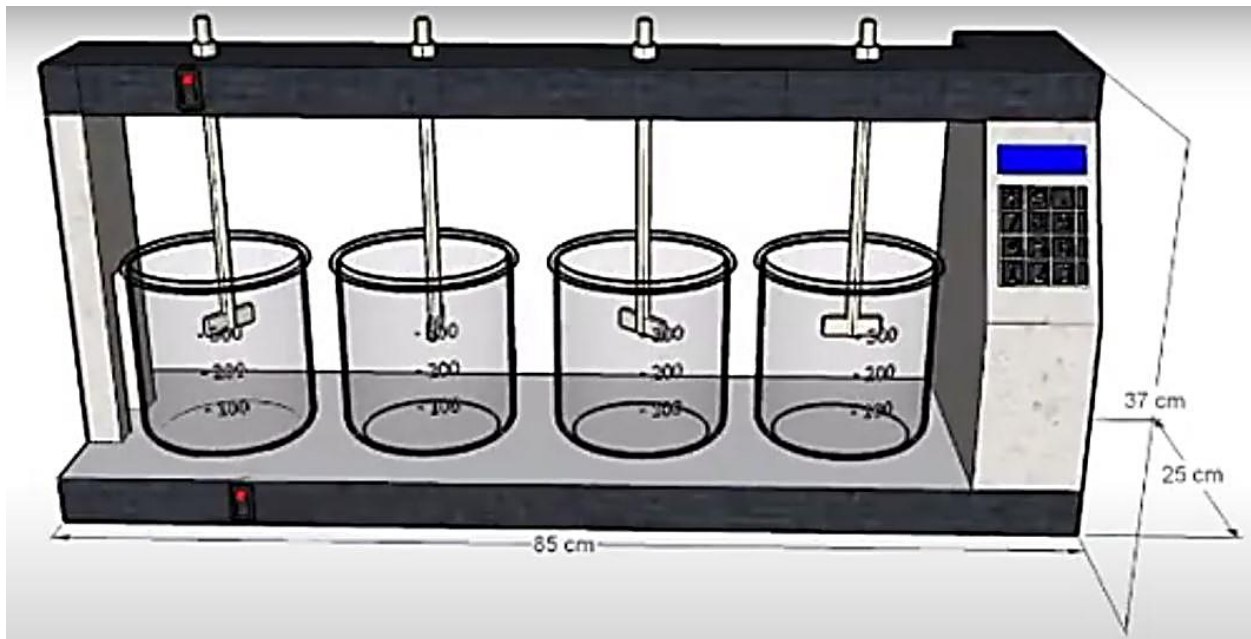
1.4.3.b. Determinación de la velocidad de sedimentación. Esta velocidad de sedimentación se observa de manera cualitativa en el momento de realizar la simulación de la planta en el equipo del test de jarras.

1.4.4. Equipo de test de jarras

Este se asemeja a los tanques de la planta donde se llevarán a cabo los procesos de coagulación y floculación, ya que en determinado tiempo oscila generando el floc que posee el agua [17]. Existen variaciones dependiendo de la marca del equipo, pero generalmente cuentan con dos características específicas: Agitador mecánico y vasos de precipitado en los cuales se depositan las muestras de agua para realizarles la simulación del tratamiento en una planta.

Figura 1.

Esquema del equipo para test de jarras.



Nota. La figura representa el equipo de test de jarras de seis puestos. Tomado de: Numael Guerrero. (10 de diciembre de 2016). Equipo test de jarras [Archivo de video]. Youtube, <https://www.youtube.com/watch?v=qoFuSMYJ9qo>.

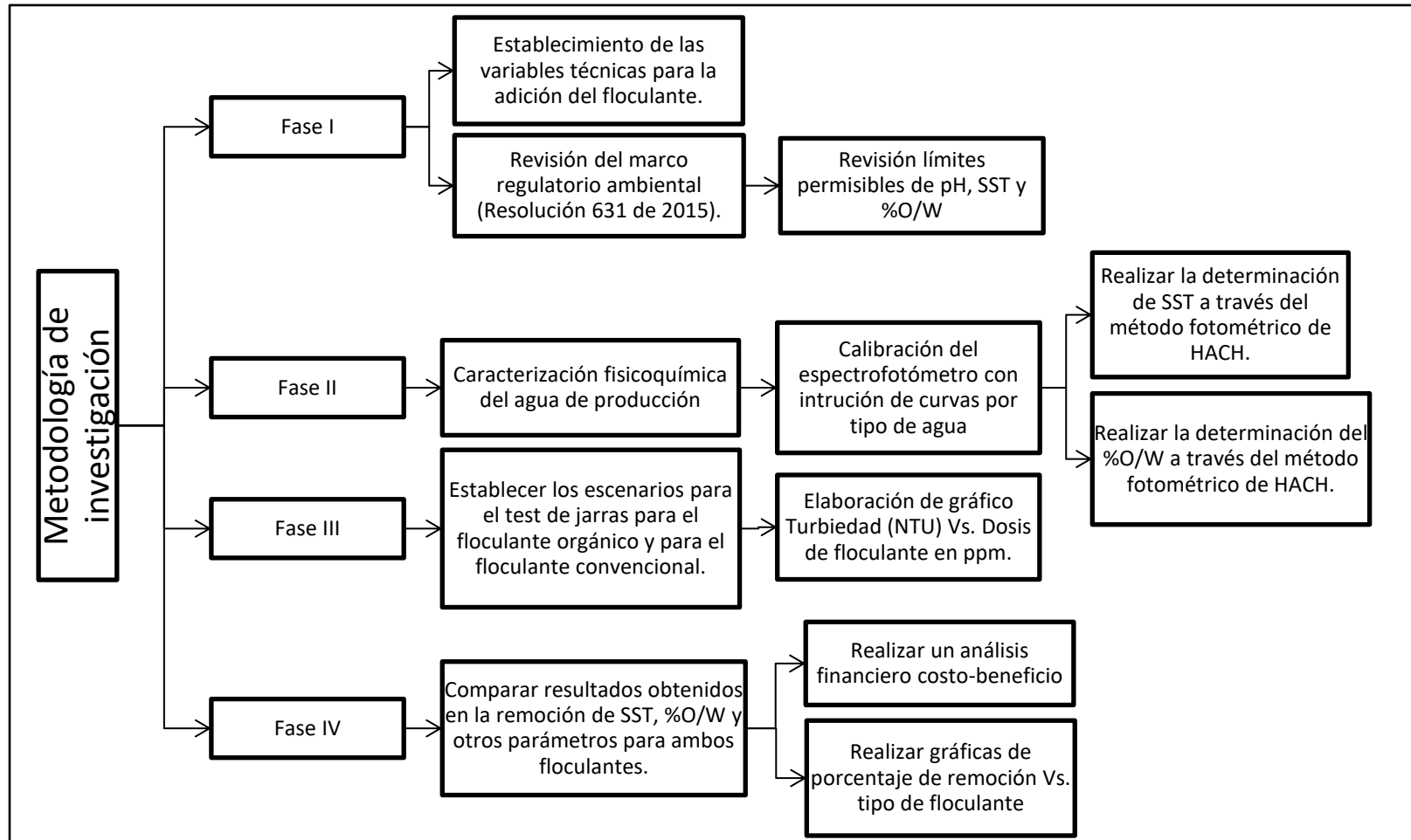
2. METODOLOGÍA

Este trabajo de grado se realizó experimentalmente, en los laboratorios de la Universidad América donde se obtuvieron resultados cuantitativos. El proyecto está enfocado en el área de recuperación avanzada. La investigación se realizó en cuatro fases que se definirán a continuación; la fase I consistió en establecer las variables técnicas para la adición del floculante orgánico en el tratamiento del agua de producción en donde se tuvo en cuenta el marco regulatorio ambiental, en la fase II se realizó la caracterización fisicoquímica del agua de producción a nivel de laboratorio, en la fase III se definieron los escenarios para el desarrollo del test de jarras tanto para el floculante orgánico como para el floculante convencional, finalmente, en el fase IV de este proyecto se comparó el desempeño del floculante orgánico respecto al floculante convencional en el tratamiento de las aguas de producción del campo B la cual consistió en realizar un análisis de la relación beneficio-costos que generaría la implementación del floculante orgánico.

Como se podrá observar en la *Figura 2* en donde se observará la metodología llevada a cabo para el desarrollo de este proyecto, se evidenciará que existen una serie de fases las cuales hacen referencia a los objetivos específicos los cuales contienen unas tareas que se deben llevar a cabo para la ejecución correcta del mismo. A continuación, se describirá el proceso para el desarrollo correcto de cada fase. Y, posteriormente se realizará la explicación detallada de cada una de las mismas.

Figura 2.

Metodología de Investigación



Nota. La figura representa la metodología utilizada para el desarrollo del proyecto, donde cada fase representa el cumplimiento de los objetivos específicos.

2.1.Fase I: Establecimiento de las variables técnicas para adición del floculante en el tratamiento del agua de producción

Esta etapa consistió en toda la recopilación de información en donde se pudieron describir las variables que afectan directa o indirectamente la elaboración de los test de jarras. Para ello primero se realizó una adquisición de información bibliográfica para poder definir cómo se realizaría la adición del floculante para maximizar el rendimiento del mismo. La información aportada por el Manual de laboratorio de la asignatura de tecnología ambiental de la Universidad de Cádiz [12] sirvió como herramienta para definir teóricamente los escenarios que fueron definidos por las cantidades mostradas en el *Tabla 3* cabe recalcar que para cada uno de los escenarios se tuvo un tiempo de retención o de reposo de 30 minutos para que la eliminación del porcentaje de grasas y aceites sea exitosa.

Tabla 3.

Concentración de floculante para test de jarras.

Número de jarra (#)	Concentración de floculante (ppm)
1	10
2	20
3	30
4	40
5	50
6	60


Nota. La tabla representa la concentración de floculante a adicionar para cada escenario en el test de jarras.

Luego del establecimiento teórico de las concentraciones de floculante tanto orgánico como convencional a adicionar en partículas por millón (ppm) se procedió a realizar de manera experimental la medición del pH de la muestra de agua utilizando el equipo pH-metro, para tener completa seguridad de la medición de esta variable en el agua de producción se realizaron tres

mediciones esterilizando y neutralizando el equipo entre cada medición para lo cual se obtuvo un valor de 7.34 lo cual indica que el agua tiene las propiedades óptimas para poder realizarle tratamiento con el floculante orgánico seleccionado, como se puede evidenciar en la ficha técnica relacionada en la *Tabla 4* en donde además de indicar el rango operativo de pH, también indica el tipo de agua donde se debe usar y el tipo de floculante que este es.

Tabla 4.

Ficha técnica del floculante orgánico.


FICHA TÉCNICA DEL FLOCULANTE ORGÁNICO (Floculante O)			
Nombre del producto	Floculante O		
Descripción del producto	Floculante orgánico para tratamiento de aguas de producción con características aniónicas.		
Fecha de entrega	13/02/2020		
Fecha de vencimiento	13/02/2022		
Tipo de floculante	Aniónico		
Rango de pH	5-9		
Características organolépticas	Color	Blanquecino	
	Olor	Inodoro	

Nota. La tabla representa la ficha técnica del floculante a utilizar en el tratamiento de agua de producción por medio de test de jarras.

Para continuar con el proceso de delimitación de las variables técnicas para la adición de floculantes se realizó la respectiva revisión de la ficha técnica para el floculante convencional, por lo tanto, se evidenciará en la *Tabla 5* las variables importantes de la muestra de floculante.

Tabla 5.

Ficha técnica del floculante convencional.

FICHA TÉCNICA DEL FLOCULANTE CONVENCIONAL (Floculante X)			
Nombre del producto	Floculante X		
Descripción del producto	Floculante convencional para tratamiento de aguas de producción con características aniónicas.		
Fecha de entrega	13/02/2020		
Fecha de vencimiento	13/02/2022		
Tipo de floculante	Aniónico		
Rango de pH	6-9		
Características organolépticas	Color	Blanquecino	
	Olor	Inodoro	

Nota. La tabla representa la ficha técnica del floculante a analizar en el tratamiento de agua de producción por medio de test de jarras.

Finalmente, se validó que ambos floculantes cumplieran con las características del agua tales como pH y polaridad para verificar que tuvieran un buen rendimiento para la eliminación de sólidos suspendidos totales y porcentaje de grasas y aceites.

2.2.Fase II: Caracterización fisicoquímica del agua de producción a nivel de laboratorio

Esta etapa comenzó con la revisión bibliográfica de los métodos por medio de los cuales se puede realizar la determinación del contenido de sólidos suspendidos totales (SST) y el porcentaje de grasas y aceites (%O/W). Luego de una recopilación del alcance de los métodos para obtener estas mediciones se definió realizar dicha evaluación de SST y %O/W por método fotométrico de HACH. Para utilizar este método inicialmente se debe hacer una calibración del equipo para que este genere la curva teniendo en cuenta las características del fluido de que se va a analizar; para

ello, se requiere un procedimiento el cual será evidenciado a continuación. Para la calibración de la curva se va a tener en cuenta la tesis de Montaje de curvas de calibración para análisis de gomas, fosfatos, sílice, azúcar y sulfitos por espectrofotometría uv - visible en el laboratorio de aseguramiento de calidad del ingenio pichichi S.A. [19]. Por medio del cual se establece un procedimiento estándar que servirá como referencia para generar la curva de calibración que es la representación gráfica de una señal que se mide en función de la concentración de un analito [20]. A continuación, se evidenciará la tabla tomada como referencia para la generación de la curva patrón.

Tabla 6.

Datos reales curvas de calibración.

# Muestra	Concentración (mg/L)	Volumen muestra (mL)	Absorbancia
1	8.5	250	0.229
2	12.9		0.612
3	15.6		0.64
4	20.3		1.087

Nota. La tabla representa los volúmenes de agua de producción para generación de patrones en la construcción de la curva de calibración.

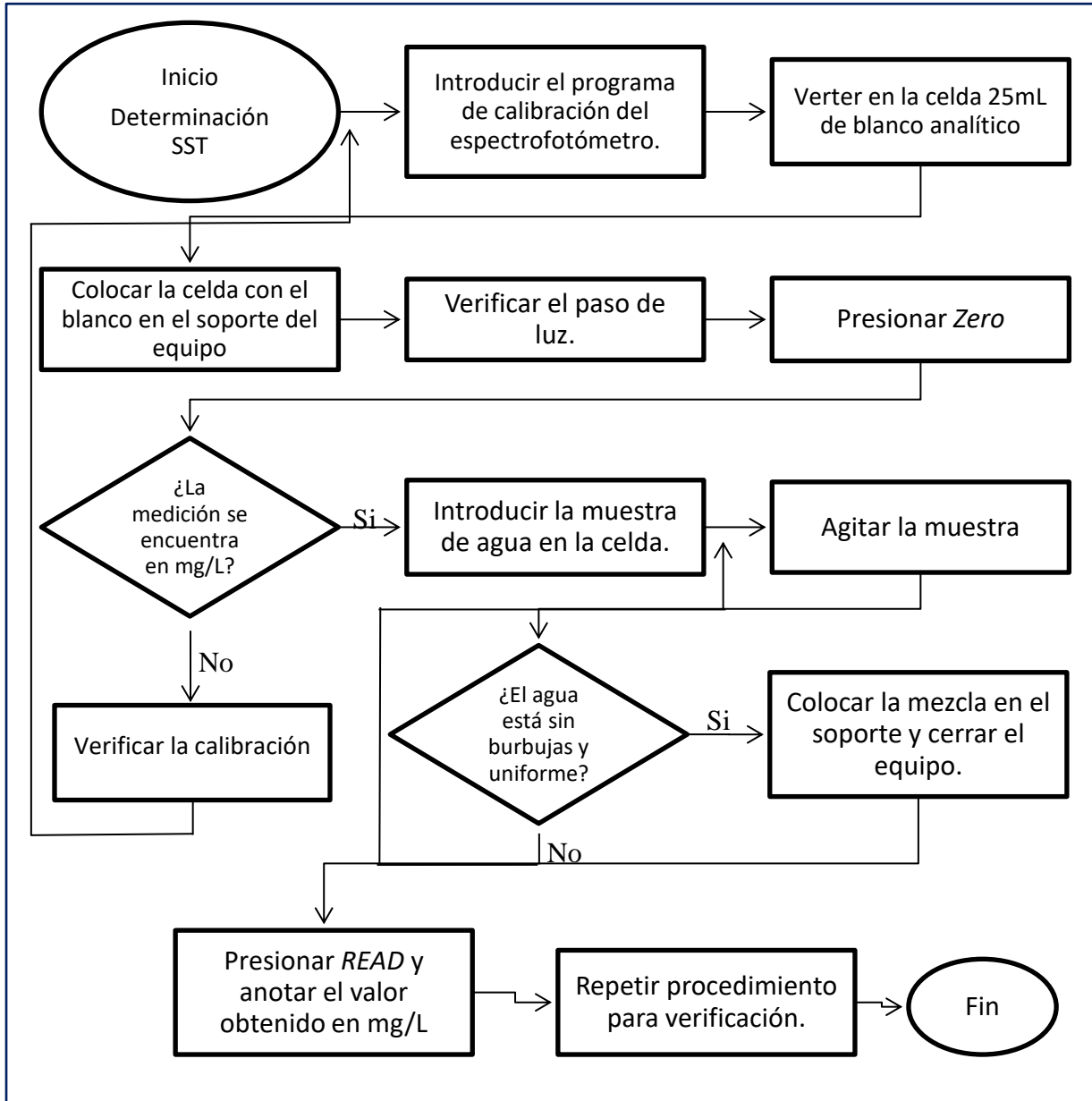
Posteriormente, se procede a la generación de la gráfica en la que se realiza la curva de calibración del equipo en donde se consignan los valores de absorbancia a las diferentes concentraciones en las que se realizó la medición espectrofotométrica. Esta curva permitirá que al momento de realizar las mediciones de SST y %O/W se adapte a las características de absorbancia de la muestra en específico.

Luego de realizar la calibración del equipo se procedió a tomar la lectura de los sólidos suspendidos totales directamente del espectrofotómetro, en este caso, se realizaron dos mediciones a la muestra de agua con el fin de disminuir posibles errores ocasionados por el porcentaje de error que genere el equipo. Así mismo, se hizo la medición para grasas y aceites con el fin de obtener los datos iniciales de la muestra de agua.

El procedimiento para la obtención del valor de los sólidos suspendidos totales (SST) se evidenciará en la *Figura 3*.

Figura 3.

Procedimiento determinación Sólidos Suspendidos Totales.

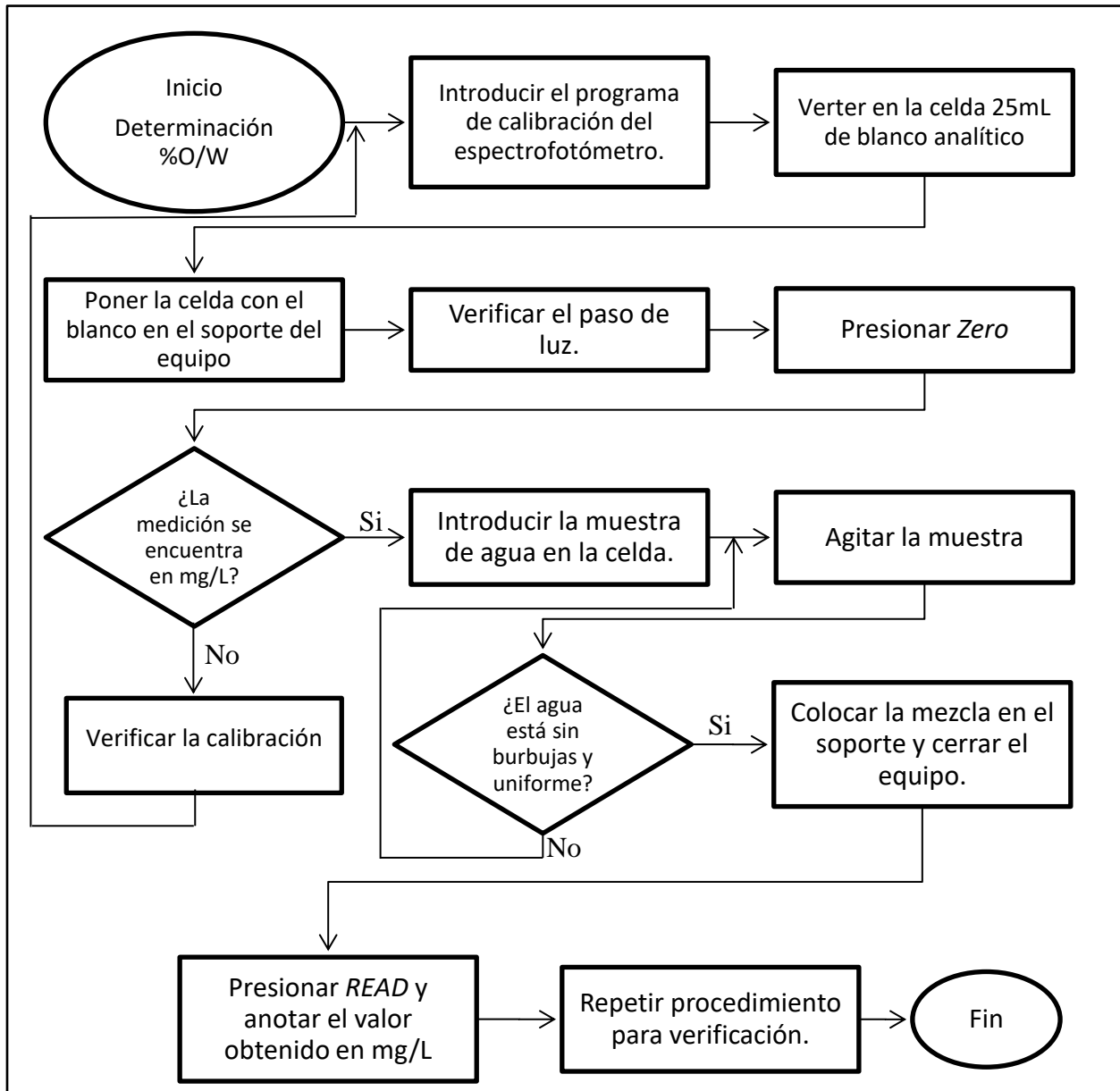


Nota. La tabla representa el procedimiento para determinación de SST.

Como segunda caracterización necesaria previa a la realización del test de jarras se debe realizar también la medición del %O/W que será encontrado de la *Figura 4*.

Figura 4.

Procedimiento determinación Porcentaje grasas y aceites.



Nota. La tabla representa el procedimiento para determinación de %O/W.

En la elaboración práctica de estos dos procedimientos se tuvo que tener especial cuidado en la precisión para evitar posibles variaciones no deseables en la medición de estos parámetros. Para obtener valores de referencia se tienen los datos generados por el laboratorio del campo B, evidenciados en la *Tabla 7*, en donde se observan los valores previos al tratamiento con químicos que se hace en campo para estas variables específicas.

Tabla 7.

Valores de laboratorio del agua de producción previo al tratamiento.

Parámetro	Medida	Equivalente	Método	Valor
SST	mg/L	ppm	Método 8006 fotométrica de HACH	51,0
Grasas y Aceites O/W	mg/L	ppm	Extracción colorimétrica de HACH	46,8

Nota. La tabla evidencia los valores obtenidos en el laboratorio del campo B para los parámetros de importancia antes del tratamiento químico.

Así mismo, fueron aportados los valores en campo para estas mismas variables después del tratamiento químico, es decir, el agua en condiciones de inyección. Cabe recalcar que el tratamiento que se hace en campo al crudo que viene emulsionada con el agua comienza con el fluido que llega al CPF, a este se le hace una inyección de rompedor inverso, directo y desemulsificantes. Seguido a esto, sigue todo el proceso de separación que se realiza por medio de tanques fwko, tratadores térmicos, electroestáticos y filtros. Luego de que el agua sale de los filtros se hace la inyección de floculante que es el punto dentro del proceso de tratamiento de aguas que se encuentra en estudio, al realizar esta añadidura de químicos al proceso sigue un estado de retención en los decantadores en donde se espera a que el floculante realice el proceso final de separación de las trazas de aceite y contenido de sólidos presentes en el agua que finalmente será dispuesta en el subsuelo en el proceso de reinyección que es regulado por la resolución 631 de 2015. A esta agua de inyección se le debe realizar la medición de SST y grasas y aceites para verificar que se esté cumpliendo con la normativa establecida por los entes reguladores, los datos obtenidos en campo serán presentados a continuación.

Tabla 8.

Valores de laboratorio del agua de producción a condiciones de inyección.

Parámetro	Medida	Equivalente	Método	Valor
SST	mg/L	ppm	Método 8006 fotométrica de HACH	2,5
Grasas y Aceites	mg/L	ppm	Extracción colorimétrica de HACH	2,1

Nota. La tabla evidencia los valores obtenidos en el laboratorio del campo B para los parámetros de importancia después del tratamiento químico.

En la *Tabla 8* se observan los parámetros de importancia obtenidos en campo los cuales sirvieron como referencia para realizar el análisis puesto que se espera que estos sirvan como punto de referencia para evaluar el desempeño del floculante O en la remoción de esta característica del agua que no es deseada.

2.3.Fase III: Determinación de los escenarios para el desarrollo del test de jarras para el floculante orgánico y floculante convencional

La tercera etapa consistió en la definición de los escenarios que se realizarían para cada uno de los floculantes, con el fin de lograr alcanzar el mejor rendimiento por parte de los mismos, teniendo en cuenta la velocidad de la agitación y tiempo de retención en el proceso de tratamiento del agua de producción. Para el desarrollo de los escenarios se va a tener en cuenta la *Tabla 2* de la sección 2.1 en donde se definió la Fase I del proyecto. En esta tabla se encuentra la relación de la cantidad de floculante que se adicionó en cada uno de los beaker utilizados para el montaje del test de jarras. Así mismo, se debe tener en cuenta la precisión en el momento de realizar las mediciones correspondientes de floculante. Adicionalmente, se presentará la *Tabla 10* por medio de la cual se especifica el procedimiento específico en cada Jarra.

2.3.1. Determinación de la concentración óptima de floculante

Para determinar la concentración de floculante utilizado en cada jarra, primero cabe resaltar las proporciones de la disolución que se hizo con el floculante tanto orgánico como convencional

previo a la generación de los escenarios del test de jarras. Para la realización de estos cálculos se utilizaron las ecuaciones encontradas en el libro de Química de Raymond Chang [21]. Para obtener el porcentaje de la disolución se utilizó la ecuación de % p/v.

$$\% \frac{p}{v} = \frac{m_{\text{solute}}}{V_{\text{solución}}} * 100$$

Teniendo en cuenta que se va a adicionar 1gr de floculante por cada 200 ml obtendremos la relación en porcentaje peso/volumen para la disolución realizada.

$$\% \frac{p}{v} = \frac{1gr}{200 mL} * 100 = 0.5\% p/v$$

Este porcentaje de 0.5% p/v fue definido por medio de la revisión bibliográfica en la que se encontró que para realizar la determinación de los valores óptimos de floculante a adicionar para el tratamiento de agua se podría utilizar una dilución con esta relación peso volumen. En esta decisión se tuvo en cuenta la tesis Coagulantes y floculantes naturales usados en la reducción de turbidez, sólidos suspendidos, colorantes y metales pesados en aguas residuales [22] donde utilizaron una dilución de 1g del floculante en 200 mL de agua destilada.

Teniendo en cuenta el resultado anterior, se procede a generar los escenarios para el procedimiento del test de jarras definiéndolo de la siguiente manera:

Tabla 9.

Cantidades de disolución al 0,5% p/v adicionada por jarra.

# Jarra	1	2	3	4	5	6
Cantidad de disolución al 0,5% (mL)	1	2	3	4	5	6

Nota. La tabla evidencia los valores adicionados en el laboratorio de disolución para cada jarra.

Teniendo en cuenta la cantidad de solución al 0.5% adicionada en cada jarra, representado en la *Tabla 9*, se va a evaluar a cuantas partículas por millón (ppm) equivaldría esta cantidad para

poder generar la formulación correspondiente de los escenarios que fueron llevados a cabo en el test de jarras.

Con el objetivo de obtener la concentración final que va a tener en cada jarra se va utilizar la ecuación de balance de concentraciones [21].

$$V_1 * C_1 = V_2 * C_2$$

Los datos que se requieren para la implementación de esta ecuación se obtuvieron teniendo en cuenta la cantidad de volumen en la que se realizó la disolución que serían 200 mL (V_1), al 0.5% p/v (C_1) para posteriormente adicionarlo a cada jarra que contiene 500mL (V_2) de agua de producción. Teniendo en cuenta estos datos se debe proceder a calcular la concentración final (C_2) para cada una de las jarras con base a las cantidades adicionadas en mL en cada una, valores que fueron consignados en la *Tabla 9*, realizando el cálculo para la Jarra 2 se obtendría:

$$C_2 = \frac{V_1 * C_1}{V_2} = \frac{1mL * 0.5\%}{500 mL} = 0,002 * 10000 = 10ppm$$

Como el valor de concentración es ideal presentarlo en unidades de partes por millón se procedió a realizar la respectiva corrección para posteriormente realizar los cálculos para los diferentes volúmenes de dilución de floculante adicionados a cada jarra. Finalmente se realizó la consignación de todos los datos en la tabla presentada a continuación.

Tabla 10.

Concentraciones de floculante para cada jarra.

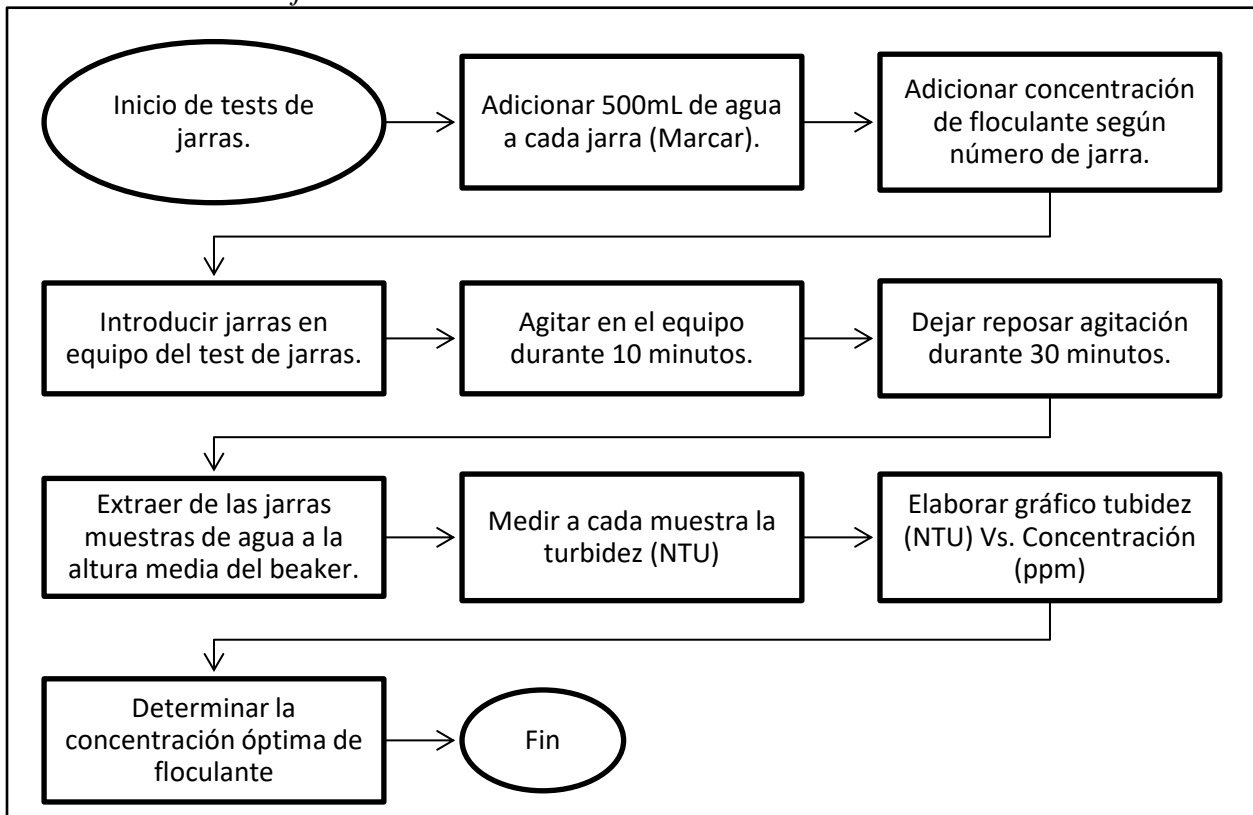
# Jarra	Volumen de agua (mL)	Concentración de floculante (ppm)	Tiempo de agitación (min)	Tiempo de reposo (min)
1	500	10	10	30
2		20		
3		30		
4		40		

5		50		
6		60		

Nota. La tabla evidencia las variables a tener en cuenta en la formulación de los escenarios para el test de jarras.

Figura 5.

Procedimiento test de jarras.



Nota. La figura representa el procedimiento que se debe llevar a cabo para la elaboración del test de jarras.

Posteriormente, se debe realizar el tratamiento del agua con la dosis óptima de floculante O para obtener el mayor rendimiento en la remoción de SST y %O/W. Luego de obtener estos datos serán consignados en la *Tabla 11* para su posterior análisis.

Tabla 11.

Valores de laboratorio del agua después del tratamiento con el floculante O.

Parámetro	Medida	Equivalente	Método	Valor
SST	mg/L	ppm	Método 8006 fotométrica de HACH	36,0
Grasas y Aceites O/W	mg/L	ppm	Extracción colorimétrica de HACH	6,4

Nota. La tabla evidencia los valores obtenidos en el laboratorio para los parámetros de importancia después del tratamiento.

Finalizado el proceso para el floculante convencional, se procedió a realizar el mismo procedimiento descrito anteriormente para el floculante orgánico para obtener toda la data necesaria para la comparación del rendimiento de los mismos. En la generación de la gráfica de turbiedad en unidades nefelométricas de turbidez (NTU) Vs. Dosis de floculante en partículas por millón (ppm) se permitió determinar la concentración óptima de floculante para la eliminación de la mayor cantidad de SST y %O/W.

Al obtener la dosis óptima de floculante se procedió a realizar el tratamiento estipulado a esa concentración para obtener la máxima remoción de los dos parámetros que se desea eliminar del agua (SST y %O/W). Finalmente, se procede a llenar la tabla por medio de la cual se sintetizarán los datos obtenidos después del tratamiento al agua de producción con el floculante convencional.

Tabla 12.

Valores de laboratorio del agua de después del tratamiento con el floculante X.

Parámetro	Medida	Equivalente	Método	Valor
SST	mg/L	ppm	Método 8006 fotométrica de HACH	43,0
Grasas y Aceites O/W	mg/L	ppm	Extracción colorimétrica de HACH	6,6

Nota. La tabla evidencia los valores obtenidos en el laboratorio para los parámetros de importancia después del tratamiento.

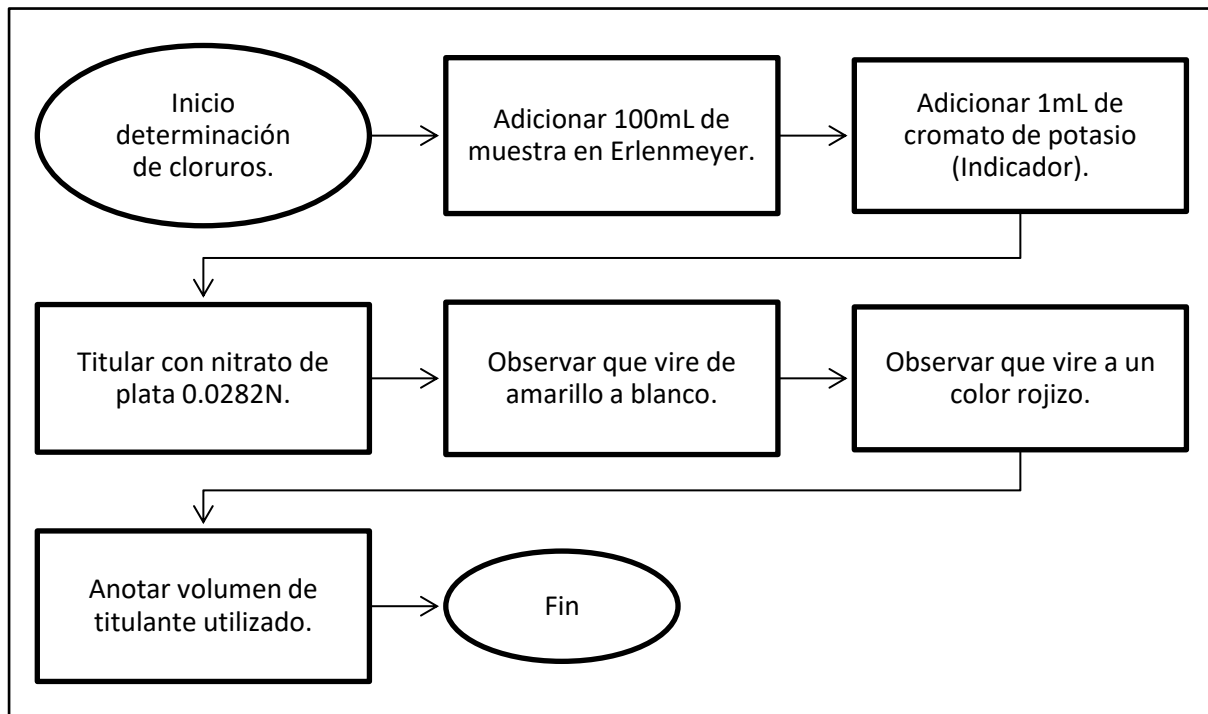
Posterior a la realización de los gráficos por medio de los cuales se determinó la concentración óptima de floculante para tratamiento del agua se procede a realizar el proceso de tratamiento a

esa concentración tanto para el floculante orgánico como para el floculante convencional para generar la mayor remoción de los dos parámetros de interés. Finalizado el proceso de tratamiento, se realizó nuevamente la medición de SST y %O/W por medio fotométrico para obtener los valores finales de remoción que serán analizados para verificación de la efectividad del proyecto.

Para la determinación de cloruros se usó como referencia el documento análisis de agua - determinación de cloruros totales en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba [23] en el que se muestra todo el procedimiento que se debe llevar a cabo para obtener los cloruros en el agua. A continuación se va a evidenciar el procedimiento para realizar esta determinación.

Figura 6.

Procedimiento determinación de cloruros.



Nota. La figura evidencia el procedimiento para la determinación de los cloruros en el agua de producción.

Luego se realizar el procedimiento evidenciado en la *Figura 6* se procede a realizar los cálculos para obtener el valor en mg/L de Cloruros en el agua, para ellos se utilizará la ecuación que se muestra a continuación.

$$Cl^{-}(mg/L) = \frac{A * N * 35,450 * 1000}{mL\ muestra}$$

Con la implementación de esta ecuación se realizarán los respectivos cálculos con el fin de determinar la cantidad de cloruros presentes en el agua.

2.4.Fase IV: Comparación del desempeño del floculante orgánico respecto al floculante convencional en el tratamiento de las aguas de producción del campo B

Para el desarrollo de esta sección se hizo necesario la elaboración de gráficas por medio de las cuales se puede apreciar con mayor claridad los valores obtenidos tanto para el floculante convencional como para el floculante orgánico.

Para comenzar se va realizar el análisis correspondiente de los datos aportados por el campo que fueron consignados en la *Tabla 7* y *Tabla 8*. La relevancia de estos datos radica en la obtención de los porcentajes de remoción que se tienen en campo actualmente en el campo B en la eliminación los dos parámetros deseados. Así mismo, estos datos servirán como referencia para el posterior análisis de los datos obtenidos a nivel laboratorio con la debida experimentación de los floculantes para de esta manera saber si el tratamiento está funcionando en la eliminación de SST y %O/W. También se hará un análisis a parámetros como turbidez, color, conductividad, pH, hierro y cloruros con el fin de determinar cómo se comportan los floculantes con respecto a otras características que debe tener el agua de inyección bajo el marco regulatorio de la resolución 631 de 2015.

Para definir que floculante tuvo mejor rendimiento se tuvo en cuenta el porcentaje de remoción que tuvo cada uno en la remoción de los parámetros de interés, así mismo, se realizó un diagrama de barras para cada una de las características evaluadas con la finalidad de visualmente notar con

respecto a la resolución cual tuvo un mejor resultado y cual aportaría en mayor proporción al mejoramiento de la operación en el campo B.

Luego de definir qué floculante tuvo un mejor rendimiento se procede a realizar el análisis financiero beneficio-costos que permitirá analizar en términos económicos la opción más viable con el fin de generar un beneficio ambiental a un buen costo. Para este proceso de análisis se tuvo en cuenta la Guía de análisis costo beneficio [24]. Por medio del cual se definen todos los factores conceptuales del análisis financiero, así como la manera de realizar cálculos que permitan saber si de manera económica es rentable realizar este proyecto.

El procedimiento a realizar para esta parte de encontrar la cantidad de floculante por cada barril de agua de producción que se desea tratar, esta determinación se hizo por medio del conocimiento de la cantidad de floculante que se utilizó para hacer la dilución seguido a los mililitros de la misma que se implementó para llegar a la concentración óptima. Con estos resultados se debe realizar la respectiva conversión de unidades para finalmente llegar a los kilogramos de floculante requeridos para tratar cada barril de agua de producción. Teniendo en cuenta este dato de dosificación se procedió a realizar el costo por cada barril de agua teniendo en cuenta el costo por kilogramo de producto químico. Finalmente, se realizó el cálculo de los costos diarios, mensuales y anuales.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se observarán los resultados obtenidos a nivel de laboratorio para las Fases I, II, III y IV de la sección metodológica del proyecto. De esta manera se dará cumplimiento a todos los objetivos específicos establecidos y se determinará el rendimiento del floculante orgánico con respecto al convencional.

3.1.Fase I: Establecimiento de las variables técnicas para adición del floculante en el tratamiento del agua de producción

En la fase I del proyecto se establecieron las variables técnicas para la adición de floculante por eso mismo se procedió a realizar la medición inicial de pH del agua de producción para determinar si esta se encuentra dentro del rango operativo de los floculantes que oscila entre 5 y 9 para el Floculante O y de 6 a 9 para el Floculante X.

Inicialmente, se realizó la medición con agua destilada con el fin de neutralizar y verificar calibración el equipo para tener mediciones más exactas.

Figura 7.

Medición de pH y conductividad para agua destilada.



Nota. La imagen representa los valores obtenidos para pH y conductividad del agua destilada con el equipo de HACH.

Al realizar esta medición como se observa en la *Figura 5* se obtuvo un resultado para pH de 7.33, en cuanto a la conductividad se obtuvo un valor de 2.37 $\mu\text{S}/\text{cm}$ lo cual indica que las características de esta agua se encuentran dentro de los valores normales, por lo tanto, se puede inducir que el equipo se encuentra calibrado.

Posteriormente, se realizó la medición para la muestra de agua de producción para la cual se realizará el análisis.

Figura 8.

Medición de pH y conductividad para agua de producción.



Nota. La imagen representa los valores obtenidos para pH y conductividad del agua de producción con el equipo de HACH.

Como se puede observar en la *Figura 8* los resultados obtenidos para el agua de producción en cuanto a pH fue un valor de 7.34 y para conductividad de 1524 $\mu\text{S}/\text{cm}$ lo cual nos indica que esta agua tiene una conductividad alta con respecto al agua destilada, sin embargo, tiene características de agua pura.

3.2.Fase II: Caracterización fisicoquímica del agua de producción a nivel de laboratorio

En la fase II del proyecto se realizó toda la caracterización fisicoquímica inicial del agua de producción, valores por medio de los cuales se permitió el posterior análisis de la utilidad de los floculantes para la eliminación de los diversos parámetros que se tendrán en cuenta sin dejar de lado el objeto de este proyecto que es el estudio puntual de la variabilidad en términos de SST y %O/W en la implementación de ambos químicos. Como se pudo evidenciar en la Fase II de la sección metodológica se explicó el procedimiento mediante el cual se realizó cada una de las mediciones de los diversos parámetros que fueron obtenidos para su posterior análisis.

A continuación, se presentará los resultados iniciales obtenidos en esta caracterización fisicoquímica del agua.

Tabla 13.

Valores de laboratorio de caracterización fisicoquímica inicial del agua.

Parámetro	Valor laboratorio	Valor resolución 631 de 2015	Unidades
Turbidez	21.62	ND	NTU
SST	50	50	mg/L
%O/W	6.6	15	mg/L
Hierro FerroVer	0.41	3	mg/L
Color	244	ND	PtCo
pH	7.34	6,00 a 9,00	AD
Conductividad	1524	ND	μS/cm

Nota. En la tabla se observan los datos obtenidos para la caracterización del agua de producción inicial.

Si se observa los valores obtenidos por medio de las pruebas de laboratorio, consignados en la *Tabla 13*, podemos observar que el valor de SST se encuentra sobre el límite debido a que la Resolución 631 de 2015 del ministerio de ambiente y desarrollo sostenible indica que el valor máximo permisible es específicamente 50 mg/L y el agua se encuentra en este valor, por lo tanto, cualquier disminución en el rendimiento en la remoción de sólidos a través de todo el tratamiento que se hace en las facilidades de producción en el campo podría influir en el cumplimiento de la regulación por medio de la cual se deben regir estos parámetros. En términos del porcentaje de grasas y aceites el agua ya viene con un valor bastante bajo de 6.6 mg/L teniendo en cuenta que el

máximo permisible según la normativa es de 15 mg/L, sin embargo, se desea disminuir al máximo este valor para evitar posibles afectaciones al subsuelo y mantener la preservación ambiental con las buenas prácticas de ingeniería.

En términos de hierro se encuentra dentro de valores normales según lo indica la resolución, dato que se pueden observar en el Anexo A, donde se podrá encontrar los parámetros fisicoquímicos y valores máximo permitidos, en este caso, para el hierro. Si observamos el dato obtenido a nivel experimental este es de 0.41 mg/L y el límite máximo es 3 lo cual nos indica que se encuentra dentro de los valores permisibles, así mismo, podemos inducir que este no será un problema dentro del tratamiento al igual que el pH debido a que este debe estar entre 6 a 9 unidades y se obtuvo un valor de 7.34 lo cual afirma la neutralidad del fluido en estudio, adicionalmente, cabe recordar que los floculantes a implementar requieren que el agua se encuentre entre 6-9 al igual que la resolución, por lo tanto, se verificó que se pueda implementar los químicos que se quieren evaluar.

Figura 9.

Medición de la turbidez para el agua de producción.



Nota. En la figura se observa el valor obtenido para la turbiedad en el agua de producción.

En términos de turbidez se obtuvo un valor de 21.62 NTU como se puede observar en la *Figura 7* este valor es elevado teniendo en cuenta que para un agua potable según la OMS no se debe superar las 5 Unidades Nefelométricas de Turbidez, sin embargo, hay que tener en cuenta que para un agua de producción puede ser más elevado.

3.3.Fase III: Determinación de los escenarios para el desarrollo del test de jarras para el floculante orgánico y floculante convencional

En esta fase se establecieron los escenarios del test por medio de los cuales se realizaría el gráfico de Turbiedad Vs. Dosis de floculante que permitirá posteriormente obtener la concentración óptima de floculante para el tratamiento.

3.3.1. Preparación del floculante X

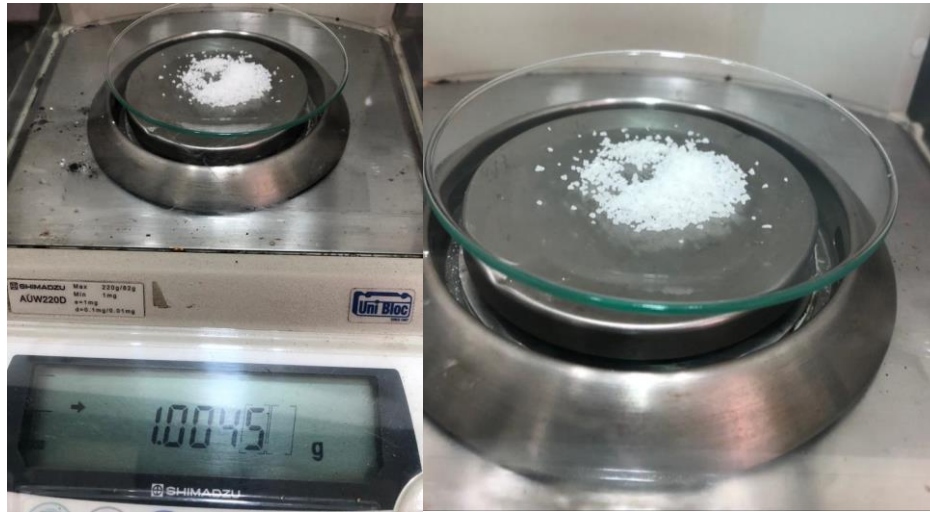
Para realizar la dilución al 0.5% del floculante X, se hizo la medición de la cantidad de floculante en gramos a adicionar teniendo en cuenta que este se encuentra en estado sólido. Como se observó en la sección metodológica se requiere un gramo de soluto para llevar a cabo esta dilución, como se observa por medio de la siguiente ecuación.

$$\% \frac{p}{v} = \frac{1gr}{200 mL} * 100 = 0.5\% p/v$$

Posterior a la realización de esta analogía se procedió a realizar la medición del gramo de floculante a implementar, el valor exacto se observa en la siguiente figura.

Figura 10.

Medición de la cantidad de floculante X requerida.



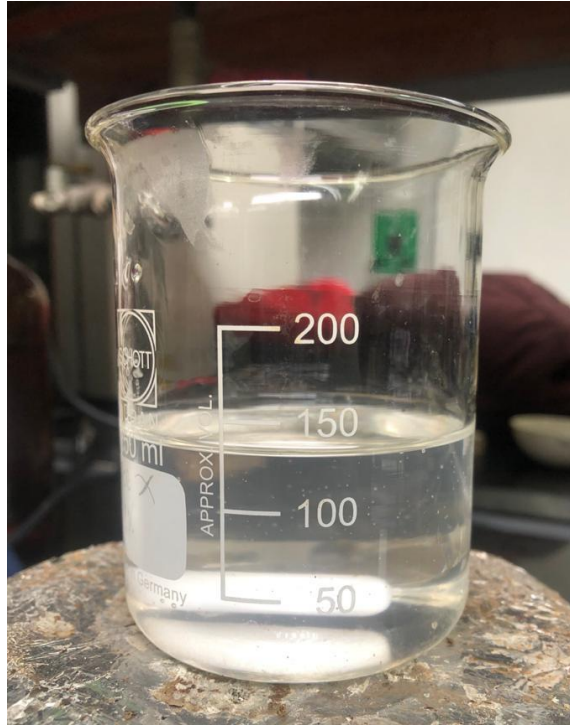
Nota. En la figura se observa la cantidad de floculante X usado para la dilución.

Como se puede evidenciar en la *Figura 10* la cantidad implementada de floculante convencional fue de 1.0045g, esta fue adicionada a 200 mL de agua destilada para hacer la dilución del soluto.

Esta dilución al 0,5% relación peso-volumen será evidenciada en la *Figura 11* en donde se podrá observar las características de la misma.

Figura 11.

Dilución al 0.5% de floculante X.



Nota. En la figura se observa la dilución de floculante X realizada.

Como se observa en la *Figura 11* se observa la dilución obtenida luego de adicionar el floculante en el agua, la agitación se hizo magnética para asegurar que la mezcla se diera de forma uniforme y se aprovechara al máximo el producto, así mismo, se pudo evidenciar las características poliméricas del químico a implementar por la consistencia que este tenía.

3.3.2. Preparación del floculante O

Para realizar la dilución al 0.5% del floculante O, se hizo la medición de la cantidad de floculante en gramos a adicionar teniendo en cuenta que este se encuentra en estado sólido. Como se observó en la sección metodológica se requiere un gramo de soluto para llevar a cabo esta dilución, como se observa por medio de la siguiente ecuación.

$$\% \frac{p}{v} = \frac{1 \text{ gr}}{200 \text{ mL}} * 100 = 0.5\% \text{ p/v}$$

Posterior a la realización de esta analogía se procedió a realizar la medición del gramo de floculante a implementar, el valor exacto se observa en la siguiente figura.

Figura 12.

Medición de la cantidad de floculante O requerida.



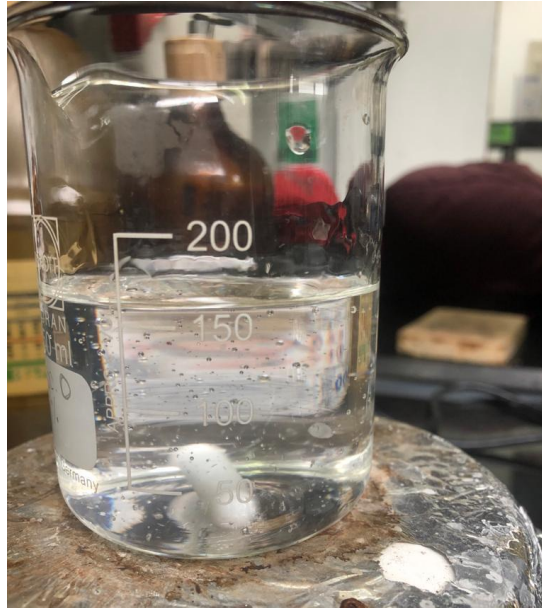
Nota. En la figura se observa la cantidad de floculante O usado para la dilución.

Como se puede evidenciar en la *Figura 12* la cantidad implementada de floculante orgánico fue de 1.0002g, esta fue adicionada a 200 mL de agua destilada para hacer la dilución del soluto.

Esta dilución al 0,5% relación peso-volumen será evidenciada en la *Figura 13* en donde se podrá observar las características de la misma.

Figura 13.

Dilución al 0.5% de floculante O.



Nota. En la figura se observa la dilución de floculante O realizada.

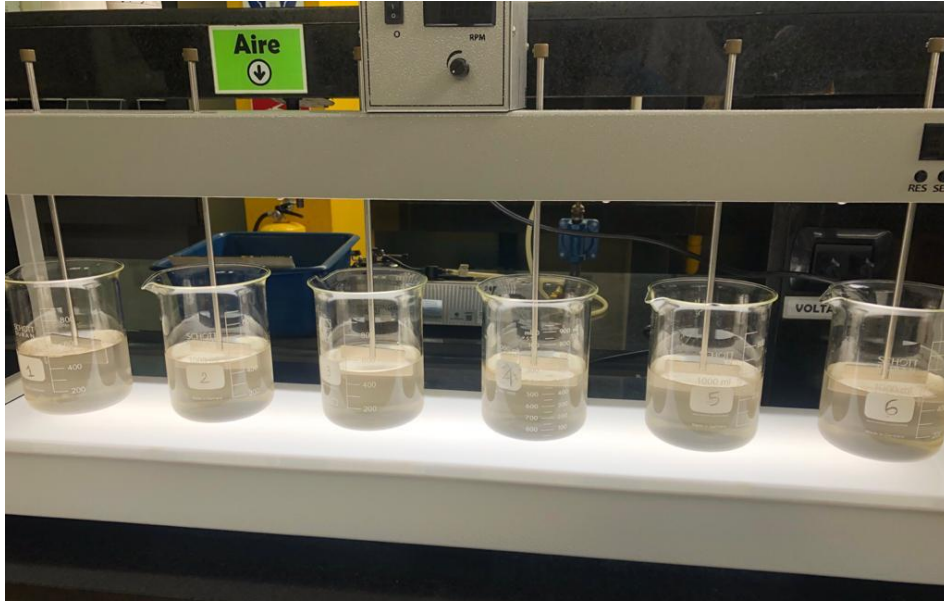
Como se observa en la *Figura 13* se observa la dilución obtenida luego de adicionar el floculante en el agua, la agitación se hizo magnética para asegurar que la mezcla se diera de forma uniforme y se aprovechara al máximo el producto, así mismo, se pudo evidenciar las características poliméricas del químico a implementar por la consistencia que este tenía. Con respecto al floculante convencional se puede decir que esta tenía una consistencia más viscosa lo cual dificultaba un poco más la movilidad del mismo.

3.3.3. Resultados test de jarras

Después de la elaboración de la dilución para cada floculante se procedió a generar los escenarios del test de jarras en el que se usaron seis beaker de 1000 mL y a cada uno se le agregó la muestra de 500 mL de agua de producción como se había establecido en la *Tabla 10* de la sección metodológica.

Figura 14.

Escenarios del test de jarras para el floculante X.



Nota. En la figura se observa los escenarios del test de jarras elaborados a las diferentes concentraciones de floculante X.

Figura 15.

Escenarios del test de jarras para el floculante O.



Nota. En la figura se observa los escenarios del test de jarras elaborados a las diferentes concentraciones de floculante O.

Luego de seguir todo el proceso de floculación que fue especificado en la sección metodológica se realizó la medición de turbidez a cada una de las jarras y se repitió el procedimiento una vez más para cada floculante para de esta manera evitar posibles errores, estos valores de turbidez permitirán realizar la estimación de la determinada concentración óptima para la realización del tratamiento.

A continuación, se van a presentar los datos obtenidos para el Floculante X para los cuales se tienen dos mediciones y se realizó el promedio entre estas para una estimación más exacta de la concentración óptima del mismo.

Tabla 14.

Valores de turbidez después del tratamiento con floculante X.

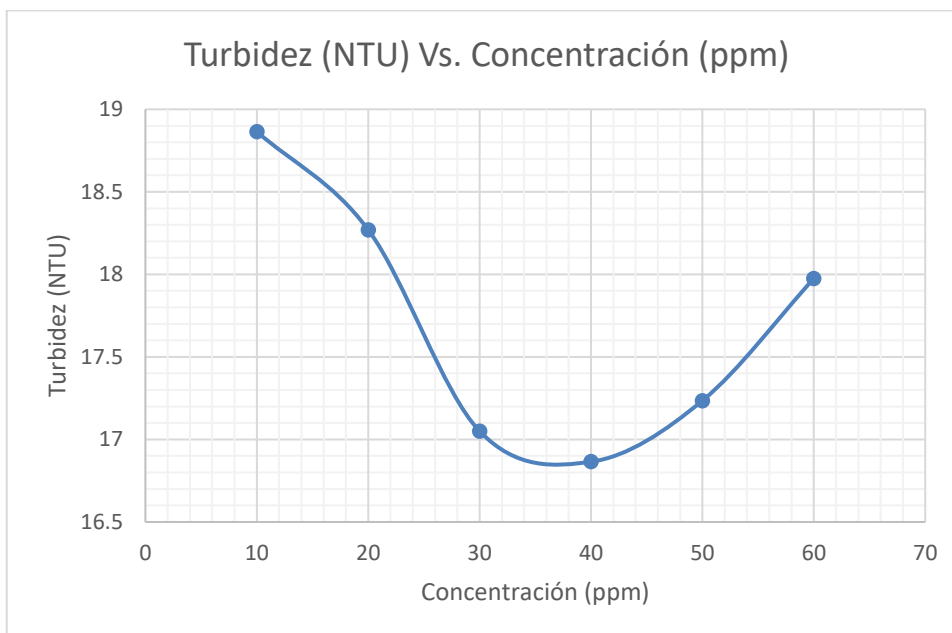
# Jarra	Concentración (ppm)	Turbidez (NTU)		
		Replica 1	Replica 2	Promedio
1	10	19.03	18.70	18.87
2	20	18.57	17.97	18.27
3	30	17.46	16.64	17.05
4	40	17.37	16.36	16.87
5	50	17.62	16.85	17.24
6	60	18.64	17.31	17.98

Nota. En la tabla se observa los valores de turbidez obtenido en las diferentes réplicas realizadas para el tratamiento con Floculante X.

Luego de obtener los datos que fueron evidenciados en la *Tabla 14* se procedió a realizar la gráfica de los valores promedio de turbidez obtenida para las diferentes concentraciones por medio de la cual se permitirá observar cual es la concentración óptima de floculante a implementar.

Figura 16.

Gráfica turbidez (NTU) Vs. Dosis de floculante X en ppm.



Nota. En la gráfica se observa el comportamiento de la turbidez al variar la concentración de floculante X.

Por medio de la *Gráfica 1* se determinó que la concentración óptima para la implementación del floculante orgánico es de 37.5 ppm teniendo en cuenta que este es el punto más bajo de turbidez reflejado a las diferentes concentraciones de producto a las cuales se realizó el procedimiento. Con base a este resultado se procederá a realizar el respectivo tratamiento al agua bajo esta concentración con el fin de asegurar que tenga la máxima remoción posible de los parámetros no deseados en el agua de producción, así mismo, cabe recalcar que se hicieron 3 réplicas del mismo para mayor seguridad en la calidad de los resultados.

Teniendo en cuenta este valor se procedió a realizar el análisis al test de jarras realizado para el floculante O (*Figura 12*). Los datos serán evidenciados a continuación, cabe recalcar que para este también se hicieron dos réplicas con el fin de evitar equivocaciones y ser más preciso en las mediciones de las características requeridas.

Tabla 15.

Valores de turbidez después del tratamiento con floculante O.

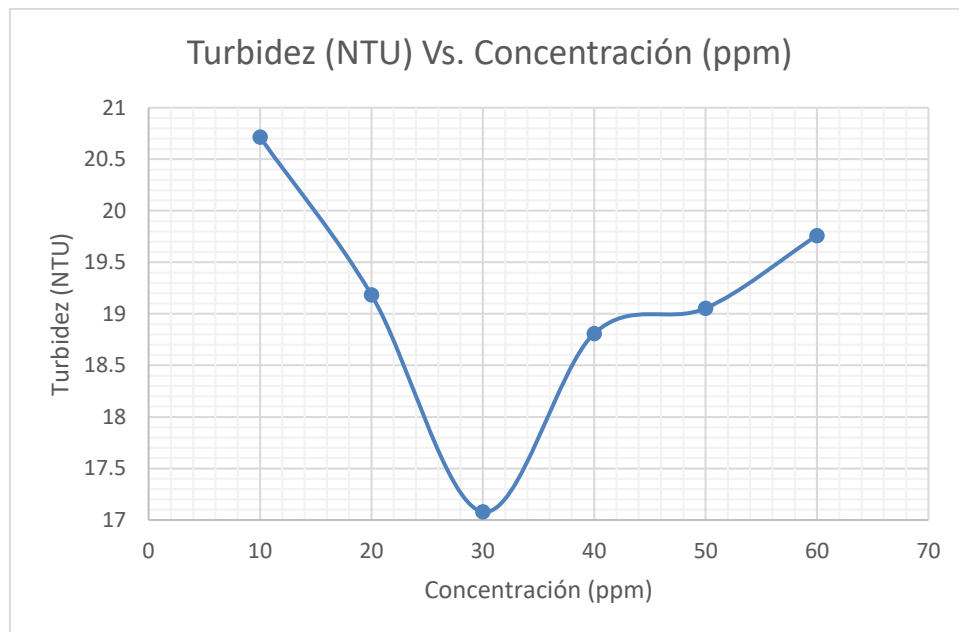
# Jarra	Concentración (ppm)	Turbidez (NTU)		
		Replica 1	Replica 2	Promedio
1	10	20.46	20.97	20.72
2	20	19.48	18.89	19.19
3	30	16.93	17.23	17.08
4	40	18.77	18.85	18.81
5	50	18.84	19.27	19.06
6	60	19.92	19.60	19.76

Nota. En la tabla se observa los valores de turbidez obtenido en las diferentes réplicas realizadas para el tratamiento con Floculante O.

Luego de obtener los datos que fueron evidenciados en la *Tabla 15* se procedió a realizar la gráfica por medio de la cual se permitirá observar cual es la concentración óptima de floculante a implementar.

Figura 17.

Gráfica turbidez (NTU) Vs. Dosis de floculante O en ppm.



Nota. En la gráfica se observa el comportamiento de la turbidez al variar la concentración de floculante O.

Por medio de la *Gráfica 2* se determinó que la concentración óptima para la implementación del floculante orgánico es de 30 ppm teniendo en cuenta que este es el punto más bajo de turbidez reflejado a las diferentes concentraciones de producto a las cuales se realizó el procedimiento. Con base a este resultado se procederá a realizar el respectivo tratamiento al agua bajo esta concentración con el fin de asegurar que tenga la máxima remoción posible de los parámetros no deseados en el agua de producción, así mismo, cabe recalcar que se hicieron 3 réplicas del mismo para mayor seguridad en la calidad de los resultados.

3.4.Fase IV: Comparación del desempeño del floculante orgánico respecto al floculante convencional en el tratamiento de las aguas de producción del campo B

En la fase IV se espera comparar los resultados obtenidos principalmente para SST y %O/W en el tratamiento tanto para el floculante X como para el floculante O. De mismo modo, se analizarán los demás parámetros medidos con el fin de determinar el comportamiento de estos floculantes para diferentes características de un agua de producción.

A continuación, se evidenciarán los resultados obtenidos tanto para floculante X como para floculante O en los distintos parámetros estudiados con el fin de realizar una comparación que permita observar cual obtuvo un mejor rendimiento para el tratamiento del agua de producción.

3.4.1. Resultados de turbidez para el agua de producción

A continuación, se presentarán los resultados obtenidos en cuanto a turbidez en el tratamiento con ambos floculantes para su posterior análisis.

Tabla 16.

Valores de turbidez a la concentración óptima de floculante X.

Concentración	Turbidez (NTU)			
	Replica 1	Replica 2	Replica 3	Promedio
37.5	19.33	19.36	18.37	19.02

Nota. En la tabla se observan los valores obtenidos de turbidez en las tres réplicas y el valor promedio con floculante X a la concentración óptima.

Tabla 17.

Valores de turbidez a la concentración óptima de floculante O.

Concentración	Turbidez (NTU)			
	Replica 1	Replica 2	Replica 3	Promedio
30	16.35	16.05	15.68	16.03

Nota. En la tabla se observan los valores obtenidos de turbidez en las tres réplicas y el valor promedio con floculante O a la concentración óptima.

En la *Tabla 16* y *Tabla 17* se observan los valores obtenidos en cuanto a turbidez para el floculante X y para el floculante O, respectivamente. Como se puede evidenciar para este primero se tuvo un valor promedio de 19.02 NTU mientras que para el segundo el valor fue de 16.03 NTU lo cual representa una diferencia significativa en términos de turbidez en el agua de uno con respecto al otro. Si analizamos en porcentaje numérico el floculante X tuvo un porcentaje total de remoción de turbiedad de 12.03% mientras que por su parte el floculante O tuvo un resultado de 25.87% lo cual ratifica que se obtuvo un mejor desempeño para este parámetro en específico. Como se pudo observar en la *Tabla 13* la resolución 631 de 2015 no tienen disponible un valor máximo permisible para proyectos de inyección de agua, sin embargo, este valor debe reportarse dentro de los datos que se le ofrecen a los entes reguladores con el fin de que los mismos puedan hacer un seguimiento del tratamiento que se hace frente a este parámetro.

3.4.2. Resultados de SST para el agua de producción

A continuación, se presentarán los resultados obtenidos en cuanto a sólidos suspendidos totales (SST) en el tratamiento con ambos floculantes para su posterior análisis.

Tabla 18.

Valores de SST a la concentración óptima de floculante X.

Concentración	SST (mg/L)			
	Replica 1	Replica 2	Replica 3	Promedio
37.5	44.00	47.00	38.00	43.00

Nota. En la tabla se observan los valores obtenidos de SST en las tres réplicas y el valor promedio con floculante X a la concentración óptima.

Tabla 19.

Valores de SST a la concentración óptima de floculante O.

Concentración	SST (mg/L)			
	Replica 1	Replica 2	Replica 3	Promedio
30	35.00	37.00	36.00	36.00

Nota. En la tabla se observan los valores obtenidos de SST en las tres réplicas y el valor promedio con floculante O a la concentración óptima.

En la *Tabla 18* y *Tabla 19* se observan los valores obtenidos en cuanto a SST para el floculante X y para el floculante O, respectivamente. Como se puede evidenciar para este primero se tuvo un valor promedio de 43 mg/L de sólidos, mientras que en el segundo se tuvo un resultado de 36 mg/L. En este caso, al igual que en la turbidez el floculante O tuvo un mejor rendimiento debido a que evidenció un porcentaje de remoción del 28% mientras que el floculante X obtuvo apenas un 14%. Según la resolución 631 de 2015, como se pudo observar en la *Tabla 13*, el valor de SST debe ser inferior a 50 mg/L e inicialmente se encontraba sobre el límite máximo, después del tratamiento con los floculantes se logró disminuir en un buen porcentaje, sin embargo, debe procurarse tener la mayor remoción posible para ser responsables ambientalmente.

Adicionalmente, como se pudo observar en la *Tabla 8* el valor de SST del agua de producción a condiciones de inyección llegaba a valores bastante bajos (2.5 mg/L) valor al que no se llegó con el tratamiento que se hizo en el laboratorio. Esta variación tan alta puede deberse principalmente a la magnitud de los equipos que se utilizan en campo para realizar este proceso final de remoción de los sólidos, además, a nivel de laboratorio se puede tener variabilidad al momento de introducir la curva de calibración para la medición de este parámetro en el espectrofotómetro ya que de las alícuotas utilizadas para la medición depende la precisión de la misma. Sin embargo, estos datos permiten observar que el tratamiento con ambos floculantes sirve para la eliminación de SST y específicamente que el floculante orgánico presentó un mayor rendimiento para la reducción de los mismos.

3.4.3. Resultados de %O/W para el agua de producción

A continuación, se presentarán los resultados obtenidos en cuanto a grasas y aceites (%O/W) en el tratamiento con ambos floculantes para su posterior análisis.

Tabla 20.

Valores de %O/W a la concentración óptima de floculante X.

Concentración	% O/W (mg/L)			
	Replica 1	Replica 2	Replica 3	Promedio
37.5	6.70	6.60	6.50	6.60

Nota. En la tabla se observan los valores obtenidos de %O/W en las tres réplicas y el valor promedio con floculante X a la concentración óptima.

Tabla 21.

Valores de %O/W a la concentración óptima de floculante O.

Concentración	% O/W (mg/L)
30	6.40

Nota. En la tabla se observan el valor obtenido de %O/W para el floculante O a la concentración óptima.

En la *Tabla 21* solo se presenta un valor puesto que a pesar de haber realizado las mismas 3 réplicas como en los anteriores parámetros todas arrojaron el mismo valor, por lo tanto, este fue el valor resultante al análisis de grasas.

En la *Tabla 20* y *Tabla 21* se observan los valores obtenidos en cuanto a %O/W para el floculante X y para el floculante O, respectivamente. Como se puede evidenciar para este primero se tuvo un valor promedio de 6.6 mg/L de grasas, mientras que en el segundo se tuvo un resultado de 6.4 mg/L. En este caso, al igual que los parámetros analizados anteriormente, el floculante O tuvo un mejor rendimiento debido a que evidenció un porcentaje de remoción del 3.03% mientras que el floculante X no demostró cambio alguno, por ende, no tuvo ningún porcentaje de variación. Según la resolución 631 de 2015 el valor de %O/W debe ser inferior a 15 mg/L e inicialmente se encontraba 6.6 mg/L lo cual indica que no tenía un porcentaje tan alto de grasas y aceites, sin embargo, se esperaba obtener una reducción significativa después del tratamiento y no fue así, lo cual puede significar que en términos de grasas los floculantes no están aportando la reducción esperada.

Adicionalmente, se pudo observar en la *Tabla 8* el valor de %O/W del agua de producción a condiciones de inyección llegaba a valores bastante bajos (2.1 mg/L) resultado al que no se llegó con el tratamiento que se hizo en el laboratorio. Esta variación tan alta puede deberse principalmente a la magnitud de los equipos que se utilizan en campo para realizar este proceso final de remoción de las grasas y aceites presentes, además, a nivel de laboratorio se puede tener variabilidad al momento de introducir la curva de calibración para la medición de este parámetro en el espectrofotómetro ya que de las muestras de crudo utilizadas para la creación de la misma depende la precisión de la calibración del equipo. A pesar de que el floculante O tuvo cierto porcentaje de remoción no fue muy significativo para poder aportar al tratamiento de aguas de manera efectiva. A nivel operativo no habrían mayor afectación con el hecho de no haber llegado a los valores de referencia de campo, sin embargo, debido a que este proyecto se centra en el beneficio ambiental que aportaría la implementación de un floculante orgánico, lo ideal sería obtener valores casi nulos en cuanto a grasas debido a que al final de todo el proceso esta agua resultará siendo inyectada en el subsuelo y no se desea realizar mayores daños en el mismo.

3.4.4. *Resultados de Color para el agua de producción*

A continuación, se presentarán los resultados obtenidos en cuanto a Color en el tratamiento con ambos floculantes para su posterior análisis.

Tabla 22.

Valores de Color (PtCo) a la concentración óptima de floculante X.

Concentración	Color (PtCo)			
	Replica 1	Replica 2	Replica 3	Promedio
37.5	182.00	182.00	177.00	180.33

Nota. En la tabla se observan los valores obtenidos de Color (PtCo) en las tres réplicas y el valor promedio con floculante X a la concentración óptima.

Tabla 23.

Valores de Color (PtCo) a la concentración óptima de floculante O.

Concentración	Color (PtCo)			
	Replica 1	Replica 2	Replica 3	Promedio
30	156.00	256.00	153.00	188.33

Nota. En la tabla se observan los valores obtenidos de Color (PtCo) en las tres réplicas y el valor promedio con floculante O a la concentración óptima.

En la *Tabla 22* y *Tabla 23* se observan los valores obtenidos en cuanto a Color para el floculante X y para el floculante O, respectivamente. Como se puede evidenciar para este primero se tuvo un valor promedio de 180.33 PtCo y el segundo tuvo un resultado de 188.33 Pt Co. Si se observa el manual de parámetros de monitoreo de aguas potables [25] este indica que el valor para aguas potables no debe ser superior a 15 Pt Co, sin embargo, en este caso al tratarse de un agua residual producto de procesos de explotación de hidrocarburos no se requiere un valor determinado para el agua puesto que directamente en la resolución 631 de 2015 solo pide reportar este valor, como se observó en la *Tabla 13*, no se indica un máximo permisible. Teniendo en cuenta lo anterior se puede inferir que este no es valor que tenga mayor afectación en el proceso de reinyección del agua para su disposición. Sin embargo, si se compara con los valores iniciales del agua, se puede observar que el floculante X obtuvo un porcentaje de remoción de este parámetro del 26.09% con respecto al valor inicial que fue de 244 Pt Co, mientras que, el floculante O obtuvo un 22.81% lo cual indica que en este parámetro el floculante X obtuvo un mejor rendimiento en la eliminación del color en el agua.

3.4.5. Resultados de Conductividad para el agua de producción

A continuación, se presentarán los resultados obtenidos en cuanto a Conductividad en el tratamiento con ambos floculantes para su posterior análisis.

Tabla 24.

Valores de Conductividad a la concentración óptima de floculante X.

Concentración	Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)			
	Replica 1	Replica 2	Replica 3	Promedio
37.5	1676.00	1674.00	1670.00	1673.33

Nota. En la tabla se observan los valores obtenidos de Conductividad en las tres réplicas y el valor promedio con floculante X a la concentración óptima.

Tabla 25.

Valores de Conductividad a la concentración óptima de floculante O.

Concentración	Conductividad ($\mu\text{S/cm}$)			
	Replica 1	Replica 2	Replica 3	Promedio
30	1683.00	1684.00	1678.00	1681.67

Nota. En la tabla se observan los valores obtenidos de Conductividad en las tres réplicas y el valor promedio con floculante O a la concentración óptima.

En la *Tabla 24* y *Tabla 25* se observan los valores obtenidos en cuanto a Conductividad para el floculante X y para el floculante O, respectivamente. Como se puede evidenciar para este primero se tuvo un valor promedio de 1673.33 $\mu\text{S/cm}$ y para el segundo un valor de 1681.67 $\mu\text{S/cm}$. Si se tiene en cuenta que el valor inicial de conductividad era de 1524 $\mu\text{S/cm}$ se puede notar que después del procedimiento aumentó este parámetro lo cual puede deberse a las características de los floculantes implementados. Se pudo evidenciar que el floculante X tuvo menor aumento de conductividad con respecto al O. Sin embargo, en este caso no tenemos porcentajes de remoción debido a que aumentó. El porcentaje de incremento para el primer floculante fue de 9.80% y para el segundo de 10.35% con respecto al valor inicial mencionado anteriormente. Este valor de conductividad no es muy alto, pues tiene características de agua pura, por ende, no representaría mayor inconveniente en la operación del campo B.

3.4.6. Resultados de pH para el agua de producción

A continuación, se presentarán los resultados obtenidos en cuanto a pH en el tratamiento con ambos floculantes para su posterior análisis.

Tabla 26.

Valor de pH a la concentración óptima de floculante X.

Concentración	pH
37.5	7.33

Nota. En la tabla se observa el valor obtenidos de pH con floculante X a la concentración óptima.

Tabla 27.

Valor de pH a la concentración óptima de floculante O.

Concentración	pH
30	7.33

Nota. En la tabla se observa el valor obtenido de pH con floculante O a la concentración óptima.

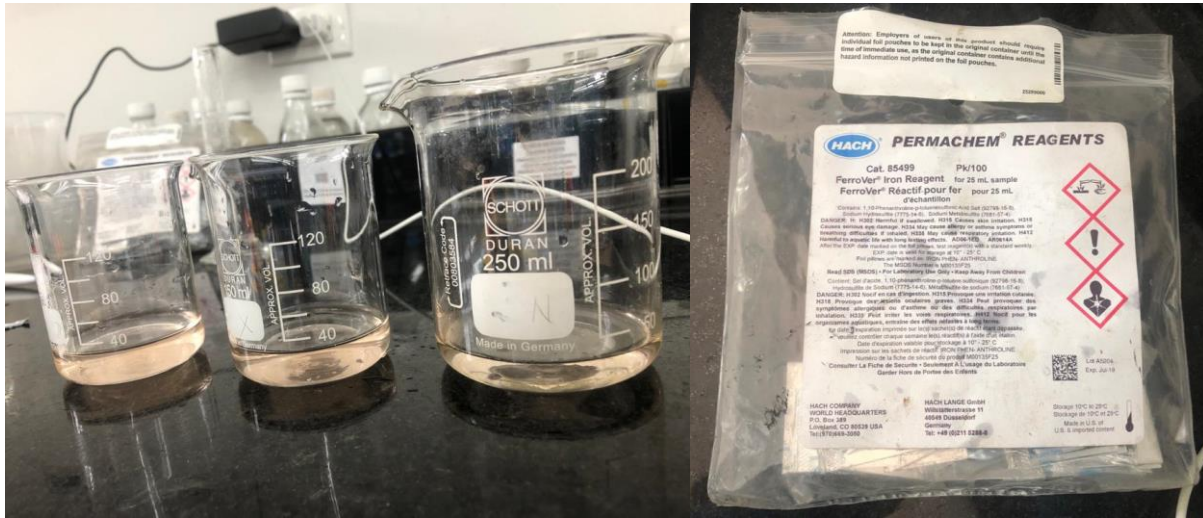
El pH en un agua es importante debido a que características ácidas en el mismo no son deseables, por lo tanto, se debe realizar un constante seguimiento al mismo. En la *Tabla 26* y *Tabla 27* se observan los valores obtenidos en cuanto a Conductividad para el floculante X y para el floculante O, respectivamente. Como se puede evidenciar para ambos se obtuvo un resultado de 7.33 lo cual indica que después de todo el tratamiento no se vio afectado este parámetro, puesto que dentro de los datos iniciales este había arrojado un valor de 7.34. Dentro del marco regulatorio se indica que este debe encontrar de 6 a 9 unidades y si observamos se encuentra dentro del rango, por ende, no tuvo una mayor afectación el mismo.

3.4.7. Resultados de Hierro para el agua de producción

Para la determinación del hierro se hizo por método FerroVer a través del espectrofotómetro en que se introdujo la papeleta en agua destilada y en una muestra de agua tratada para floculante X y O.

Figura 18.

Determinación de hierro FerroVer.



Nota. En la figura se observa cómo se realizó la determinación de hierro FerroVer, de izquierda a derecha se encuentra la muestra tratada con floculante O, floculante X y agua destilada.

Como se muestra en la *Figura 16* la determinación de hierro se realizó para el agua tratada con floculante O y floculante X para así poder determinar cómo es el comportamiento con respecto a este parámetro.

A continuación, se presentarán los resultados obtenidos en cuanto a Hierro en el tratamiento con ambos floculantes para su posterior análisis.

Tabla 28.

Valor de Hierro a la concentración óptima de floculante X.

Concentración	Hierro (mg/L)
37.5	0.39

Nota. En la tabla se observa el valor obtenidos de Hierro con floculante X a la concentración óptima.

Tabla 29.

Valor de Hierro a la concentración óptima de floculante O.

Concentración	Hierro (mg/L)
30	0.38

Nota. En la tabla se observa el valor obtenidos de Hierro con floculante X a la concentración óptima.

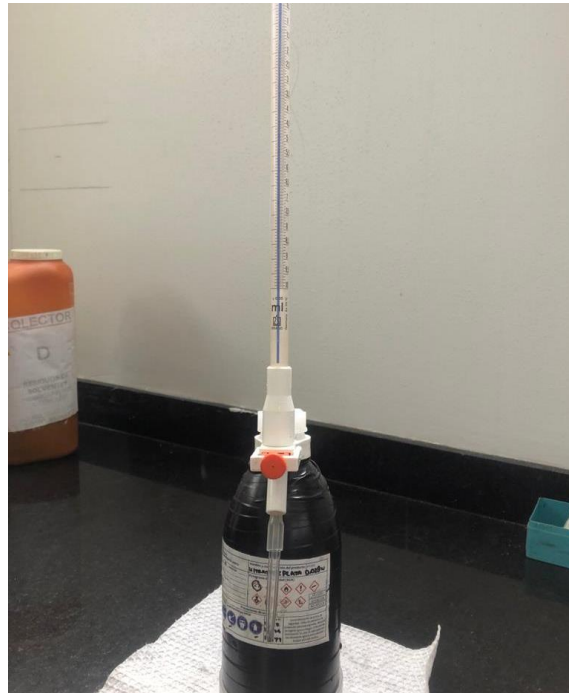
En la *Tabla 28* y *Tabla 29* se observan los valores obtenidos en cuanto al Hierro para el floculante X y para el floculante O, respectivamente. Como se puede evidenciar se obtuvo un valor de 0.39 mg/L para el primero y 0.38 mg/L para el segundo. Si se tiene en cuenta que el valor inicial para este parámetro fue de 0.41 mg/L se puede indicar que si se tuvo cierto porcentaje de remoción que fue de 7.32% y 4.88%, respectivamente. Lo cual indica que los floculante ayudan a disminuir en menor proporción este parámetro dentro del agua. Si se observa la normativa se puede ver que este valor debe encontrarse por debajo de los 3 mg/L valor que se estaba cumpliendo a cabalidad antes del tratamiento de agua, sin embargo, cabe recalcar que por parte de las características no deseadas en el agua se encuentren en los valores más bajos para así evitar posibles contaminaciones del subsuelo.

3.4.8. Resultados de Cloruros para el agua de producción

Finalmente, se realizó una medición de cloruros con el fin de determinar las características corrosivas de esta agua. Para este procedimiento que fue especificado en la sección metodológica, se utilizó nitrato de plata al 0.0280N.

Figura 19.

Solución titulante para determinación de cloruros.



Nota. En la figura se observa el Nitrato de Plata al 0.0280N.

Para saber que ya se llevó a cabo la reacción se debió titular hasta observar los virajes de color para finalmente obtener la cantidad de titulante requerido.

Figura 20.

Viraje de color en la titulación para determinación de cloruros.



Nota. En la figura se observa el cambio de color observado antes de llegar al color rojizo que indica que ya se llevó a cabo la reacción para la determinación de cloruros.

Como se observa en la *Figura 18* se debe realizar la titulación con nitrato de plata para cada muestra de agua tratada con los floculantes implementados. Las cantidades utilizadas se evidenciarán a continuación.

Tabla 30.

Cantidades de Nitrato de plata usados en la titulación para el floculante X.

Concentración	Nitrato de plata (mL)			
	Replica 1	Replica 2	Replica 3	Promedio
37.5	29.90	25.75	27.00	27.55

Nota. En la tabla se observan las cantidades de Nitrato de plata gastados en la titulación para la determinación de cloruros para el agua tratada con floculante X.

Tabla 31.

Cantidades de Nitrato de plata usados en la titulación para el floculante O.

Concentración	Nitrato de plata (mL)			
	Replica 1	Replica 2	Replica 3	Promedio
30	26.80	27.40	27.25	27.15

Nota. En la tabla se observan las cantidades de Nitrato de plata gastados en la titulación para la determinación de cloruros para el agua tratada con floculante O.

En la *Tabla 30* y *Tabla 31* se observa los mL de nitrato de plata que fueron utilizados para el viraje completo en la titulación para la determinación de la cantidad de Cloruros en el agua. Luego de obtener estos datos se procedió a realizar los cálculos en mg/L de Cl⁻ como fue especificado en la fase III de la sección metodológica, en esta sección se evidenciaba que la ecuación para realizar el respectivo cálculo es la siguiente:

$$Cl^{-}(mg/L) = \frac{A * N * 35,450 * 1000}{mL \text{ muestra}}$$

Si tenemos en cuenta que A hace referencia a los mL de disolución de nitrato de plata gastados en la titulación de la muestra y N es la normalidad del nitrato de plata, se tiene que:

$$Cl^{-}(mg/L) = \frac{26,8 * 0,0280 * 35,450 * 1000}{100 \text{ mL}}$$

$$Cl^{-} = 266,017 \text{ mg/L}$$

El cálculo presentado es de referencia a la primera titulación realizada para floculante O en las muestras de agua, sin embargo, hace parte del procedimiento que se debe seguir para llevar a cabalidad la validación de este parámetro.

A continuación, se presentarán los resultados obtenidos en cuanto a Cloruros en el tratamiento con ambos floculantes para su posterior análisis.

Tabla 32.

Cantidad de Cloruro en el agua tratada con el floculante X.

Concentración	Cloruros (mg/L)			
	Replica 1	Replica 2	Replica 3	Promedio
37.5	296.79	255.59	268.00	273.46

Nota. En la tabla se observa la cantidad de cloruro presente en cada una de las réplicas realizadas al agua tratada con el floculante X.

Tabla 33.

Cantidad de Cloruro en el agua tratada con el floculante O.

Concentración	Cloruros (mg/L)			
	Replica 1	Replica 2	Replica 3	Promedio
30	266.02	271.97	270.48	269.49

Nota. En la tabla se observa la cantidad de cloruro presente en cada una de las réplicas realizadas al agua tratada con el floculante O.

En la *Tabla 32* y *Tabla 33* se observan los valores obtenidos en cuanto a Cloruros para el floculante X y para el floculante O, respectivamente. Como se puede evidenciar se obtuvo un valor promedio para el primero de 273,46 mg/L y para el segundo de 269,49 mg/L. Este resultado indica que al realizar el tratamiento con el floculante X se tiene un valor final de Cloruros más alta con respecto al floculante O. Además, se puede inducir que es un valor bajo y no representaría mayor problema en la operación normal del campo B. Si se observa la resolución 631 de 2015 esta indica que este valor debe ser inferior a 1200 mg/L, por ende, se estaría cumpliendo a cabalidad la normativa por medio de la cual se rige el Campo para la reinyección de esta agua de producción. Sin embargo, este es un valor que debe tener especial control debido a que altos valores del mismo podrían generar afectaciones operativas en las tuberías puesto que es un componente del agua altamente corrosivo.

3.4.9. Resultados globales para los floculantes implementados

A continuación, se presentaran los resultados consolidados obtenidos para los distintos parámetros evaluados después de la utilización de los floculante que se desean estudiar.

Tabla 34.

Consolidado parámetros evaluados en el tratamiento de agua de producción.

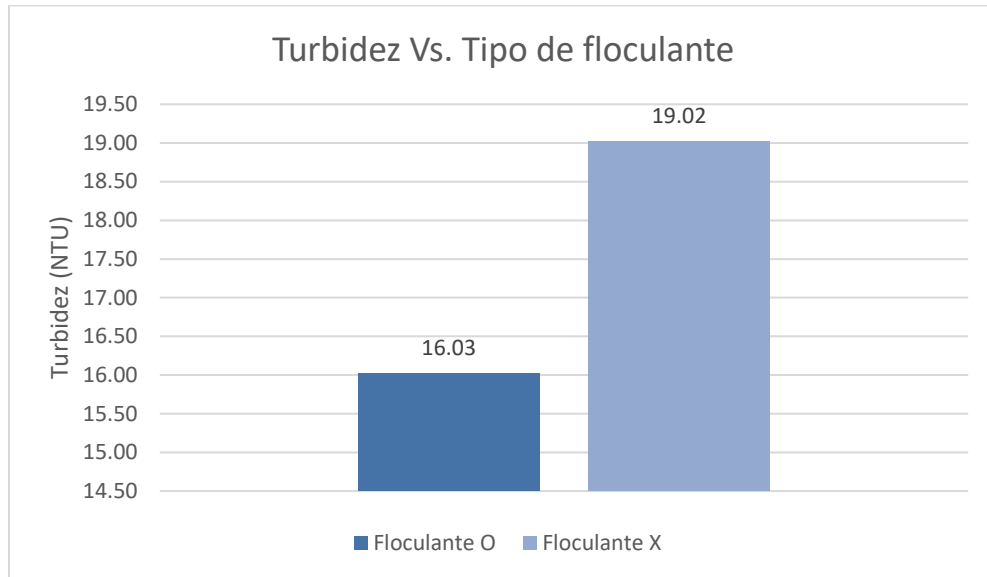
Parámetro	Valor laboratorio		Valor resolución 631 de 2015	Unidades
	Floculante O	Floculante X		
Turbidez	16.03	19.02	ND	NTU
SST	36.00	43.00	50	mg/L
% O/W	6.40	6.60	15	mg/L
Color	188.33	180.33	ND	PtCo
Conductividad	1681.67	1673.33	ND	μS/cm
pH	7.33	7.33	6,00 a 9,00	AD
Hierro	0.38	0.39	3	mg/L
Cloruros	269.49	273.46	1200	mg/L

Nota. En la tabla se observan los resultados globales obtenidos para los diferentes parámetros evaluados en el tratamiento de aguas de producción.

Para complementar el análisis realizado a cada parámetro anteriormente, se realizaron una serie de gráficas por medio de las cuales visualmente se podrá comparar los resultados obtenidos para cada floculante y la analogía con el valor máximo permitido según la resolución 631 de 2015. Cabe recalcar que las gráficas que no presentan datos de la resolución son debido a que no se indica un valor específico para ese parámetro.

Figura 21.

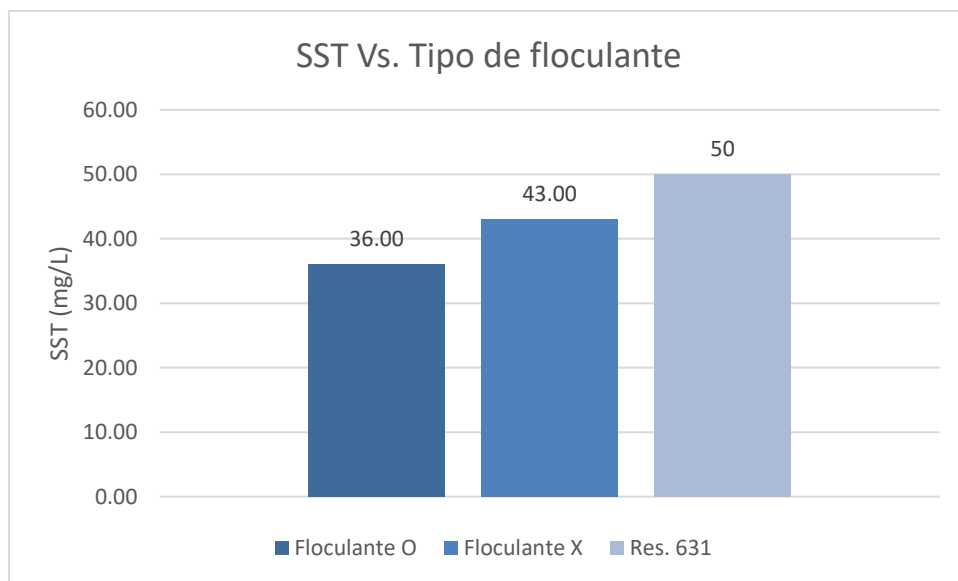
Grafica turbidez Vs. Tipo de floculante



Nota. En la gráfica se observa la comparación en términos de turbidez de los floculantes implementados.

Figura 22.

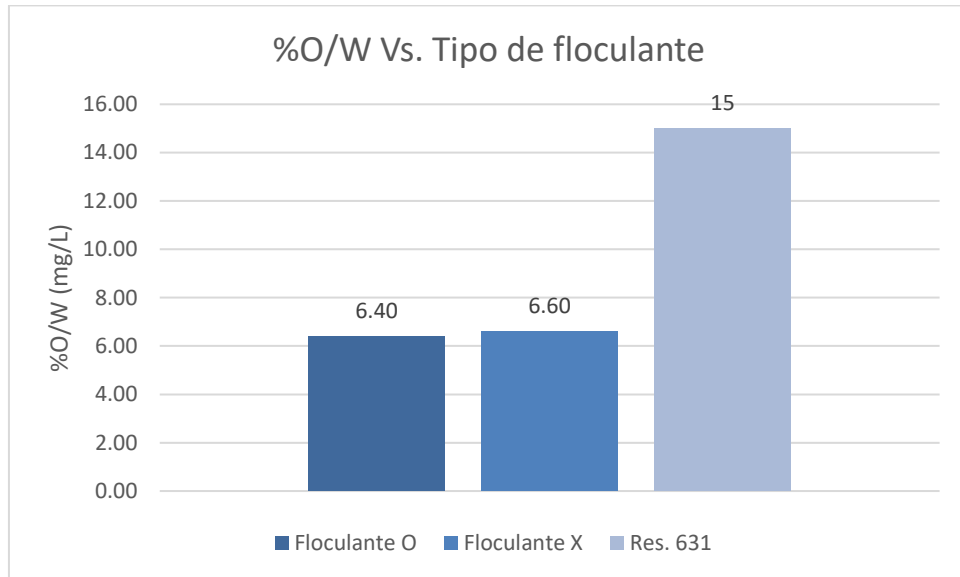
Grafica SST Vs. Tipo de floculante



Nota. En la gráfica se observa la comparación en términos de SST de los floculantes implementados.

Figura 23.

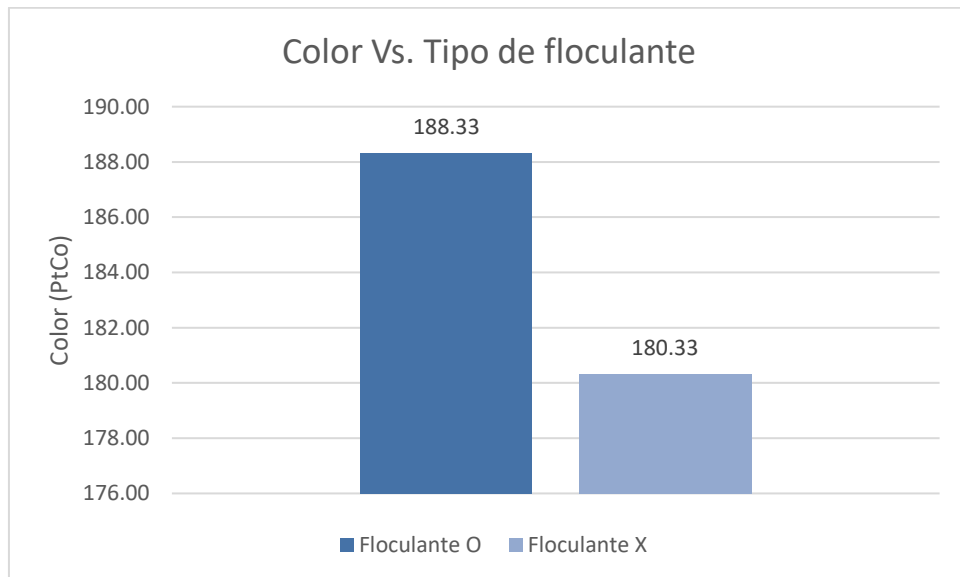
Grafica %O/W Vs. Tipo de floculante



Nota. En la gráfica se observa la comparación en términos de %O/W de los floculantes implementados.

Figura 24.

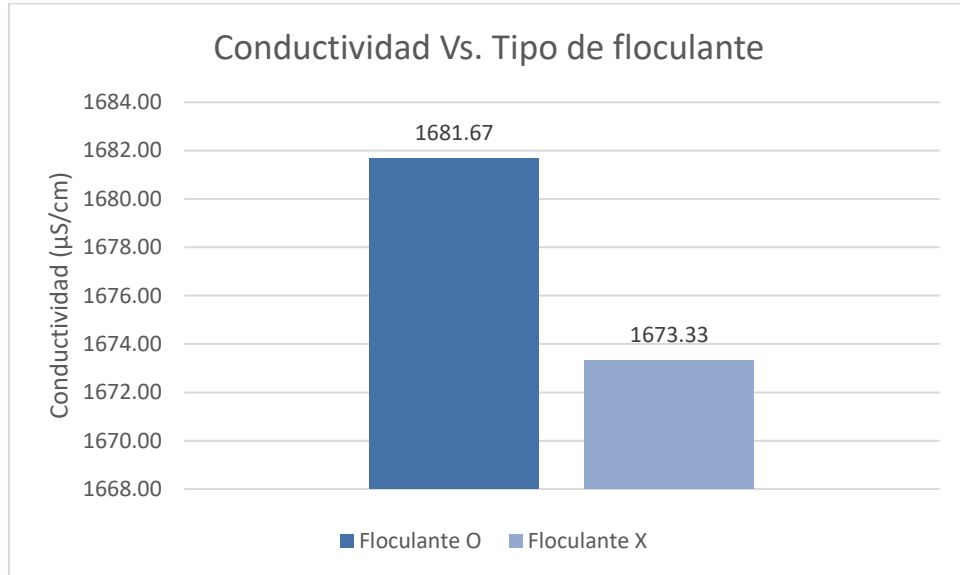
Grafica Color Vs. Tipo de floculante



Nota. En la gráfica se observa la comparación en términos de Color de los floculantes implementados.

Figura 25.

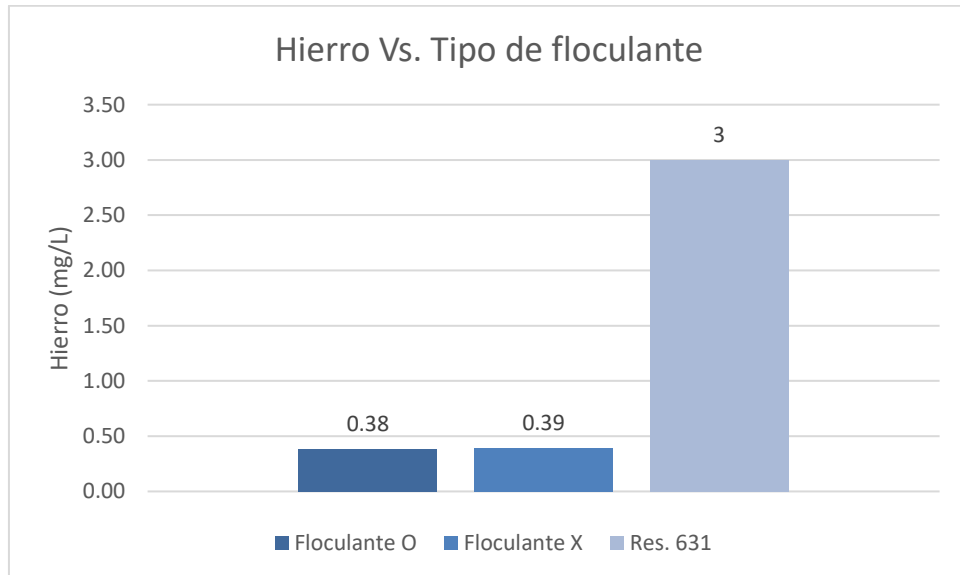
Grafica conductividad Vs. Tipo de floculante



Nota. En la gráfica se observa la comparación en términos de Conductividad de los floculantes implementados.

Figura 26.

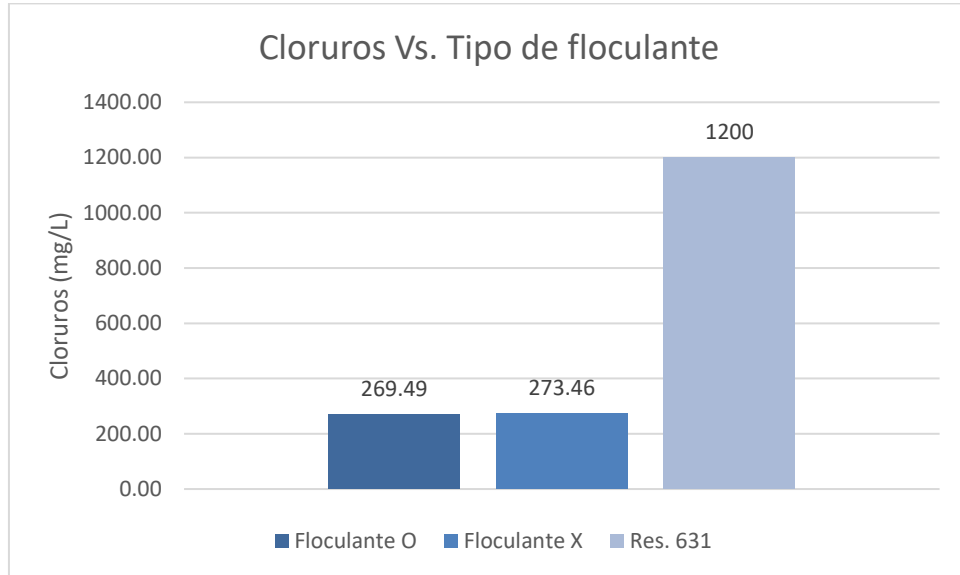
Grafica hierro Vs. Tipo de floculante



Nota. En la gráfica se observa la comparación en términos de Hierro de los floculantes implementados.

Figura 27.

Gráfica cloruros Vs. Tipo de floculante



Nota. En la gráfica se observa la comparación en términos de Cloruros de los floculantes implementados.

Como podemos observar el floculante orgánico tuvo un mejor rendimiento frente al floculante convencional en la eliminación de SST y %O/W pues en este primero tuvo un porcentaje de remoción 14,00% mejor que el otro producto químico en este parámetro lo cual es muy importante en términos técnicos teniendo en cuenta que el propósito de esta investigación era analizar si la implementación de este floculante orgánico ayudaría a la eliminación de este parámetro de manera efectiva para posteriormente permitir a la compañía aportar a la responsabilidad ambiental que se desea que sea cada vez mayor, cabe recalcar que para las autoridades ambientales, por medio de la resolución 631 de 2015, permiten un máximo en cuanto a este parámetro de 50 mg/L, sin embargo, se desea que este valor se acerque cada vez más a su eliminación total puesto que de esta manera se evitaría que el subsuelo tenga cambios debido a las características no deseadas de este fluido inyectado. En términos operacionales una mayor remoción de sólidos permitirá menor necesidad de mantenimiento a las bombas que realizan la inyección de esta agua puesto que se requeriría un menor esfuerzo para movilizar el agua, así disminuiría el costo de la operación a largo plazo.

En cuanto a la cantidad de grasas y aceites el floculante O fue un 3,03% mejor que el floculante X, lo cual ratifica su buen rendimiento en los parámetros de interés que se evaluaron en este proyecto. El bajo contenido de grasas trae consigo un gran beneficio ambiental debido a que un alto porcentaje del mismo en el agua podría generar serios problemas en el subsuelo puesto que el agua no es inyectada en una zona que tenga aceites o grasas naturalmente, por lo tanto, se estaría alterando significativamente las características de este. Si se observa la resolución 631, marco regulatorio mediante el cual nos regimos en esta investigación, para este parámetro se tiene un máximo permisible de 15 mg/L. A pesar de que el resultado obtenido en este proyecto fue inferior al resultado obtenido en esta investigación la remoción de esta característica del agua que no es deseada podría ser mucho mejor teniendo en cuenta que en los datos de referencia en el campo B se llegan a valores bastante inferiores (2,1 mg/L) a los reflejados en el laboratorio (6,4 mg/L) esta variación puede deberse a la magnitud de los equipos que usan en campo, además, el tiempo de residencia es mucho mayor lo cual favorece a la separación de fases que se presenta en la separación de grasas en el agua. Sin embargo, se tuvo un reducción con el floculante O, mientras que con el floculante X este valor se mantuvo igual al valor tomado en los datos antes del tratamiento en la práctica de laboratorio.

En cuanto a los otros parámetros tomados como referencia para observar el comportamiento de los químicos implementados en las diferentes características de interés dentro de la resolución 631 se puede observar que el floculante X tuvo un mejor rendimiento en el color y en la conductividad, sin embargo, estos parámetros dentro del agua que la resolución pide notificar pero no establece valores máximos permisibles, por lo tanto, no implican que el floculante O no haya tenido un mejor rendimiento en los aspectos importantes dentro del marco regulatorio.

Un aspecto importante que se evaluó fue la cantidad de cloruros presenten al final del tratamiento puesto que se esto depende la capacidad corrosivo o incrustante dentro de la tubería del agua y se obtuvieron valores bajos con respecto a la resolución que tiene un valor máximo permisible de 1200 mg/L. Esta comparación con los valores obtenidos para cada floculante pudo observarse en la *Gráfica 9* por medio de la cual se logró observar como la cantidad de cloruros se encuentra en valores bajos con respecto a lo delimitado por el ente regulador.

3.4.10. Análisis financiero para la implementación del floculante

En esta sección se va a realizar el análisis financiero que permitirá determinar si la implementación del floculante orgánico es viable económicamente. A continuación, se realizará el cálculo efectuado para poder determinar la dosificación utilizada en Kg/bbl.

Si se tiene en cuenta que se adicionó 1 gramo de floculante en 200 ml de agua, eso quiere decir que se utilizó 0,005 kilogramos por cada litro de dilución, como se representa a continuación:

$$\frac{1 \text{ gr floc.}}{200 \text{ mL H}_2\text{O}} = \frac{5 \text{ gr floc.}}{\text{L dilución}} = \frac{0,005 \text{ Kg floc.}}{\text{L dilución}}$$

Teniendo en cuenta lo anterior, se procedió a hacer los cálculos con base a las 30 ppm adicionadas en la jarra que fue representada por 3 mL de dilución en los 500 mL de agua. Si se hace la analogía esto significa que se utilizaron 6 mL de dilución por cada litro de agua, como se representa a continuación:

$$\frac{3 \text{ mL dilución}}{500 \text{ mL H}_2\text{O prod.}} = \frac{6 \text{ mL dilución}}{\text{L H}_2\text{O prod.}} = \frac{0,006 \text{ L dilución}}{\text{L H}_2\text{O prod.}}$$

Tomando como referencia la cantidad de floculante usado en la dilución y el volumen usado para el tratamiento del agua, se obtiene que:

$$\frac{0,005 \text{ Kg floc.}}{\text{L dilución}} * \frac{0,006 \text{ L dilución}}{\text{L H}_2\text{O prod.}} = 0,00003 \text{ Kg floc./L H}_2\text{O prod.}$$

Por lo tanto,

$$0,00003 \text{ Kg floc./L H}_2\text{O prod.} = 0,0047697 \text{ Kg floc./bbl H}_2\text{O prod.}$$

En procedimiento evidenciado fue realizado igualmente para las 37,5 ppm utilizadas en el tratamiento con el floculante X y se logró determinar la respectiva dosificación.

Con base a los resultados obtenidos, se procede a realizar los cálculos por medio de los cuales se permitirá determinar la viabilidad de la implementación del floculante orgánico a nivel financiero, para ello se consignaron los datos en la *Tabla 35*.

Tabla 35.

Análisis financiero floculante X y floculante O.

	Floculante X	Floculante O
Dosificación (Kg/bbl)	0.00596	0.00477
Costo de producto por Kg (\$/Kg)	22125	24300
Costo por bbl de agua tratada (\$/bbl)	131.91	115.90
Costo total diario (\$)	\$ 6,379,529	\$ 5,605,335
Costo total mensual (\$)	\$ 191,385,867	\$ 168,160,057
Costo total anual (\$)	\$ 2,296,630,404	\$ 2,017,920,680

Nota. En la tabla se observa el análisis financiero realizado para el floculante X y floculante O.

Como se puede evidenciar en la *Tabla 35* el floculante O a pesar de ser más costoso requiere una menor dosificación con respecto al X lo cual indica que se requeriría un menor costo por barril y la variación del costo total de manera anual de uno con respecto al otro sería de \$278'709.724 lo cual implicaría una reducción de presupuesto CAPEX para la compañía generando un beneficio a nivel financiero bastante significativo.

Si comparamos los resultados obtenidos a nivel técnico y a nivel financiero es notable que el floculante O es una buena opción alternativa al químico que se utiliza actualmente en campo, puesto que este obtuvo un mejor rendimiento puesto que para los SST se obtuvo un porcentaje de remoción de 28% frente al 14% que obtuvo el floculante X. Para el %O/W se obtuvo una remoción de 3,03%, por lo tanto, el floculante O presentó mejores resultados en cuanto a los parámetros que se desea eliminar de un agua de producción, esto indica que con la implementación del mismo se podría obtener un beneficio ambiental y también representa una mejora a nivel financiero debido a que representaría un ahorro de \$278'709.724 lo cual indica un porcentaje de 12% de disminución frente a la utilización del floculante X como producto químico para el tratamiento de aguas lo cual

podría ser de gran ayuda para la compañía en términos de posible disminución de presupuestos debido a la reducción de costos destinados para este fin.

4. CONCLUSIONES

Dentro del establecimiento de las variables técnicas se determinó que las de mayor relevancia son el pH y el intercambio iónico del agua debido a que esto permitirá la correcta compatibilidad del floculante con el agua que se desee tratar. En cuanto al agua se determinó que esta era aniónica y se encontraba en un pH de 7,34. Si se tiene en cuenta que para el floculante O el pH debía estar entre 5-9 mientras que para el floculante X era de 6-9 lo cual permitió que se pudiera realizar el tratamiento.

Se estableció que para la concentración de floculante a adicionar en el tratamiento de aguas oscila entre las 10 y 60 ppm puesto que este rango operativo permitió encontrar la concentración óptima de adición de floculante.

La resolución 631 de 2015 indica que el valor máximo permitido para las aguas de producción destinadas a reinyección en cuanto a sólidos suspendidos totales es de 50 mg/L. Al realizar la medición del laboratorio, se determinó que previo al tratamiento el agua tenía un valor para este parámetro de 50 mg/L, por lo tanto, se concluye que es requerido el procedimiento teniendo en cuenta que se encuentra sobre el límite y cualquier falla operativa podría aumentar el valor del mismo lo cual haría que se encuentre por fuera del marco regulatorio.

Dentro de la resolución 631 de 2015 indica que el valor máximo permitido para las aguas de producción para reinyección en cuanto a contenido de grasas y aceites es de 15 mg/L. Al realizar la medición del laboratorio se determinó que previo al tratamiento el agua se encontraba en 6,6 mg/L, teniendo en cuenta que ya se encontraba cumpliendo la normativa se desea reducir este valor para evitar mayores contaminaciones y disminuyendo el riesgo de salirse del marco regulatorio debido a fallas operativas dentro del tratamiento, al final del tratamiento se logró disminuir a un valor de 6,4 mg/L cumpliendo de manera efectiva la implementación del floculante.

Se obtuvo que la mejor concentración para el floculante O fue de 30 ppm y para el floculante X de 37,5 ppm debido a que a esta presentó un mejor rendimiento. En cuanto a TSS el floculante O obtuvo un resultado de 36 mg/L, lo cual representa un porcentaje de remoción de 28%, mientras

que el floculante X tuvo un resultado de 43 mg/L para un porcentaje de remoción de 14%. Por medio de lo anterior se concluye que el floculante O tuvo un mejor rendimiento en la eliminación de TSS en el agua de producción tratada.

Teniendo en cuenta las concentraciones óptimas encontradas, para el %O/W el floculante O obtuvo un valor de 6,4 mg/L con un porcentaje de remoción de 3,03%, mientras que el floculante X tuvo un resultado de 6,6 mg/L, no tuvo ninguna reducción frente a los datos obtenidos inicialmente. Por lo anterior, se puede concluir que el floculante O tuvo un mejor rendimiento en la reducción de este parámetro no deseado dentro del agua de producción.

En términos financieros, al analizar el costo que representaría para la compañía la implementación del floculante O en sus operaciones, se determinó que anualmente se tendría un ahorro de \$278'709.724 lo cual sería bueno permitiendo reducir presupuestos destinados para este fin.

BIBLIOGRAFIA

- [1] H. A. Restrepo Osorno, "Evaluación del proceso de coagulación - floculación de una planta de tratamiento de agua potable," 2009. [En línea]. Disponible en: https://explore.openaire.eu/search/other?orpId=od_____1326::f06a77b2bf9a58a3b547d52a9250ac66
- [2] Y. Cárdenas, "Tratamiento de agua, coagulación y floculación". SEDAPAL, Lima, 2000. [En línea]. Disponible en: <http://www1.frm.utn.edu.ar/archivos/civil/Sanitaria/Coagulaci%C3%B3n%20y%20Floculaci%C3%B3n%20del%20Agua%20Potable.pdf>
- [3] J. N. Díaz Claros. Tesis de maestría, "Coagulantes-floculantes orgánicos e inorgánicos elaborados de plantas y del reciclaje de chatarra para el tratamiento de aguas contaminadas", San Pedro Sula Cortés, 2014. [En línea]. Disponible en: <http://www.cervantesvirtual.com/obra/coagulantes-floculantes-organicos-einorganicos-elaborados-de-plantas-y-del-reciclaje-de-la-chatarra-para-eltratamiento-de-aguas-contaminadas/>
- [4] Tecnología, C. and floculantes, C., 2021. Coagulantes y floculantes - Acqua Tecnología. [En línea]. Disponible en: <http://acquatecnologiaperu.com/producto/coagulantes-y-floculantes> [Fecha de acceso 12 de Febrero 2021].
- [5] T, Okunda. A, Baes. W, Nishijima. M, Okanda. "Isolation and Characterization of Coagulant Extracted from Moringa Oleifera Seed by Salt Solution." Wat. 2001. Res. Vol. 35, N.o 2, pp. 405-410.
- [6] Degremont-Manual de tratamiento de agua, 6ta edición, Lenntech, distributieweg, Países Bajos, 1991, ISBN: 2950398413, Volumen 1. [En línea]. Disponible en: <https://www.lenntech.com/scientific-books/water-treatment/degremont-water-treatment-handbook.htm>
- [7] Hasbleidy, Y. and M. Medina, .2018. "Evaluación Técnico-Financiera De Facilidades De Producción Tipo Con Tecnología Victaulic Mediante Simulación." Universidad de América. [En línea]. Disponible en: <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/7199/3/5122524-2018-II-IP.pdf>

- [8] C. G. Toro, "2. La turbidez 2. La turbidez Monitoreo de la calidad del agua," 2011. [En línea]. Disponible en: <https://academic.uprm.edu/gonzalezc/HTMLObj-859/maguaturbidez.pdf>
- [9] Oilfield Glossary, "Gravedad específica", Schlumberger Limited, 2021. [En línea]. Disponible en: https://www.glossary.oilfield.slb.com/es/terms/s/specific_gravity
- [10] Manual técnicas analíticas, Invemar, definiciones técnicas. [En línea]. Disponible en: <http://www.invemar.org.co/redcostera1/invemar/docs/7010manualTecnicasanaliticas.pdf>
- [11] DANE "FICHA TECNICA Sistema de Información del Medio Ambiente Identificación de la Variable," 2007. [En línea]. Disponible en: https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/pib/ambientales/Sima/solidos_suspension.pdf
- [12] Montes,C., J. A. Amat and L. Ramírez Díaz, (1982). "Distribución temporal de las características Fisico-Químicas y Biológicas de las aguas de algunos ecosistemas acuáticos del Bajo Guadalquivir (SW. España) a lo largo de un ciclo anual." [En línea]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10201/5344>.
- [13] Universitas Americarum, "REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA III. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA 3.1 DUREZA DEL AGUA 3.1.1 DEFINICIÓN DE DUREZA," [En línea]. Disponible en: http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/leip/valenzuela_m_td/capitulo3.pdf
- [14] L. A. Fernández. A. Acevedo. (2013, Octubre 1.) "Manual de laboratorio de la asignatura Tecnología Ambiental". [En línea]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10498/20943>.
- [15] Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, "Resolución 631 de 2015". Diario Oficial No. 49.486 de 18 de abril de 2015. [En línea]. Disponible en: https://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/d1-res_631_marz_2015.pdf
- [16] D. M. Fúquene and A. V. Yate, "Ensayo de jarras para el control del proceso de coagulación en el tratamiento de aguas residuales industriales," 2018. . DOI: 10.22490/ecapma.2771. [En línea]. Disponible en: <https://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/workpaper/article/download/2771/2857/>

- [17] Ovalle, R. and C. Moreno. "Cartilla Guía Para La Ejecución De Prácticas De Laboratorio En Saneamiento De Agua Potable." Universidad Católica de Colombia, 2014. [En línea]. Disponible en: <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/1797/1/Proyecto.pdf>
- [18] Numael Guerrero. (10 de diciembre de 2016). Equipo test de jarras [Archivo de video]. Youtube, <https://www.youtube.com/watch?v=qoFuSMYJ9qo>
- [19] M. Ospina, .2008."Montaje De Curvas De Calibración Para Análisis De Gomas, Fosfatos, Sílice, Azúcar Y Sulfitos Por Espectrofotometría Uv -Visible En El Laboratorio De Aseguramiento De Calidad Del Ingenio Pichichi s.a." Universidad Tecnológica de Pereira. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/handle/11059/1106/6641227O83.pdf?sequence=1>
- [20] A. María and M. Dosal, "INTRODUCCIÓN A LA METROLOGÍA QUÍMICA CURVAS DE CALIBRACIÓN EN LOS MÉTODOS ANALÍTICOS," 2008. [En línea]. Disponible en: http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/CURVASDECALIBRACION_23498.pdf
- [21] R. Chang y K. A. Goldsby, Química, Mexico D.F: McGRAW-HILL, 2017. [En línea]. Disponible en: https://www.academia.edu/40503509/Qu%C3%ADmica_Raymond_Chang_12va_Edici%C3%B3n
- [22] Bravo,M., .2017."Coagulantes Y Floculantes Naturales Usados En La Reducción De Turbidez, Sólidos Suspendidos, Colorantes Y Metales Pesados En Aguas Residuales." Universidad distrital francisco José de Caldas. [En línea]. Disponible en: <https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/5609/BravoGallardoMonicaAlejandra2017.pdf?sequence=1>
- [23] M, Aguilar. "Análisis de agua - determinación de cloruros totales en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba." 2001. Secretaría de Economía, Estados Unidos Mexicanos. [En línea]. Disponible en: <https://aniq.org.mx/pqta/pdf/NMX-AA-quimicosgpo2.pdf>

- [24] M. Carriquiry, M. Piaggio and G. Sena, "Guía de análisis costo-beneficio," 2019. Unidad agropecuaria de Sostenibilidad y Cambio Climático. [En línea]. Disponible en: <http://www.fao.org/3/ca2795es/ca2795es.pdf>
- [25] Servicios Geográficos y Medio Ambiente S.A.C. (GEMA) "Parámetros de monitoreo de agua". Petrominerales. [En línea]. Disponible en: <http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/DGGAE/ARCHIVOS/estudios/EIAS%20-%20hidrocarburos/EIA/EIA-%20PETROMINERALES%20EXPLORACION%20SISMICA%20D%20Y%20D%20LOTE%20126/Par%C3%A1metros%20de%20monitoreo.pdf>

ANEXOS

ANEXO I.
TABLA PARAMETROS PERMISIBLES

Tabla 35.

Parámetros fisicoquímicos y valores máximos permitidos por la resolución 631 de 2015.

PARÁMETRO	UNIDADES	EXPLORACIÓN (UPSTREAM)	PRODUCCIÓN (UPSTREAM)	REFINO	VENTA Y DISTRIBUCIÓN (DOWNSTREAM)	TRANSPORTE Y ALMACENAMIENTO (MIDSTREAM)
Sustancias Activas al Azul de Metileno (SAAM)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Hidrocarburos						
Hidrocarburos Totales (HTP)	mg/L	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	
BTEX (Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xileno)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	
Compuestos Orgánicos Halogenados Adsorbibles (AOX)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte		
Compuestos de fósforo						
Fósforo total (P)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Ortofosfatos (P- PO43-)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte		
Compuestos de Nitrógeno						
Nitratos (N-NO3-)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte		
Nitrógeno Amoniacal (N- NH3)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte		
Nitrógeno Total (N)	mg/L	10.00	10.00	10.00 o 40.00 si en el proceso de refino se incluyen actividades de hidrogenación	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Iones						
Cianuro Total (CN-)	mg/L	1.00	1.00	1.00		
Cloruros (Cl-)	mg/L	1.200,00	1.200,00	500,00	250,00	250,00
Fluoruros (F-)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte		
Sulfatos (SO42-)	mg/L	300,00	300,00	500,00	250,00	250,00
Sulfuros (s2-)	mg/L	1,00	1,00	1,00		

Metales y Metaloides						
Arsénico (As)	mg/L	0,10	0,10	0,10		
Bario (Ba)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte		
Cadmio (Cd)	mg/L	0,10	0,10	0,10		
Cinc (Zn)	mg/L	3,00	3,00	3,00		
Cobre (Cu)	mg/L	1,00	1,00	1,00		
Cromo (Cr)	mg/L	0,50	0,50	0,50		
Hierro (Fe)	mg/L	3,00	3,00	3,00		
Mercurio (Hg)	mg/L	0,01	0,01	0,01		
Níquel (Ni)	mg/L	0,50	0,50	0,50		
Plata (Ag)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte		
Plomo (Pb)	mg/L	0,20	0,20	0,20		
Selenio (Se)	mg/L	0,20	0,20	0,20		
Vanadio (V)	mg/L	1,00	1,00	1,00		
Otro parámetros para Análisis y Reporte						
Acidez Total	mg/L CaCO ₃	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Alcalinidad Total	mg/L CaCO ₃	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Dureza Cálcica	mg/L CaCO ₃	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Dureza Total	mg/L CaCO ₃	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Colore Real (Medidas de absorbancia a las siguientes longitudes de onda: 436 nm, 525 nm, y 620 nm)	m-1	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte

Nota. La tabla evidencia los valores máximos permitidos para los principales parámetros fisicoquímicos del agua. Tomado de: Resolución 631 de 2015 del ministerio de ambiente y desarrollo sostenible [15].

ANEXO II.

RECOMENDACIONES

Se recomienda plantear otros parámetros operativos para el test de jarras variando el tiempo de retención y la agitación que permitan acercarse a los datos obtenidos en campo para el tratamiento de aguas.

Se recomienda validar calibración de las curvas para la medición de TSS y %O/W en el espectrofotómetro según tipo de agua y aceite del campo que se desee estudiar para obtener una mejor exactitud en la medición de los parámetros.

Evaluar este tipo de floculante para el control de otras propiedades fisicoquímicas que la normativa hace énfasis con el fin de evaluar el rendimiento en las mismas para ratificar que el floculante O presente resultados positivos de manera transversal a todas las variables requeridas.

Evaluar el desempeño del floculante O a nivel de campo para determinar el funcionamiento del mismo a nivel operativo real que permita evidenciar las variaciones que se tiene sobre el rendimiento del mismo frente al análisis realizado a nivel de laboratorio.

Realizar un diseño de experimentos que permita determinar la concentración exacta de floculante a adicionar con el fin de generar un ahorro más significativo para la compañía debido a la posible disminución de concentración a implementar.

Desarrollar un análisis financiero utilizando indicadores económicos que permitan evidenciar frente a la compañía el ahorro que representaría la implementación de este tipo de alternativas amigables con el ambiente en términos económicos.