

EVALUACIÓN TÉCNICO-FINANCIERA DE DIFERENTES ALTERNATIVAS PARA  
EL TRATAMIENTO Y DISPOSICIÓN DE AGUAS Y RESIDUOS PRODUCIDOS  
DURANTE LA PERFORACIÓN EN LOS CAMPOS DE EQUIÓN EN  
PIEDEMONTE.

JULIETTE GAVIRIA NAVARRO  
KATHERINE MARQUEZ CASTAÑEDA

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS  
PROGRAMA INGENIERÍA DE PETRÓLEOS  
BOGOTÁ. D.C.  
2018

EVALUACIÓN TÉCNICO-FINANCIERA DE DIFERENTES ALTERNATIVAS PARA  
EL TRATAMIENTO Y DISPOSICIÓN DE AGUAS Y RESIDUOS PRODUCIDOS  
DURANTE LA PERFORACIÓN EN LOS CAMPOS DE EQUIÓN EN  
PIEDEMONTE.

JULIETTE GAVIRIA NAVARRO  
KATHERINE MARQUEZ CASTAÑEDA

Proyecto integral para optar al título de  
INGENIERO DE PETRÓLEOS

Director  
Jairo Enrique Peñuela Ramírez  
Ingeniero de Petróleos

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS  
PROGRAMA INGENIERÍA DE PETRÓLEOS  
BOGOTÁ. D.C.  
2018

## NOTA DE ACEPTACIÓN

---

---

---

---

---

---

---

Ing. Jorge Andrés Tovar Moreno

---

Ing. Adriana Ruiz León

---

Ing. Claudia Angélica Rubio Arvilla

Bogotá D.C., 09 de agosto del 2018.

## DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro:

**Dr. JAIME POSADA DÍAZ.**

Vice rector de Desarrollo y Recursos Humanos:

**Dr. LUIS JAIME POSADA GARCÍA-PEÑA.**

Vice rectora Académica y de Posgrados:

**Dra. ANA JOSEFA HERRERA VARGAS.**

Decano Facultad de Ingenierías:

**Dr. JULIO CÉSAR FUENTES ARISMENDI.**

Director Programa Ingeniería de Petróleos:

**Dr. JOSE HUMBERTO CANTILLO SILVA.**

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

## DEDICATORIAS

Han sido cinco años desde que decidí estudiar ingeniería de petróleos, donde he adquirido diversos conocimientos no sólo en el ámbito profesional, sino también en lo personal. Por eso, en primer lugar, le doy gracias a Dios por haberme dado la oportunidad de estudiar y por darme la fortaleza para culminar otra meta en mi vida.

A mis padres, Lucrecia y Ricardo, que siempre me han brindado su apoyo, amor y cariño, les agradezco por enseñarme todos los valores que me han hecho la persona que soy hoy en día y espero ser un reflejo de sus enseñanzas.

A mi hermano David, porque a través de sus bromas y consejos me han dado ánimo para seguir adelante, enfrentando mis miedos y vivir los momentos felices.

A Jonathan, por ser una persona que ha influenciado en mi vida. Al estar a su lado, he aprendido que los problemas son una oportunidad para superarse a uno mismo y que la mejor forma de afrontarlos es con la ayuda de alguien.

A mis familiares, por estar presentes en mi vida y darme el apoyo en los momentos que más los he necesitado, en el especial a mi tía Nubia que está en el cielo por haber sido mi segunda madre y mi gran consejera.

A mi compañera Katherine, por la paciencia, comprensión y esfuerzo que nos impulsó a llevar a finalidad este proyecto. Espero que nos encontremos de nuevo en el futuro

*Juliette Gaviría Navarro*

En primer lugar, quiero agradecer a Dios por llenarme de fuerzas cada día, por permitirme culminar esta etapa de mi vida y por proveer que todas las cosas se dieran a mi favor. También por mi familia, puesto que fue la mejor que me pudo haber brindado.

Por tanto, quiero agradecer a mis padres Luis Fernando y Gloria Dilia, por sus esfuerzos para darme todo lo necesario y apoyarme en la decisión de salir de casa para formarme profesionalmente en la carrera que elegí. Por el amor que me dan día a día y todas sus enseñanzas y valores que inculcaron y que ahora hacen de mí una mejor persona.

A mi hermano David Fernando y su esposa, por su constante apoyo, por sus palabras de aliento, por su ejemplo de vida, y por traer una nueva razón de alegría a casa.

También, quiero dar gracias a Manuel Ortiz que me ha acompañado durante toda la carrera, por el apoyo brindado y por enseñarme a encontrarle siempre el lado bueno a las cosas. De igual manera a mis amigas que siempre estuvieron presentes, por los momentos de felicidad y demás compartidos, por sus consejos y su amistad incondicional.

A mi compañera de tesis Juliette por darme la oportunidad de desarrollar la tesis junto con ella, y porque a pesar de las dificultades y demás logramos llegar a la meta.

Finalmente quiero dar gracias a cada una de esas personas que me abrió las puertas de su casa en esta enorme ciudad y que durante el camino aportaron un granito de arena para llegar hasta aquí.

*Katherine Márquez Castañeda*

## AGRADECIMIENTOS

Los autores de este proyecto expresan sus agradecimientos a:

**Equión Energía Limited** por brindarnos la oportunidad de realizar nuestro proyecto de grado y darnos durante la realización del proyecto.

**Ing. Jairo Enrique Peñuela**, por ofrecer sus conocimientos, resolver nuestras inquietudes y dar nos un acercamiento a la industria.

**Ing. Diego Zea** por su colaboración y gestión a la hora requerir la información necesaria para la elaboración de este proyecto.

**Ing. Dayanna Duarte** por disponer del tiempo y la paciencia para guiarnos en el entendimiento del proceso de tratamiento convencional.

**Ing. Catalina Parra** por su orientación durante las pruebas de laboratorio que fueron vitales para el desarrollo del trabajo de grado.

**Ing. Leandro Uriel Gómez e Ing. Jorge Andrés Tovar** por acompañamiento y dirección en el transcurso del proyecto, además de darnos ánimos para la culminación del mismo.

**Geólogo Yimi Alejandro Parra** por su asesoría técnica en el ámbito geológico expuesto en el proyecto.

**Profesor Luis González** por su seguimiento en el desarrollo de la evaluación financiera.

A la Fundación Universidad de América y todos sus docentes por abrirnos sus puertas y suministrarnos los conocimientos para la terminación de este proyecto y nuestro desarrollo profesional.

## CONTENIDO

	pág.
RESUMEN	19
INTRODUCCIÓN	20
OBJETIVOS	21
1. GENERALIDADES DE LOS CAMPOS DE EQUIÓN EN PIEDEMONTE	22
1.1 LOCALIZACIÓN DE LOS CAMPOS PAUTO Y FLOREÑA	22
1.2 HISTORIA DE LOS CAMPOS PAUTO Y FLOREÑA	23
1.3 MARCO GEOLÓGICO	23
1.3.1 Columna Estratigráfica.	23
1.3.2 Estratigrafía.	24
1.3.3 Geología estructural.	27
1.3.4 Geología del Petróleo.	29
1.4 HISTORIA DE PRODUCCIÓN	31
2. AGUAS Y RESIDUOS OBTENIDOS DURANTE EL PROCESO DE PERFORACIÓN	32
2.1 LODOS DE PERFORACIÓN	32
2.1.1 Lodos WBM.	32
2.1.2 Lodos OBM.	34
2.2 SALMUERA.	34
2.3 SLOPS	34
2.4 FLOCS	35
2.5 PARÁMETROS MÍNIMOS REQUERIDOS PARA LA ASPERSIÓN DE AGUAS AL MEDIO AMBIENTE	36
3. TRATAMIENTOS DE AGUAS Y RESIDUOS PROCEDENTES DE LA PERFORACIÓN	40
3.1 TRATAMIENTO CONVENCIONAL	40
3.1.1 Tratamiento de aguas	40
3.1.2 Tratamiento de residuos aceitosos	43
3.2 TRATAMIENTO ALTERNATIVO DE LÁMINAS FILTRANTES	45
3.2.1 Fitorremediación	46
3.2.2 Láminas filtrantes	47
4. PRUEBAS DE LABORATORIO FISICOQUÍMICAS	50
4.1 CONDUCTIVIDAD	50
4.2 TEMPERATURA	51
4.3 CONCENTRACIÓN IÓNICA DE HIDRÓGENO (pH)	51
4.4 OXÍGENO DISUELTO	52
4.5 DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXIGENO (DBO)	55

4.6	DEMANDA QUÍMICA DE OXIGENO (DQO)	55
4.7	SOLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES	58
4.8	CONCENTRACIÓN DE GRASAS, ACEITES E TOTALES	HIDROCARBUROS 60
4.9	FENOLES	63
4.10	CLORUROS	67
4.11	SULFATOS	70
4.12	SODIO TOTAL	73
4.13	PLOMO TOTAL	75
4.14	CROMO TOTAL	78
4.15	HIERRO TOTAL	82
4.16	NÍQUEL	83
4.17	RESULTADOS DE LAS PRUEBAS FISICOQUÍMICAS	86
5.	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS PARA LA SELECCIÓN DEL MEJOR TRATAMIENTO	87
6.	EVALUACIÓN FINANCIERA	94
6.1	COSTO ANUAL UNIFORME EQUIVALENTE	94
6.2	VALOR PRESENTE	95
6.3	TASA DE INTERÉS DE OPORTUNIDAD	96
6.4	EVALUACIÓN DE COSTOS	96
6.4.1	Tratamiento convencional	96
6.4.2	Tratamiento de láminas filtrantes	101
7.	CONCLUSIONES	105
8.	RECOMENDACIONES	106
	BIBLIOGRAFÍA	107
	ANEXOS	112

## LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Localización de los Campos Floreña y Pauto en el bloque Piedemonte	22
Figura 2. Columna estratigráfica generalizada de cuenca Llanos Orientales	25
Figura 3. Entorno geológico regional de Piedemonte	28
Figura 4. Modelo tridimensional del Anticlinal Floreña y Complejo Pauto	30
Figura 5. Diagrama de procesos de Dewatering	33
Figura 6. Proceso de floculación y coagulación	35
Figura 7. Layout de la locación	36
Figura 8. Diagrama de la unidad de tratamientos de agua	41
Figura 9. Unidad de tratamiento de aguas	41
Figura 10. Unidad de desorción térmica de la compañía de tratamiento convencional	43
Figura 11. Diagrama de procesos de los sistemas de la Unidad de Desorción Térmica	45
Figura 12. Plantas en proceso de Fitorremediación	46
Figura 13. Sistema de láminas filtrantes de flujo vertical	48
Figura 14. Sistema de láminas filtrantes de flujo Horizontal	49
Figura 15. Diagrama de procesos para el tratamiento de láminas filtrantes	49
Figura 16. Papel indicador de Ph	52
Figura 17. Electrodo de membrana para leer oxígeno disuelto	53
Figura 18. Multímetro para leer oxígeno disuelto, ph, conductividad y temperatura	54
Figura 19. Procedimiento de la prueba de oxígeno disuelto	54
Figura 20. Incubación de la muestra para la prueba de DBO	55
Figura 21. Procedimiento para la prueba de DQO	56
Figura 22. Montaje de reflujó	57
Figura 23. Cambio de color durante la titulación amarillo-verde	57
Figura 24. Proceso de filtración de la muestra	58
Figura 25. Proceso de calentamiento en la estufa (Calcinación de la muestra)	58
Figura 26. Procedimiento de solidos suspendidos totales	59
Figura 27. Equipo Soxhlet	60
Figura 28. Procedimiento para determinar grasas, aceites y HT	62
Figura 29. Destilación de la muestra	63
Figura 30. Equipo fotométrico	63
Figura 31. Procedimiento de la preparación de reactivos para la prueba de fenoles	65
Figura 32. Procedimiento de la preparación de la muestra para la prueba de fenoles	66
Figura 33. Procedimiento del método directo fotométrico para la prueba de fenoles	67
Figura 34. Titulador titrando	68

Figura 35. Diagrama de flujo para la determinación de cloruros	69
Figura 36. Equipo turbidímetro	70
Figura 37. Procedimiento para determinar sulfatos	72
Figura 38. Equipo de absorción atómica y longitud de onda del sodio	73
Figura 39. Pretratamiento de la muestra para prueba de sodio	74
Figura 40. Procedimiento para la determinación del sodio	74
Figura 41. Procedimiento para la determinar plomo total	76
Figura 42. Equipo de absorción atómica y longitud de onda del plomo	78
Figura 43. Pretratamiento de la muestra para prueba de cromo	79
Figura 44. Procedimiento parar determinar el cromo	80
Figura 45. Patrones de hierro con fenantrolina para la curva de calibración	82
Figura 46. Procedimiento para la determinación de hierro total	83
Figura 47. Equipo y longitud de onda para el níquel	84
Figura 48. Pretratamiento de la muestra para la determinación de níquel	85
Figura 49. Diagrama de flujo para la determinación de níquel	85
Figura 50. Diagrama de flujo del tratamiento de láminas filtrantes con puntos de muestreo	88
Figura 51. Diagrama de flujo para la toma de muestras en el tratamiento convencional	89
Figura 52. Diagrama de flujo para el Valor Presente Neto para la compañía de tratamiento convencional	100
Figura 53. Diagrama de flujo para el Costo Anual Uniforme Equivalente para la compañía de tratamiento convencional	100
Figura 54. Diagrama de flujo para el Valor Presente Neto para la compañía de tratamiento de láminas filtrantes	102
Figura 55. Diagrama de flujo para el Costo Anual Uniforme Equivalente para la compañía de tratamiento de láminas filtrantes	102

## LISTA DE GRÁFICAS

	pág.
Grafica 1. Producción fiscalizada de Gas y Crudo de los Campos del bloque Piedemonte.	31

## LISTA DE ECUACIONES

	pág.
Ecuación 1. Cálculo de la constante de la celda C	51
Ecuación 2. Ecuación cálculo de demanda química de oxígeno	57
Ecuación 3. Ecuación cálculo de sólidos suspendidos totales	59
Ecuación 4. Ecuación cálculo de concentración de grasas y aceites	61
Ecuación 5. Cálculo de cloruros	68
Ecuación 6. Calculo de sulfatos para concentraciones mayores a 10 mg/L	70
Ecuación 7. Cálculo de sulfatos para Concentraciones menores a 10mg/L	71
Ecuación 8 .Cálculo de Sodio	75
Ecuación 9. Ecuación cálculo de plomo	75
Ecuación 10. Cálculo de cromo con digestión	79
Ecuación 11. Cálculo de hierro	82
Ecuación 12. Cálculo de Eficiencia	91
Ecuación 13.Costo Anual Equivalente	95
Ecuación 14. Valor presente	95
Ecuación 15. Número de carro tanques para transportar un determinado volumen de fluido	98
Ecuación 16. Costo de transporte	98

## LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Parámetros se calidad de agua de acuerdo a los decretos 1594 de 1984 y resolución 0631 del 2015.	37
Tabla 2. Parámetros del agua de entrada para la osmosis inversa.	42
Tabla 3. Resultados pruebas fisicoquímicas.	86
Tabla 4. Matriz de selección de acuerdo a las normas.	90
Tabla 5. Matriz de selección de acuerdo a la eficiencia.	92
Tabla 6. Volúmenes promedios de fluidos residuales por pozo.	96
Tabla 7. Costos de los servicios de la empresa de tratamiento convencional.	97
Tabla 8. Costo por servicio y costo total del tratamiento convencional.	99
Tabla 9. Costos de los servicios de la empresa de tratamiento de láminas filtrantes.	101
Tabla 10. Costo por servicio y costo total del tratamiento de láminas filtrantes.	103
Tabla 11. Reporte de resultados.	104

## LISTA DE ABREVIATURAS

<b>ADR:</b>	Aguas domésticas residuales
<b>ANDR:</b>	Aguas no domésticas residuales
<b>ANH:</b>	Agencia nacional de hidrocarburos.
<b>ANLA:</b>	Autoridad nacional de licencias ambientales.
<b>BP:</b>	British Petroleum
<b>BPD:</b>	Barriles por día.
<b>DAF:</b>	Flotación por aire disuelto.
<b>CAUE:</b>	Costo anual uniforme equivalente.
<b>DANE:</b>	Departamento administrativo nacional de estadística.
<b>DBO:</b>	Demanda Bioquímica de oxígeno.
<b>DQO:</b>	Demanda química de oxígeno.
<b>EPA</b>	Environmental protection agency / Agencia de protección al medio ambiente.
<b>IPC:</b>	Indice de precios al consumidor.
<b>ML:</b>	Mud logging / Registros de perforación.
<b>MPCD:</b>	Millones de pies cúbicos por día.
<b>OBM:</b>	Oil based mud / Lodo base aceite.
<b>SLFFH:</b>	Sistema de láminas filtrantes de flujo horizontal.
<b>SLFFV:</b>	Sistema de láminas filtrantes de flujo vertical.
<b>TDS:</b>	Total de sólidos disueltos.
<b>TIO:</b>	Tasa interna de oportunidad.
<b>TOC:</b>	Carbón orgánico total.
<b>TSS:</b>	Sólidos suspendidos totales.
<b>UDT:</b>	Unidad de desorción térmica.
<b>UTA:</b>	Unidad de tratamientos de agua.
<b>VOC's:</b>	Compuestos orgánicos volátiles.
<b>VPN:</b>	Valor presente neto.
<b>WBM:</b>	Water based mud / Lodo base agua.
<b>WM:</b>	Waste management / Control de sólidos.
<b>°C:</b>	Grados centígrados.
<b>Ppm:</b>	Partes por millón.
<b>s/cm:</b>	Segundos por centímetro.
<b>µs/cm:</b>	Microsegundos por centímetro.
<b>mg/L:</b>	Miligramo por litro.

## GLOSARIO

**ABANICO IMBRICADO:** estructura compuesta por un conjunto de fallas lítricas que convergen hacia una falla mayor basal, de manera que los bloques de falla se superponen entre sí de forma análoga a las tejas de un tejado.

**ANTICLINAL:** pliegue que presenta una concavidad orientada hacia el interior del globo, cuyo núcleo está constituido por las rocas más antiguas de la serie plegada.

**ASPERJAR:** rociar o esparcir en forma de pequeñas gotas el agua u otro líquido.

**CABALGAMIENTO:** se trata de un desplazamiento horizontal de una gran masa de materiales debido a la acción de las fuerzas tectónicas del interior de la Tierra.

**CLARIFICACIÓN:** es el proceso por el cual se remueven partículas suspendidas del agua turbia para hacerla clara.

**COAGULACIÓN:** es un proceso por el cual las sustancias de una disolución estable son desestabilizadas al romper las fuerzas que mantienen tal estabilidad.

**CONCORDANTE:** es paralelo a otro debido generalmente a que la sedimentación se ha producido sin apenas interrupción.

**DESORCIÓN:** fenómeno por el cual un gas abandona un sólido cuando este alcanza cierta temperatura.

**DISCORDANTE:** es una relación geométrica entre capas de sedimentos que representa un cambio en las condiciones en que se produjo su proceso de deposición.

**FALLA:** es una falla es una fractura, generalmente plana, en el terreno a lo largo de la cual se han deslizado los dos bloques el uno respecto al otro.

**FALLA DE DESGARRE:** se presenta cuando el desplazamiento es horizontal y paralelo al rumbo de la falla.

**FALLA INVERSA:** se da cuando el bloque colgante se mueve hacia arriba respecto del yacente.

**FALLA NORMAL:** en esta falla, el bloque colgante o de techo se desplaza hacia abajo respecto al bloque yacente o de muro.

**FLOC:** residuos sólidos que provienen de algún tratamiento en el cual se ha hecho uso de químicos tales como floculantes y coagulantes.

**FLOCULACIÓN:** es el proceso en el que se unen las partículas desestabilizadas y forman una aglomeración.

**KERÓGENO:** es una mezcla de compuestos químicos orgánicos presente en las rocas sedimentarias.

**LAYOUT:** plano de distribución de una locación de perforación.

**LIXIVIACIÓN:** extracción de la materia soluble de una mezcla mediante la acción de un disolvente líquido.

**RIZOSFERA:** zona inmediata a las raíces vivas que están directamente influenciada por estas.

**SHAKER:** también conocido como zaranda. Es un dispositivo mecánico, primero en la línea de limpieza del fluido de perforación, que se emplea para separar los recortes del trépano u otros sólidos que se encuentren en éste en su retorno del pozo. El fluido pasa a través de uno o varios coladores vibratorios de distinta malla o tamaño de orificios que separan los sólidos mayores.

**SINCLINAL:** es un pliegue de la corteza terrestre que presenta los estratos más recientes en su núcleo.

**SLOP:** son desechos con una composición compleja que pueden contener fluidos acuosos emulsionados, sólidos, cortes de perforación y agua dulce o salada.

## RESUMEN

El estudio de dos alternativas para el tratamiento de aguas y residuos provenientes de la perforación de los Campos de Equión en Piedemonte, se desarrolla con la finalidad de evaluar técnico y financieramente la implementación de un tratamiento diferente con respecto al tratamiento convencional de la empresa. En donde, el nuevo tratamiento es conocido como tratamiento de láminas filtrantes.

Para la elaboración del proyecto, se inicia contextualizando al lector con la ubicación geográfica de los Campos de Equión en Piedemonte, tomando como referencia los Campos de Pauto y Floreña. Además, se realiza una breve descripción de la geología que atraviesa el bloque del Piedemonte Llanero, sus generalidades y la historia de producción de los campos desde el año 2013 hasta el 2017.

Posteriormente, se detallan que tipo de aguas y residuos se obtienen durante el proceso de la perforación, su recorrido en la locación y que normas regulan la aspersión de los fluidos tratados. Además, se explican cada uno de los equipos y procesos fisicoquímicos para el tratamiento convencional y los procesos de Fitorremediación para el tratamiento de láminas filtrantes.

Después de entender cómo funcionan ambos tratamientos, se realizan las correspondientes pruebas fisicoquímicas de laboratorio en los fluidos a la salida de cada tratamiento, en donde principalmente se analizan los parámetros de: Conductividad, pH, Oxígeno disuelto, Demanda química de oxígeno, Demanda bioquímica de oxígeno, Sólidos suspendidos totales, Concentración de grasas y aceites, Fenoles, Cloruros, Sulfatos, Sodio total, Plomo total, Cromo total, Hierro total, Hidrocarburos totales, Níquel y Temperatura.

Una vez obtenidos los resultados de cada parámetro analizado, se elaboran dos matrices para la selección del mejor tratamiento. La primera matriz evalúa el cumplimiento del Decreto 1594 de 1984 y la Resolución 0631 del 2015 y la segunda matriz estima la eficiencia de los tratamientos, calculando el porcentaje de remoción en los parámetros de pH, grasas y aceites, fenoles, cloruros, sólidos suspendidos totales e hidrocarburos totales, los cuales se consideran críticos.

Finalmente se desarrolla un análisis financiero de los tratamientos de acuerdo a los costos de los servicios, y la distancia entre las plantas de tratamiento y la locación de los campos, con lo cual se concluye la selección del mejor tratamiento.

**Palabras claves:** aguas residuales, floculación, tratamiento convencional, tratamiento de láminas filtrantes, Bloque Piedemonte

## INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de grado se realiza con el fin de estudiar dos alternativas de tratamiento para el agua y los residuos provenientes de la perforación para la empresa Equión Energía Limited. En donde, se pretende comparar los procesos actuales de tratamiento con un nuevo tratamiento y estimar el beneficio financiero de la implementación de la nueva alternativa para a la empresa.

El proyecto surge a partir de la idea de minimizar los costos que se tienen en las operaciones de perforación en el momento de disponer y asperjar los fluidos al medio ambiente. Puesto que, estos fluidos deben cumplir con ciertos parámetros estipulados en el decreto 1594 de 1984 y en la resolución 0631 del 2015, lo cual implica llevar a cabo un tratamiento adecuado de los fluidos para obtener las condiciones establecidas.

En primer lugar, se determina realizar el proyecto comparando solo dos alternativas: el tratamiento convencional, realizado actualmente por Equión y como alternativa de estudio el tratamiento por láminas filtrantes o humedales artificiales. Luego, se procede a realizar la consulta pertinente en textos y artículos relacionados con la implementación de esta nueva tecnología en otros lugares, los procesos que conlleva y sus resultados. Para finalmente, plasmar que ventajas técnicas, ambientales y financieras involucra emplear el tratamiento de láminas filtrantes frente al tratamiento convencional.

La aplicación de este trabajo de grado para la industria petrolera, se evidencia en dos aspectos importantes: el cuidado al medio ambiente y el beneficio financiero. El cuidado al medio ambiente, puesto que actualmente es un factor determinante para la competitividad en la industria, reflejado en que se busca implementar tecnologías amigables al medio ambiente y procesos que cumplan con las normas, para no incurrir en sanciones y a su vez que conlleve a un beneficio financiero.

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

Evaluar técnico financieramente diferentes alternativas para el tratamiento y disposición de aguas y residuos producidos durante la perforación en los Campos de Equión en Piedemonte.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

1. Describir generalidades de los campos de Equión en Piedemonte.
2. Describir las diferentes aguas y residuos obtenidos durante el proceso de perforación de acuerdo a sus propiedades en los Campos de Equión en Piedemonte.
3. Describir los tratamientos de aguas y residuos actualmente utilizados por Equión Energía Limited y el tratamiento de láminas filtrantes.
4. Realizar pruebas de laboratorio antes y después del tratamiento convencional y de láminas filtrantes.
5. Analizar los resultados obtenidos a través de una matriz que permita la selección de un tratamiento.
6. Evaluar financieramente el proyecto mediante el indicador Costo Anual Uniforme Equivalente (CAUE).

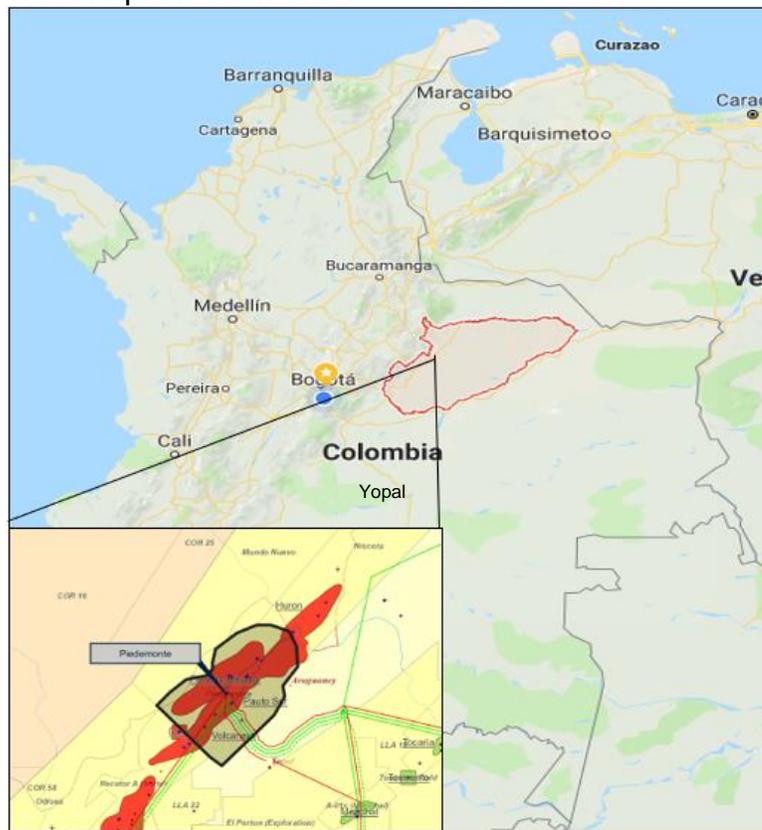
## 1. GENERALIDADES DE LOS CAMPOS DE EQUIÓN EN PIEDEMONTE

En este capítulo se mencionan las diferentes características geológicas del Piedemonte Llanero, teniendo como referencia los Campos de Floreña y Pauto; en donde se incluye la localización del Piedemonte Llanero, la reseña histórica, la estratigrafía, la geología estructural y la historia de producción de los campos.

### 1.1 LOCALIZACIÓN DE LOS CAMPOS PAUTO Y FLOREÑA

Los Campos de Pauto y Floreña se encuentran ubicados en la Cuenca de los Llanos orientales de Colombia, en el bloque de Piedemonte, dentro del Corregimiento de El Morro, en la jurisdicción Yopal, Casanare (Figura 1). El área aproximada del bloque de Piedemonte es de 287.000 hectáreas.

**Figura 1.** Localización de los Campos Floreña y Pauto en el bloque Piedemonte.



Fuente: Mapa de Colombia-Casanare. [En Línea] [Citado 20 de febrero del 2018]: Disponible en: < <https://www.google.com.co/maps/place/Casanare/@5.2919857,-72.5770963,8z/>>. EDIN. Contract Blocks. Piedemonte. IHS Inc. 2017. p.5. Modificado por los autores.

## 1.2 HISTORIA DE LOS CAMPOS PAUTO Y FLOREÑA

Los Campos Floreña y Pauto fueron descubiertos a finales de los años noventa, por la empresa British Petroleum en la cuenca de los Llanos Orientales en Piedemonte luego de evaluar el área con nueve pozos. Desde la etapa inicial se evidenció el gran potencial hidrocarburífero de la zona, pero la incertidumbre superficial hizo imposible definir el plan de desarrollo del área. Así, la empresa British Petroleum (BP) obtuvo el contrato de asociación de Piedemonte con Ecopetrol en 1992 en donde actualmente se encuentran los Campos Floreña y Pauto.

El Campo Floreña fue descubierto con el pozo exploratorio Floreña-1, el cual logro una profundidad de 15.000 pies y cuyo objetivo exploratorio fueron las areniscas de la Formación Guadalupe<sup>1</sup>. Por otra parte, el pozo Pauto Sur-1 con una profundidad de 15000 pies fue el pozo descubridor del Campo Pauto y su objetivo fueron las Formaciones Barco y Mirador<sup>2</sup>, en ambos casos se encontraron reservas de crudo liviano y gas.

Los Campos Floreña y Pauto fueron declarados comerciales en el año 1998 pero la empresa BP no los desarrolló hasta el año 2001, ya que la empresa centro su operación en los Campos Cusiana y Cupiagua.

En el 2011 los derechos de explotación de los hidrocarburos del contrato de Asociación de Piedemonte fueron adjudicados a la empresa Equión Energía Limited, empresa fruto de la adquisición de las acciones de BP en Colombia por Ecopetrol S.A y Talisman Energy con una participación del 50%.

## 1.3 MARCO GEOLÓGICO

En esta sección, se realiza una breve descripción de la columna estratigráfica, la estratigrafía y la geología estructural de la cuenca de los Llanos Orientales donde se encuentran los Campos Pauto y Floreña.

**1.3.1 Columna Estratigráfica.** La Cuenca de los Llanos Orientales comprende un área que va desde el cabalgamiento frontal de la Cordillera Oriental, al oeste, hasta los afloramientos Precámbricos del Escudo de Guyana, sobre los ríos Orinoco

---

<sup>1</sup> CÁRDENAS, Diego. Floreña, nuevo campo petrolero: El piedemonte llanero sigue haciendo brotar petróleo de sus entrañas. En: El Tiempo [en línea]. (30 de mayo de 1995). Disponible en: <<http://www.eltiempo.com/archivo/documento/MAM-334924>> [citado en 18 de febrero de 2018]

<sup>2</sup> TIEMPO. Vía libre al Campo Floreña: con la aprobación de la comerciabilidad del campo Floreña, la Empresa Colombiana de Petróleos (Ecopetrol) y la British Petroleum iniciarán el desarrollo conjunto de un nuevo complejo petrolífero en el piedemonte llanero del Casanare. En: El Tiempo [en línea]. (3 de noviembre de 1998). Disponible en: <<http://www.eltiempo.com/archivo/documento/MAM-830998>> [citado en 18 de febrero de 2018]

y Guaviare al Este. La cuenca está constituida por sedimentos de edad Cretácico y Paleógeno que descansan alternadamente sobre el Paleozoico y el basamento. Los sedimentos de la edad del Paleógeno hacen parte de un sistema fluvial de ríos trezados conformados por pequeñas islas de arena, interestratificadas con sedimentos de grano fino. Por otro lado, el Mesozoico está constituido por rocas sedimentarias del Cretácico Inferior representadas por las Formaciones Lutitas de Macanal, Areniscas de Las Juntas, Fόμεque y Une, y las formaciones sedimentarias del Cretácico Superior Chipaque y el Grupo Palmichal. El Cenozoico está conformado por rocas sedimentarias del Paleógeno representadas por las formaciones Arcillas de El Limbo, Areniscas de El Limbo y las formaciones del Neógeno San Fernando, Diablo Conjunto Inferior y Diablo Conjunto Superior. En la Figura 2 se muestra la Columna estratigráfica generalizada de la Cuenca de los Llanos Orientales.<sup>3</sup>

**1.3.2 Estratigrafía.** A continuación, se realiza la descripción de las unidades estratigráficas que conforman la cuenca los Llanos Orientales, haciendo un énfasis en las características de Piedemonte. Esta información está basada en el informe de la ANH.

**1.3.2.1 Formación Une.** Está conformada por areniscas cuarzosas con intercalaciones de lutitas y de limolitas carbonosas. Esta formación aumenta su espesor hacia el Noroeste alcanzando así en Piedemonte un espesor de 650 pies.<sup>4</sup>

**1.3.2.2 Formación Gachetá.** Representa la mayor transgresión del Cretáceo sobre el Escudo de Guyana. Constituida por una secuencia de lutitas en el tope y con algunas intercalaciones de areniscas en su base. El contacto de la Formación Gacheta es concordante con la Formación Une que la infrayace, al igual que con la Formación Guadalupe que la suprayace.<sup>5</sup>

**1.3.2.3 Formación Guadalupe.** Consiste en una secuencia de areniscas con pequeñas intercalaciones lutitas y algunas capas de carbón. Alcanza un espesor de 600 pies en Piedemonte y su espesor disminuye hacia el Escudo de Guyana.<sup>6</sup>

---

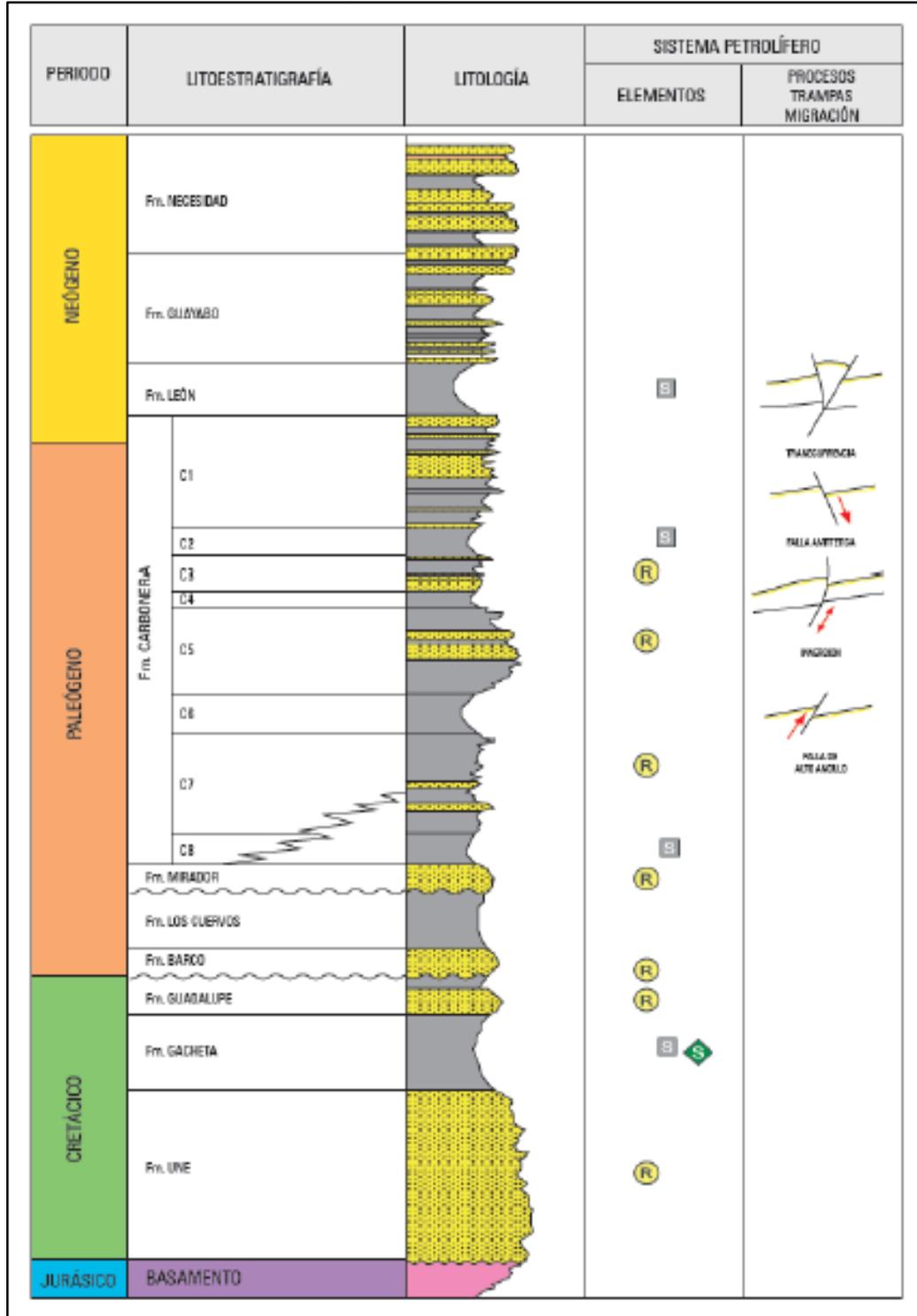
<sup>3</sup> INGEOMINAS – UIS. Geología del Piedemonte Llanero en la Cordillera Oriental, Departamentos de Arauca y Casanare, Memoria. Bucaramanga. 2010. p. 19.

<sup>4</sup> ANH. Cuenca Llanos Orientales. Integración de Geológica de la digitalización y Análisis de Núcleos. Bogotá D.C. 2012. p.48.

<sup>5</sup> Ibid.,p.48.

<sup>6</sup> Ibid., p. 48.

**Figura 2.** Columna estratigráfica generalizada de cuenca Llanos Orientales.



Fuente: AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS. Cuenca Llanos Orientales. Integración de Geológica de la digitalización y Análisis de Núcleos. Bogotá D.C. 2012, p.46.

**1.3.2.4 Formación Barco.** Se depositó en un ambiente regresivo durante el periodo terciario. Compuesta por areniscas cuarzosas de color gris claro, amarillo pálido con intercalaciones de lutitas gris claro o cafés. Los contactos con las formaciones Guadalupe y Une son discordantes.<sup>7</sup>

**1.3.2.5 Formación Los Cuervos.** Se hallan lutitas de color gris, intercalaciones de capas delgadas de carbón e intercalaciones de areniscas de grano fino a medio, de color parduzco. El contacto infrayacente con la Formación Barco y el contacto suprayacente con la Formación Mirador son discordantes.<sup>8</sup>

**1.3.2.6 Formación Mirador.** Depositada en el Eoceno Tardío. Se trata de un conjunto de areniscas masivas con diferentes granulometrías. Actualmente, estas areniscas se consideran el reservorio más importante para la cuenca de los Llanos. Su límites infrayacentes son discordantes, mientras que los límites suprayacentes son concordantes con la Formación Carbonera en la mayor parte de la cuenca. El espesor decrece de Occidente a Oriente, en Piedemonte el espesor es aproximado de 950 pies.<sup>9</sup>

**1.3.2.7 Formación Carbonera.** Es una secuencia litológica correspondiente a un depósito transgresivo y regresivo de corta duración de un mar epicontinental de baja profundidad. El Aquitaine dividió la formación en ocho unidades operacionales (C1 al C8) donde las unidades pares corresponden a ambientes transgresivos y caracterizados por ser importantes sellos; las unidades impares corresponden a los ambientes regresivos es decir están conformadas por arenas y las unidades C7 a C3 pueden ser productoras de hidrocarburos en algunas partes de la Cuenca. Además, el Contacto superior con la Formación León es conforme. A continuación, una breve descripción de las unidades de carbonera<sup>10</sup>:

- **Unidad C8:** Está constituida por un ciclo lutítico y el contacto infrayacente con la Formación Mirador es concordante.
- **Unidad C7:** Son areniscas color crema a parduzco, de grano fino a medio, con algunas intercalaciones de arcillolitas color gris verdoso; fueron depositadas en un ambiente marino somero. En algunas zonas de la cuenca son rocas productoras.
- **Unidad C6:** Esta unidad arcillosa alcanza un espesor de 600 pies en la zona del Oeste y se reduce rápidamente hacia el Este.
- **Unidad C5:** Están compuestas por areniscas y arcillolitas, poco consolidadas, en algunos casos son calcáreas, el espesor varía entre 50 a 300 pies.
- **Unidad C4:** Se encuentra compuesta por capas de areniscas, limolitas y

---

<sup>7</sup> Ibid., p. 48.

<sup>8</sup> Ibid., p. 49.

<sup>9</sup> Ibid., p. 49.

<sup>10</sup> Ibid., p.50-52

lutitas, en Piedemonte puede alcanzar espesores superiores 700 pies; mientras que en el centro de la cuenca está en un orden de 150 a 300 pies.

- **Unidad C3:** Está formada por niveles alternados de areniscas de fina a gruesa, blanca a translúcida, con algunos pies de limolitas y arcillolitas.
- **Unidad C2:** Constituida casi en su totalidad por lutitas grises y algunas limolitas. Tiene un espesor aproximado 350 pies
- **Unidad C1:** Es la última secuencia arenosa de la Formación Carbonera, y constituida por areniscas con capas de limolitas oscuras y lutitas grises.

**1.3.2.8 Formación León.** Esta unidad está constituida por dos secciones homogéneas de lodolitas laminadas delgadas de color gris verdoso oscuro ubicadas en la parte superior e inferior de la formación, separados por una sección intercalada de arenisca cuarzosa, de grano fino a muy fino, consolidado, duro, con intercalaciones de lodolita. Algunos niveles delgados de dolomita arcillosa duran generalmente se intercalan en la parte inferior de la unidad.<sup>11</sup>

**1.3.2.9 Formación Charte.** Es una unidad interestratificada compuesta por limolitas, lodolitas y un espesor de 10 a 30 pies de areniscas, los cuales a su vez se intercalan con capas delgadas de lignitos ocasionales ubicados en la parte inferior de la unidad. En la parte superior de la formación predominan lodolitas grises verdosas y se correlacionan con los pozos de Volcanera.<sup>12</sup>

**1.3.2.10 Formación Guayabo.** Es la secuencia más espesa con más de 13.000 pies, en Piedemonte. Está formada por arcillolitas, arenas mal seleccionadas y contiene niveles de conglomerados. Tiene una influencia marina en la base y en el tope fluvial marino a continental.<sup>13</sup>

**1.3.3 Geología estructural.** El Piedemonte Llanero limita con la Cordillera Oriental y los Llanos Orientales. Este terreno ha sido afectado por varios eventos tectónicos de compresión lo cual ha generado un sistema de fallas de cabalgamiento, las cuales a través del tiempo han propiciado el entrampamiento de hidrocarburos en el subsuelo de la Cuenca de los Llanos orientales. De tal manera que el área del Contrato de Asociación de Piedemonte, encierra estructuras importantes tales como los anticlinales Monterralo, El Morro, Floreña, Pauto, Dele y Volcanera.

La trampa está dividida en secciones por fallas de desgarre que corren oblicuamente respecto a la tendencia principal de la estructura. La estructura de

---

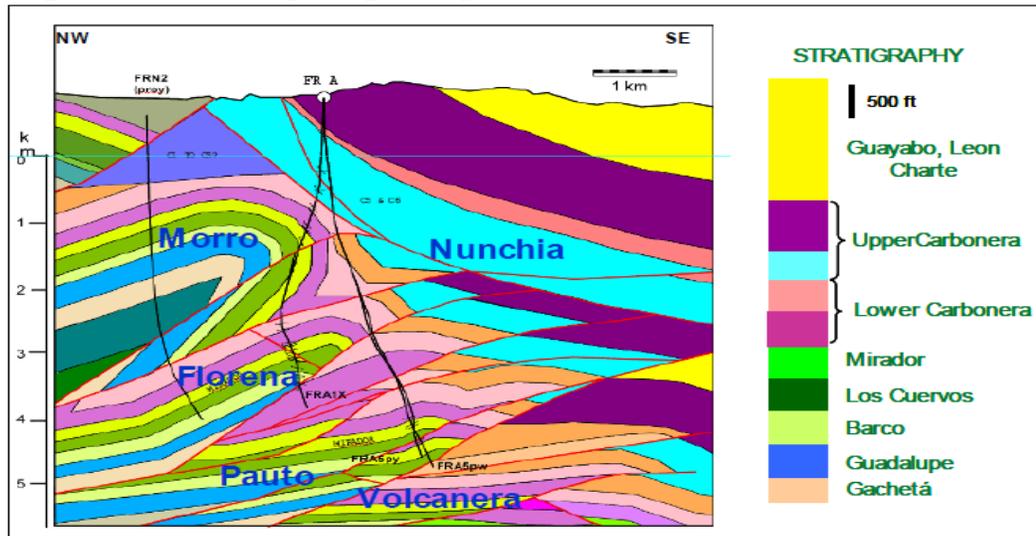
<sup>11</sup> EQUIÓN ENERGÍA LIMITED. Piedemonte Stage II Development Wells Basis of Design End of Select. Bogotá. 2016. p.11.

<sup>12</sup>Ibid., p. 11.

<sup>13</sup> ANH.Op.cit.,p.52.

Pauto tiene aproximadamente 25 km de largo por 4 km de ancho y Floreña tiene 11 km de largo por 2 km de ancho.<sup>14</sup>

**Figura 3.** Entorno geológico regional de Piedemonte



Fuente: EQUIÓN ENERGÍA LIMITED, Piedemonte Field Well Review, 2013. p.4.

En el cinturón de fallamiento y plegamiento del frente Oriental de la Cordillera, se han identificado cuatro estilos estructurales dominantes<sup>15</sup>:

Estilo de tectónica de cobertura delgada: En este estil se generan fallas inversas de bajo ángulo que sólo involucran la sección sedimentaria (fallas de Aguaclara y de Yopal); además, genera estructuras tipo pliegues por propagación de fallas, pliegues por flexión de fallas y sinclinales pasivos, tales como los sinclinales de Nunchía y Zamaricote; abanicos imbricados de cabalgamientos, zonas triangulares y zonas de dúplex.

Estilo de tectónica de cobertura gruesa: Este presenta particularidades similares al estilo de cobertura delgada, pero involucra rocas del Paleozoico y del basamento precámbrico (cabalgamientos de Santa María y Lengupá). Esta deformación genera pliegues por flexión de fallas (anticlinal de Guavio) y zonas de dúplex. A menudo se encuentran fallas fuera de secuencia con respecto a las fallas de la tectónica de cobertura delgada, tales como la falla de Guaicáramo.

Estilo de fallamiento de alivio: Este estilo involucra fallas de desgarre y rampas laterales, las cuales están ubicadas en las escamas de cabalgamiento,

<sup>14</sup> EQUIÓN ENERGÍA LIMITED.Op.cit.,p.8.

<sup>15</sup> ANH.Op.cit.,p. 48-52.

perpendiculares u oblicuas al frente de deformación.

Estilo de inversión tectónica: La deformación resulta de la reactivación de antiguas fallas normales o fallas inversas (fallas de Cumaral, Chaparral).

**1.3.4 Geología del Petróleo.** Basados en la información reportada por la ANH<sup>16</sup>, se describe el sistema petrolífero de la cuenca de los Llanos Orientales.

**1.3.4.1 Roca generadora.** Las lutitas de las formaciones Gacheta y Chipaque son consideradas las principales rocas fuentes y están localizadas por debajo del flanco Este de la Cordillera Oriental. Esta roca posee kerógeno de tipo II (marino) en la región del piedemonte y la tipo III (continental) en la región del llano, con un TOC (Carbón orgánico total) ente 1% al 3%, con capacidad de generar petróleo y gas. Asimismo, las lutitas contenidas en las Formaciones Mirador, Los Cuervos y Carbonera C8 tienen potencial como roca generadora para el área de Cusiana.

**1.3.4.2 Migración.** Hubo dos pulsos de migración: el primero durante el Eoceno tardío- Oliogoceno en el que se expulsaron los hidrocarburos livianos y condensados, y el segundo comenzó en el Mioceno con la expulsión de gas. La migración de los hidrocarburos en el piedemonte sucedió de forma paralela a la deformación, en consecuencia, la distribución y la composición de los hidrocarburos está controlada por la evolución estructural del área.

**1.3.4.3 Roca reservorio.** Las principales rocas almacenadoras son las areniscas de las formaciones Mirador, Barco y Carbonera (C3, C5 y C7), además de las arenas de Guadalupe. La porosidad en el área de los Campos Floreña y Pauto está en el rango de 3% a 9%, lo cual es consecuencia de la compactación y de la deformación estructural.

**1.3.4.4 Roca sello.** El Principal sello de la cuenca es la Formación León. Por otra parte, las lutitas de la Formación Carbonera (C2, C4, C6 y C8), y Gacheta son considerados sellos locales.<sup>17</sup>

**1.3.4.5 Trampa.** El piedemonte llanero se caracteriza por ser una zona altamente fallada, lo cual ha facilitado el entrampamiento de hidrocarburos, a continuación, se enuncian las principales estructuras que se presentan en el bloque<sup>18</sup>:

---

<sup>16</sup> SARMIENTO, Luís. Llanos basin. Volumen 9. Bogotá.: ANH. p. 101-104

<sup>17</sup> ANH. Catalogo open round Tipo 1. Bogotá. 2009.p.13.

<sup>18</sup> GUTIERREZ, Zorel. Efecto del Espaciamiento y Longitud de Fracturas Sobre la Permeabilidad de un Yacimiento Naturalmente Fracturado: Caso Piedemonte Llanero Colombiano. Trabajo de

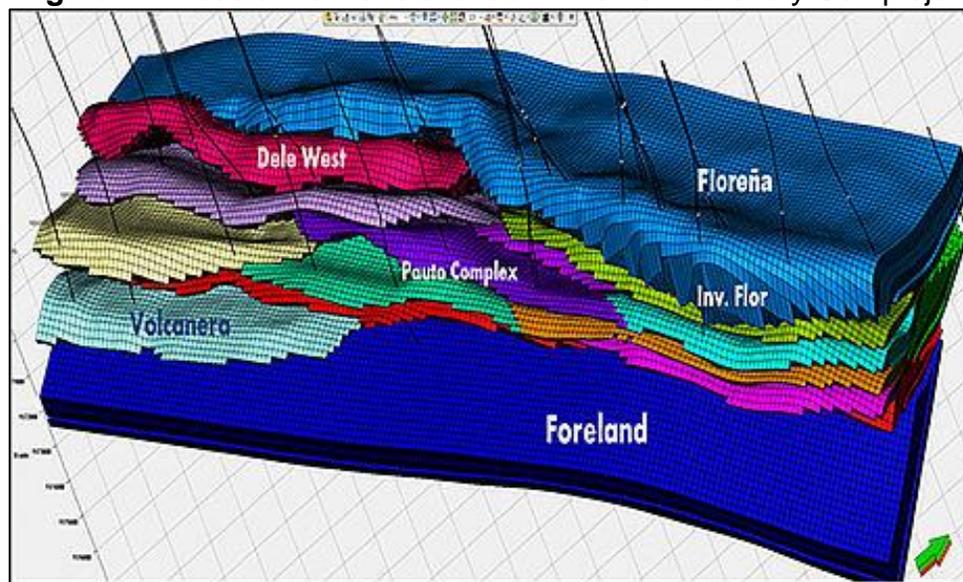
El morro es un anticlinal que se encuentra presente a lo largo del área, involucra desde la unidad Carbonera C7 hasta el Cretácico.

El anticlinal de Floreña posee 16 km de largo y 5 de ancho con flanco frontal invertido, las formaciones Guadalupe, Barco y Mirador son productoras de aceite volátil y gas condensado.

El Complejo Pauto se compone de una serie de anticlinales dispuestos en escamas apiladas, este tiene una longitud total de cerca de 30 Km y 6 km de ancho. Su producción proviene en su mayor parte de la Formación Mirador, seguida de la Formación Los Cuervos, el fluido es composicional con predominio de gas condensado. La escama Miche es la más alta estructuralmente ubicada más al Oriente, esta reporta mayor cantidad de perforaciones y mayores volúmenes de gas original en sitio. Volcanera está probablemente relacionada a la estructura del Foreland bajo el frente de cabalgamiento, tiene bajo buzamiento y está llena de gas menos enriquecido que el de Pauto, es posiblemente la escama menos fracturada.

En la figura 4, se observa el modelo tridimensional del anticlinal de Floreña y el Complejo de Pauto.

**Figura 4.** Modelo tridimensional del Anticlinal Floreña y Complejo Pauto



Fuente: GUTIERREZ, Zorel. Efecto del Espaciamiento y Longitud de Fracturas Sobre la Permeabilidad de un Yacimiento Naturalmente Fracturado: Caso Piedemonte Llanero Colombiano. Trabajo de grado Magister en Ingeniería de Petróleo. Medellín: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas. 2016. p. 6

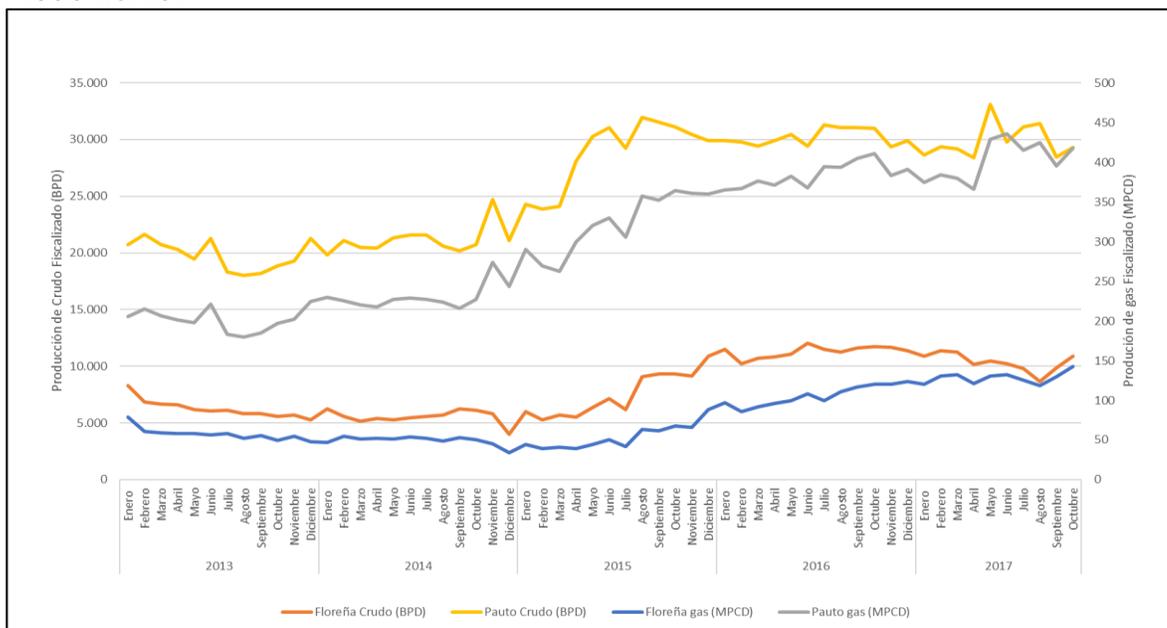
## 1.4 HISTORIA DE PRODUCCIÓN

En el año de 1995 los Campos Floreña y Pauto fueron hallados por la multinacional inglesa British Petroleum. Para el año 1998 se estimó que tendrían unas reservas estimadas de 66 millones de barriles de hidrocarburos líquidos y 388 billones de pies cúbicos de gas.<sup>19</sup>

En el año 2001 el Campo Floreña empieza a producir un crudo de 44 grados API, obteniendo 5.000 BPD y se esperaba que en diez días más este campo llegara a producir el doble es decir 10.000 BPD.<sup>20</sup>

Según las estadísticas de producción de la ANH desde el 2013 hasta el 2017 (grafica 1), la producción de gas en el Campo Floreña oscila entre 33,7 MPCD a 142 MPCD y la producción de Crudo esta entre 4.000 BPD a 12.000 BPD. Mientras, para el Campo Pauto, la producción de gas esta entre 179.6 MPCD a 436 MPCD y la producción de crudo esta entre 17.000 BPD a 33.000 BPD.

**Grafica 1.** Producción fiscalizada de Gas y Crudo de los Campos del bloque Piedemonte.



Fuente: elaboración propia.

<sup>19</sup> TIEMPO. Floreña: Nuevo campo petrolero. En: El Tiempo [en línea]. (30 de mayo de 1995). Disponible en: < <http://www.eltiempo.com/archivo/documento/MAM-334924> > [citado en 20 de febrero de 2018]

<sup>20</sup> TIEMPO. Floreña empieza a producir petróleo. En: El Tiempo [en línea]. (21 de junio de 2001). Disponible en: < <http://www.eltiempo.com/archivo/documento/MAM-483565> > [citado en 20 de febrero de 2018]

## 2. AGUAS Y RESIDUOS OBTENIDOS DURANTE EL PROCESO DE PERFORACIÓN

En este capítulo, se describen las diferentes aguas y residuos provenientes de la perforación de los campos de Equión en Piedemonte que se estudian y se utilizan en el presente proyecto. Estas hacen referencia a los lodos y residuos acuosos que se obtienen después de perforar los pozos, sin incluir las aguas industriales que se utilizan en locación y las ADR. Además, se expone el decreto 1594 de 1984, junto con la Resolución 0631 del 2015 las cuales hacen alusión a los parámetros mínimos requeridos para la aspersión de las aguas al medio ambiente.

### 2.1 LODOS DE PERFORACIÓN

A la hora de llevar a cabo una operación de perforación, es indispensable el uso de un fluido que contribuya con la terminación satisfactoria del pozo. Este fluido debe cumplir con ciertas especificaciones según el tipo de pozo que se desee construir, las formaciones que se vayan a perforar, los factores que intervienen (presión, temperatura), la profundidad del pozo, los parámetros de perforación y ante todo el presupuesto con el que cuente la empresa operadora, entre otros.

La importancia de los lodos de perforación radica en las funciones que estos llevan a cabo, entre estos se pueden mencionar: mantener la sarta de perforación refrigerada, controlar las presiones de las formaciones a perforar, brindar la estabilidad de las paredes del pozo, suspender y acarrear los cortes a superficie, controlar la corrosión, transmitir la energía hidráulica a la broca, llevar una evaluación en todo el momento del pozo y minimizar el impacto ambiental que dicho fluido puede generar.<sup>21</sup>

Los lodos de perforación pueden ser líquidos, de mezcla gas y líquido o solo gas. Para el presente trabajo solo se utilizan lodos de perforación líquidos; estos están compuestos por una cantidad de químicos según se requieran y se clasifican según su fase continua, la cual puede ser agua (conocidos como lodos WBM) o aceite (conocidos como lodos OBM).

**2.1.1 Lodos WBM.** Los lodos base agua se dividen en dos fases una continua y otra dispersa. La fase continua puede ser agua dulce o agua salada, estas aguas pueden ser recogidas directamente de un efluente cercano a la locación o pueden provenir de otro pozo que produjese cantidades considerables de agua al extraer el crudo, conocidas como aguas de producción. La fase dispersa es una fase química,

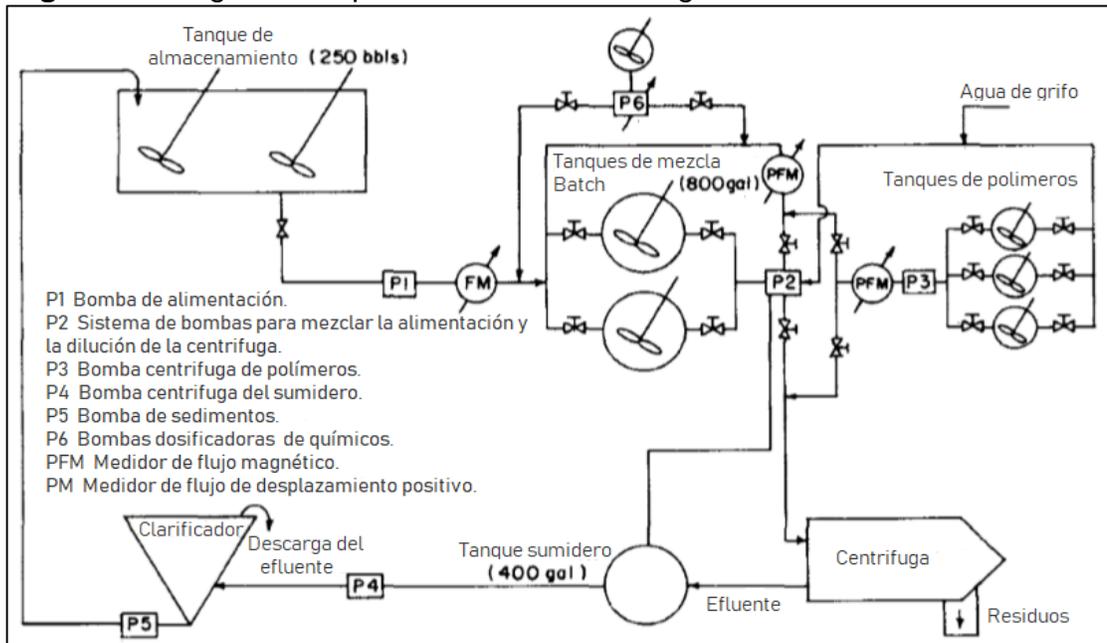
---

<sup>21</sup>INSTITUTO AMERICANO DEL PETRÓLEO. Manual de fluidos de perforación. Dallas, Texas. 2014.p. 2.1

esta fase varía de acuerdo con el tipo de pozo que se tenga, en esta se pueden incluir densificantes, viscosificantes, controladores de filtrado, inhibidores, dispersantes, controladores de pH, entre otros.

Cuando la etapa de perforación ha terminado y el pozo queda lleno con fluido de completamiento para su posterior puesta en producción, los lodos WBM se someten a un proceso de deshidratación conocido como dewatering, proceso el cual se explica a continuación (ver Figura 5).

**Figura 5.** Diagrama de procesos de Dewatering.



Fuente: WOJTANOWICZ. K, Andrew. Modern solids control: A centrifuge dewatering-process study. Louisiana, septiembre 1988. SPE-16098-PA. Modificado por el autor.

El proceso de Dewatering está compuesto básicamente por 2 etapas; centrifugación y clarificación.

Para llevar a cabo el procedimiento, el lodo es situado en un tanque de almacenamiento. Aparte se prepara una mezcla con químicos coagulantes y floculantes que permiten la separación de las fases; esta mezcla se dirige al tanque sumidero y a su vez se combina con el lodo en la centrífuga de alta revolución. La Centrifuga ayuda a acelerar el proceso de separación de las fases del lodo en función de sus densidades, en esta fase se eliminan algunos sólidos. El lodo continúa hacia al tanque sumidero donde de nuevo se combina con una mezcla de

químicos coagulantes y floculantes para finalmente pasar al clarificador en donde se decantan de nuevo por la diferencia de densidades.<sup>22</sup>

Después de finalizado el proceso de dewatering, el agua obtenida debe tener ciertas condiciones químicas definidas en los decretos 1594 de 1984 que la harán apta para ser dispuesta y/o asperjada en locación. Por otra parte, los sólidos obtenidos se tratan por fitorremediación, explicado en la sección 3.2.1. La elección del tratamiento que se elija para estos sólidos dependerá de su composición y del tratamiento que sea más costo-efectivo para la empresa.

**2.1.2 Lodos OBM.** Los lodos base aceite son una emulsión inversa, en donde la fase continua del lodo es aceite (en la práctica se hace uso del diésel) y la fase emulsionada es salmuera, comúnmente de cloruro de calcio. Los tratamientos de estos lodos se realizan por desorción térmica y biorremediación los cuales están explicados en la sección 3.1.2.

## **2.2 SALMUERA**

La salmuera es un líquido salino utilizado generalmente en las operaciones de terminación de pozos o asociadas a los lodos de perforación base aceite. Agua saturada con una sal común como cloruros de calcio o sodio, los bromuros y los formiatos.<sup>23</sup>

## **2.3 SLOPS**

Los slops son desechos con una composición compleja que pueden contener fluidos acuosos emulsionados, sólidos, cortes de perforación y agua dulce o salada. Estos residuos al estar contaminados, son removidos del sistema activo de los fluidos de perforación ya que pueden comprometer el rendimiento de estos.<sup>24</sup>

Los slops se caracterizan por tener una fuerte emulsión en la fase interna y los sólidos posean una alta mojabilidad al aceite lo cual no permite la fácil separación entre sus fases.

Los slops son generados en los procesos de perforación en donde se combinan significantes cantidades de agua con fluidos OBM. Esto puede ocurrir durante la cementación, operaciones de limpieza de la mesa del taladro, los tanques, shakers

---

<sup>22</sup> WOJTANOWICZ, K, Andrew. Modern solids control: A centrifuge dewatering-process study. SPE-16098-PA. Louisiana, Septiembre 1988.

<sup>23</sup>BAKER HUGHES. Drilling Fluids reference manual. 2006.p. 15.7

<sup>24</sup> Ibid.,p14.30

o zarandas y durante los desplazamientos de fluido de perforación por salmueras o agua.<sup>25</sup>

## 2.4 FLOCS

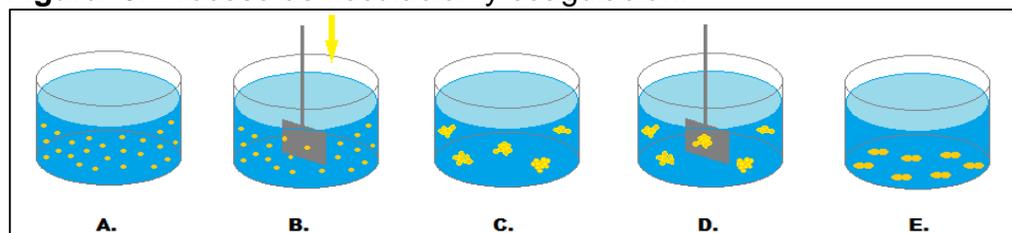
Los flóculos, o mayormente manejados como “Flocs”; hacen referencia a aquellos residuos sólidos que provienen de algún tratamiento en el cual se ha hecho uso de químicos tales como floculantes y coagulantes, como por ejemplo en el proceso de dewatering. Para entender un poco más el concepto de Floc, se explica a continuación los procesos de coagulación y floculación, de los cuales se derivan los Flocs.

La floculación y la coagulación son procesos que suelen producirse de manera simultánea. La coagulación se encarga de desestabilizar las cargas de una suspensión coloidal, mientras que la floculación aglomera las partículas ya coaguladas en partículas floculantes, este proceso provee una mezcla suave que aumenta los choques entre las partículas sin romper los agregados ya preformados. Este proceso se realiza para facilitar la eliminación de las partículas mediante sedimentación por gravedad y filtración.<sup>26</sup>

Los flocs al igual que los slops tienen una composición compleja, esta depende del tipo de fluido que se haya tratado y los tipos de coagulantes y floculantes que se hayan empleado en la práctica. Para el presente proyecto se clasificarán en flocs base agua y flocs base aceite.

Posteriormente, se presenta un esquema en el cual se explica el proceso de floculación (ver figura 6). En el punto A, se observa la suspensión coloidal, en donde todas las partículas se encuentran estabilizadas dado a que poseen la misma carga, repeliéndose entre sí mismas. En el punto B, se agrega el coagulante para desestabilizar las partículas. En el punto C, las partículas forman puentes de atracción y se aglomeran. Finalmente, en el punto D, se forman los flóculos.

**Figura 6.** Proceso de floculación y coagulación.



Fuente: elaboración propia.

<sup>25</sup> Ibid.p.14.22

<sup>26</sup> ROMERO, Jairo. Purificación del agua. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería. 2000

A continuación, el layout de una locación se presenta en la figura 7 cómo se presentan los diferentes equipos para la recolección de los fluidos provenientes de la perforación y el recorrido que siguen hasta llegar a la piscina de tratamiento.

**Figura 7.** Layout de la locación



Fuente: elaboración propia.

En Primer lugar, los fluidos de perforación pasan por los equipos de separación Primaria (Shakers, centrifugas, hidrociclos, etc) donde se retiran los cortes de perforación. Si los fluidos son base agua pasan al proceso de dewatering dentro de la locación y las aguas resultantes del proceso se disponen en la zona de aspersión. Por otro lado, si los fluidos están contaminados con aceite se envían a las plantas de tratamiento.

## 2.5 PARÁMETROS MÍNIMOS REQUERIDOS PARA LA ASPERSIÓN DE AGUAS AL MEDIO AMBIENTE

Los fluidos anteriormente descritos cuentan en diferentes proporciones con componentes de materia orgánica, solidos suspendidos, solidos disueltos, aceites y grasas, metales y demás; los cuales son considerados como potenciales contaminantes, puesto que estos no se integran fácilmente al medio ambiente y son tóxicos para el ecosistema. Por lo cual, se llevan a cabo tratamientos fisicoquímicos que ayudan a proporcionar los parámetros necesarios para colocar de nuevo las aguas resultantes en contacto con el medio. Los tratamientos fisicoquímicos se

describen en el capítulo 3. Para conocer los parámetros mínimos requeridos se tendrán en cuenta: el decreto 1594 de 1984<sup>27</sup> y la resolución 0631 del 2015<sup>28</sup>.

La empresa encargada de realizar los tratamientos necesarios para la recuperación del agua utiliza como base el decreto 1594 de 1984, el cual ofrece unos criterios de calidad como guía para asperjar el agua al medio ambiente ocasionando un impacto mínimo posible.

A continuación, en la tabla 1 se adjuntan los parámetros de calidad del agua para el vertimiento y aspersión de acuerdo a los decretos 1594 de 1984 y resolución 0631 del 2015.

**Tabla 1.** Parámetros de calidad de agua de acuerdo a los decretos 1594 de 1984 y resolución 0631 del 2015.

Parámetros generales	Unidades	Decreto 1594 de 1984	Resolución 0631 del 2015
Ph	Ph	5 – 9	6 – 9
<b>Demanda química de oxígeno (DQO)</b>	mg/L O <sub>2</sub>	-	400
<b>Demanda Bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>)</b>	mg/L O <sub>2</sub>	Remoción >20% en carga	200
<b>Sólidos Suspendidos Totales (SST)</b>	mg/L	Remoción >50% en carga	50
<b>Sólidos Sedimentables (SSED)</b>	mL/L	10	1
<b>Grasas y aceites</b>	mg/L	Remoción >80% en carga	15
<b>Fenoles</b>	mg/L	0,2	0,2
<b>Sustancias activas de azul de metileno (SAAM)</b>	mg/L	-	Análisis y reporte
<b>Temperatura</b>	°C	<40	-
<b>Material flotante</b>	-	Ausente	-
<b>Hidrocarburos Totales (HTP)</b>	mg/L	-	10
<b>Hidrocarburos Aromáticos policíclicos (HAP)</b>	mg/L	-	Análisis y reporte
<b>BTEX (Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xileno)</b>	mg/L	-	Análisis y reporte
<b>Compuestos orgánicos Halogenados Absorbibles (AOX)</b>	mg/L	-	Análisis y reporte
<b>Compuestos organoclorados, cada variedad</b>	mg/L	0,05	-

<sup>27</sup> COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO. Decreto 1594 (26, junio, 1984) Por el cual se reglamenta parcialmente el [Título I de la Ley 9 de 1979 ], así como el [ Capítulo II del Título VI -Parte III- Libro II y el Título III de la Parte III -Libro I- del Decreto Ley 2811 de 1974] en cuanto a usos del agua y residuos líquidos. Bogotá: El Ministerio. p. 19-21

<sup>28</sup> COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO. Resolución 0631 (17, marzo, 2015). Por el cual se establece los parámetros y valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado y se dictan otras disposiciones. Bogotá: El ministerio, 2015.p 12-13

**Tabla 1. (Continuación)**

Parámetros generales	Unidades	Decreto 1594 de 1984	Resolución 0631 del 2015
Difenil Policlorados	mg/L	No detectable	-
Tricloroetileno	mg/L	1	-
Dicloroetileno	mg/L	1	-
Tetracloruro de carbono	mg/L	1	-
Cloroformo	mg/L	1	-
Fosforo total (P) y Ortofosfatos (P-(PO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	mg/L	-	Análisis y reporte
Compuestos organofosforados	mg/L	0,1	
Nitratos (N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ) y Nitrógeno Amoniacal (N-NH <sub>3</sub> )	mg/L	-	Análisis y reporte
Nitrógeno Total (N)	mg/L	-	10
Carbamatos	mg/L	0,1	-
Cianuro Total (CN <sup>-</sup> )	mg/L	1	1
Cloruros (Cl <sup>-</sup> )	mg/L	-	1200
Fluoruros (F <sup>-</sup> )	mg/L	-	Análisis y reporte
Sulfatos (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> <sup>-</sup>	mg/L		300
Sulfuros (S <sub>2</sub> <sup>-</sup> )	mg/L	1	1
Arsénico (As)	mg/L	0,5	0,1
Bario (Ba)	mg/L	5	Análisis y reporte
Cadmio (Cd)	mg/L	0,1	0,1
Zinc (Zn)	mg/L	-	3
Cobre (Cu)	mg/L	3	1
Cromo (Cr)	mg/L	0,5	1
Hiero (Fe)	mg/L		3
Mercurio (Hg)	mg/L	0,02	0,01
Níquel (Ni)	mg/L	2	0,5
Plata (Ag)	mg/L	0,5	Análisis y reporte
Plomo (Pb)	mg/L	0,5	0,2
Selenio (Se)	mg/L	0,5	0,2
Vanadio (V)	mg/L	-	1
Acidez Total	mg/L CaCO <sub>3</sub>	-	Análisis y reporte
Dureza Cálcica	mg/L CaCO <sub>3</sub>	-	Análisis y reporte
Dureza Total	mg/L CaCO <sub>3</sub>	-	Análisis y reporte
Alcalinidad Total	mg/L CaCO <sub>3</sub>	-	Análisis y reporte
Color real	m <sup>-1</sup>	-	Análisis y reporte

Fuente: elaboración propia. COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO. Decreto 1594 (26, junio, 1984) Por el cual se reglamenta parcialmente el [Título I de la Ley 9 de 1979], así como el [Capítulo II del Título VI -Parte III- Libro II y el Título III de la Parte III -Libro I- del Decreto Ley 2811 de 1974] en cuanto a usos del agua y residuos líquidos. Bogotá: El Ministerio. p. 19-21. COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO. Resolución 0631 (17, marzo, 2015). Por el cual se establece los parámetros y valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado y se dictan otras disposiciones. Bogotá: El ministerio, 2015.p 12-13

Para la matriz de selección que se desarrolla en el capítulo 5, se hace uso del Decreto 1594 de 1984 y la Resolución 0631 del 2015. Esto con el fin de garantizar que tanto el tratamiento convencional como el tratamiento de láminas filtrantes

cumplen con las especificaciones de la norma, para lo cual se realizaran pruebas fisicoquímicas a las aguas obtenidas a la salida de cada tratamiento.

Los parámetros que se toman como referencia son: Conductividad, pH, Oxígeno disuelto, DQO, DBO, Grasas y aceites, Fenoles, Cloruros, Sulfatos, Sodio total, Plomo total, Cromo total, Hierro total, Sólidos suspendidos totales, Hidrocarburos totales, Níquel, Temperatura. Se manejan estos parámetros debido a que estos son los parámetros base que se llevan a cabo en las empresas de tratamiento convencional y tratamiento de láminas filtrantes.

### 3. TRATAMIENTOS DE AGUAS Y RESIDUOS PROCEDENTES DE LA PERFORACIÓN

En este capítulo se mencionan y explican los diferentes tratamientos para el manejo de las aguas y residuos procedentes de la perforación que se desean estudiar en el proyecto. En donde en primer lugar se describe el tratamiento que usualmente se utiliza, el cual se conocerá en este capítulo como el “Tratamiento convencional”. También se hará la descripción del tratamiento de Láminas filtrantes, el cual es realizado por terceros, para posteriormente poder hacer una comparación entre ambos procedimientos según: el cumplimiento de la norma para cada tratamiento, la eficiencia, los costos y tipos de fluidos a tratar.

#### 3.1 TRATAMIENTO CONVENCIONAL

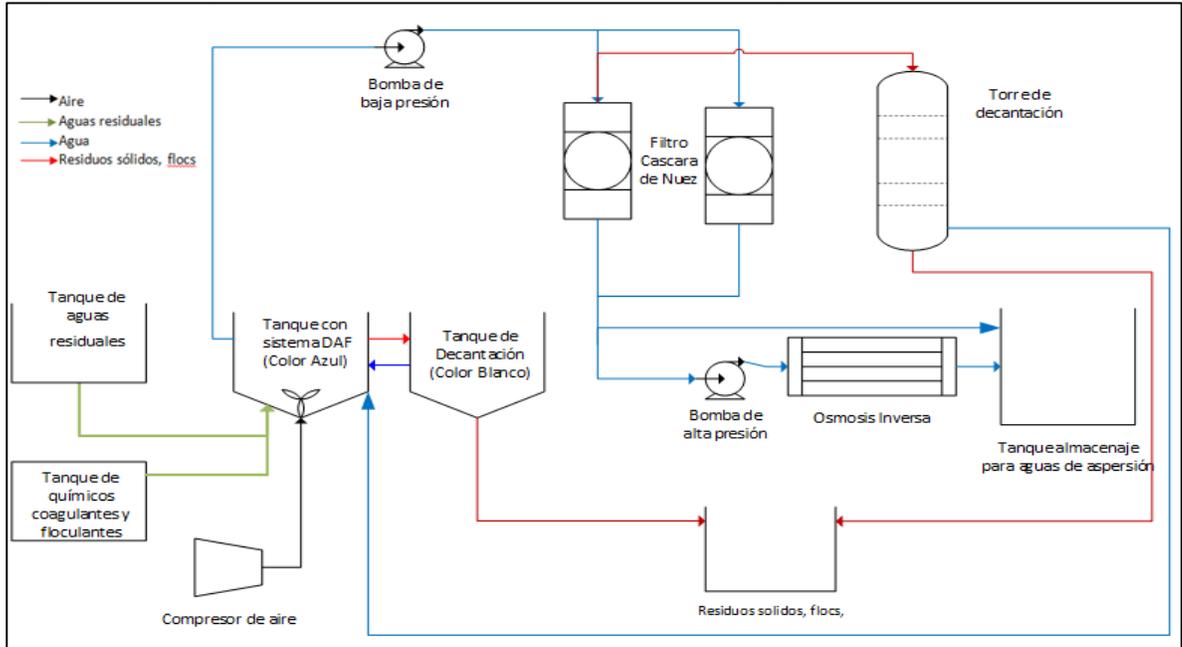
Este tratamiento se caracteriza principalmente por utilizar medios fisicoquímicos para llevar a cabo la separación de las fases, en este caso agua y aceite de un flujo de agua que contiene hidrocarburos y otros contaminantes, proveniente de la perforación de los pozos. Este tratamiento suele utilizarse en la mayoría de las compañías, dado a que presenta resultados óptimos en la entrega de los fluidos.

**3.1.1 Tratamiento de aguas.** El tratamiento de las aguas se realiza en la unidad de tratamiento de Aguas (UTA), el cual se observa en la Figura 8.

El agua residual proveniente de la perforación de los pozos de Equión, es almacenada en piscinas aisladas herméticamente dependiendo de la conductividad; si esta es mayor a 5000  $\mu\text{s}/\text{cm}$  se clasifica como aguas de alta conductividad, de lo contrario se clasifican como aguas de baja conductividad.

El tratamiento consiste en mezclar previamente las aguas con coagulantes y floculantes antes de entrar un tanque equipado con el sistema DAF, el cual es un sistema de aireación que separa las fases sólido - líquido. En el tanque se realiza una separación gravitacional donde los lodos se acumulan en el fondo, mientras que las grasas ascienden a la superficie por la acción antiemulsiva de la aireación y la acción de arrastre de las microburbujas de aire. Las grasas son barridas de la superficie hacia un bolsillo lateral que luego es transportado al tanque de decantación. En la Figura 9, se observa el tanque de tratamiento de color azul y el tanque de decantación de color blanco.

**Figura 8.** Diagrama de la unidad de tratamientos de agua.



Fuente: elaboración propia.

Como se ilustra en la Figura 8, las aguas entran en un filtro de cáscara de nuez a una presión de 50 a 60 psi para la remoción de residuos. El equipo de filtración de cascara de nuez está diseñado para trabajar en dos ciclos operacionales, el primero es de filtración, cuya función principal consiste en remover el contenido de sólidos y aceites remanentes mediante filtros de lecho de cascara de nuez; y el segundo proceso es el de retrolavado, en el cual se realiza la limpieza del lecho al invertir el flujo, el agua de limpieza se lleva a una torre de decantación y se recircula al tanque de tratamiento. En el proceso se tienen dos equipos de filtración para mantener la continuidad del tratamiento durante los ciclos de retrolavado.

**Figura 9.** Unidad de tratamiento de aguas.



Fuente: Equión Energía Limited.

En la Figura 9 se observan los dos filtros de cáscara de nuez (numeradas con un 3) situados al lado izquierdo del tanque de tratamiento de color azul (numerado con un 2), además la torre de decantación de color blanco (numerada con 1).

Dependiendo de las características del agua resultante, estas pasan al equipo de osmosis inversa. El equipo de osmosis inversa se utiliza para retirar los iones que generan en el agua alta conductividad, alcalinidad y/o salinidad por medio de una membrana semi-permeable. Hay que tener en cuenta que el agua de entrada debe tener los parámetros mostrados en la tabla 2 para garantizar el óptimo funcionamiento de la membrana.

**Tabla 2.** Parámetros del agua de entrada para la osmosis inversa.

Temperatura del Fluido Máxima	35 °C
Temperatura del Fluido Mínima	4 °C
Salinidad Máxima (TDS)	10.000 ppm como NaCl
Solidos suspendidos totales (TSS) Máximo	10 ppm
Grasas /Aceites Máximos	0,1 ppm
Cloro Residual Máximo	0,1 ppm
Hierro Total Máximo	4 ppm
Ph	Entre 4 y 9
H2S Máximo	0,1 ppm
Calcio Máximo	10 ppm
Bacterias	Ausente
Máximo TOC (carbono Organico Total)	3 ppm

Fuente: Equión Energía Limited.

El agua resultante de este procedimiento debe cumplir con los parámetros fisicoquímicos expuestos en el decreto 1594 de 1984.

Por otra parte, los residuos de grasas y lodos generados durante las operaciones del tratamiento anterior son almacenados en un tanque de decantación (ver Figura 9, tanque numerado con 1) donde se deshidratan y se obtienen aguas que se reintegran al proceso en el tanque con sistema DAF (ver Figura 9, numerado con 2) y los flocs resultantes se caracterizan y envían a desorción térmica. Finalmente, los sólidos contaminados con hidrocarburos pasan a un proceso de biorremediación.

**3.1.2 Tratamiento de residuos aceitosos** El tratamiento de residuos aceitosos se realiza para desechos de perforación base aceite.

**3.1.2.1 Unidad de Tratamiento de Desorción Térmica (UDT)**

La desorción es un proceso de tratamiento térmico que modifica ciertas características de los sólidos que han sido impregnados con hidrocarburos convirtiéndolos en sólidos con propiedades inertes, los cuales pueden ser reintegrados más fácil al medio. Este tratamiento ayuda a recuperar el recurso suelo, previniendo la lixiviación y evitando la contaminación de los cuerpos de agua, además de permitir la recuperación y reutilización de los hidrocarburos extraídos de los sólidos.

La Figura 10 ilustra la Unidad de Desorción Térmica con la cual cuenta la compañía de tratamiento convencional. La UDT cuenta con cuatro sistemas (ver figura 11), los cuales se explican a continuación:

- Sistema de vaporización.
- Sistema de enfriamiento.
- Sistema de condensación.
- Sistema de control.

**Figura 10.** Unidad de desorción térmica de la compañía de tratamiento convencional.



Fuente. Equión Energía Limited. Solids control waste Guidebook.2008 p30.

- **SISTEMA DE VAPORIZACIÓN (HORNO):** En la tolva se descargan los residuos que son transferidos por medio de un tornillo sinfín al tambor rotatorio que es calentado previamente de forma indirecta usando dos quemadores. En el tambor rotatorio se produce calor de forma indirecta usando dos quemadores, a temperatura superiores de 550°C a fin de que los contaminantes con punto de

ebullición, tales como los compuestos Orgánicos Volátiles (VOCs) y los Metales Volátiles, como el Mercurio (Hg) se conviertan en gases y, por consiguiente, se separen de la tierra. La tierra descontaminada producto de este proceso es reutilizada en procesos de Bioremediación y Fitoremediación que son explicados en el numeral 3.1.2.2.<sup>29</sup>

- **SISTEMA DE ENFRIAMIENTO:** Para la condensación de los gases, es necesario regular la temperatura del sistema. Por lo que la unidad dispone de una torre de enfriamiento, responsable de regular las altas temperaturas de los fluidos por medio de los intercambiadores de temperatura. Estos fluidos son conducidos por bombas a través de ductos en el interior de los sistemas de condensación.<sup>30</sup>
- **SISTEMA DE CONDENSACION:** Los vapores succionados por la bomba de vacío desde la campana de vapores, son obligados a pasar por el tanque de condensación de aceite, donde los gases son condensados por el sistema de aspersion, así se capta las partículas liquidas aceitosas del vapor entrante, que ya precipitado es después conducido al tanque de recuperación de aceite. Los vapores restantes continúan succionados por la línea siguiente en la cual se condensa el agua de la misma forma que el aceite. Los gases restantes del fluido de vapores iniciales, que no fueron retenidos en el sistema pasan por tubería a la cámara de combustión, y de esta manera son reutilizados por los quemadores que garantizan la temperatura del tambor rotatorio. Los fluidos condensados pasan por los intercambiadores de placas para regular la temperatura de tal forma que puedan ser almacenados. Con este proceso se obtiene la recuperación y reutilización del agua y el aceite.<sup>31</sup>
- **SISTEMA DE CONTROL:** La operación de la UDT es controlada, monitoreada y censada en el tablero eléctrico del cuarto de control, módulo conectado físicamente a los diferentes equipos descritos anteriormente. Para el monitoreo y verificación de los estándares, se dispone un cuarto para los servicios de laboratorio, encargado de monitorear la calidad de los residuos, con el fin de asegurar el cumplimiento de la Norma de Louisiana 29B y la Resolución 4741 del 2005. Las muestras de laboratorio están supervisadas por el IDEAM, lo que da veracidad al cumplimiento de las Normas.<sup>32</sup>

---

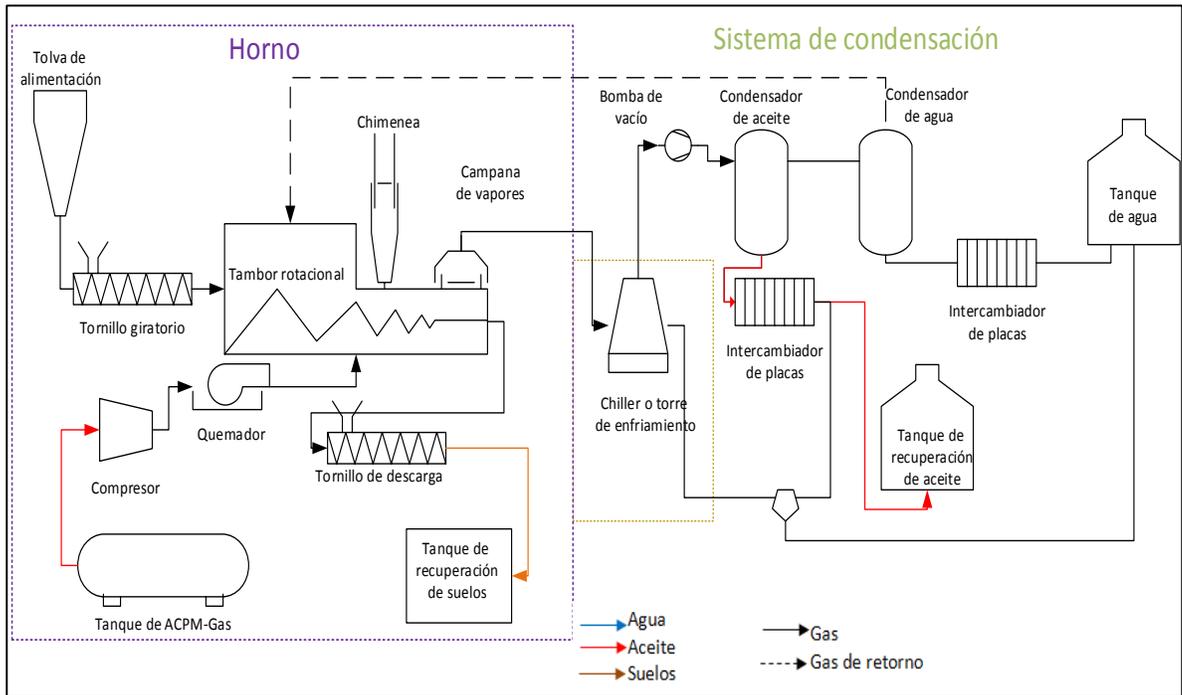
<sup>29</sup> COLOMBIA. AUTORIDAD NACIONAL DE LICENCIAS AMBIENTALES. Certificación 0079-16 (06 mayo, 2016. Por la cual se certifica que son acreditables algunos elementos y equipos de la solicitud de exclusión sobre las ventas IVA, presentada por la Empresa Tecnología Ecológica de Oriente, y se toman otras determinaciones. Bogota: ANLA, 2016. p.9

<sup>30</sup> Ibid.,p.9

<sup>31</sup> Ibid.,p.9

<sup>32</sup> Ibid., p.9

**Figura 11.** Diagrama de procesos de los sistemas de la Unidad de Desorción Térmica.



Fuente: elaboración propia.

**3.1.2.2 Biorremediación:** De acuerdo con la Environmental Protection Agency (EPA), la Biorremediación es un tratamiento natural que involucra el uso de microorganismos que degradan o alteran las moléculas orgánicas transformándolas en moléculas más pequeñas y no tóxicas. El objetivo de la Biorremediación es acelerar los procesos naturales de descomposición por medio del control de la temperatura, el pH, contenido de humedad y los parámetros nutricionales.<sup>33</sup>

La Biorremediación es utilizada para el tratamiento de residuos sólidos que contienen un volumen de 30% de aceite. No es práctico para el tratamiento de los cortes OBM ya que tarda varias semanas en realizar la degradación de los hidrocarburos. Los cortes de perforación OBM son tratados en la UDT.

## 3.2 TRATAMIENTO ALTERNATIVO DE LÁMINAS FILTRANTES

Al igual que el tratamiento convencional, la finalidad de este tratamiento es lograr separar el aceite y otros contaminantes del agua, garantizando su purificación.

<sup>33</sup> LESTO, A. and KUSUMO, P. Bioremediation for Wastesolid and Wastewater at Drilling Waste Management. Nusa Dua, Bali, Indonesia: Society of Petroleum Engineers, SPE-176300. 2015. p. 2

Este método puede llegar a ser efectivo siempre y cuando el contenido de sólidos en el fluido sea menor al 3%, puesto que contenidos de sólidos mayores a este sobresaturan el medio filtrante y obstruyen su correcto funcionamiento. Además, este a pesar de que logra retirar el aceite del agua, no puede recuperarlo, tal cual como lo hace el tratamiento convencional.

**3.2.1 Fitorremediación:** Es una eco-tecnología basada en la capacidad de algunas plantas para tolerar, absorber, acumular y degradar compuestos contaminantes de los suelos o aguas; como metales, pesticidas, solventes, explosivos, hidrocarburos entre otros (Ver Figura 12). Los métodos de Fitorremediación según la EPA<sup>34</sup> son:

**Figura 12.** Plantas en proceso de Fitorremediación.



Fuente: Equión Energía Limited.

- **Fitoextracción o fitoacumulación:** se refiere a la captación de los contaminantes metálicos en el suelo por medio de las raíces de las plantas llamadas hiperacumuladores.
- **Rizofiltración:** se refiere a la absorción de los contaminantes alrededor de la zona de la raíz. Las plantas se cultivan en invernaderos con sus raíces sumergidas en agua en vez de tierra; cuando ya se ha desarrollado el sistema de raíces, se sustituye el agua de alimentación por el agua contaminada. Las raíces absorben los contaminantes hasta que la raíz se sature. Luego se cosechan las plantas y se incineran.

---

<sup>34</sup> Environmental Protection Agency. Phytoremediation resource guide. Washington, DC: 1999. p.11-12

- **Fitoestabilización:** se utilizan ciertas especies de plantas para inmovilizar contaminantes del suelo y aguas subterráneas a través de la absorción y acumulación por las raíces, o precipitación dentro de la zona de la raíz. Este proceso reduce la movilidad del contaminante y evita la migración a las aguas subterráneas o al aire. Esta técnica se utiliza para una cubierta vegetal en sitios con altas concentraciones de metales en suelos superficiales.
- **Fitodegradación:** es la descomposición de contaminantes absorbidos por las plantas a través de procesos metabólicos dentro de la planta, o la descomposición de contaminantes externos a la planta a través del efecto de enzimas producidos por las plantas. Los contaminantes se degradan, se incorporan a los tejidos vegetales y se usan como nutrientes.
- **Rizodegradación:** también llamada biodegradación mejorada de la rizosfera (zona de influencia de la raíz), es la descomposición de contaminantes en el suelo a través de la actividad microbiana que se potencia por la presencia de la rizosfera y es un proceso mucho más lento que la fitodegradación. Los microorganismos (levadura, hongos o bacterias) consumen y digieren sustancias orgánicas para la nutrición y la energía. Las sustancias naturales liberadas por las raíces de las plantas (azúcares, alcoholes y ácidos) contienen carbono orgánico que proporciona alimento a los microorganismos del suelo y los nutrientes adicionales aumentan su actividad. La biodegradación también se ve favorecida por la forma en que las plantas aflojan el suelo y transportan agua a la zona.
- **Fitovolatilización:** es la captación y transpiración de un contaminante por medio de una planta, donde los contaminantes pasan a través de las plantas hacia las hojas y se volatilizan a la atmósfera en concentración relativamente bajas.

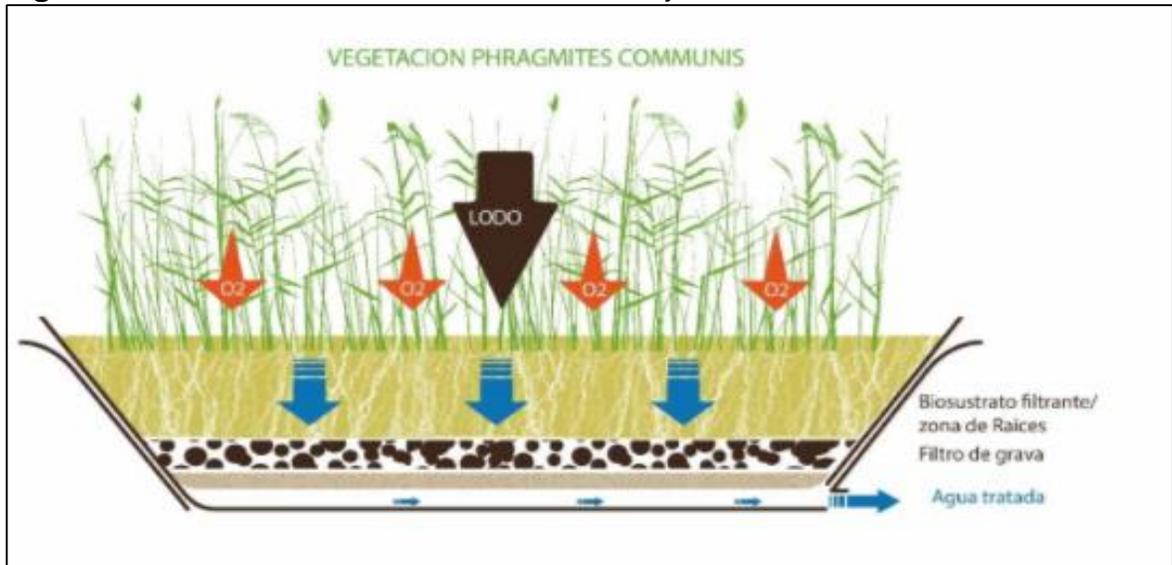
**3.2.2 Láminas filtrantes.** Es un método de fitorremediación diseñado para aprovechar las funciones naturales de la vegetación, los suelos y los microorganismos asociados para el tratamiento de las aguas residuales en un entorno controlado, además es considerado una técnica económica y visualmente agradable.

Hay dos tipos de sistemas de láminas filtrantes, uno de flujo vertical y otro de flujo horizontal.

En el sistema de láminas filtrantes de flujo vertical (SLFFV) este es alimentado por la parte superior. En este el fluido a tratar se va filtrando por la rizosfera (suelo influenciado por la acción de las raíces) y se recolecta en una tubería perforada que lo guía a un tratamiento posterior. Dentro del SLFFV se desarrollan dos

procesos, primero la deshidratación del lodo por medio de la evaporación y transpiración que se genera en la rizosfera; y el segundo proceso es la mineralización de los lodos, que consiste en la transformación de los sólidos a una sustancia seca por medio de microorganismos.<sup>35</sup> En la Figura 13 se observa el sistema de láminas filtrantes de flujo vertical.

**Figura 13.** Sistema de láminas filtrantes de flujo vertical.

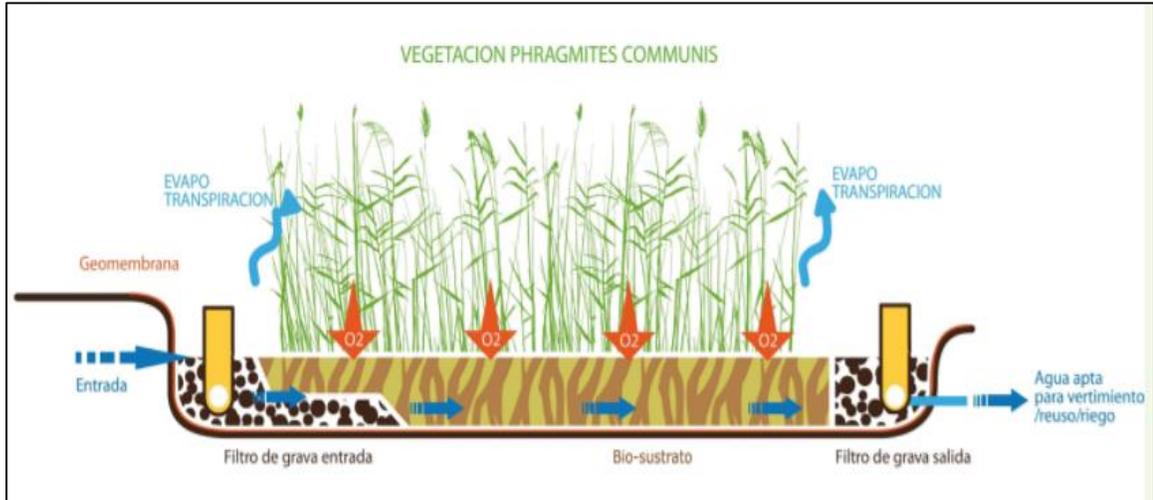


Fuente: Láminas Filtrantes de flujo vertical. [En Línea] [Citado 20 de marzo del 2018]: Disponible en:< <https://www.biologos.com/web/tecnologia/>>

El sistema de láminas filtrantes de flujo horizontal (SLFFH) consiste en una micro filtración en suelo, donde se realiza la degradación de los contaminantes por medio de microorganismos. Las plantas en estos sistemas se encargan de favorecer el desarrollo de los microorganismos al transportar oxígeno y nutrientes en la rizosfera. A continuación, se ilustra en la Figura 14 el sistema de láminas filtrantes de flujo horizontal.

<sup>35</sup> Láminas Filtrantes de flujo vertical y horizontal. [En Línea] [Citado 20 de marzo del 2018]: Disponible en:< <https://www.biologos.com/web/tecnologia/>>

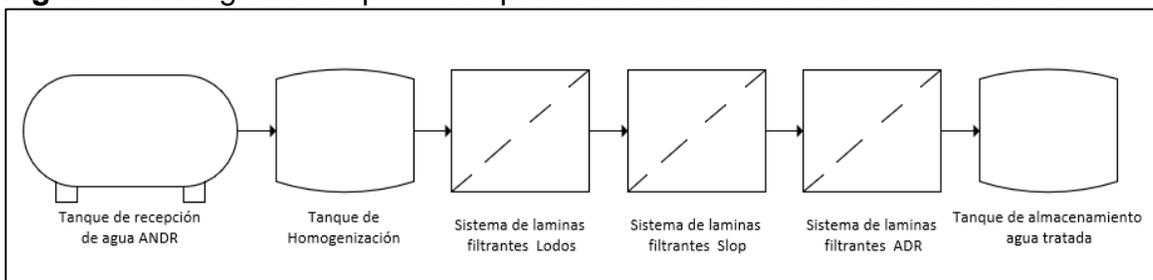
**Figura 14.** Sistema de láminas filtrantes de flujo Horizontal.



Fuente: Láminas Filtrantes de flujo horizontal. [En Línea] [Citado 20 de marzo del 2018]; Disponible en: < <https://www.biologos.com/web/tecnologia/> >

El tratamiento de láminas filtrantes, consiste en un conjunto de sistemas de láminas, el cual está dividido en tres etapas: lodos, slops y ADR. Como se observa en la Figura 15 las aguas son recolectadas en el tanque de recepción, luego son homogenizadas antes de entrar al tratamiento propiamente dicho. El efluente homogenizado entra en la etapa de lodos el cual consiste en un sistema de flujo vertical en el cual se retiran los principales sólidos; luego pasa por las etapas de Slops y ADR, cada una de las etapas consiste en dos sistemas de láminas filtrantes, uno vertical y el otro horizontal en cual se degradan los contaminantes, finalmente se recoge el agua tratada en el tanque de almacenamiento o piscina. Esta agua tratada es reutilizada para el mantenimiento del mismo sistema de láminas filtrantes. Sin embargo para medir su eficiencia se miden los parámetros fisicoquímicos o calidad del agua de acuerdo a la norma (Decreto 1594 del 84).

**Figura 15.** Diagrama de procesos para el tratamiento de láminas filtrantes.



Fuente: elaboración propia.

## 4. PRUEBAS DE LABORATORIO FISICOQUÍMICAS

En este capítulo se enuncian las pruebas de laboratorio a realizar en las aguas y residuos procedentes de la perforación, a su vez se describe el procedimiento para desarrollar cada una de estas pruebas y así comparar los datos obtenidos entre el Tratamiento convencional y el de Láminas Filtrantes.

Las pruebas fueron realizadas por los autores en compañía de la Ing. Catalina Parra en las instalaciones del Instituto de Higiene Ambiental, en donde se analizaron las pruebas de Conductividad, pH, Oxígeno disuelto, Demanda química de oxígeno, Demanda bioquímica de oxígeno, Sólidos suspendidos totales, Concentración de grasas y aceites, Fenoles, Cloruros, Sulfatos, Sodio total, Plomo total, Cromo total, Hierro total, Hidrocarburos totales, Níquel y Temperatura. Como referencia bibliográfica para el procedimiento de las diferentes pruebas se utiliza el libro "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater".<sup>36</sup>

### 4.1 CONDUCTIVIDAD

La conductividad de un fluido es la capacidad que posee de conducir la corriente eléctrica a una temperatura dada.

MÉTODO: Consiste en la medida directa de la conductividad utilizando una celda previamente estandarizada con una solución de Cloruro de potasio (KCl).

PROCEDIMIENTO: Generalmente la medida se realiza a 25°C, en caso contrario se deben realizar las correcciones necesarias para entregar el resultado final de conductividad a la temperatura de 25°C. La conductividad se toma de acuerdo a las instrucciones del medidor utilizado, luego se determina la constante de la celda de la siguiente manera: Primero enjuagar la celda de conductividad con al menos tres porciones de una solución de Cloruro de potasio KCl 0.01 M, segundo ajustar la temperatura de la cuarta porción a 25°C y medir. Si el medidor de conductividad lee resistencia en ohm, se debe medir la resistencia de esta cuarta porción y la temperatura.

La constante de la celda, C, se calcula como:

---

<sup>36</sup> RICE, Eugene, et al. Standard methods for the examination of water and wastewater. 21 ed. Washington, DC: American Public Health Associate. 2005, section 2504

### **Ecuación 1. Cálculo de la constante de la celda C.**

$$C, cm^{-1} = 0,001412 R_{KCl} [1 + 0,019 (T - 25)]$$

Fuente: RICE, Eugene, et al . Standard methods for the examination of water and wastewater. 21 ed. Washington, DC: American Public Health Associate. 2005, section 2504

Donde,

$R_{KCl}$ : Resistencia medida en ohms.

T: Temperatura en °C.

Para medir la conductividad se enjuaga la celda de conductividad con una o más porciones de la muestra a medir y se ubica la celda en la muestra de tal manera que no queden retenidas burbujas de aire. Finalmente se ajusta la temperatura y se mide la resistencia o conductividad de la muestra. Ver figura 18.

## **4.2 TEMPERATURA**

Las lecturas de temperatura se utilizan en el cálculo de diversas formas de alcalinidad, en estudios de saturación y estabilidad con respecto al carbonato de calcio, en el cálculo de la salinidad y en operaciones generales de laboratorio. Las temperaturas elevadas que resultan de las descargas de agua calentada pueden tener un impacto ecológico significativo. Las plantas industriales a menudo requieren datos sobre la temperatura del agua para el uso del proceso o cálculos de transmisión de calor.

MÉTODO: Medida directa de multímetro.

PROCEDIMIENTO: Las mediciones de temperatura se realizan generalmente con un termómetro Celsius de mercurio. Sin embargo, actualmente existen equipos tales como el ph-metro o el medidor de oxígeno disuelto, los cuales dan como resultado adicional la temperatura de la muestra. Ver figura 18.

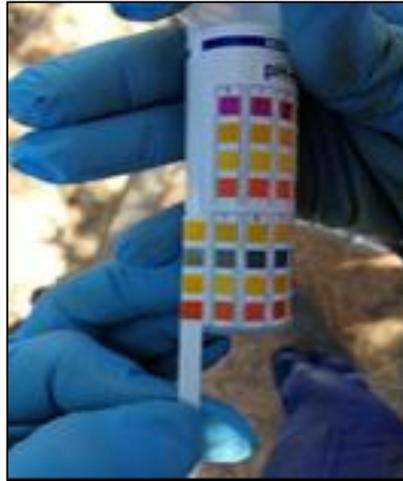
## **4.3 CONCENTRACIÓN IÓNICA DE HIDRÓGENO (pH)**

El pH es la concentración de iones o cationes hidrógeno H<sup>+</sup> que se encuentran presentes en determinada sustancia. La medición del pH del fluido de perforación y mantener un ajuste del pH apropiado, son operaciones indispensables para controlar el fluido de perforación; ya que el comportamiento de la arcilla, la solubilidad de ciertos componentes y la eficacia de los aditivos dependen del pH,

además de la corrosión que puede llegar a ser causada por ácidos y sulfuros.

**MÉTODO:** Existen dos métodos para medir el pH en los fluidos. El primero consiste en el uso de un papel indicador de pH (ver figura 16), el cual tiene una resolución de una unidad de pH y el segundo utiliza un sistema de electrodo de vidrio, un amplificador electrónico y el medidor calibrado en unidades de pH.

**Figura 16.** Papel indicador de Ph



Fuente: elaboración propia.

**PROCEDIMIENTO:** Para el primer método, se toma un papel indicador de pH de 25mm y se sumerge en el fluido durante un periodo de 30 segundos hasta que el papel tome un color uniforme, posteriormente se compara el color obtenido con una escala de colores de pH (desde cero a catorce, en números enteros) y se reporta el valor de pH más cercano en unidades de pH (UpH).

En el segundo método se debe calibrar el medidor con una solución buffer según lo considere el instrumento, luego se procede a poner el electrodo en un recipiente que contiene el fluido a estudiar y se gira el recipiente para lograr mayor contacto entre el fluido y los electrodos, finalmente se retira el electrodo y se toma la lectura de pH que sea constante (Ver figura 18).

#### **4.4 OXÍGENO DISUELTO**

Esta prueba mide los niveles de oxígeno disuelto (OD) en aguas naturales y residuales, los cuales dependen de las actividades físicas, químicas y bioquímicas en el cuerpo de agua que se estudie.

**MÉTODO:** Los electrodos de membrana (ver figura 17) proporcionan un método excelente para el análisis de OD en aguas contaminadas, aguas muy coloreadas y fuertes efluentes de desecho. Se recomiendan para su uso especialmente en condiciones que son desfavorables para el uso del método yodométrico, o cuando esa prueba y sus modificaciones están sujetas a errores graves causados por interferencias.

Los electrodos de membrana sensibles al oxígeno del tipo galvánico se componen de dos electrodos de metal sólido y una membrana que separa la solución de prueba con la muestra. Este instrumento, percibe la “corriente de difusión” la cual es linealmente proporcional a la concentración de oxígeno molecular. La corriente se puede convertir fácilmente en unidades de concentración (por ejemplo, miligramos por litro) mediante una serie de procedimientos de calibración.<sup>37</sup> Para llevar a cabo esta prueba, junto con las pruebas de conductividad, temperatura y ph, se utiliza un equipo multimetro (ver figura 18), el cual varia los electrodos de acuerdo al parámetro que se desee obtener.

**Figura 17.** Electrodo de membrana para leer oxígeno disuelto.



Fuente: elaboración propia.

---

<sup>37</sup> Ibid., section 4500-O 6

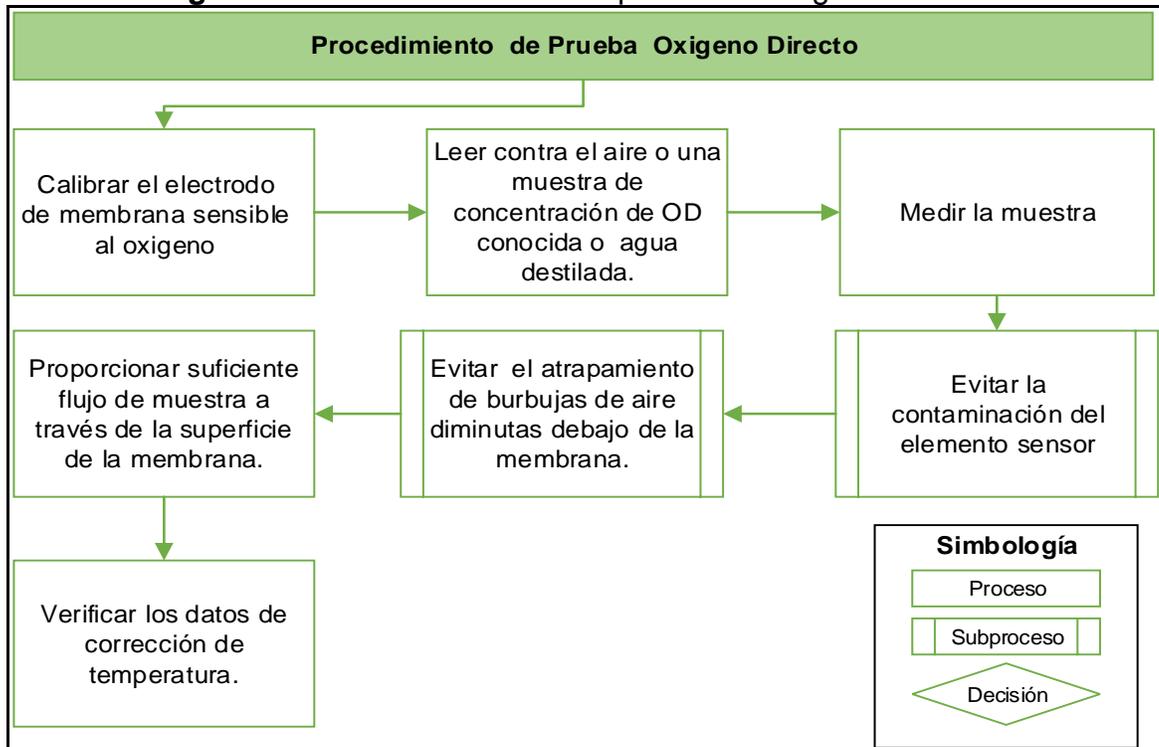
**Figura 18.** Multímetro para leer oxígeno disuelto, ph, conductividad y temperatura.



Fuente: elaboración propia.

PROCEDIMIENTO: Para describir el procedimiento de la prueba de oxígeno disuelto se realiza un diagrama de flujo, tal como se visualiza en la figura 19.

**Figura 19.** Procedimiento de la prueba de oxígeno disuelto.



Fuente: elaboración propia. RICE, Eugene, et al. Standard methods for the examination of water and wastewater. 21 ed. Washington, DC: American Public Health Associate. 2005, section 4500-O 6

#### 4.5 DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXIGENO (DBO)

Tal como su nombre lo menciona esta prueba se usa para medir la cantidad de oxígeno que se consume en la degradación bioquímica de la materia orgánica en un fluido. Algunas veces es nombrada como DBO<sub>5</sub>.

MÉTODO: Incubación.

PROCEDIMIENTO: Se incuba la muestra (o una dilución adecuada de la misma) por 5 días a 20°C, sin luz, ver figura 20. Después se mide la concentración de oxígeno disuelto antes y después de la incubación, en donde el consumo de oxígeno corresponde a la demanda bioquímica de oxígeno.<sup>38</sup>

**Figura 20.** Incubación de la muestra para la prueba de DBO.



Fuente: elaboración propia.

#### 4.6 DEMANDA QUÍMICA DE OXIGENO (DQO)

Esta prueba mide la cantidad de oxígeno que se requiere para lograr oxidar químicamente el material orgánico en el agua, según las condiciones de temperatura y tiempo.

MÉTODO: Se utiliza dicromato de potasio (en exceso) para oxidar la muestra con una cantidad conocida, esto se realiza en un medio ácido y con catalizadores. El remanente de dicromato de potasio es determinado por medio de una titulación con sulfato de amonio ferroso (FAS) y se calcula el material consumido y oxidable en términos de oxígeno equivalente<sup>39</sup>.

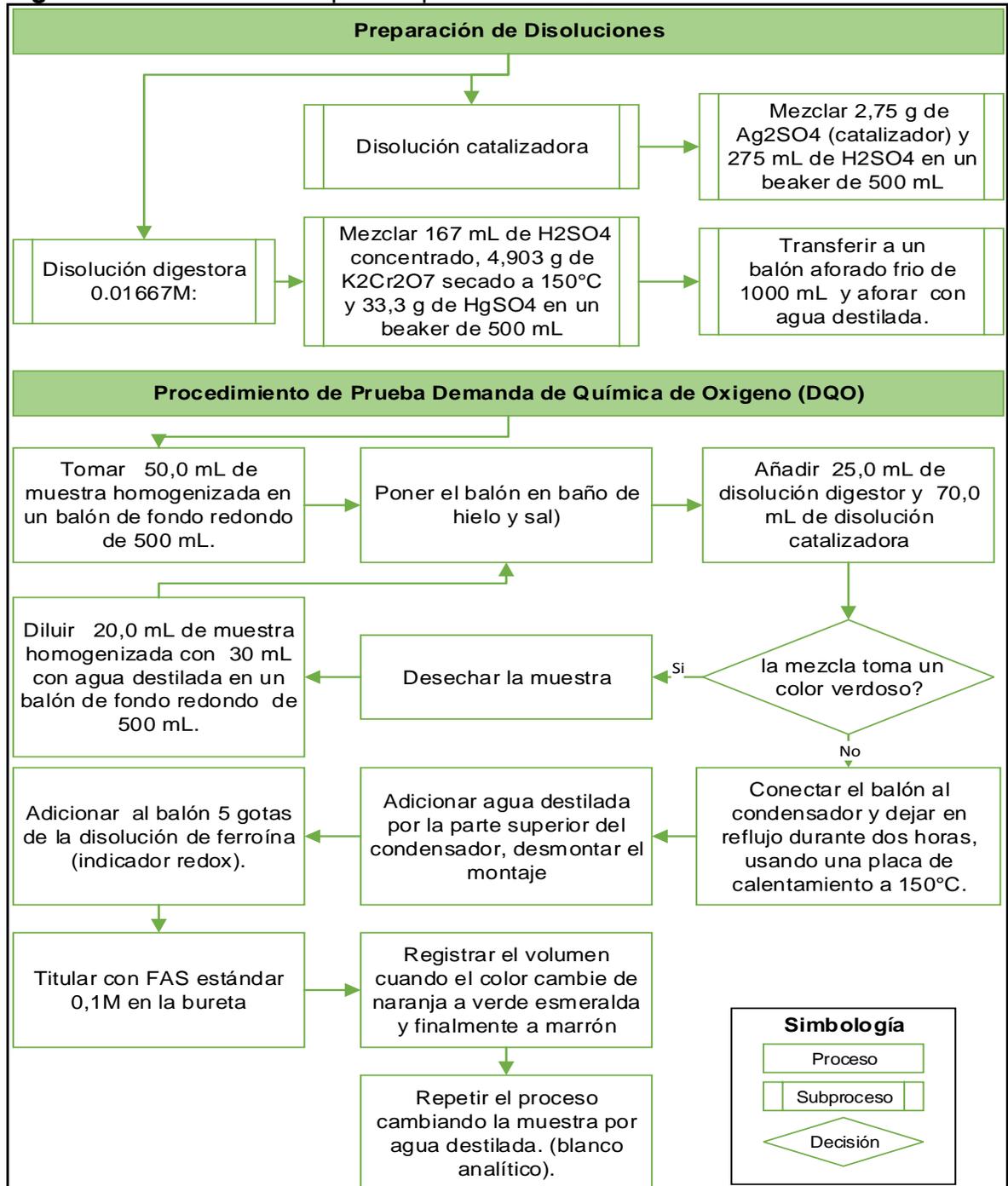
---

<sup>38</sup> Ibid., section 5210

<sup>39</sup> Ibid., section 5220 B

**PROCEDIMIENTO:** A continuación, se presenta el diagrama de flujo para la prueba de demanda química de oxígeno en la figura 21.

**Figura 21.** Procedimiento para la prueba de DQO.



Fuente elaboración propia. RICE, Eugene, et al. Standard methods for the examination of water and wastewater. 21 ed. Washington, DC: American Public Health Associate. 2005, section 2520B

En la figura 22, se observa el montaje del refluo mencionado en la figura 21 y en la figura 23 se evidencia el cambio de color de la muestra después de titular con FAS estándar.

**Figura 22.** Montaje de refluo.



Fuente: elaboración propia.

**Figura 23.** Cambio de color durante la titulación amarillo-verde



Fuente: elaboración propia.

Una vez terminada la prueba, se utiliza la ecuación 2 para el cálculo de la demanda química de oxígeno en mg O<sub>2</sub>/L.

**Ecuación 2.** Ecuación cálculo de demanda química de oxígeno.

$$DQO\left(\frac{mgO_2}{L}\right) = \frac{(A - B) * M * 8000}{Volumen\ de\ la\ muestra}$$

Fuente: RICE, Eugene, et al. Standard methods for the examination of water and wastewater. 21 ed. Washington, DC: American Public Health Associate.2005, Section 2520 B.

Donde,

A: mL FAS usado en el blanco

B: mL FAS usado para la muestra

M: molaridad del FAS

8000 = mili equivalente de oxígeno  $\times$  1000 ml/L.

#### 4.7 SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES

**MÉTODO:** Gravimétrico. Esta prueba se refiere a la cantidad de sólidos que puedan ser filtrados del agua residual, en este caso por un filtro estándar de fibra de vidrio y secado 103-105 °C.<sup>40</sup>

**PROCEDIMIENTO:** La figura 26 describe el procedimiento de sólidos suspendidos totales por medio de un diagrama de flujo. En la figura 24 se muestra el proceso de filtración de la muestra y en la figura 25 la calcinación de la muestra, mencionadas en la figura 26.

**Figura 24.** Proceso de filtración de la muestra



Fuente: elaboración propia.

**Figura 25.** Proceso de calentamiento en la estufa (Calcinación de la muestra)

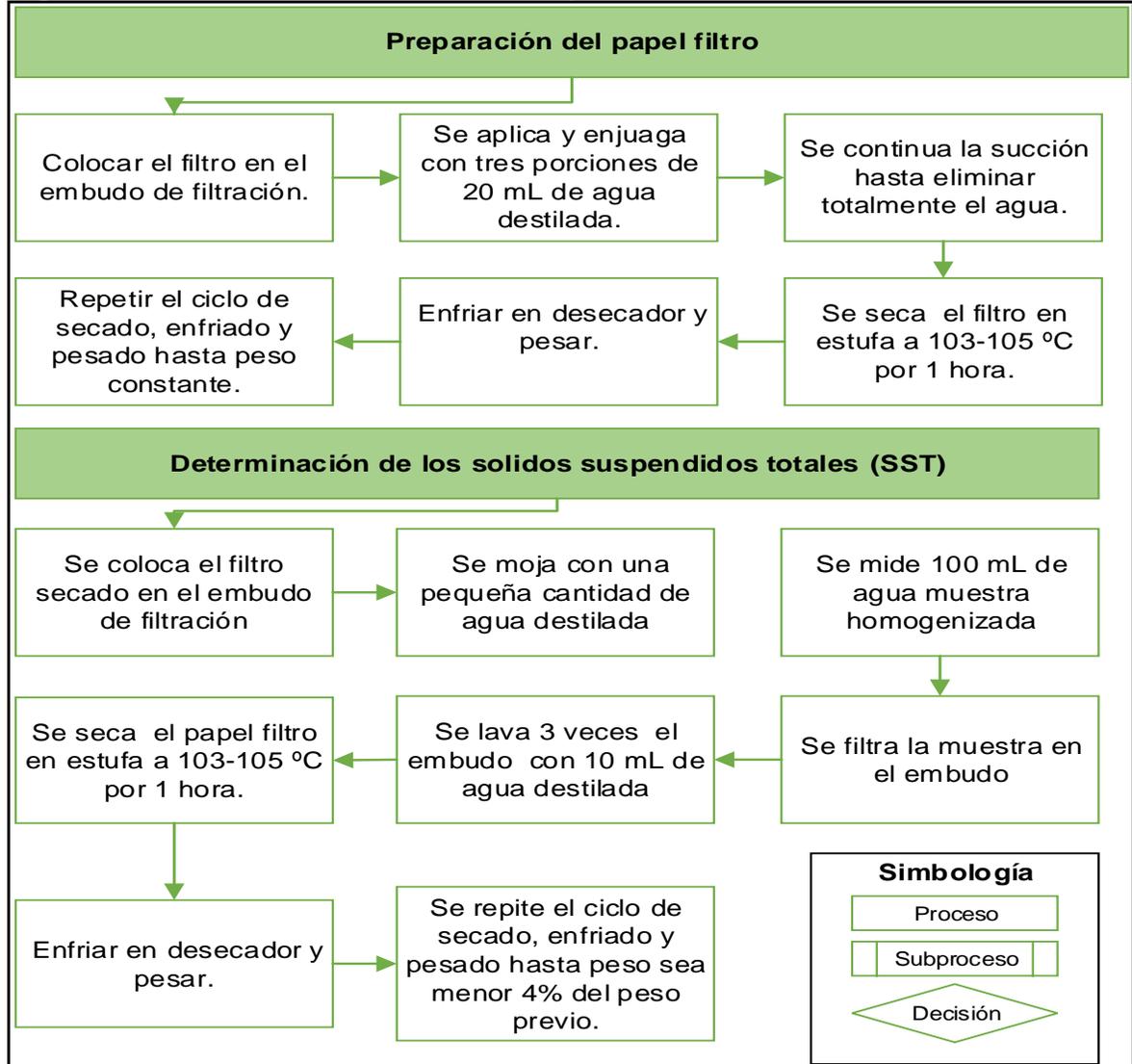


Fuente: elaboración propia.

---

<sup>40</sup> Ibid., section 2540D

**Figura 26.** Procedimiento de solidos suspendidos totales.



Fuente elaboración propia. RICE, Eugene, et al. Standard methods for the examination of water and wastewater. 21 ed. Washington, DC: American Public Health Associate.2005, section 2540D

Los datos obtenidos se reemplazan en la ecuación 3 así:

**Ecuación 3.** Ecuación cálculo de sólidos suspendidos totales.

$$SST, \text{mg/L} = \frac{(P2 - P1) * 1000}{V}$$

Fuente: RICE, Eugene, et al. Standard methods for the examination of water and wastewater. 21 ed. Washington, DC: American Public Health Associate.2005, Section 2540D

Donde,

P2: peso del filtro más el residuo seco a 103-105°C en mg.

P1: peso del filtro preparado en mg.

V: volumen de muestra tomado en mL.

#### 4.8 CONCENTRACIÓN DE GRASAS, ACEITES E HIDROCARBUROS TOTALES

Como aceites y grasas se considera cualquier material recuperado de la muestra ya acidificada, como una sustancia soluble en éter de petróleo y que no se volatiliza durante el ensayo. Incluye además otros materiales extractables por el solvente.<sup>41</sup>

MÉTODO: Los aceites y las grasas presentes en el fluido son separados por filtración de la muestra líquida acidificada. Una vez separados de la solución, se realiza una extracción en un equipo Soxhlet (ver figura 27) en el material retenido en el filtro, utilizando como solvente éter de petróleo. La ganancia de peso que se obtenga en el frasco de extracción luego de evaporado el solvente corresponde al contenido de aceites y grasas presentes en la muestra.<sup>42</sup>

Para determinar los hidrocarburos se utiliza el gel de sílice porque tiene la capacidad de adsorber materiales polares. Si la solución de hidrocarburos y materiales grasos en un disolvente no polar se mezcla con gel de sílice, los ácidos grasos se eliminan selectivamente de la solución. Los materiales no eliminados por adsorción de gel de sílice se designan hidrocarburos mediante esta prueba<sup>43</sup>

**Figura 27.** Equipo Soxhlet.



Fuente: elaboración propia.

---

<sup>41</sup> Ibid., section 5520 A

<sup>42</sup> Ibid., section 5520 D

<sup>43</sup> Ibid., section 5520 F

PROCEDIMIENTO: La figura 28 explica por diagrama de flujo el procedimiento para la prueba de concentración de grasas, aceites e hidrocarburos totales (HT).

Para realizar el cálculo de concentración de grasas, aceites e hidrocarburos totales se utiliza la ecuación 4.

**Ecuación 4.** Ecuación cálculo de concentración de grasas y aceites.

$$\frac{mg}{L} \text{ de grasas y aceites} = \frac{(A - B) \times 100}{M}$$

Fuente: RICE, Eugene, et al. Standard methods for the examination of water and wastewater. 21 ed. Washington, DC: American Public Health Associate.2005, Section 5520D

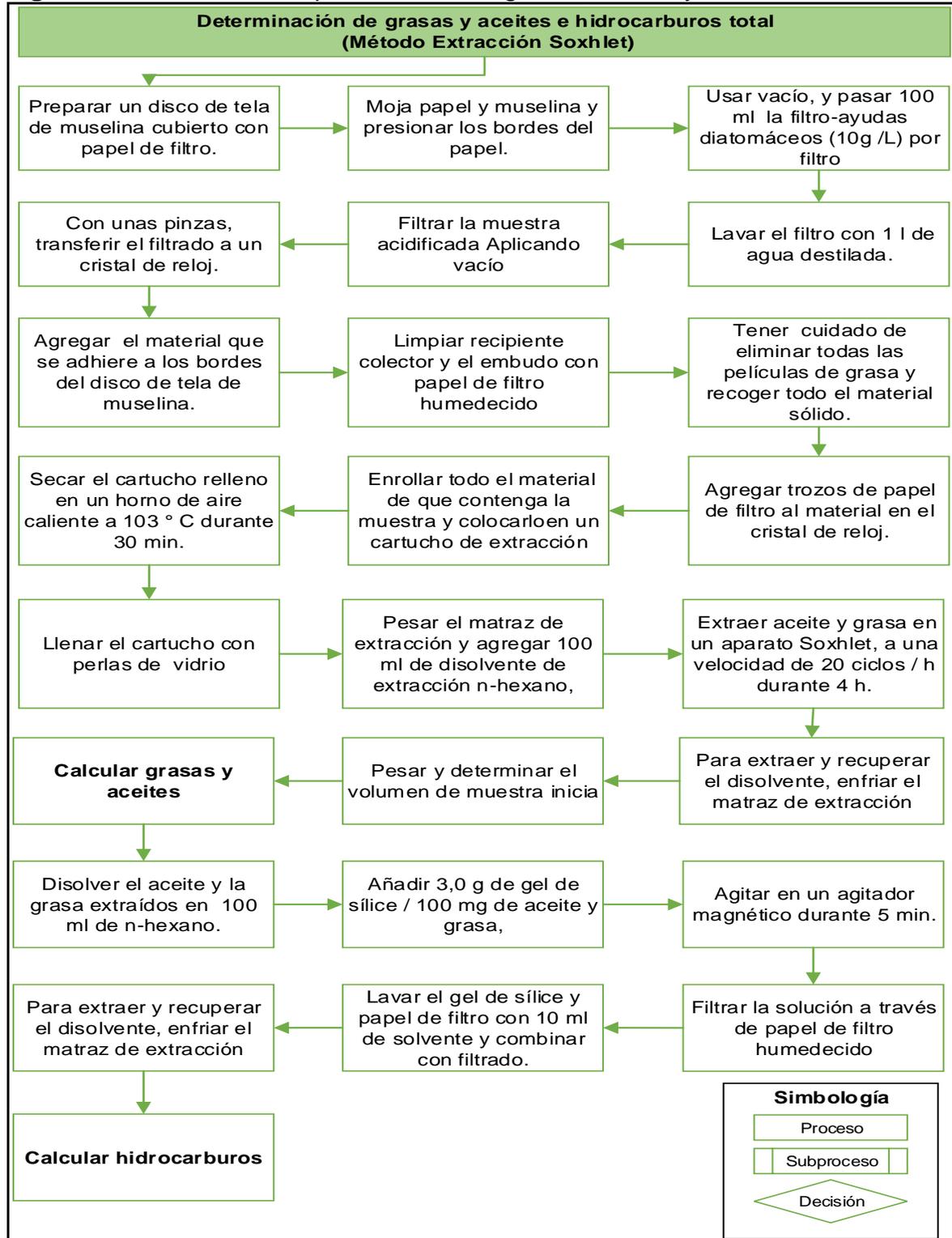
Donde;

A: ganancia total de peso en el matraz.

B: residuo calculado de solvente en el blanco.

M: es el volumen de muestra en mL.

**Figura 28.** Procedimiento para determinar grasas, aceites y HT.



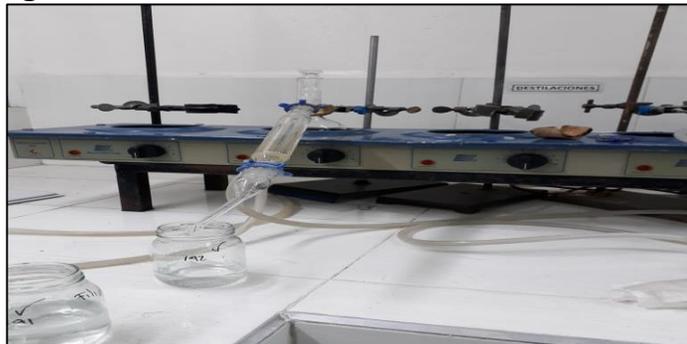
Fuente: elaboración propia. RICE, Eugene, et al. Standard methods for the examination of water and wastewater. 21 ed. Washington, DC: American Public Health Associate.2005, Section 5520D

## 4.9 FENOLES

Los fenoles se presentan como resultado de la polución con residuos industriales y son muy solubles en el agua; cuando se realiza el proceso de cloración de tales aguas se pueden producir cloro-fenoles los cuales representan un problema de olor y sabor.

**MÉTODO:** Método directo Fotométrico (ver figura 30) después de la destilación (ver figura 29). El principio del método consiste en que los compuestos fenólicos destilables al vapor reaccionan con 4-aminoantipirina a pH 7,9 en presencia de ferricianuro de potasio para formar un colorante antipirina coloreado. Este colorante se mantiene en solución acuosa y la absorbancia se mide a 460 nm. Antes de tomar la absorbancia se eliminan o reducen las interferencias al pasar la muestra por un proceso de destilación preliminar.<sup>44</sup>

**Figura 29.** Destilación de la muestra.



Fuente: elaboración propia.

**Figura 30.** Equipo fotométrico.



Fuente: elaboración propia.

---

<sup>44</sup> Ibid., section 5530 p. 984-990

PROCEDIMIENTO: a continuación, se presenta en la figura 31 el diagrama de flujo para la preparación de los reactivos a usar en el método, en la figura 32 el diagrama de flujo para tratar la muestra y por último la figura 33 se muestra el procedimiento de la prueba fenoles.

La ecuación utilizada para determinar concentración de fenoles se presenta a continuación:

**Ecuación 5.** Ecuación cálculo de fenol.

$$fenol \mu g /L = \frac{A * 1000}{B}$$

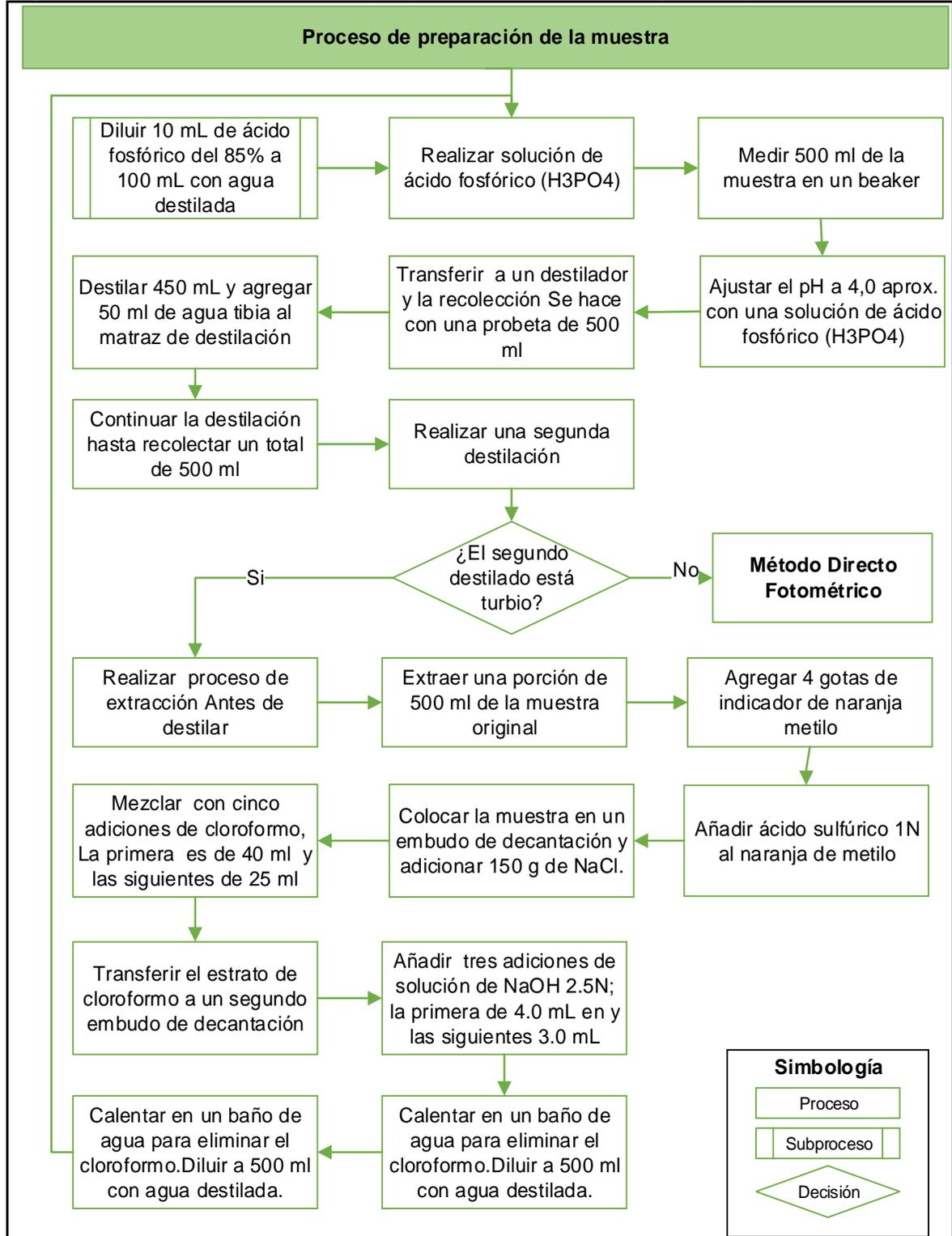
Fuente: RICE, Eugene, et al. Standard methods for the examination of water and wastewater. 21 ed. Washington, DC: American Public Health Associate.2005, Section 5530

Donde,

A: A =  $\mu g$  fenol en la muestra de acuerdo a la curva de calibración

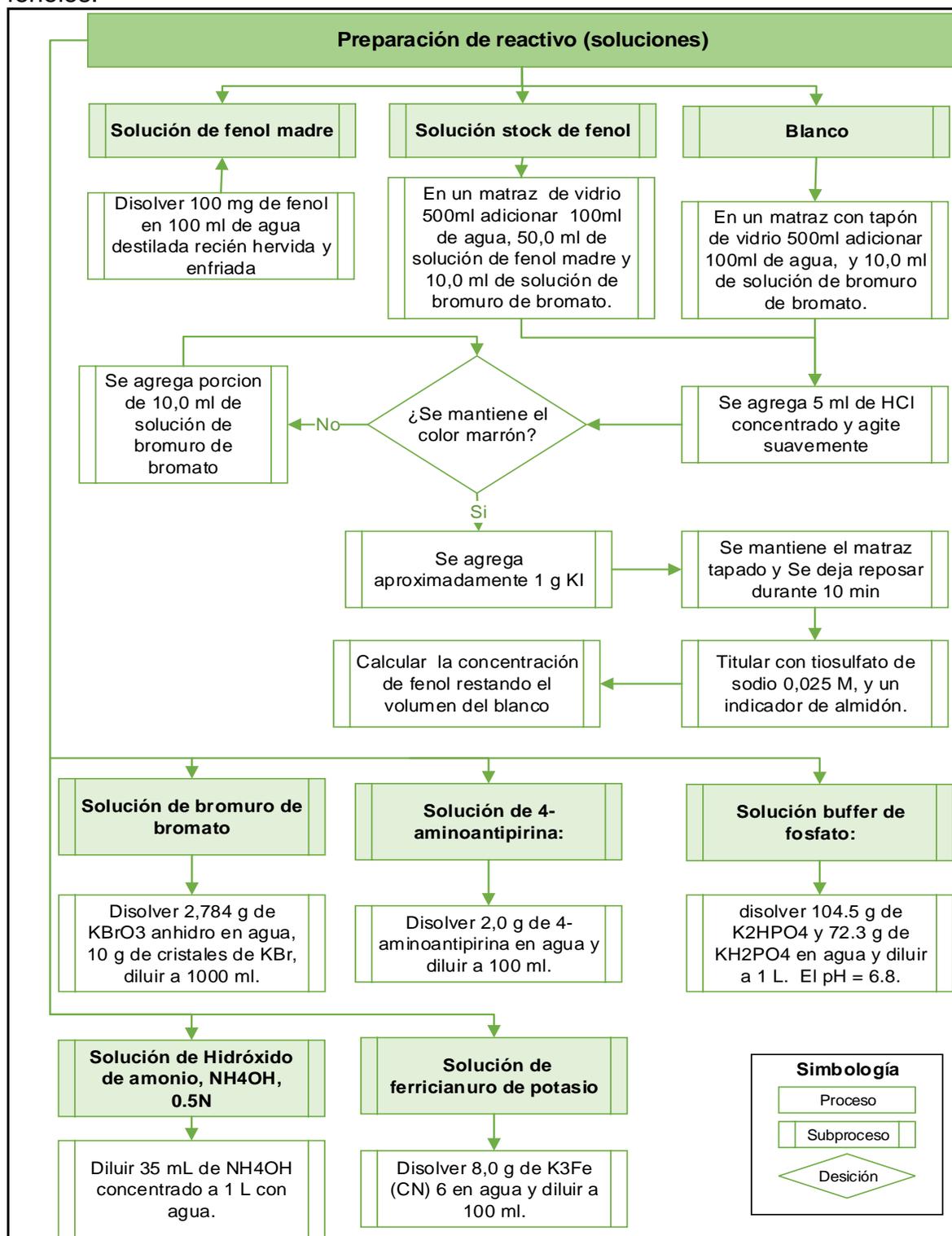
V: volumen de muestra tomado para el ensayo, mL.

**Figura 31.** Procedimiento de la preparación de reactivos para la prueba de fenoles.



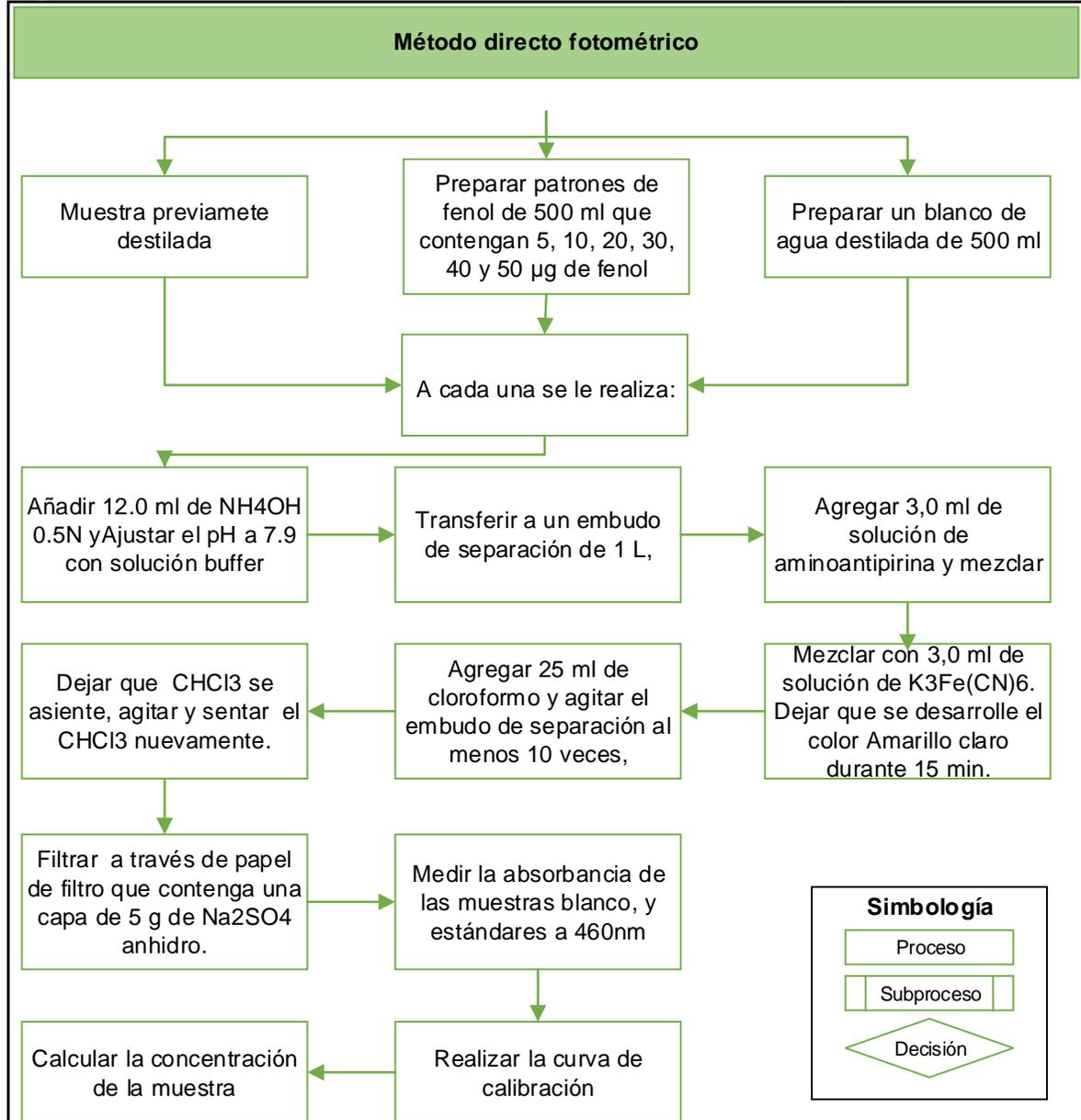
Fuente: elaboración propia. RICE, Eugene, et al. Standard methods for the examination of water and wastewater. 21 ed. Washington, DC: American Public Health Associate.2005, Section 5530

**Figura 32.** Procedimiento de la preparación de la muestra para la prueba de fenoles.



Fuente: elaboración propia. RICE, Eugene, et al. Standard methods for the examination of water and wastewater. 21 ed. Washington, DC: American Public Health Associate.2005, Section 5530

**Figura 33.** Procedimiento del método directo fotométrico para la prueba de fenoles.



Fuente: elaboración propia. RICE, Eugene, et al. Standard methods for the examination of water and wastewater. 21 ed. Washington, DC: American Public Health Associate.2005, Section 5530

#### 4.10 CLORUROS

El cloruro, en forma de ion cloruro (Cl<sup>-</sup>), es uno de los principales aniones inorgánicos en el agua y las aguas residuales. Es importante medir su contenido ya que una alta concentración puede dañar las tuberías y estructuras metálicas, así como las plantas en crecimiento.

**MÉTODO:** Método argento-métrico. El cloruro se determina en una solución neutra o ligeramente alcalina por titulación con nitrato de plata estándar, usando cromato de potasio como indicador del punto final.<sup>45</sup>

**Figura 34.** Titulador titrando.



Fuente: elaboración propia.

**PROCEDIMIENTO:** En la figura 35 se expresa el proceso para la determinación de los cloruros.

La ecuación utilizada para determinar cloruros se presenta a continuación:

**Ecuación 5.** Cálculo de cloruros.

$$\text{Cloruro mg /L} = \frac{(A - B) * N * 35450}{V}$$

Fuente: RICE, Eugene, et al. Standard methods for the examination of water and wastewater. 21 ed. Washington, DC: American Public Health Associate.2005, Section 4500Cl-

Donde,

A: gasto de titulante en la valoración de la muestra, mL.

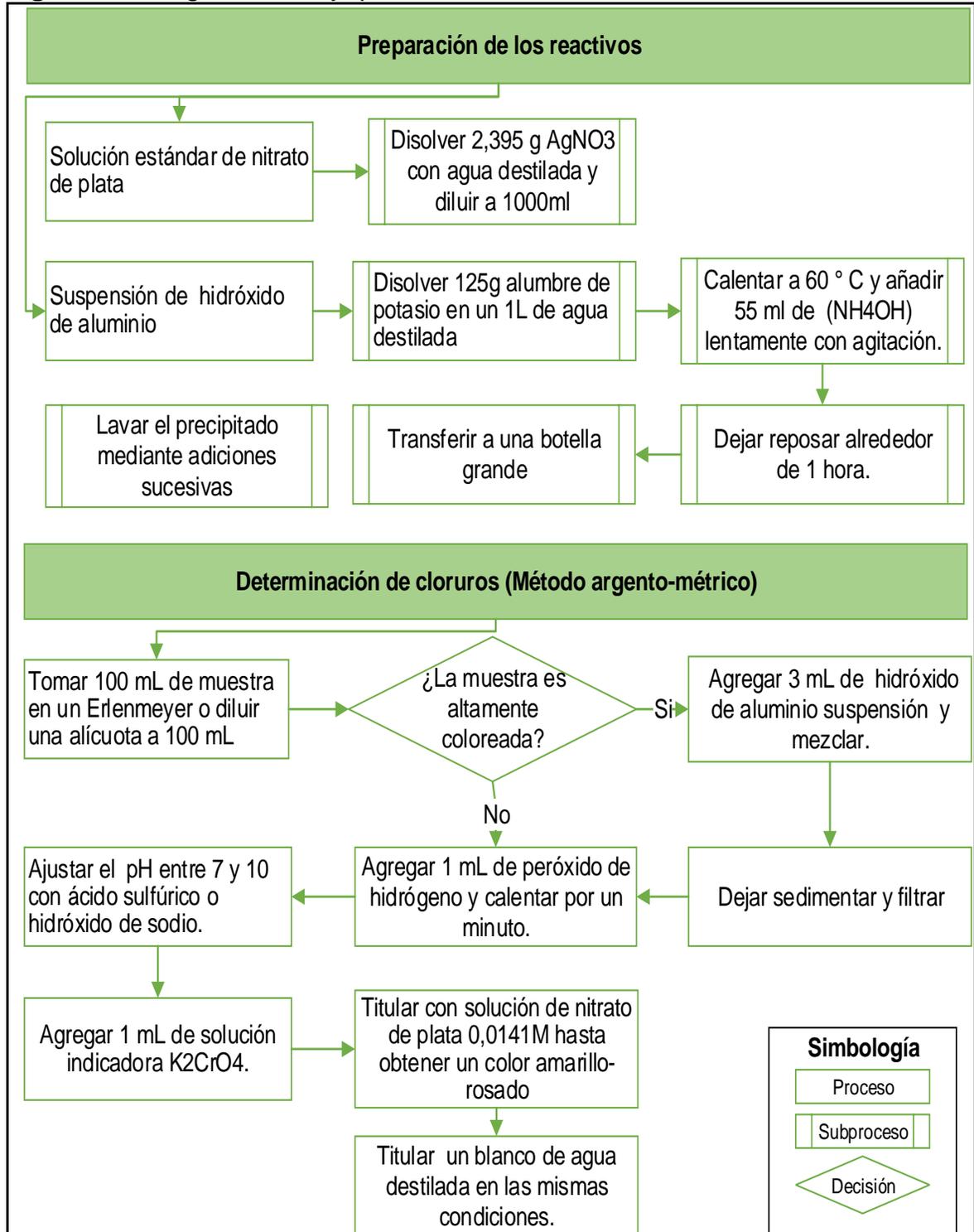
B: gasto de titulante por el blanco, mL.

V: volumen de muestra tomado para el ensayo, mL.

---

<sup>45</sup> Ibid., section 4500Cl-

**Figura 35.** Diagrama de flujo para la determinación de cloruros.



Fuente: elaboración propia. RICE, Eugene, et al. Standard methods for the examination of water and wastewater. 21 ed. Washington, DC: American Public Health Associate.2005, Section 4500Cl-

## 4.11 SULFATOS

El sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) está distribuido en la naturaleza y puede estar presente en aguas naturales en concentraciones que varían de unos pocos a varios miles de miligramos por litro. Los desechos del drenaje de la mina pueden contribuir con grandes cantidades de  $\text{SO}_4^{2-}$  a través de la oxidación de la pirita. El sodio y el sulfato de magnesio ejercen una acción catártica.

**MÉTODO:** Método turbidimétrico (ver figura 36). Los sulfatos se determinan en aguas con concentraciones entre 1 y 40 mg/L. El ion sulfato es precipitado en medio acético utilizando cloruro de bario para formar cristales de sulfato de bario de tamaño uniforme. La absorción de luz producida para la suspensión del sulfato de bario se mide con un fotómetro y la concentración de sulfato es determinada por comparación con la lectura realizada en una curva estándar.<sup>46</sup>

**Figura 36.** Equipo turbidímetro.



Fuente: elaboración propia.

**PROCEDIMIENTO:** A continuación, se adjunta el diagrama de flujo para la prueba de sulfatos en la figura 37. La medida de ion sulfatos se halla por medio de la ecuación 6 y 7, según la concentración que contenga la muestra, así:

**Ecuación 6.** Calculo de sulfatos para concentraciones mayores a 10 mg/L.

$$\text{Sulfato, mg } \text{SO}_4/\text{L} = \frac{C * 1000}{V}$$

Fuente: RICE, Eugene, et al. Standard methods for the examination of water and wastewater. 21 ed. Washington, DC: American Public Health Associate.2005, Section 4500- $\text{SO}_4^{2-}$

<sup>46</sup> Ibid., section 4500- $\text{SO}_4^{2-}$

Donde,

C: mg/L de la muestra, determinado con la curva de calibración, usando como dato de absorbancia: (Abs.muestra - Abs. blanco de muestra).

V: mL de muestra tomados para la determinación.

**Ecuación 7.** Cálculo de sulfatos para Concentraciones menores a 10mg/L.

$$\text{Sulfato, mg SO}_4\text{/L} = \frac{(M - B) * 1000}{V}$$

Fuente: RICE, Eugene, et al. Standard methods for the examination of water and wastewater. 21 ed. Washington, DC: American Public Health Associate.2005, Section 4500-SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>

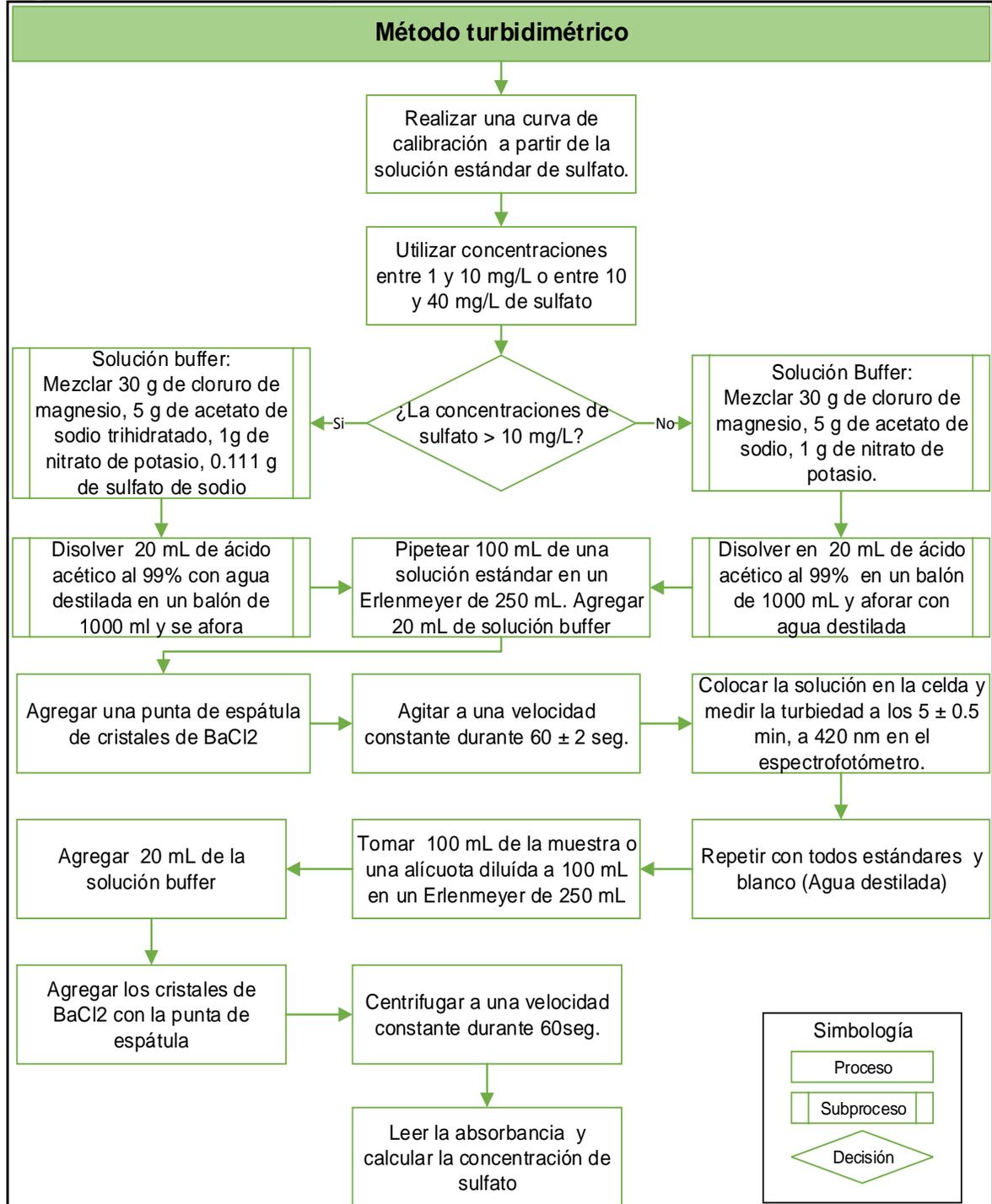
Donde,

M: mg/L aparente de la muestra leída de la curva de calibración.

B: mg/L del blanco leído de la curva de calibración.

V: mL de muestra tomados para la determinación.

**Figura 37.** Procedimiento para determinar sulfatos.



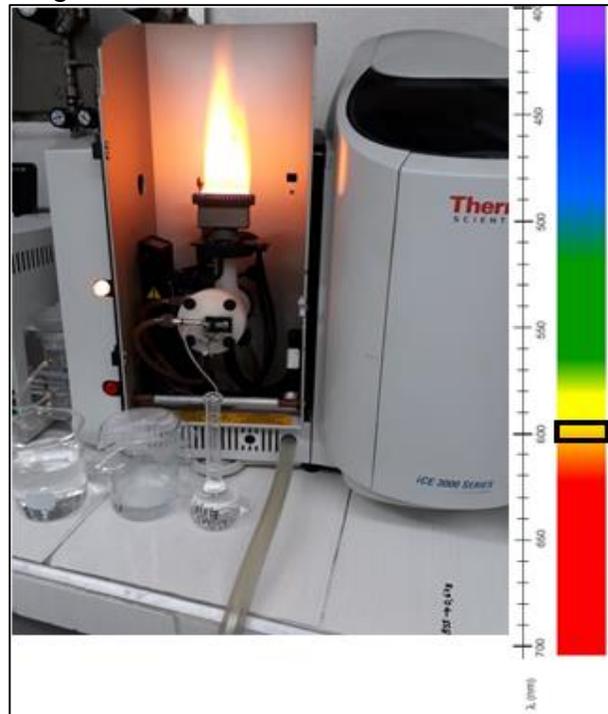
Fuente: elaboración propia. RICE, Eugene, et al. Standard methods for the examination of water and wastewater. 21 ed. Washington, DC: American Public Health Associate.2005, Section 4500-SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>

## 4.12 SODIO TOTAL

EL sodio (Na) es un metal alcalino; tiene un número atómico de 11 y un peso atómico de 22.99. El sodio se encuentra en la corteza terrestre aproximadamente en un 2.5%; en suelos entre 0.02 y 0.62%; en las corrientes en 6.3 mg / L, y en las aguas subterráneas generalmente es mayor a 5 mg/L. El sodio se produce con silicatos y con depósitos de sal. El límite de advertencia de la EPA de EE. UU. Para el sodio en el agua potable es de 20 mg / L.

MÉTODO: Método fotométrico de emisión de llama (ver figura 38). Las trazas de sodio se pueden determinar mediante fotometría de emisión de llama a 589 nm. La muestra se nebuliza en una llama de gas bajo condiciones de excitación controladas y se mide la línea espectral del sodio al exponer la llama a un dispositivo de dispersión de luz y medir la intensidad de la luz de emisión mediante un fototubo. <sup>47</sup>

**Figura 38.** Equipo de absorción atómica y longitud de onda del sodio

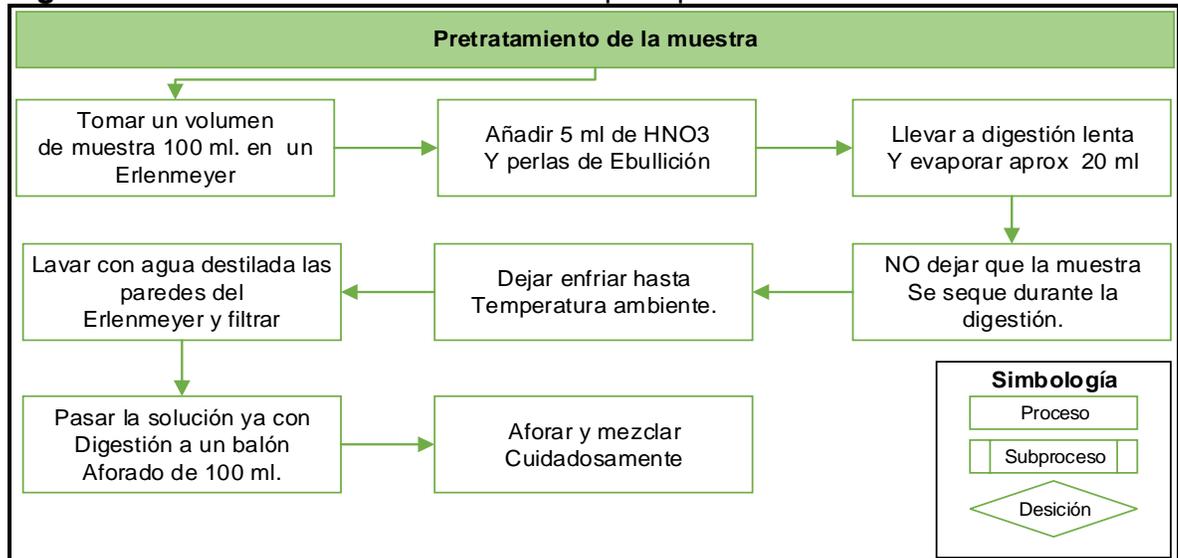


Fuente: elaboración propia.

<sup>47</sup> Ibid., section 3500-Na B

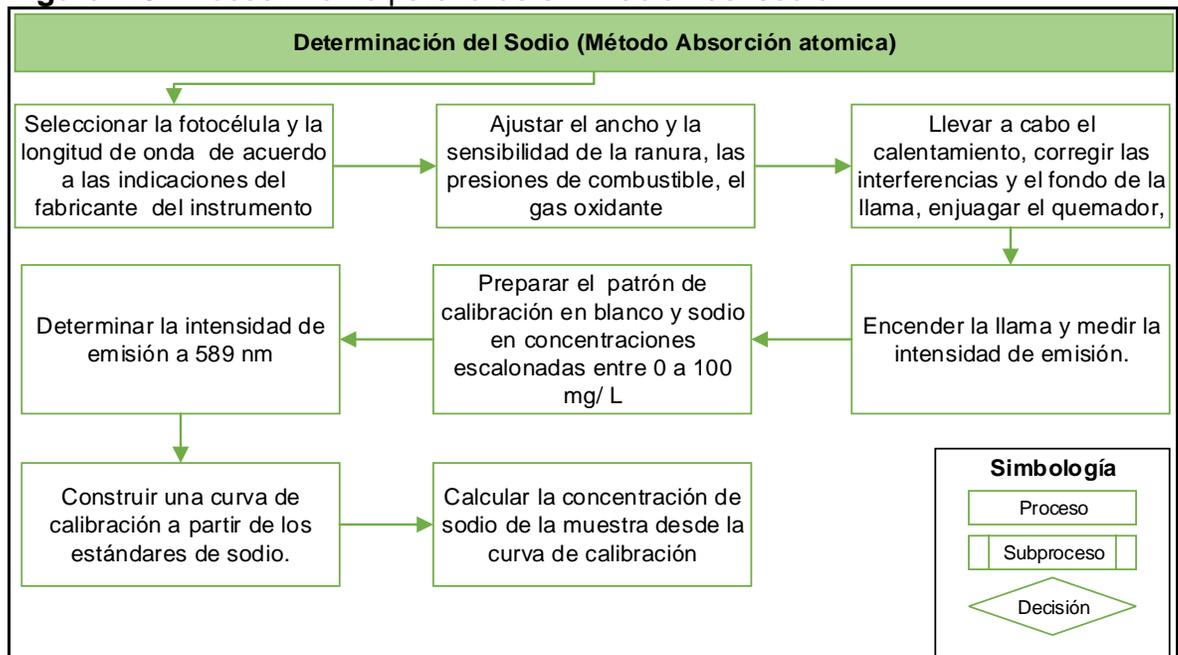
**PROCEDIMIENTO:** Más adelante en la figura 39 se expresa el procedimiento para preparar la muestra y en la figura 40 se muestra el procedimiento para la prueba de sodio total.

**Figura 39.** Pretratamiento de la muestra para prueba de sodio.



Fuente: elaboración propia. RICE, Eugene, et al. Standard methods for the examination of water and wastewater. 21 ed. Washington, DC: American Public Health Associate.2005, Section 3500-Na B

**Figura 40.** Procedimiento para la determinación del sodio



Fuente: elaboración propia. RICE, Eugene, et al. Standard methods for the examination of water and wastewater. 21 ed. Washington, DC: American Public Health Associate.2005, Section 3500-Na

B

Finalmente, se utiliza la siguiente ecuación:

**Ecuación 8 .Cálculo de Sodio**

$$Na \text{ mg/L} = (Na \text{ mg/L en porción}) * D$$

Fuente: RICE, Eugene, et al. Standard methods for the examination of water and wastewater. 21 ed. Washington, DC: American Public Health Associate.2005, Section 3500 NaB

Donde;

D: Relación de dilución.

**4.13 PLOMO TOTAL**

El plomo (Pb) es un metal del bloque P. Tiene un número atómico de 82 y un peso atómico de 207.19. Se encuentra en la corteza terrestre en aproximadamente 13 ppm; en los suelos oscila entre 2.6 y 25 ppm; en las corrientes es de 3 µg / L, y en las aguas subterráneas generalmente es menor a 0.1 mg / L. El plomo se obtiene principalmente de galena (PbS). Las especies acuosas comunes son Pb<sup>2+</sup> y complejos de hidróxido y carbonato. Bajo la regla de plomo y cobre, el nivel de acción del percentil 90 del agua potable de la EPA de EE. UU. Es de 15 µg / L.

MÉTODO: Dithizona. Una muestra acidificada que contiene cantidades de microgramos de plomo se mezcla con solución reductora de cianuro de citrato amoniacal y se extrae con dithizona en cloroformo (CHCl<sub>3</sub>) para formar un ditionato de plomo rojo cereza (figura 42). El color de la solución de color mixto se mide fotométricamente El volumen de muestra tomado para el análisis puede ser de 2 L cuando se usa la digestión.<sup>48</sup>

PROCEDIMIENTO: La figura 41 describe el proceso de la prueba de plomo total. Todas las concentraciones son µg de Pb / 10 ml de extracto final. Se valora con la siguiente ecuación:

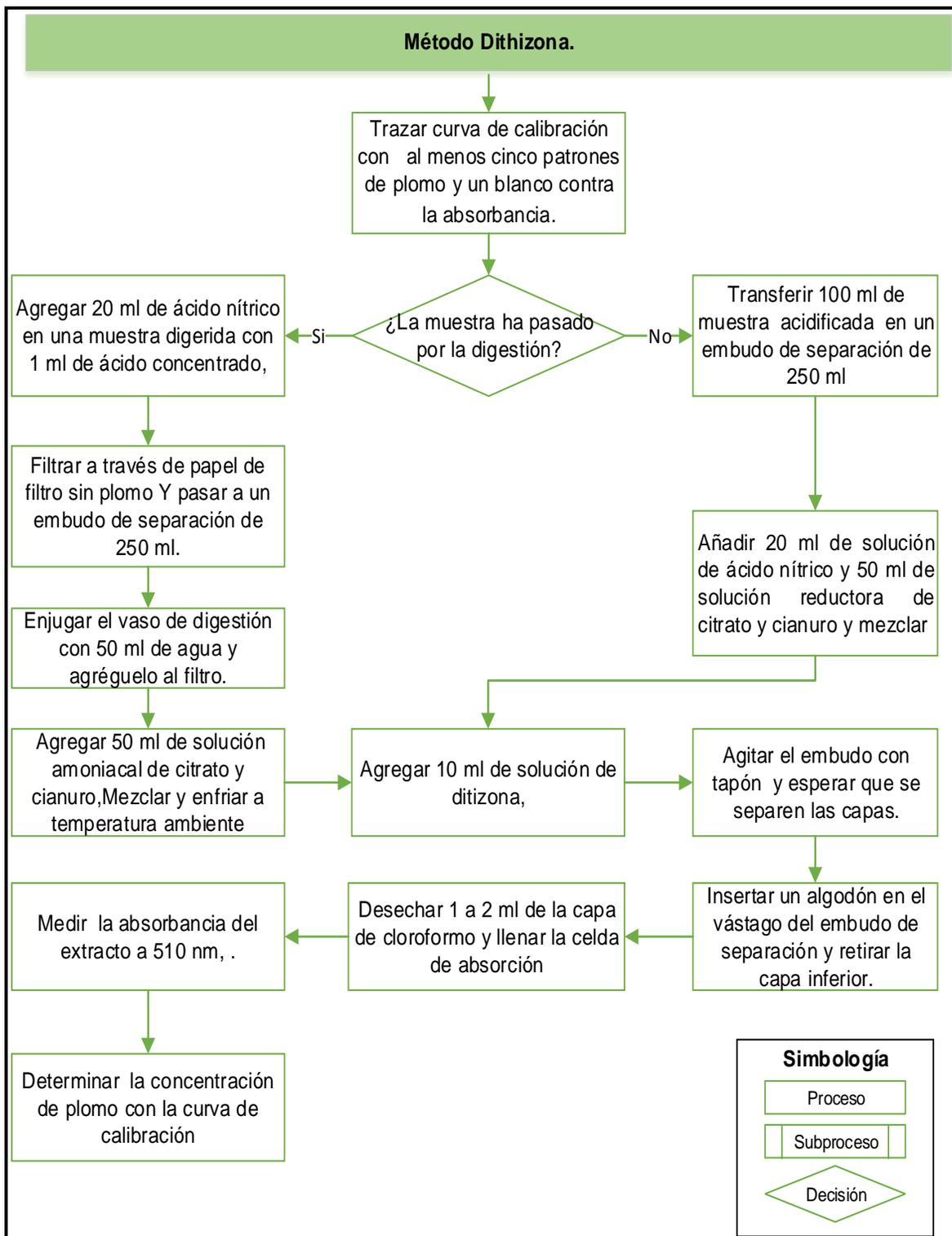
**Ecuación 9. Ecuación cálculo de plomo.**

$$Pb \text{ mg/L} = \frac{mg \text{ Pb (en 10 ml de la curva de calibración)}}{ml \text{ de muestra}}$$

<sup>48</sup> Ibid., section 3500-Pb B

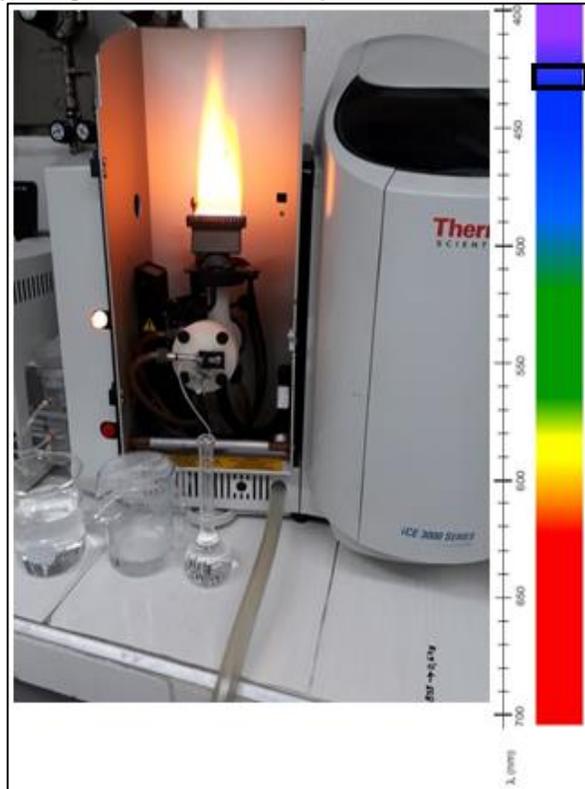
Fuente: RICE, Eugene, et al. Standard methods for the examination of water and wastewater. 21 ed. Washington, DC: American Public Health Associate.2005, Section 3500-PbB

**Figura 41.** Procedimiento para la determinar plomo total.



Fuente: elaboración propia.

**Figura 42.** Equipo de absorción atómica y longitud de onda del plomo



Fuente: elaboración propia

#### 4.14 CROMO TOTAL

El cromo (Cr) es un metal de transición; tiene un número atómico de 24 y un peso atómico de 51.99. Se encuentra en la corteza terrestre en aproximadamente 122 ppm; en los suelos oscila entre 11 y 22 ppm; en las corrientes promedio aproximadamente 1  $\mu\text{g} / \text{L}$ , y en las aguas subterráneas generalmente es de 100 $\mu\text{g}/\text{L}$ . El cromo se encuentra principalmente en el mineral de hierro y cromo ( $\text{FeO}\cdot\text{Cr}_2\text{O}_3$ ).

El ideal de cromo para el agua natural se relaciona con la dureza o la alcalinidad del agua; es decir, cuanto más blanda es el agua, menor es el nivel permitido para el cromo. El nivel máximo recomendado para la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación es de 100  $\mu\text{g} / \text{L}$ . El estándar Máximo nivel de contaminante MCL para el agua potable de los EE. UU. Es de 0.1mg/L para el cromo total.

MÉTODO: Método Colorimétrico.

Este procedimiento mide solo cromo hexavalente (Cr 6+). Por lo tanto, para determinar el cromo total se convierte todo el cromo al estado hexavalente por oxidación con permanganato de potasio. El proceso de oxidación puede no proporcionar la conversión total de todas las especies de cromo a Cr 6 + por lo tanto se debe digerir la muestra con una mezcla de ácido sulfúrico-nítrico y luego oxidar con permanganato de potasio. El cromo hexavalente se determina colorimétricamente la reacción con difenilcarbazida en solución ácida. Se produce un complejo rojo-violeta de composición desconocida (ver Figura 30). La reacción es muy sensible, la absorptividad molar basada en cromo es de aproximadamente 40 000 L g<sup>-1</sup> cm<sup>-1</sup> a 540 nm. <sup>49</sup>

**PROCEDIMIENTO:** posteriormente, en la figura 43 se muestra el proceso de pretratamiento de la muestra y en la figura 44 el proceso para determinar la concentración de cromo total. Para determinar el cromo total, se utiliza la ecuación 10:

**Ecuación 10.** Cálculo de cromo con digestión.

$$mg \frac{Cr}{L} = \frac{mg Cr (en 102 mL de volumen final)}{A * B} * 10$$

Fuente: RICE, Eugene, et al. Standard methods for the examination of water and wastewater. 21 ed. Washington, DC: American Public Health Associate.2005, Section 3500-Cr B

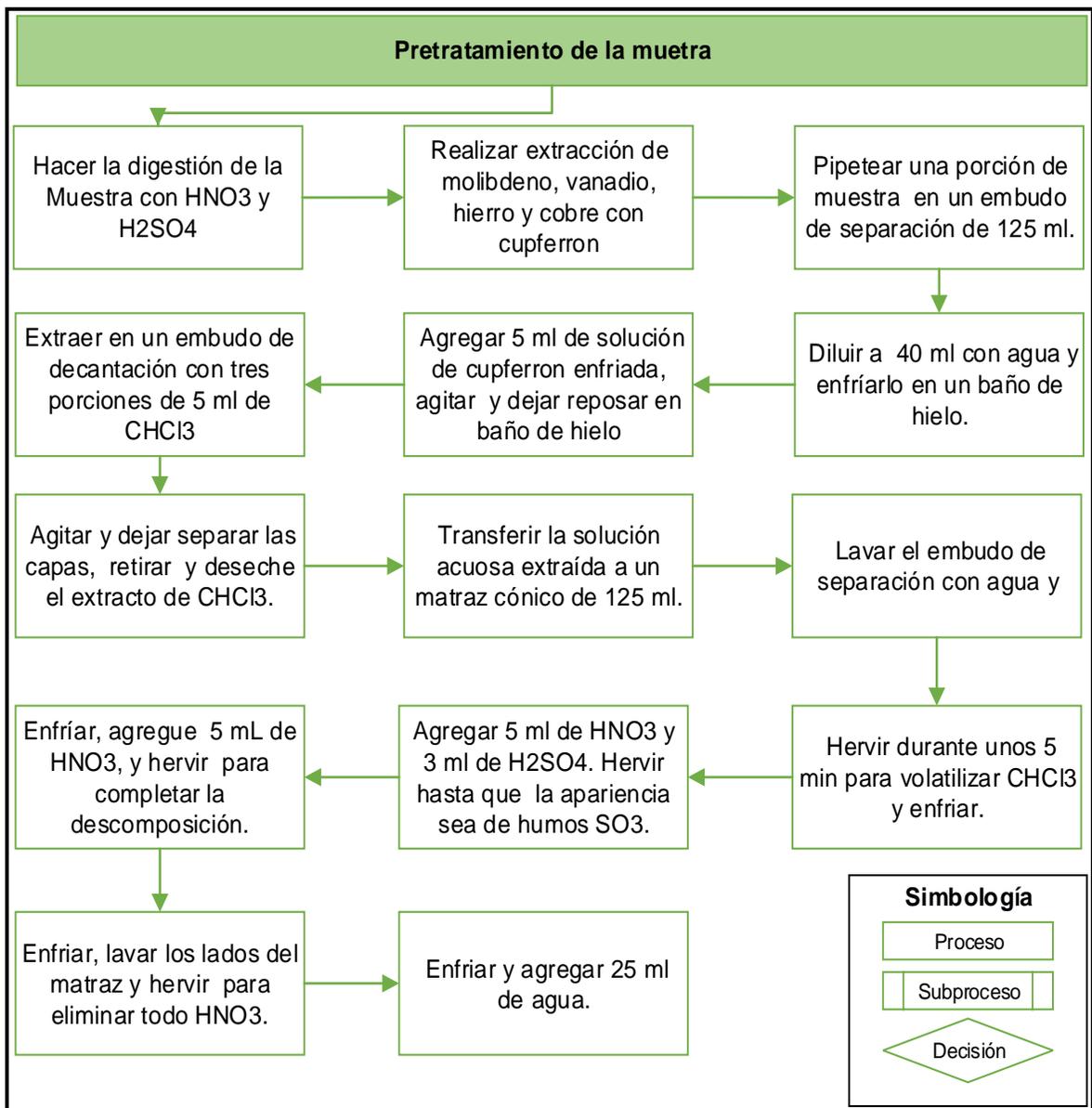
Donde;

A: mL de muestra original.

B: porción de mL de 100 mL de muestra digerida.

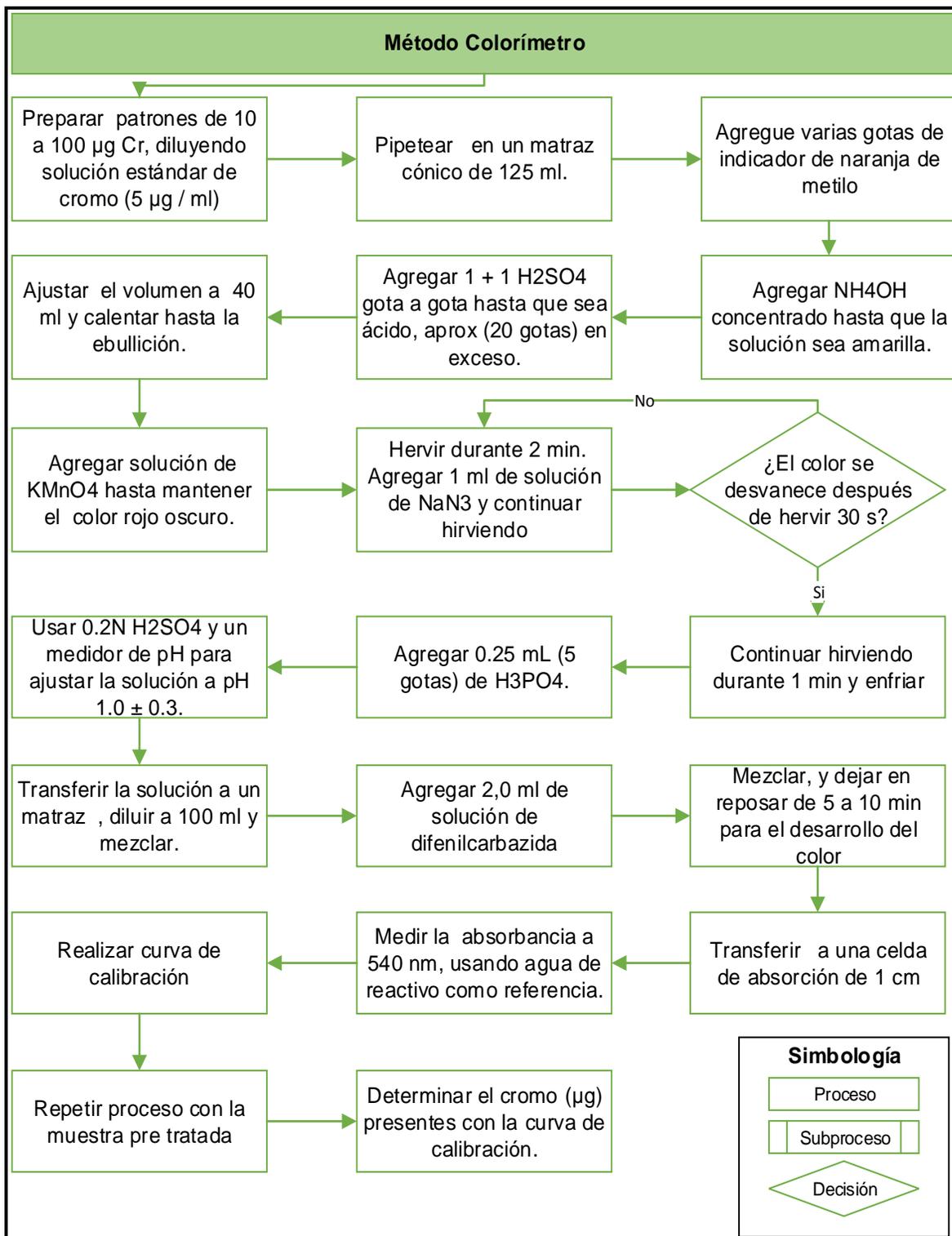
**Figura 43.** Pretratamiento de la muestra para prueba de cromo.

<sup>49</sup> Ibid., section 3500-Cr B



Fuente: elaboración propia. RICE, Eugene, et al. Standard methods for the examination of water and wastewater. 21 ed. Washington, DC: American Public Health Associate.2005, Section 3500-Cr B

**Figura 44.** Procedimiento para determinar el cromo.



Fuente: elaboración propia. RICE, Eugene, et al. Standard methods for the examination of water and wastewater. 21 ed. Washington, DC: American Public Health Associate. 2005, Section 3500-Cr B

#### 4.15 HIERRO TOTAL

El hierro (Fe) es un metal de transición; tiene un número atómico de 26 y un peso atómico de 55.847. Cerca de un 5% de este elemento se encuentra en la corteza terrestre. El hierro se caracteriza por tener propiedades magnéticas y generalmente a condiciones estándar se presenta en estado sólido. En cuanto a su presencia en el agua, puede provocar precipitación y coloración no deseada.

**MÉTODO:** Método de fenantrolina: El hierro se lleva a la solución, se reduce al estado ferroso por ebullición con ácido e hidroxilamina, y tratado con 1,10-fenantrolina en un pH 3. Tres moléculas de fenantrolina se adhieren a cada átomo de hierro ferroso para formar un complejo naranja-rojo (ver figura 45). La solución coloreada obedece a la ley de Beer, es decir que existe una relación entre la medición de absorbancia y la concentración del ion ferroso.<sup>50</sup>

**Figura 45.** Patrones de hierro con fenantrolina para la curva de calibración.



Fuente: elaboración propia.

**PROCEDIMIENTO:** En la figura 46 se describe el procedimiento para la prueba de hierro total. Al final del proceso se utiliza la ecuación 11 para hallar el hierro total de la muestra.

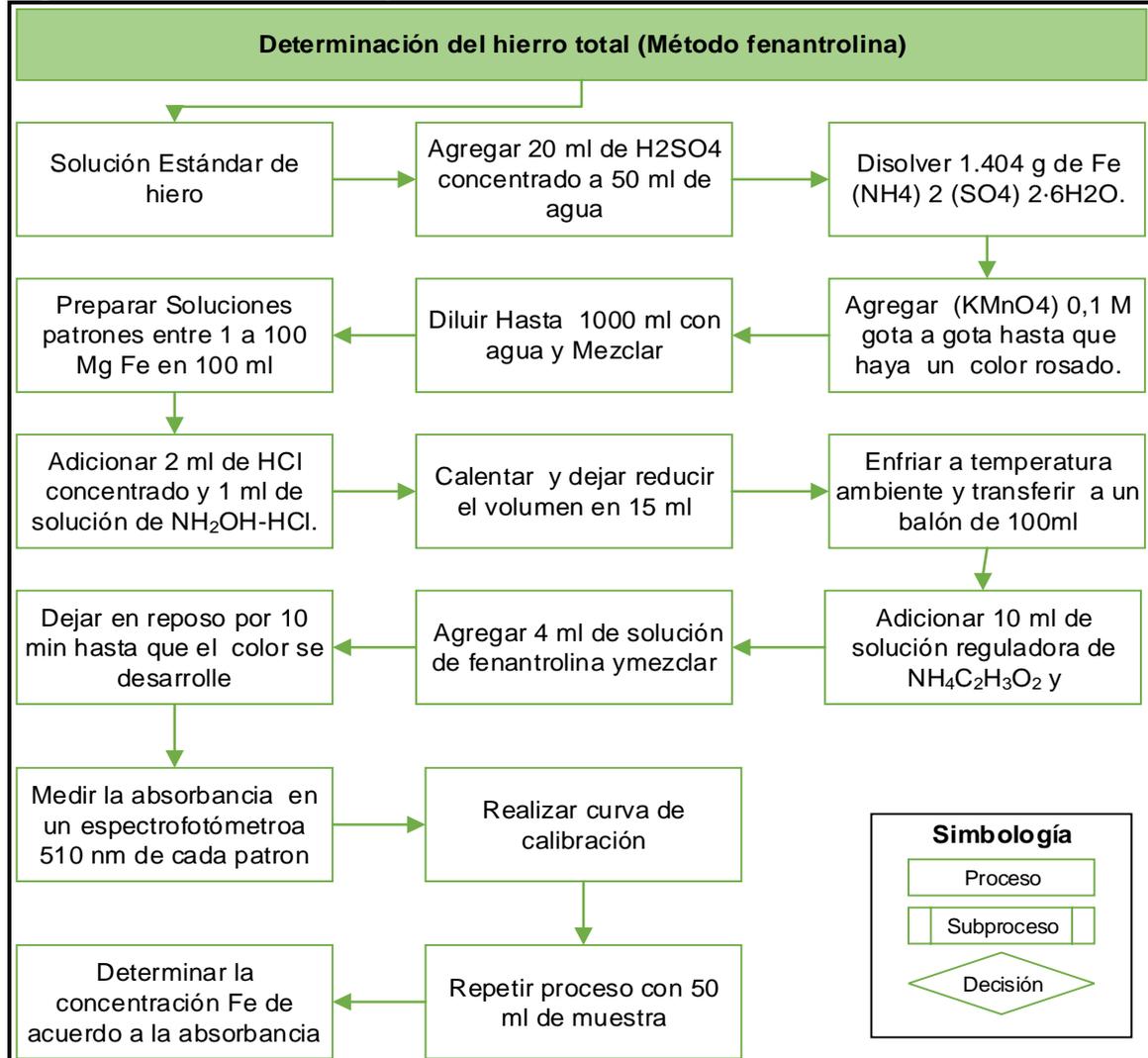
**Ecuación 11.** Cálculo de hierro.

$$Fe \left( \frac{mg}{L} \right) = \frac{\mu g Fe (en 100 mL de volumen final)}{ml de muestra}$$

Fuente: RICE, Eugene, et al. Standard methods for the examination of water and wastewater. 21 ed. Washington, DC: American Public Health Associate. 2005, Section 3500-Fe B

<sup>50</sup> Ibid., section 3500-Fe B

**Figura 46.** Procedimiento para la determinación de hierro total.



Fuente: elaboración propia. RICE, Eugene, et al. Standard methods for the examination of water and wastewater. 21 ed. Washington, DC: American Public Health Associate. 2005, Section 3500-Fe B

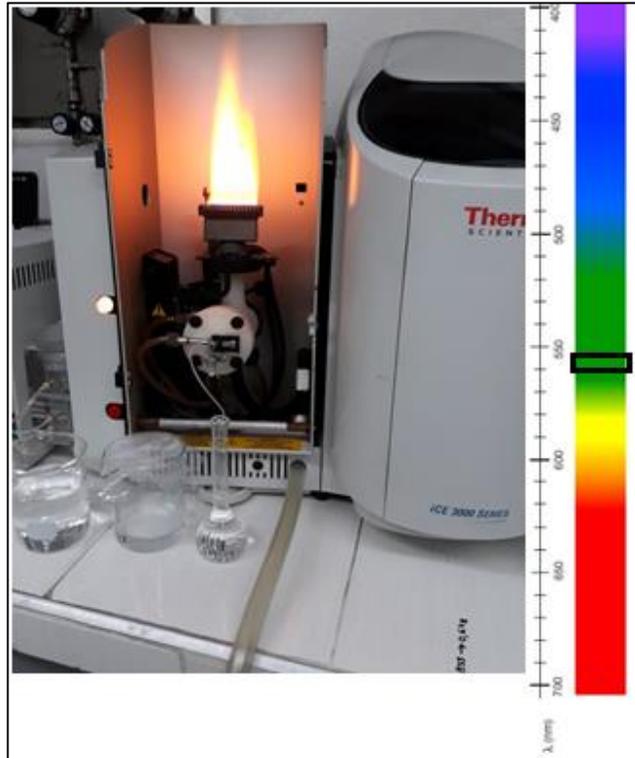
#### 4.16 NÍQUEL

El níquel (Ni) es un metal de transición; tiene un número atómico de 28 y un peso atómico de 58.69. Se encuentra en la corteza terrestre aproximadamente en 1.2 ppm; en suelos en 2.5 ppm; en las corrientes en 1 µg / L, y en las aguas subterráneas menor a 0.1 mg / L. El níquel se obtiene principalmente de pirrotita y garnierita. La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación recomendó que el nivel máximo para las aguas de riego sea de 200 µg / L. El estándar MCL para el agua potable de los EE. UU. Es 0.1 mg / L. <sup>51</sup>

<sup>51</sup> Ibid., section 3500-Ni

**MÉTODO:** Método Absorción Atómica. En la figura 47, se visualiza el equipo de absorción atómica y la longitud de onda para el níquel.

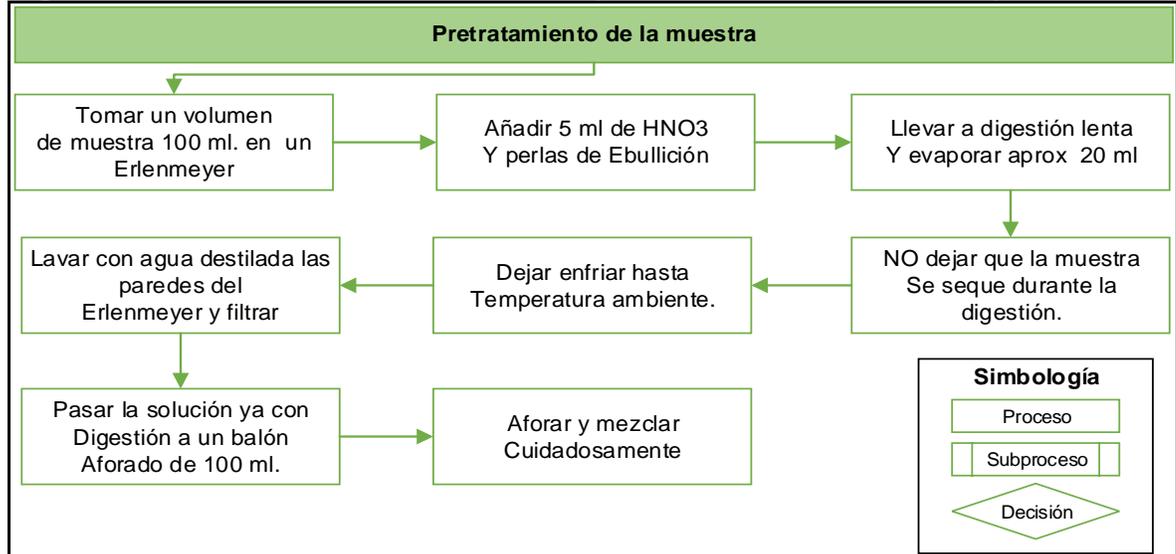
**Figura 47.** Equipo y longitud de onda para el níquel.



Fuente: elaboración propia.

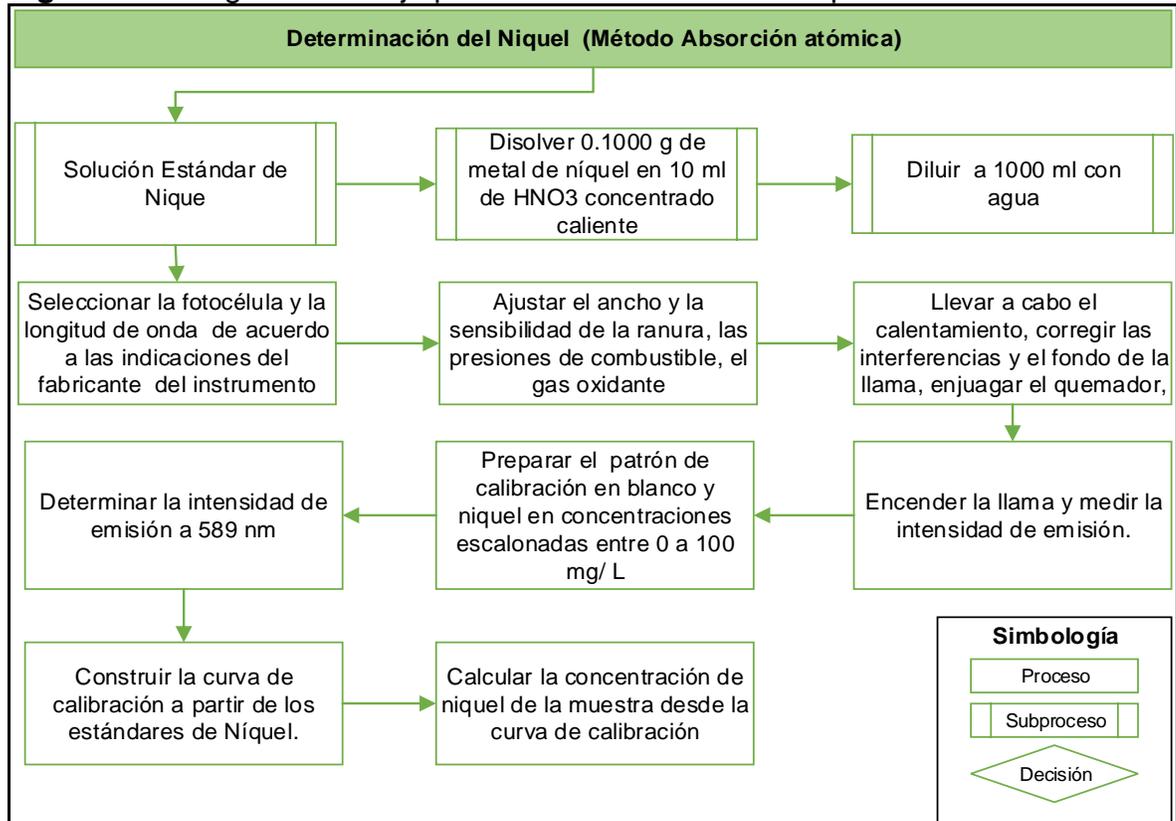
**PROCEDIMIENTO:** En la figura 48 se explica el pre-tratamiento de la muestra y en la figura 49 se observa el diagrama de flujo para determinar el níquel en la muestra. Finalmente se utiliza la ecuación 8 para determinar sodio de la sección 4.12, reemplazando en términos de níquel.

**Figura 48.** Pretratamiento de la muestra para la determinación de níquel.



Fuente: elaboración propia. RICE, Eugene, et al. Standard methods for the examination of water and wastewater. 21 ed. Washington, DC: American Public Health Associate.2005, Section 3500-Ni

**Figura 49.** Diagrama de flujo para la determinación de níquel.



Fuente: elaboración propia. RICE, Eugene, et al. Standard methods for the examination of water and wastewater. 21 ed. Washington, DC: American Public Health Associate.2005, Section 3500-Ni

#### 4.17 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS FISICOQUÍMICAS

Luego de realizar las pruebas fisicoquímicas correspondientes a las aguas obtenidas del tratamiento convencional y el tratamiento de láminas filtrantes, se procede a recopilar y reportar los resultados para construir la matriz de selección (tabla 3).

**Tabla 3.** Resultados pruebas fisicoquímicas.

RESULTADOS PRUEBAS FISICOQUÍMICAS				
Parámetro	Unidades	Entrada	Tratamiento convencional	Tratamiento de láminas filtrantes
			Salida	Salida
Conductividad	µs/cm	13020	157	349
pH	unidad de pH	11	6.59	7.5
Oxígeno disuelto	mg/L	4.02	6.87	7.39
DQO	mg O <sub>2</sub> /L	129200	19	18.1
DBO	mg O <sub>2</sub> /L	554	6.32	5.2
Grasas y aceites	mg/L	7816	8.9	15
Fenoles	mg/L	0.977	0.12	0.1
Cloruros	mg/L	378	51.54	67
Sulfatos	mg/L	-	30	12.8
Sodio total	mg/L	973	44.96	38.9
Plomo total	mg/L	0.05	0.04	0.05
Cromo total	mg/L	0.087	0.08	0.05
Hierro total	mg/L	5.79	0.123	12.6
Sólidos suspendidos totales	mg/L SST	14223	2.25	12
Hidrocarburos totales	mg/L TPH	5706	7.96	15
Níquel	mg/L	0.1	< 0.1	0.1
Temperatura	°C	29	25.1	26.4

Fuente: elaboración propia.

## **5. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS PARA LA SELECCIÓN DEL MEJOR TRATAMIENTO**

Después de haber obtenido los resultados de las pruebas fisicoquímicas del tratamiento convencional y del tratamiento de láminas filtrantes, se procede a elegir desde el punto técnico que tipo de tratamiento es mejor. La selección del tratamiento se hará teniendo en cuenta en primer lugar, el cumplimiento del Decreto 1594 de 1984 y de la Resolución 0631 del 2015 por medio de la “Matriz de acuerdo a la norma”.

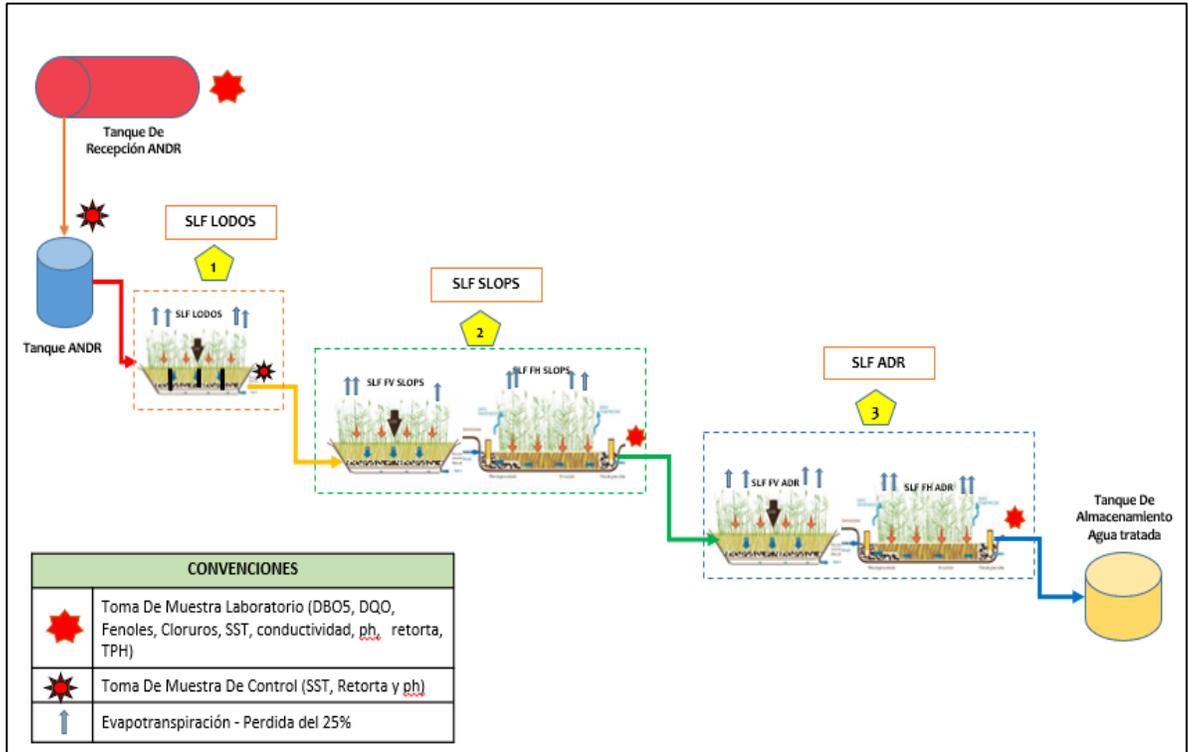
En segundo lugar, se determina la eficiencia de cada tratamiento en la “Matriz de acuerdo a la eficiencia”, para lo cual, se toman como referencia los parámetros de pH, grasas y aceites, fenoles, cloruros, sólidos suspendidos totales e hidrocarburos totales.

La matriz de selección de acuerdo a la norma, permite verificar si los parámetros de las aguas en las salidas de ambos tratamientos cumplen con los parámetros mínimos requeridos para su aspersión al medio ambiente, según el Decreto 1594 de 1984 y la Resolución 0631 del 2015 mencionados en el capítulo 2, sin embargo, esto no es suficiente para decidir cuál tratamiento entrega un mejor resultado, por lo cual, se compara la eficiencia para cada tratamiento.

Para el tratamiento de láminas filtrantes se realizan cinco muestreos en diferentes puntos del sistema. El primer muestreo se realiza para caracterizar el fluido antes de entrar al tratamiento en el tanque de recepción, luego, se realizan dos muestreos de control en el tanque de homogenización y en el sistema de láminas filtrantes de lodos.

Posteriormente, se toman dos muestreos más para el laboratorio en el sistema de láminas filtrantes de slops y el sistema de láminas filtrantes de aguas residuales domésticas, tal como se muestra en la figura 50. Los resultados que figuran en las matrices de selección son los que se realizan en el sistema de láminas filtrantes de aguas residuales domésticas.

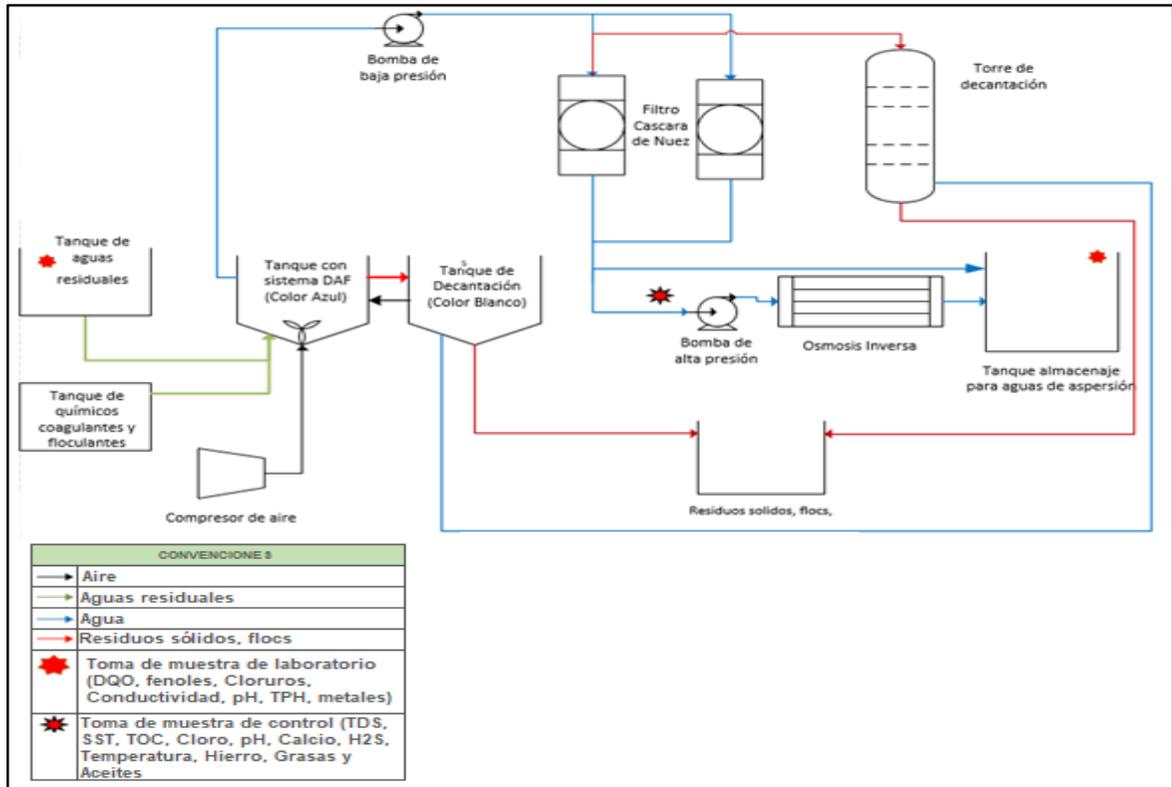
**Figura 50.** Diagrama de flujo del tratamiento de láminas filtrantes con puntos de muestreo.



Fuente: Equión Energía Limited.

Por otra parte, el tratamiento convencional se realizan tres muestreos. El primer muestreo toma lugar en el tanque de aguas residuales para caracterizar la muestra, el segundo muestreo es de control y se realiza después del filtro de cascara de nuez, justo antes de la entrada al equipo de osmosis inversa, esto para garantizar el correcto funcionamiento de la membrana del equipo. Finalmente, se ejecuta un muestreo en el tanque de almacenaje para aguas de aspersión como se puede observar en la figura 51, siendo estos últimos los resultados que se presentan en la matriz de selección.

**Figura 51.** Diagrama de flujo para la toma de muestras en el tratamiento convencional.



Fuente: elaboración propia.

Se presenta la matriz de selección de acuerdo a las normas en la tabla 4. En las primeras columnas se muestran los parámetros a estudiar con sus respectivos resultados para ambos tratamientos. Luego, se prosigue a verificar que parámetros tienen concordancia con la norma, para lo cual se establece la decisión de “Cumple 1 y 2” en caso de que corresponda para ambas, “Cumple 1” si solo cumple con el Decreto 1594 de 1984, “Cumple 2” si solo cumple con la Resolución 0631 del 2015. De no cumplir con ninguna de las normas se toma la decisión “No cumple”.

Como se puede observar en la tabla 4, el tratamiento convencional cumple con el Decreto 1594 de 1984 y la Resolución 0631 del 2015 en cada uno de los parámetros establecidos. Por otro lado, el tratamiento de láminas filtrantes no cumple en los parámetros de hierro total e hidrocarburos totales. El parámetro de hierro total tiene una diferencia de casi cuatro veces el parámetro de hierro fijado por la Resolución 0631 del 2015 y el parámetro de hidrocarburos totales presenta cinco unidades más que el parámetro de hidrocarburos totales fijado por la Resolución 0631 del 2015.

**Tabla 4.** Matriz de selección de acuerdo a las normas.

MATRIZ DE SELECCIÓN DE ACUERDO A LA NORMA							
Parámetro	Unidades	Resultados en salidas		1	2	Decisión	
		Tratamiento convencional	Tratamiento de láminas filtrantes	Decreto 1594 de 1984	Resolución 0631 del 2015	Tratamiento convencional	Tratamiento de láminas filtrantes
Conductividad	µs/cm	157	349	-	-	Cumple 1 y 2	Cumple 1 y 2
pH	unidad de pH	6.59	7.5	5 a 9	6 a 9	Cumple 1 y 2	Cumple 1 y 2
Oxígeno disuelto	mg/L	6.87	7.39	-	-	Cumple 1 y 2	Cumple 1 y 2
DQO	mg O2/L	19	18.1	-	400	Cumple 1 y 2	Cumple 1 y 2
DBO	mg O2/L	6.32	5.2	>20% Remoción	200	Cumple 1 y 2	Cumple 1 y 2
Grasas y aceites	mg/L	8.9	15	>80% Remoción	15	Cumple 1 y 2	Cumple 1 y 2
Fenoles	mg/L	0.12	0.1	0.2	0.2	Cumple 1 y 2	Cumple 1 y 2
Cloruros	mg/L	51.54	67	-	1200	Cumple 1 y 2	Cumple 1 y 2
Sulfatos	mg/L	30	12.8	-	300	Cumple 1 y 2	Cumple 1 y 2
Sodio total	mg/L	44.96	38.9	-	-	Cumple 1 y 2	Cumple 1 y 2
Plomo total	mg/L	0.04	0.05	0.5	0.2	Cumple 1 y 2	Cumple 1 y 2
Cromo total	mg/L	0.08	0.05	0.5	1	Cumple 1 y 2	Cumple 1 y 2
Hierro total	mg/L	0.123	12.6	-	3	Cumple 1 y 2	Cumple 1
Sólidos suspendidos totales	mg/L SST	2.25	12	>50% Remoción	50	Cumple 1 y 2	Cumple 1 y 2
Hidrocarburos totales	mg/L TPH	7.96	15	-	10	Cumple 1 y 2	Cumple 1
Níquel	mg/L	< 0.1	0.1	2	0.5	Cumple 1 y 2	Cumple 1 y 2
Temperatura	°C	25.1	26.4	40 °C	-	Cumple 1 y 2	Cumple 1 y 2

Fuente: elaboración propia.

Según la tabla 5 el hierro total en la entrada del tratamiento era de 5.79 mg/L y paso a 12,6 mg/L, lo cual significa que la concentración aumentó en el sistema, esto debido a que en el Sistema de Láminas Filtrantes de Slops (ver figura 50), se identificó una acumulación de material arcilloso con presencia de mineral de hierro, dado a la inactividad de la operación del sistema.

En cuanto al hidrocarburo total, para el tratamiento de láminas filtrantes en la entrada se tenía un valor de 5706 mg/L y al final se redujo hasta 15mg/L, sin embargo, la Resolución 0631 del 2015 dispone de una concentración mínima de 10 mg/L. Se propone como solución que el fluido se recircule a través del tratamiento o aumentar el tiempo de retención en el sistema.

De acuerdo al decreto 1594 de 1984, debe haber una remoción mayor al 20% para el parámetro DBO, para grasas y aceites mayor al 80% y para sólidos suspendidos totales de mayor al 50%; se evidencia que para el tratamiento convencional la remoción para los parámetros es respectivamente de: 98,86%, 99,89% y 99,96%. Por otro lado, para el tratamiento de láminas filtrantes las remociones para los parámetros en orden son: 99,06%, 99,81% y 99,74%.

Para la matriz de selección de acuerdo a la eficiencia que se presenta a continuación en la tabla 5, se expone en las primeras columnas los parámetros de entrada y salidas para ambos tratamientos, luego se calcula la eficiencia de remoción en cada tratamiento para cada uno de los parámetros. Además, se resaltan en recuadro rojo los parámetros que se consideran críticos, como lo son: pH, grasas y aceites, fenoles, cloruros, sólidos suspendidos totales e hidrocarburos totales, para realizar el posterior análisis. Para generar la matriz se utilizó la siguiente ecuación:

#### **Ecuación 12. Cálculo de Eficiencia**

$$\%eficiencia = \left( 1 - \frac{\text{concentración de salida}}{\text{Concentración de entrada}} \right) * 100\%$$

Fuente: elaboración propia.

**Tabla 5.** Matriz de selección de acuerdo a la eficiencia.

MATRIZ DE SELECCIÓN DE ACUERDO A LA EFICIENCIA						
Parámetro	Unidades	Entrada	Resultados en salidas			
			Tratamiento convencional	Eficiencia	Tratamiento de láminas filtrantes	Eficiencia
Conductividad	µs/cm	13020	157	98.79%	349	97.32%
pH	unidad de pH	11	6.59	40.09%	7.5	31.82%
Oxígeno disuelto	mg/L	4.02	6.87	-	7.39	-
DQO	mg O2/L	129200	19	99.99%	18.1	99.99%
DBO	mg O2/L	554	6.32	98.86%	5.2	99.06%
Grasas y aceites	mg/L	7816	8.9	99.89%	15	99.81%
Fenoles	mg/L	0.977	0.12	87.72%	0.1	89.76%
Cloruros	mg/L Cl-	378	51.54	86.37%	67	82.28%
Sulfatos	mg/L	-	30	-	12.8	-
Sodio total	mg/L	973	44.96	95.38%	38.9	96.00%
Plomo total	mg/L	0.05	0.04	20.00%	0.05	0.00%
Cromo total	mg/L	0.087	0.08	8.05%	0.05	42.53%
Hierro total	mg/L	5.79	0.123	97.88%	12.6	-117.62%
Sólidos suspendidos totales	mg/L SST	14223	2.25	99.98%	12	99.92%
Hidrocarburos totales	mg/L TPH	5706	7.96	99.86%	15	99.74%
Níquel	mg/L	0.1	0.09	10.00%	0.1	0.00%
Temperatura	°C	29	25.1	13.45%	26.4	8.97%

Fuente: elaboración propia.

Según la matriz de selección de acuerdo a la eficiencia, se tiene que para los parámetros seleccionados: en el pH la eficiencia es mayor en el tratamiento convencional, esto puede deberse a la composición del suelo rico en minerales; para grasas y aceites la diferencia entre ambos tratamientos es apenas del 0,08%; los cloruros, en el tratamiento convencional tiene una eficiencia de 86,37% mayor a la eficiencia obtenida de 82.28% por el tratamiento de láminas filtrantes, lo cual se relaciona directamente con el proceso de osmosis inversa; además para los sólidos suspendidos totales, presenta una diferencia entre ambos tratamientos del 0,06%; y para hidrocarburos totales el tratamiento convencional presenta mayor eficiencia en 0,12% más. En cuanto a fenoles el tratamiento de láminas filtrantes tiene un 89,76% de eficiencia frente al tratamiento convencional.

El valor de la eficiencia para el parámetro de hierro en el tratamiento de láminas filtrantes es de -117,62%. El valor es negativo debido a que la concentración de hierro aumento a la salida en comparación con a la entrada.

Acorde a los resultados arrojados por las dos matrices de selección de acuerdo al cumplimiento de las normas y la de eficiencia, se concluye desde el punto de vista técnico que el tratamiento convencional reúne todos los requisitos exigidos por el Decreto 1594 de 1984 y la resolución 0631 del 2015 y tiene mayor eficiencia de remoción de los contaminantes comparado con el tratamiento de láminas filtrantes, por ende, se selecciona como el mejor tratamiento para aguas y residuos provenientes de la perforación.

## **6. EVALUACIÓN FINANCIERA**

En este capítulo se evalúan financieramente los dos tratamientos anteriormente explicados: el Tratamiento Convencional y el Tratamiento de Láminas Filtrantes. Para esto se hará uso del indicador financiero Costo Anual Uniforme Equivalente (CAUE), este indica cuál de los dos tratamientos representa un menor costo para la empresa Equión.

Cuando se lleva a cabo un tratamiento para aguas y residuos procedentes de la perforación en la industria, esto conlleva a unos costos para la empresa. En la medida en que estos costos puedan llegar a ser más económicos, representa mayores beneficios dado a que se pueden obtener los mismos o incluso mejores resultados y a su vez puede haber un capital de inversión menor.

Por lo tanto, la herramienta de la evaluación financiera ayuda a medir en unidades monetarias que tratamiento resulta ser más rentable para la empresa, lo cual a su vez logra dar a la compañía un mayor margen de competitividad.

El tratamiento convencional está conformado principalmente por las siguientes secciones: una unidad de tratamiento de aguas, la cual se encarga de clarificar y separar el agua y aceites por medio de un sistema de aireación (DAF), filtros de cáscara de nuez y osmosis inversa. Posteriormente, los residuos aceitosos se tratan por biorremediación o por desorción térmica, dependiendo del contenido de aceites que contengan los residuos; por otro lado, el tratamiento de láminas filtrantes que se caracteriza por ser un método de fitorremediación en el cual se saca provecho de las funciones de degradación de la vegetación y de los microorganismos asociados a los suelos donde se cultivan.

La presente evaluación financiera se realiza en Pesos Colombianos (COP), en un periodo de tiempo de tres años y el incremento de los costos del tratamiento por barril será en 4,2% anual, que corresponde al promedio simple del índice de precios al consumidor (IPC) dado por el DANE de los últimos diez años, entre 2007 a 2017 (ver Anexo 2).

### **6.1 COSTO ANUAL UNIFORME EQUIVALENTE**

Para evaluar el Tratamiento Convencional frente al tratamiento de Láminas Filtrantes se eligió el indicador Costo Anual Uniforme Equivalente CAUE, puesto que este logra comparar dos alternativas, al reducir todos los egresos involucrados en el proyecto en una serie de pagos uniformes durante un periodo de tiempo determinado, generalmente un año.

La ventaja que representa este indicador frente al Valor Presente Neto, se da en cuanto a que no es necesario tomar tiempos iguales, si no que únicamente se comparan los costos que se han causado durante un año al emplear ambas alternativas, sin importar que las vidas útiles de los tratamientos se han diferentes.<sup>52</sup>

**Ecuación 13. Costo Anual Equivalente**

$$CAUE(TIO) = \frac{VP}{\frac{(1 + TIO)^n - 1}{TIO(1 + TIO)^n}}$$

Fuente: BACCA. G. Ingeniería económica, Bogotá, Colombia, 2008, octava edición, p. 223-237.

Donde;

CAUE: Costo anual uniforme equivalente.

VP: Valor presente para cada caso.

TIO: Tasa de interés de oportunidad.

n: Periodos anuales.

## 6.2 VALOR PRESENTE

El valor presente o también conocido como valor actual, es un método financiero el cual permite reducir los valores financieros relevantes en cada alternativa al punto inicial de comparación.<sup>53</sup>

**Ecuación 14. Valor presente**

$$VP(n) = \sum_1^n \frac{F}{(1 + TIO)^n}$$

Fuente: BACCA. G. Ingeniería económica, Bogotá, Colombia, 2008, octava edición, p. 15

Donde:

VP: Valor presente para cada caso

F: valor futuro

TIO: Tasa de interés de oportunidad

n: Periodos anuales

<sup>52</sup> BACA CURREA, Guillermo. Ingeniería Económica. Sexta edición. 2000. p. 217.

<sup>53</sup> GUZMÁN CASTRO, Fernando. Introducción a la ingeniería económica. 2004. p. 65.

### 6.3 TASA DE INTERÉS DE OPORTUNIDAD

La tasa de interés de oportunidad (TIO), representa la tasa de interés que la empresa está dispuesta a fijar para invertir en un proyecto. En este caso Equión Energía Limited dispone con una TIO del 9% para la inversión del presente proyecto.

### 6.4 EVALUACIÓN DE COSTOS

En esta sección, se desarrolla la comparación de los egresos producidos para el tratamiento convencional y el tratamiento de láminas filtrantes, teniendo en cuenta el volumen de fluido residual (3.676 Bbls), el costo y distancia del transporte y un periodo de tres años para ambos tratamientos.

**6.4.1 Tratamiento convencional.** De acuerdo a la base de datos de Equión de los últimos tres años, se determina los volúmenes promedios de fluidos residuales producidos durante la perforación de un pozo, cuya duración es entre diez a doce meses, y se clasifica de acuerdo a la caracterización que maneja la compañía tratamiento convencional. En la tabla 6, se observan los volúmenes promedio de aguas residuales y su caracterización, así mismo para la evaluación financiera se toma como volumen mínimo 100 barriles para los fluidos que no poseen datos.

**Tabla 6.** Volúmenes promedios de fluidos residuales por pozo.

Caracterización de los fluidos residuales	Pozo 1	Pozo 2	Pozo 3	Pozo 4	Pozo 5	Promedio
	Bbls	Bbls	Bbls	Bbls	Bbls	Bbls
Fluidos con contenido de aceite	2.460	2.086	2.006	160	740	1.719
Fluidos salinos						
Fluidos acuosos con contenido de cloruros menor a 250 ppm.		400		160	130	230
Fluidos salinos con contenido de cloruros 251 - 1000 ppm	220	1540		60		607
Fluidos salinos con contenido de cloruros 1001 - 3000 ppm						100*
Fluidos salinos con contenido de cloruros 3001 - 6000 ppm	920					920
Fluidos salinos con contenido de cloruros 6001 - 9000 ppm						100*
<b>Volumen total de fluidos residuales</b>						<b>3.676</b>

Nota: \*Para referenciar los fluidos con estas características se toma un volumen mínimo de 100 Bbls.  
Fuente: Equión modificado por los autores.

En la tabla 7 se muestran los costos de los servicios de la empresa de tratamiento convencional con una breve descripción de cada servicio.

**Tabla 7.** Costos de los servicios de la empresa de tratamiento convencional.

Servicio	Característica del residuo	Costo por Barril (COP)
Tratamiento fisicoquímico, filtración, osmosis inversa de fluidos acuosos	Contenido de cloruros menor a 250 ppm.	19.345
	Contenido de cloruros 251 - 1000 ppm	38.425
	Contenido de cloruros 1001 - 3000 ppm	50.085
	Contenido de cloruros 3001 - 6000 ppm	51.940
	Con contenido de cloruros 6001 - 9000 ppm	57.770
Tratamiento fisicoquímico, filtración, osmosis inversa de fluidos acuosos con tenido de aceite.	Contenido de aceite menor a 30 %v/v y % solidos menor 30%v/v	57.770
Transporte desde la locación de Equión a la planta.	Carro tanque de 200 Bbls	771.173

Fuente: Equión Energía Limited. Modificado.

En la tabla 8 se presenta el costo por servicio con un incremento anual de 4,2%, correspondiente al promedio simple del IPC del 2007 al 2017 dado por el DANE (Anexo 2) y el costo total por año para el tratamiento convencional. Como referencia se toman los volúmenes de fluidos residuales promedios por pozo de la tabla 6 y los costos de los servicios del tratamiento convencional de la tabla 7.

El transporte es otro parámetro a tener en cuenta, ya que se necesita transportar el fluido desde las locaciones de Equión hasta la planta de tratamiento; para ello se transporta los fluidos en carro tanques de 200 Bbls con una capacidad de llenado de 80%. Por lo tanto, se calcula con la ecuación 15 el número de carro tanques para transportar el volumen total de los residuos.

**Ecuación 15.** Número de carro tanques para transportar un determinado volumen de fluido.

$$No. \text{ carro tanques} = \frac{\text{volumen total de fluido residual}}{\text{volumen del carro tanques} * \text{capacidad de llenado}}$$

Fuente: elaboración propia.

Para un volumen de 3.676 Bbls de fluidos por año se deduce con la ecuación 15 el número de carro tanques de la siguiente forma:

$$No. \text{ Carro tanques} = \frac{3676 \text{ bbl}}{200\text{bbl} * 80\%} = 23 \text{ carro tanques}$$

Por otra parte, la distancia entre la compañía de tratamiento convencional a las locaciones de Equión es aproximadamente de 60 Km y el costo de un carro tanque por viaje es de COP 771.173, igualmente el costo aumenta de acuerdo al IPC (4,2%) durante los próximos dos años. Con la ecuación 16 se estima el costo de transporte en un año.

**Ecuación 16.** Costo de transporte.

$$\text{Costo del transporte} = No. \text{ Carro tanques} * \text{costo del transporte}$$

Fuente: elaboración propia.

Se rempazan los valores en la ecuación 16:

$$\text{Costo del transporte} = 23 \text{ carro tanques} * \$771.173\text{COP} = \$17.736.979 \text{ COP}$$

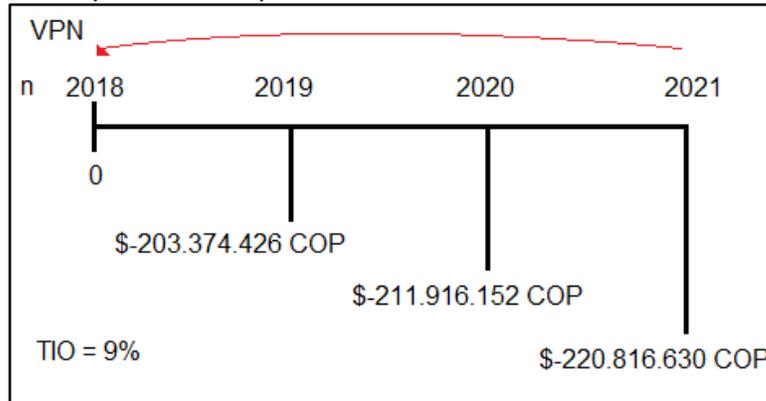
**Tabla 8.** Costo por servicio y costo total del tratamiento convencional.

Fluido residual	Volumen (Bbls)	Costo por barril (COP)			Costo Total (COP)		
		2019	2020	2021	2019	2020	2021
Fluidos con contenido de aceite	1.719	57.770	60.196	62.725	99.306.630	103.477.508	107.823.564
Fluidos acuosos con contenido de cloruros menor a 250 ppm.	230	19.345	20.157	21.004	4.449.350	4.636.223	4.830.944
Fluidos salinos con contenido de cloruros 251 - 1000 ppm	607	38.425	40.039	41.720	23.311.167	24.290.236	25.310.426
Fluidos salinos con contenido de cloruros 1001 - 3000 ppm	100	50.085	52.189	54.380	5.008.500	5.218.857	5.438.049
Fluidos salinos con contenido de cloruros 3001 - 6000 ppm	920	51.940	54.121	56.395	47.784.800	49.791.762	51.883.016
Fluidos salinos con contenido de cloruros 6001 - 9000 ppm	100	57.770	60.196	62.725	5.777.000	6.019.634	6.272.459
Total	3.676				185.639.466	193.436.239	201.560.478
Transporte	No. Carro tanques	Costo por viaje (COP)			Costo total del transporte (COP)		
Carro tanque de 200 bbl	23	771.173	803.562	837.312	17.736.979	18.481.932	19.258.173
					203,374,426	211,916,152	220,816,630

Fuente: elaboración propia.

Se calcula el valor presente equivalente de los costos del tratamiento convencional y transporte de los tres años con la ecuación 14 (ver figura 52).

**Figura 52.** Diagrama de flujo para el Valor Presente Neto para la compañía de tratamiento convencional.



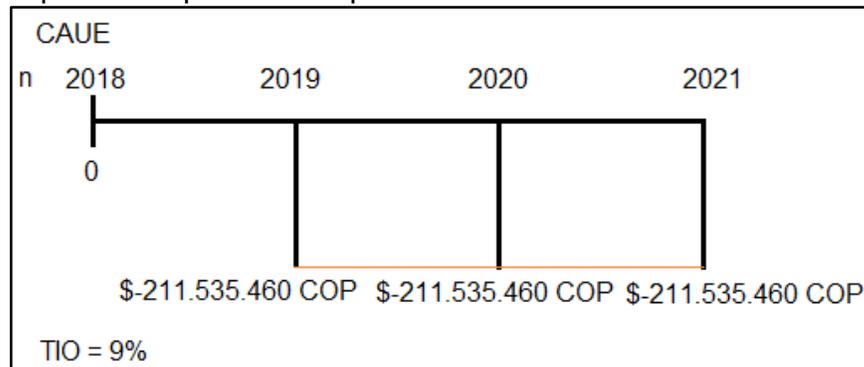
Fuente: elaboración propia.

$$VP(\text{egresos}) = -\left(\frac{203.374.426}{(1 + 0,09)^1} + \frac{211.916.152}{(1 + 0,09)^2} + \frac{220.816.630}{(1 + 0,09)^3}\right) = -535.458.581\text{COP}$$

El Costo anual equivalente CAUE del valor presente de los egresos del tratamiento convencional se determina con la ecuación 13 (ver figura 53).

$$CAUE = -\frac{535.458.581}{\frac{(1 + 0,09)^3 - 1}{0,09 * (1 + 0,09)^3}} = -211.535.460\text{ COP}$$

**Figura 53.** Diagrama de flujo para el Costo Anual Uniforme Equivalente para la compañía de tratamiento convencional.



Fuente: elaboración propia.

**6.4.2 Tratamiento de láminas filtrantes.** En la tabla 9, se muestran los costos de los servicios de la empresa de tratamiento láminas filtrantes y sus parámetros para determinar el costo del servicio.

**Tabla 9.** Costos de los servicios de la empresa de tratamiento de láminas filtrantes.

Servicio	Característica del residuo	Costo por barril (COP)
.Aguas residuales Industriales Peligrosos (DQO < a 1.000 mg/lit), % de SST < al 3% y concentración de fenoles <0,2 mg/lit Tratamiento y disposición final de fluidos acuosos	Contenido de cloruros menor a 250 ppm.	15.924
	Contenido de cloruros 251 - 1000 ppm	23.885
	Contenido de cloruros 1001 - 3000 ppm	31.847
	Contenido de cloruros 3001 - 6000 ppm	39.809
	Contenido de cloruros 6001 - 9000 ppm	47.771
Aguas residuales Industriales Peligrosas con Fenoles , % de solidos < al 3% y DQO < a 1000 mg/lit Tratamiento y disposición final de desechos de fluidos	Contenido de fenoles 0,2 - 2 mg/lit	23.885
	Contenido de fenoles 2,1- 4 mg/lit	28.662
	Contenido de fenoles 4,1 - 6 mg/lit	31.847
	Contenido de fenoles 6,1 - 8 mg/lit	39.809
	Contenido de fenoles 8,1 - 10 mg/lit	47.771
Transporte desde la locación de Equión a la planta	Carro tanque de 200 Bbls	771.173

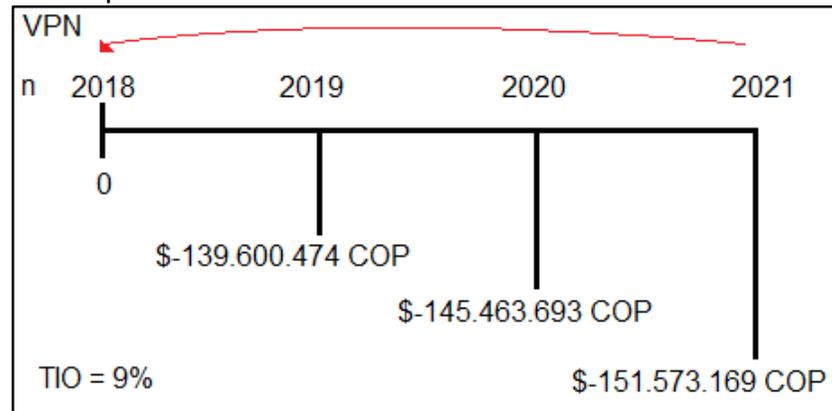
Fuente: elaboración propia.

Para el análisis del tratamiento de láminas filtrantes, se mantienen los mismos volúmenes de fluidos residuales por pozo de la tabla 6. Pero se distribuye el volumen de fluidos con contenido de aceite expresados de 1.719 Bbls también expresados en la tabla 8, en los fluidos definidos por el contenido de fenoles, esto debido a que no hay históricos de este parámetro. En la tabla 10, se muestra el promedio de fluidos a tratar, costo por barril en los tres años con un incremento 4,2% para el año 2020 y 2021 y el costo total del servicio por año.

Para el parámetro de transporte se mantiene el volumen total de fluido residual que es de 3676 Bbls, es decir, se conserva el requerimiento de 23 carro tanques de 200 Bbls para el transporte del fluido. La distancia entre la compañía de tratamiento de láminas filtrantes a las locaciones de Equión es aproximadamente de 25 Km y el costo por viaje es de \$771.173 COP, es decir el costo del transporte en primer año es de \$17,736,979 COP.

Con el costo del tratamiento de láminas filtrantes de los tres años se calcula el valor presente utilizando la ecuación 14 (ver figura 54).

**Figura 54.** Diagrama de flujo para el Valor Presente Neto para la compañía de tratamiento de láminas filtrantes.



Fuente: elaboración propia

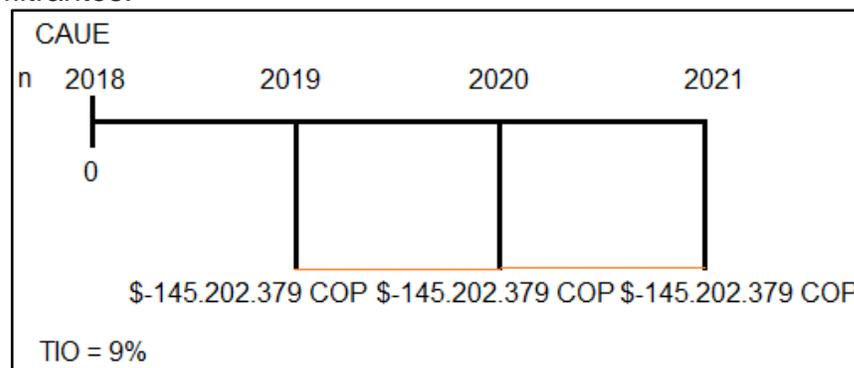
$$VP(\text{egresos}) = - \left( \frac{139.600.474}{(1 + 0.09)^1} + \frac{145.463.693}{(1 + 0.09)^2} + \frac{151.573.169}{(1 + 0.09)^3} \right)$$

$$= -367.550.006 \text{ COP}$$

Y se calcula el CAUE al remplazar los valores de la ecuación 13 (ver figura 55).

$$CAUE = - \frac{367.550.006}{\frac{(1 + 0,09)^3 - 1}{0,09 * (1 + 0,09)^3}} = -145.202.379 \text{ COP}$$

**Figura 55.** Diagrama de flujo para el Costo Anual Uniforme Equivalente para la compañía de tratamiento de láminas filtrantes.



Fuente: elaboración propia.

**Tabla 10.** Costo por servicio y costo total del tratamiento de láminas filtrantes.

Fluidos residuales	Volumen (Bbls)	Costo por barril (COP)			Costo total (COP)		
		2018	2.019	2.020	2.018	2.019	2.020
Aguas residuales Industriales Peligrosos (DQO < a 1.000 mg/Lt), % de SST < al 3% y concentración de fenoles <0,2 mg/Lt							
Fluidos acuosos con contenido de cloruros menor a 250 ppm.	230	15.924	16.593	17.290	3.662.520	3.816.346	3.976.632
Fluidos salinos con contenido de cloruros 251 - 1000 ppm	607	23.885	24.888	25.933	14.490.233	15.098.823	15.732.974
Fluidos salinos con contenido de cloruros 1001 - 3000 ppm	100	31.847	33.185	34.578	3.184.700	3.318.457	3.457.833
Fluidos salinos con contenido de cloruros 3001 - 6000 ppm	920	39.809	41.481	43.223	36.624.280	38.162.500	39.765.325
Fluidos salinos con contenido de cloruros 6001 - 9000 ppm	100	47.771	49.777	51.868	4.777.100	4.977.738	5.186.803
Aguas residuales Industriales Peligrosas con Fenoles , % de solidos < al 3% y DQO < a 1000 mg/Lt							
Fluidos con contenido de fenoles 0,2 - 2 mg/Lt	343,8	23.885	24.888	25.933	8.211.663	8.556.553	8.915.928
Fluidos con contenido de fenoles 2,1- 4 mg/Lt	343,8	28.662	29.866	31.120	9.853.996	10.267.863	10.699.114
Fluidos con contenido de fenoles 4,1 - 6 mg/Lt	343,8	31.847	33.185	34.578	10.948.999	11.408.857	11.888.029
Fluidos con contenido de fenoles 6,1 - 8 mg/Lt	343,8	39.809	41.481	43.223	13.686.334	14.261.160	14.860.129
Fluidos con contenido de fenoles 8,1 - 10 mg/Lt	343,8	47.771	49.777	51.868	16.423.670	17.113.464	17.832.229
Total	3.676				121.863.495	126.981.761	132.314.995
<b>Transporte</b>	<b>No. carro tanque</b>	<b>Costo por viaje (COP)</b>			<b>Costo total del transporte (COP)</b>		
Carro tanque de 200 Bbls (30 a 60km)	23	771.173	803.562	837.312	17.736.979	18.481.932	19.258.173
					139.600.474	145.463.693	151.573.169

Fuente: elaboración propia.

Finalmente, se reportan los costos anuales equivalentes del tratamiento convencional y tratamiento de láminas filtrantes en la tabla 11.

**Tabla 11.** Reporte de resultados.

Tratamiento	CAUE
Convencional	-211.535.460 COP
Láminas filtrantes	-145.202.379 COP
Diferencia	-66.331.081 COP

Fuente: elaboración propia.

En la evaluación de los costos se realizó una sobreestimación de los costos del tratamiento convencional y el tratamiento de láminas filtrantes ya que suponemos que los precios de los servicios se incrementan en 4,2 % de acuerdo al promedio simple del IPC del 2007 al 2017 mientras que la proyección IPC por el Banco de la República para el 2018 y 2019 está en 3,3%.<sup>54</sup>

El factor del transporte no es indispensable para la selección de la compañía de tratamiento dado que el costo del transporte es igual para ambos tratamientos, para el primer año es de \$17.736.979 COP. Sin embargo, se debe tener en cuenta que el fluido residual debe ser trasladado desde las locaciones de Equión hasta las plantas de tratamiento, en donde la distancia hacia la compañía de tratamiento convencional es de 60 km hacia las locaciones de Equión y para la compañía de tratamiento de láminas filtrantes la distancia es de 25 km, por temas de logística se facilita el transporte hacia la planta de tratamiento de láminas filtrantes.

Para la evaluación financiera se tomó como base un volumen definido de fluidos residuales de 3.676 barriles, estimando el costo del tratamiento de acuerdo a las características y servicios definidos por las compañías de tratamiento, obteniendo así un costo anual equivalente para el tratamiento convencional de \$-211.535.460 COP y un costo anual equivalente para el tratamiento de láminas filtrantes de \$-145.202.379 CO. Por lo cual, se logra evidenciar que el tratamiento de láminas filtrantes presenta un ahorro en costos por año evaluados en \$ 66.331.081 COP y se determina que el proyecto por tratamiento de láminas filtrantes es viable.

Por otro lado, se debe tener en cuenta que el tratamiento de láminas filtrantes presenta dos restricciones. Una de ellas es que el fluido residual a tratar no puede contener un porcentaje de sólidos mayor al 3%, puesto que esto podría reducir la efectividad de los lechos de filtro; en este caso, se tendrá que diluir los fluidos residuales a tratar y se puede plantear el costo de los equipos adicionales para llevar el fluido a las especificaciones. Otra restricción que se tiene es que no se ha evaluado con certeza si se puede recuperar el aceite después de terminado el tratamiento, tal como lo hace la compañía de tratamiento convencional.

<sup>54</sup> BANCO DE LA REPUBLICA. Proyecciones macroeconómicas de analistas locales y extranjeros - Informe sobre inflación. Colombia 2018

## 7. CONCLUSIONES

- Se identificaron los diferentes fluidos residuales provenientes de la perforación, tales como lodos de perforación base agua y base aceite, salmueras, slops y flocs, se describieron su procedencia y su composición.
- Se estableció que los contaminantes de los fluidos son retirados por medio procesos físico químicos para el tratamiento convencional; mientras que el tratamiento láminas filtrantes utiliza las funciones naturales de la vegetación, los suelos y los microorganismos asociados.
- Al analizar la matriz de acuerdo a las normas, se evidenció que el tratamiento de láminas filtrantes sobrepasa los valores máximos permitidos por la resolución 0631 del 2015 en los parámetros de hierro total e hidrocarburos totales. El hierro total es de 12,6 mg/L sobrepasando el valor máximo que es de 3 mg/L y los hidrocarburos totales presentan una concentración de 15mg /L por encima del 10mg/L permitido.
- Se evidenció que la diferencia de remoción entre los tratamientos convencional y láminas filtrantes para los parámetros DBO, grasas y aceites, sólidos suspendidos totales no son significativas y cumplen con el decreto 1594 de 1984, siendo su remoción por encima del 98% para ambos casos.
- Según la matriz de selección de acuerdo a la eficiencia, se determinó que la eficiencia en ambos tratamientos se encuentra por encima del 82% y son similares para los parámetros de fenoles y cloruros.
- Desde el punto de vista técnico, el tratamiento convencional presenta mejores resultados en la remoción de los parámetros evaluados, cumpliendo con los límites establecidos en las normas. Sin embargo, el tratamiento de láminas filtrantes cumple con quince parámetros de los diecisiete medidos, por lo cual realizando los ajustes necesarios puede ser utilizado en casos de contingencia.
- Desde el punto de vista financiero, utilizando el indicador del CAUE se evidencia que el tratamiento de láminas filtrantes presenta un ahorro en costos por año evaluados en \$ 66.331.081COP frente al tratamiento convencional. Por lo cual, se considera factible la implementación de la nueva tecnología de tratamientos de láminas filtrantes.
- Se demuestra la viabilidad de la implementación del tratamiento de láminas filtrantes al realizar la evaluación técnico-financiera, dado que las aguas resultantes no se asperjan en el medio ambiente, sino que se reutilizan para el mantenimiento del mismo sistema de láminas.

## 8. RECOMENDACIONES

- Se sugiere evaluar para el tratamiento de láminas filtrantes la opción de recircular las aguas por los sistemas de láminas con la finalidad de aumentar el porcentaje de remoción de los contaminantes.
- Se recomienda realizar el mantenimiento de las entradas y salidas de los sistemas de las láminas filtrantes: lodos, slops y ADR con el fin de prevenir taponamientos de arcillas que puedan alterar los resultados finales.
- En vista de que el contenido de sólidos debe ser menor al 3% en el sistema de láminas filtrantes, realizar el estudio de la dilución de los fluidos residuales a tratar estimando los costos de los equipos adicionales que se involucren en la operación.
- Medir el parámetro de fenoles de las aguas de entrada a los tratamientos, para llevar el control en los costos de los servicios relacionados a láminas filtrantes.

## BIBLIOGRAFÍA

ANH. Catalogo open round Tipo 1. Bogotá. 2009.p.13.

----- . Cuenca Llanos Orientales. Integración de Geológica de la digitalización y Análisis de Núcleos. Bogotá D.C. 2012. p.46-52.

BACCA. G. Ingeniería económica, Bogotá, Colombia, 2008, octava edición, p. 223-237.

----- .----- Bogotá, Colombia, 2008, octava edición, p. 15

----- .----- Bogotá, Colombia, 2008, octava edición, p. 217.

BAKER HUGHES. Drilling Fluids reference manual. 2006.p. 15.7

----- .----- .2006. p. 14.30

----- .----- .2006. p. 14.22

BANCO DE LA REPUBLICA. Proyecciones macroeconómicas de analistas locales y extranjeros - Informe sobre inflación. Colombia 2018.

CÁRDENAS, Diego. Floreña, nuevo campo petrolero: El piedemonte llanero sigue haciendo brotar petróleo de sus entrañas. En: El Tiempo [en línea]. (30 de mayo de 1995). Disponible en: <<http://www.eltiempo.com/archivo/documento/MAM-334924>> [citado en 18 de febrero de 2018]

COLOMBIA. AUTORIDAD NACIONAL DE LICENCIAS AMBIENTALES. Certificación 0079-16 (06 mayo, 2016). Por la cual se certifica que son acreditables algunos elementos y equipos de la solicitud de exclusión sobre las ventas IVA, presentada por la Empresa Tecnología Ecológica de Oriente, y se toman otras determinaciones. Bogota: ANLA, 2016. p.9

COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO. Decreto 1594 (26, junio, 1984) Por el cual se reglamenta parcialmente el [Título I de la Ley 9 de 1979 ], así como el [ Capítulo II del Título VI -Parte III- Libro II y el Título III de la Parte III

-Libro I- del Decreto Ley 2811 de 1974] en cuanto a usos del agua y residuos líquidos. Bogotá: El Ministerio. p. 19-21

----- . Resolución 0631(17, marzo, 2015). Por el cual se establece los parámetros y valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado y se dictan otras disposiciones. Bogotá: El ministerio, 2015.p 12-13

Environmental Protection Agency. Phytoremediation resource guide. Washington, DC: 1999. p.11-12

EQUIÓN ENERGÍA LIMITED. Piedemonte Stage II Development Wells Basis of Design End of Select. Bogotá. 2016. p.11.

----- . Solids control waste Guidebook.2008, p.30

GUTIERREZ, Zorel. Efecto del Espaciamiento y Longitud de Fracturas Sobre la Permeabilidad de un Yacimiento Naturalmente Fracturado: Caso Piedemonte Llanero Colombiano. Trabajo de grado Magister en Ingeniería de Petróleo. Medellín: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas. 2016. p. 37

GUZMÁN CASTRO, Fernando. Introducción a la ingeniería económica. 2004. p. 65.

INGEOMINAS, UIS. Geología del Piedemonte Llanero en la Cordillera Oriental, Departamentos de Arauca y Casanare, Memoria. Bucaramanga. 2010. p. 19.

INSTITUTO AMERICANO DEL PETRÓLEO. Manual de fluidos de perforación. Dallas, Texas. 2014.p. 2.1

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS. Normas colombianas para la presentación de tesis, trabajos de grado, y otros trabajos de investigación. Sexta actualización. Bogota: ICONTEC, 2008. NTC 1486

----- . Referencias bibliográficas, contenido forma y escritura. Bogotá: ICONTEC, 2008. NTC 5613

----- . Referencias documentales para fuentes de información electrónica. Bogotá: ICONTEC, 1998. NTC 4490

Láminas Filtrantes de flujo horizontal. [En Línea] [Citado 20 de marzo del 2018]: Disponible en:< <https://www.biolodos.com/web/tecnologia/>>

Láminas Filtrantes de flujo vertical. [En Línea] [Citado 20 de marzo del 2018]: Disponible en:< <https://www.biolodos.com/web/tecnologia/>>

Láminas Filtrantes de flujo vertical y horizontal. [En Línea] [Citado 20 de marzo del 2018]: Disponible en:< <https://www.biolodos.com/web/tecnologia/>>

LESTO, A. and KUSUMO, P. Bioremediation for Wastesolid and Wastewater at Drilling Waste Management. Nusa Dua, Bali, Indonesia: Society of Petroleum Engineers, SPE-176300. 2015. p. 2

Mapa de Colombia-Casanare. [En Línea] [Citado 20 de febrero del 2018]: Disponible en:<<https://www.google.com.co/maps/place/Casanare/@5.2919857,-72.5770963,8z/>>. EDIN. Contract Blocks. Piedemonte. IHS Inc. 2017. p.5.

TIEMPO. Vía libre al Campo Floreña: con la aprobación de la comerciabilidad del campo Floreña, la Empresa Colombiana de Petróleos (Ecopetrol) y la British Petroleum iniciarán el desarrollo conjunto de un nuevo complejo petrolífero en el piedemonte llanero del Casanare. En: El Tiempo [en línea]. (3 de noviembre de 1998). Disponible en: <<http://www.eltiempo.com/archivo/documento/MAM-830998>> [citado en 18 de febrero de 2018]

RICE, Eugene, et al. Standard methods for the examination of water and wastewater. 21 ed. Washington, DC: American Public Health Associate. 2005, Section 2504

----- Washington, DC: American Public Health Associate. 2005, Section 4500-O 6

----- Washington, DC: American Public Health Associate. 2005, Section 5210

----- Washington, DC: American Public Health Associate. 2005, Section 5220 B

----- Washington, DC: American Public Health Associate. 2005, Section 2540D

----- Washington, DC: American Public Health Associate. 2005, Section 2520 B.

----- Washington, DC: American Public Health Associate. 2005, Section 2540D

----- Washington, DC: American Public Health Associate. 2005, Section 5520 A

----- Washington, DC: American Public Health Associate. 2005, Section 5520 D

----- Washington, DC: American Public Health Associate. 2005, Section 5520 F

----- Washington, DC: American Public Health Associate. 2005, Section 5520D

----- Washington, DC: American Public Health Associate. 2005, Section 5530

----- Washington, DC: American Public Health Associate. 2005, Section 4500Cl-

----- Washington, DC: American Public Health Associate. 2005, Section 4500-SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>

----- Washington, DC: American Public Health Associate. 2005, Section 3500 NaB

----- Washington, DC: American Public Health Associate. 2005, Section 3500-Pb B

----- Washington, DC: American Public Health Associate. 2005, Section 3500-Cr B

----- Washington, DC: American Public Health Associate. 2005, Section 3500-Fe B

----- Washington, DC: American Public Health Associate. 2005, Section 3500-Ni

ROMERO, Jairo. Purificación del agua. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería. 2000

SARMIENTO, Luís. Llanos basin. Volumen 9. Bogotá.: ANH. p. 101-104

TIEMPO. Floreña empieza a producir petróleo. En: El Tiempo [en línea]. (21 de junio de 2001). Disponible en: < <http://www.eltiempo.com/archivo/documento/MAM-483565>> [citado en 20 de febrero de 2018]

TIEMPO. Floreña: Nuevo campo petrolero. En: El Tiempo [en línea]. (30 de mayo de 1995). Disponible en: < <http://www.eltiempo.com/archivo/documento/MAM-334924> > [citado en 20 de febrero de 2018]

WOJTANOWICZ. K, Andrew. Modern solids control: A centrifuge dewatering-process study. Louisiana , septiembre 1988. Modificado por el autor. SPE-16098-PA

# **ANEXOS**

**ANEXO A.**  
**PRODUCCIÓN FISCALIZADA DE GAS Y CRUDO DE LOS CAMPO FLOREÑA Y PAUTO REPORTADOS EN LA ANH 2013-2017**

Periodo		Floreña		Pauto	
		gas (MPCD)	Crudo (BPD)	gas (MPCD)	Crudo (BPD)
2013	Enero	78,8	8.287,1	205,9	20.757,0
	Febrero	60,3	6.870,9	214,7	21.650,4
	Marzo	59,0	6.651,6	206,7	20.750,7
	Abril	58,0	6.603,8	201,6	20.302,2
	Mayo	57,9	6.202,4	197,7	19.473,8
	Junio	56,6	6.077,0	221,3	21.263,8
	Julio	58,4	6.127,2	183,4	18.335,5
	Agosto	52,3	5.826,0	179,6	17.992,8
	Septiembre	55,6	5.820,2	185,0	18.204,4
	Octubre	49,8	5.563,9	197,2	18.875,7
	Noviembre	54,9	5.703,0	202,3	19.300,4
	Diciembre	47,6	5.283,3	224,4	21.286,3
2014	Enero	47,4	6.251,4	229,6	19.849,4
	Febrero	54,3	5.575,6	225,7	21.121,4
	Marzo	51,0	5.132,6	220,1	20.487,6
	Abril	52,3	5.380,1	217,6	20.435,9
	Mayo	51,1	5.291,1	227,0	21.313,1
	Junio	54,1	5.461,5	228,5	21.595,4
	Julio	51,8	5.587,2	226,7	21.592,4
	Agosto	48,8	5.725,5	223,8	20.620,3
	Septiembre	53,0	6.257,3	216,0	20.164,2
	Octubre	50,6	6.103,2	227,0	20.727,6
	Noviembre	45,3	5.804,2	274,0	24.724,1
	Diciembre	33,7	4.006,3	243,5	21.067,1
2015	Enero	44,1	5.988,9	290,4	24.292,1
	Febrero	39,5	5.280,3	269,3	23.894,4
	Marzo	41,3	5.718,5	262,5	24.114,8
	Abril	39,2	5.506,1	299,4	28.064,8
	Mayo	44,5	6.345,5	319,9	30.271,0
	Junio	50,8	7.130,3	329,4	31.046,0
	Julio	41,7	6.202,9	305,3	29.224,4
	Agosto	63,2	9.101,8	357,7	31.939,5
	Septiembre	62,0	9.304,0	351,8	31.507,7
	Octubre	67,4	9.333,9	363,8	31.134,0
	Noviembre	65,9	9.155,9	360,5	30.442,0
	Diciembre	88,0	10.915,3	360,0	29.914,9

2016	Enero	96,8	11.508,2	365,4	29.931,3
	Febrero	85,3	10.238,3	367,1	29.767,5
	Marzo	92,0	10.723,0	376,1	29.449,8
	Abril	95,9	10.828,1	371,1	29.909,2
	Mayo	99,1	11.084,1	382,4	30.473,5
	Junio	108,0	12.011,0	367,8	29.395,5
	Julio	99,8	11.490,2	394,7	31.269,2
	Agosto	111,2	11.244,9	393,7	31.027,1
	Septiembre	116,5	11.598,6	404,7	31.029,0
	Octubre	119,9	11.723,1	410,6	30.988,4
	Noviembre	120,5	11.647,7	383,6	29.353,4
	Diciembre	124,1	11.388,9	391,3	29.877,1
2017	Enero	120,5	10.873,7	374,8	28.665,1
	Febrero	130,6	11.349,9	383,8	29.372,8
	Marzo	132,7	11.246,4	379,6	29.206,8
	Abril	120,9	10.148,1	365,8	28.377,7
	Mayo	130,3	10.495,9	428,7	33.077,4
	Junio	132,3	10.225,6	435,8	29.802,9
	Julio	125,1	9.802,6	414,8	31.082,6
	Agosto	118,6	8.636,3	424,4	31.401,7
	Septiembre	129,8	9.841,1	395,0	28.459,4
	Octubre	142,9	10.902,4	417,5	29.286,7

**ANEXO B.**  
**ÍNDICE DE PRECIOS AL CONSUMIDOR IPC 2003 AL 2018**



**Colombia, Índice de Precios al Consumidor (IPC)**  
**(variaciones porcentuales) 2003 – 2018**

Actualizado el 5 de mayo de 2018	Base Diciembre de 2008 = 100,00															
	Mes	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Enero	1,17	0,89	0,82	0,54	0,77	1,06	0,59	0,69	0,91	0,73	0,30	0,49	0,64	1,29	1,02	0,63
Febrero	1,11	1,20	1,02	0,66	1,17	1,51	0,84	0,83	0,60	0,61	0,44	0,63	1,15	1,28	1,01	0,71
Marzo	1,05	0,98	0,77	0,70	1,21	0,81	0,50	0,25	0,27	0,12	0,21	0,39	0,59	0,94	0,47	0,24
Abril	1,15	0,46	0,44	0,45	0,90	0,71	0,32	0,46	0,12	0,14	0,25	0,46	0,54	0,50	0,47	0,46
Mayo	0,49	0,38	0,41	0,33	0,30	0,93	0,01	0,10	0,28	0,30	0,28	0,48	0,26	0,51	0,23	
Junio	-0,05	0,60	0,40	0,30	0,12	0,86	-0,06	0,11	0,32	0,08	0,23	0,09	0,10	0,48	0,11	
Julio	-0,14	-0,03	0,05	0,41	0,17	0,48	-0,04	-0,04	0,14	-0,02	0,04	0,15	0,19	0,52	-0,05	
Agosto	0,31	0,03	0,00	0,39	-0,13	0,19	0,04	0,11	-0,03	0,04	0,08	0,20	0,48	-0,32	0,14	
Septiembre	0,22	0,30	0,43	0,29	0,08	-0,19	-0,11	-0,14	0,31	0,29	0,29	0,14	0,72	-0,05	0,04	
Octubre	0,06	-0,01	0,23	-0,14	0,01	0,35	-0,13	-0,09	0,19	0,16	-0,26	0,16	0,68	-0,06	0,02	
Noviembre	0,35	0,28	0,11	0,24	0,47	0,28	-0,07	0,19	0,14	-0,14	-0,22	0,13	0,60	0,11	0,18	
Diciembre	0,61	0,30	0,07	0,23	0,49	0,44	0,08	0,65	0,42	0,09	0,26	0,27	0,62	0,42	0,38	
En año corrido	6,49	5,50	4,85	4,48	5,69	7,67	2,00	3,17	3,73	2,44	1,94	3,66	6,77	5,75	4,09	2,05

Fuente: DANE

Promedio Simple del 2007 al 2017	4,2
----------------------------------	-----