

METODOLOGÍA PARA EL TRATAMIENTO DE RIPIOS DE PERFORACIÓN EN
UN POZO ESTRATIGRÁFICO PROFUNDO

SAMUEL ANTONIO ARÉVALO GARZÓN
MARIA PAULA TRIANA TAPIAS

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA

2013

METODOLOGÍA PARA EL TRATAMIENTO DE RIPIOS DE PERFORACIÓN EN
UN POZO ESTRATIGRÁFICO PROFUNDO

SAMUEL ANTONIO ARÉVALO GARZÓN
MARIA PAULA TRIANA TAPIAS

Proyecto de grado presentado como requisito para optar al título de
INGENIERO DE PETRÓLEOS

Director:

MSc. CESAR AUGUSTO PINEDA GOMEZ

Codirectores:

ALEXANDER BELTRAN BARRERA
ING. OSCAR FERNANDO LOPEZ SILVA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA

2013

DEDICATORIA

A Dios por siempre darme fortaleza, salud y sabiduría durante toda mi vida.

A mi madre por su amor incondicional, confianza, amistad, sacrificio y apoyo durante toda mi vida.

A mi padre por su amistad, compañía y buenos consejos.

A mis hermanos, amigos y familiares quienes aportaron su grano de arena para hacer posible mi formación profesional.

A mis amigos de Flekk Oil Company (Didier, Jonathan, Oscar, Oriol, Stivenson) quienes más que amigos fueron como hermanos durante el transcurso de mi carrera.

Samuel Antonio Arévalo Garzón

DEDICATORIA

Esta tesis es parte de mi vida y comienzo de otras etapas por esto y más, la dedico con todo mi amor y cariño a Dios por haberme dado la sabiduría y fortaleza para que fuera posible alcanzar este triunfo y por regalarme una familia maravillosa

Con mucho cariño principalmente a mis padres que me dieron la vida y han estado conmigo en todo momento. Gracias por todo papi y mami por darme una carrera para mi futuro y por creer en mí, aunque hemos pasado momentos difíciles siempre han estado apoyándome y brindándome todo su amor, por todo esto les agradezco el que estén a mi lado. Los quiero con todo mi corazón y este triunfo es para ustedes y para mi hermano que siempre me apoyo, te quiero mucho nanito.

A toda mi familia que con sus consejos me hicieron una mujer de bien y a los cuales les deseo felicidad.

A ti tía Vicky que aunque no estás aquí ahora conmigo porque Dios lo quiso así, se que tu alma si lo está por que tuviste los mismo sueños que yo, te dedico mi tesis y Nunca te olvidare.

A todos mis amigos, muchas gracias por estar conmigo en todo este tiempo donde he vivido momentos felices y tristes, gracias por ser mis amigos y recuerden que siempre los llevare en mi corazón

Les agradezco a todos ustedes el haber llegado a mi vida y cada uno de los momentos compartidos quedan guardados en mi corazón y ese compartir que me ayudo a crecer y valorar a las personas que me rodearon en todo este tiempo. Los quiero mucho y siempre harán parte de mi corazón.

María Paula Triana Tapias

AGRADECIMIENTOS

A Dios creador del universo y dueño del mundo que me permitió crear otros mundos posibles.

A los ingenieros Cesar Augusto Pineda Gómez y Alexander Beltrán Barrera, quienes siempre tuvieron la mejor disposición para brindar su orientación y sus conocimientos para llevar a buen término este trabajo.

A los ingenieros Jorge Calvete, Werney Machuca, Edgar Márquez, Carlos Rueda y demás profesionales de los pozos ANH-PATIA 1 y ANH-BVTURA 1 por su asesoramiento durante el desarrollo de las pruebas de campo.

A la escuela de ingeniería de petróleos de nuestra Universidad Industrial de Santander, por el aporte hecho a nuestra formación personal y por hacer de nosotros unos profesionales íntegros.

Y a todas las personas que directa o indirectamente hicieron posible la culminación de nuestra tesis

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	21
1. RIPIOS DE PERFORACIÓN	22
1.1 GENERALIDADES	22
1.1.1 Manejo de los ripios de perforación	22
1.1.2 Generación de los ripios de perforación	23
1.1.3 Volumen de ripios producidos.....	23
1.1.4 Composición de los ripios de perforación	24
1.1.5 Efecto de los ripios sobre el proceso de perforación	25
1.2 TRATAMIENTO PRIMARIO	26
1.2.1 Objetivos.....	26
1.2.2 Clasificación según tamaño de partícula	27
1.2.2.1. Tamaño de las partículas/puntos de corte	27
1.2.2.2. Clasificación API del tamaño de los sólidos.....	28
1.2.3 Métodos aplicados para el control de sólidos	28
1.2.3.1 Dilución	28
1.2.3.2 Desplazamiento	28
1.2.3.3 Asentamiento.....	30
1.2.3.4 Separación mecánica	30
1.2.4 Equipo para control de sólidos.....	30
1.2.4.1 Zarandas vibratorias (Shale Shakers).....	31
1.2.4.2 Hidrociclones	32
1.2.4.3 Desarenadores (Desanders).....	33
1.2.4.4 Desarcilladores (Desilters).....	34
1.2.4.5 Limpiadores de Lodo (Mud Cleaners).....	35
1.2.4.6 Centrífugas	36
1.3 TRATAMIENTO SECUNDARIO.....	37
1.3.1 Objetivos.....	37
1.3.2 Deshidratación del lodo (<i>Dewatering</i>).....	37
1.3.3 Procedimientos químicos para la deshidratación del lodo	38
1.3.3.1 Coagulación.....	38
1.3.3.2 Floculación.....	40

1.3.4 Procedimientos físicos para la deshidratación del lodo	42
1.3.4.1 Centrifugación.....	42
1.3.5 Tratamiento de aguas residuales.....	43
1.3.5.1 Desinfección	43
1.3.5.2 Estabilización de pH	43
1.3.5.3 Coagulación/Floculación.....	44
1.3.5.4 Oxidación.....	45
1.4 MANEJO Y DISPOSICIÓN DE CORTES DE PERFORACIÓN.....	46
1.4.1 Técnicas convencionales.....	46
1.4.1.1 Almacenamiento temporal	46
1.4.1.2.1 Celdas.....	47
1.4.1.2.2 Confinamiento en piscinas.....	48
1.4.1.2.3 Dispersión en el terreno (<i>Landsread</i>).....	49
1.4.1.2.4 Estabilización/Solidificación	49
1.4.2 Técnicas no convencionales.....	50
1.4.2.1.1 Aglomeración con alquitrán de carbón.....	50
1.4.2.1.2 Lavado de suelos.....	50
1.4.2.1.3 Ventilación de suelos	51
1.4.2.2.1 Bioreactores.....	51
1.4.2.2.2 Compostaje (<i>Composting</i>)	52
1.4.2.2.3 Landfarming.....	53
1.4.2.3.1 Calentamiento por radiofrecuencia	54
1.4.2.3.2 Desorción térmica	54
1.4.2.3.3 Incineración	56
1.4.2.3.4 Vitrificación	56
1.4.2.4 Inyección de ripios de perforación	57
2. DESARROLLO DE PRUEBAS	58
2.1 LOCALIZACIÓN DEL PROYECTO	58
2.1.1 Localización del Pozo ANH-PATÍA 1-ST-P.....	58
2.1.2 Localización del Pozo ANH-BVTURA 1-ST-P.....	59
2.2 GENERALIDADES POZOS ESTRATIGRÁFICOS ANH-PATIA 1 Y ANH-BVTURA 1	61

2.3 EQUIPOS INSTALADOS PARA TRATAMIENTO	63
2.3.1 Unidad de Dewatering	63
2.3.2 Tratamiento de aguas	64
2.3.3 Laboratorio.....	64
2.3.4 Control de sólidos	65
2.4 DISEÑO DE PRUEBAS A EJECUTAR	66
2.4.1 Ensayos físicos	66
2.4.1.1 Filtrado API	66
2.4.1.2 Medición de pH	67
2.4.1.3 Prueba de Retorta.....	69
2.4.2 Ensayos químicos.....	70
2.4.2.1 Dureza	70
2.4.2.2 Cloruros	71
2.4.2.3 Alcalinidad	71
2.4.2.4 Espectrofotómetro.....	72
2.5 LIMITES PERMISIBLES PARA LA DISPOSICIÓN DE DESECHOS DE PERFORACIÓN	73
2.5.1 Aguas residuales	73
2.5.2 Cortes de perforación	76
2.5.3 Lixiviados	77
3. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	78
3.1 ANÁLISIS FISICOQUIMICOS DE RIPIOS Y FLUIDOS.	78
3.1.1 Ripios de perforación	78
3.1.2 Lixiviados	79
3.1.3 Aguas residuales	81
3.2 EVALUACIÓN DEL TRATAMIENTO.....	84
3.2.1 Tratamiento de ripios de perforación	84
3.2.2 Tratamiento de aguas residuales.....	88
3.3 EFECTO DE LOS CONTAMINANTES SOBRE EL RECURSO SUELO	93
3.4 EVALUACIÓN DE LAS TÉCNICAS ALTERNATIVAS PARA EL MANEJO DE DESECHOS DE PERFORACIÓN	95
3.5 DISEÑO DE METODOLOGÍA PARA EL TRATAMIENTO DE CORTES EN POZOS ESTRATIGRÁFICOS	99

3.5.1 Tratamiento primario de cortes en pozos estratigráficos	100
3.5.2 Tratamiento secundario de cortes en pozos estratigraficos.....	101
4. CONCLUSIONES	102
5. RECOMENDACIONES.....	104
BIBLIOGRAFÍA	113

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Composición de los recortes de perforación.....	25
Figura 2: Clasificación del tamaño de partícula	27
Figura 3: Método de dilución.....	29
Figura 4: Método de desplazamiento.....	29
Figura 5: Puntos de corte en equipos de control de sólidos	30
Figura 6: Zaranda vibratoria.....	31
Figura 7: Hidrociclón	32
Figura 8: Desarenadores	33
Figura 9: Desarcilladores	34
Figura 10: Limpiador de lodo (<i>Mud Cleaner</i>)	35
Figura 11: Centrífuga decantadora	36
Figura 12: Unidad de Dewatering	38
Figura 13: Centrífuga de alta velocidad	42
Figura 14: Coagulación de partículas en suspensión	44
Figura 15: Floculación de partículas en suspensión	45
Figura 16: Catch Tank	46
Figura 17: Celdas.....	47
Figura 18: Piscinas de confinamiento	48
Figura 19: Bioreactores.....	52
Figura 20: Compostaje.....	53
Figura 21: Unidad de Desorción térmica.....	55
Figura 22: Inyección de ripios de perforación	57
Figura 23: Localización del pozo estratigráfico ANH-PATIA 1-ST-P.....	59
Figura 24: Localización del pozo estratigráfico ANH-BVTURA 1-ST-P.....	60
Figura 25: Sistema de tratamiento para recortes de perforación	65
Figura 26: Filtroprensa API	67
Figura 27: Medición de pH.....	68
Figura 28: Equipo de retorta	69
Figura 29: Determinación de dureza.....	70
Figura 30: Determinación de cloruros.....	71
Figura 31: Determinación de alcalinidad.....	72

Figura 32: Espectrofotómetro DR 2000	72
Figura 33: Agua de Dewatering. Pozo ANH-BVTURA 1	82
Figura 34: Manejo de ripios. Pozo ANH-PATIA 1 ST-P	86
Figura 35: Manejo de ripios. Pozo ANH-BVTURA 1 ST-P	86
Figura 36: Muestra de agua (Dewatering). Pozo ANH-PATIA 1 ST-P	91
Figura 37: Muestra de agua (Red Fox). Pozo ANH-PATIA 1 ST-P.....	91
Figura 38: Muestra de agua (Tanque de tratamiento). Pozo ANH-PATIA 1 ST-P .	92
Figura 39: Muestra de agua (Tratada). Pozo ANH-PATIA 1 ST-P.....	92
Figura 40: Efectos de la salinidad sobre el suelo.....	94
Figura 41: Porcentaje de Humedad	96
Figura 42: Propiedades del lixiviado	96

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Clasificación API del tamaño de los sólidos.....	28
Tabla 2: Polímeros utilizados para el tratamiento de aguas	41
Tabla 3: Ficha técnica. Pozo ANH-PATIA 1 ST-P.....	61
Tabla 4: Estado mecánico. Pozo ANH-PATIA 1 ST-P	61
Tabla 5: Ficha técnica. Pozo ANH-BVTURA 1 ST-P	62
Tabla 6: Estado mecánico. Pozo ANH-BVTURA 1 ST-P	62
Tabla 7: Valores límite máximos permisibles. Parámetros de pH y temperatura ...	73
Tabla 8: Valores límite máximos permisibles. Parámetros generales.....	73
Tabla 9: Valores límite máximos permisibles en los vertimientos puntuales de los parámetros de pH y temperatura.....	74
Tabla 10: Valores límite máximos permisibles en los vertimientos puntuales de los parámetros generales.....	74
Tabla 11: Valores límite máximos permisibles en los vertimientos puntuales de los parámetros de concentración de iones, metales y metaloides	75
Tabla 12: Valores límite máximos permisibles en disposición de cortes de perforación	76
Tabla 13: Valores límite máximos permisibles en disposición de lixiviados.....	77
Tabla 14: Análisis fisicoquímicos de rípios de perforación. Pozo ANH-PATIA 1....	79
Tabla 15: Análisis fisicoquímicos de rípios de perforación pozo ANH-BVTURA 1 .	79
Tabla 16: Análisis fisicoquímicos de lixiviados. Pozo ANH-PATIA 1.....	80
Tabla 17: Análisis fisicoquímicos de lixiviados. Pozo ANH-BVTURA 1	81
Tabla 18: Análisis fisicoquímicos de aguas residuales. Pozo ANH-PATIA 1	82
Tabla 19: Análisis fisicoquímicos de aguas residuales. Pozo ANH-BVTURA 1	83
Tabla 20: Comportamiento del pH en los cortes de perforación. Pozos ANH-PATIA 1 y ANH-BVTURA 1	84
Tabla 21: Comportamiento del calcio en los cortes de perforación. Pozos ANH-PATIA 1 y ANH-BVTURA 1	85
Tabla 22: Comportamiento del porcentaje de humedad en los cortes de perforación. Pozos ANH-PATIA 1 y ANH-BVTURA 1	87
Tabla 23: Comportamiento del bario en los cortes de perforación. Pozos ANH-PATIA 1 y ANH-BVTURA 1	87
Tabla 24: Concentración de cloruros en el agua. Pozos ANH-PATIA 1 y ANH-BVTURA 1	89

Tabla 25: Valores de pH del agua. Pozos ANH-PATIA 1 y ANH-BVTURA 1.....	90
Tabla 26: Dureza del agua. Pozos ANH-PATIA 1 y ANH-BVTURA 1.....	90
Tabla 27: Técnicas de manejo alternativas para el manejo de cortes de perforación	97
Tabla 28: Ficha técnica del Abono ABIMGRA FOSFOAZUCAL	98
Tabla 29: Ficha técnica del Abono COMPUESTO ABIMGRA	98

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. EVALUACIÓN DE LAS TÉCNICAS ALTERNATIVAS SOBRE LAS PROPIEDADES FISICOQUIMICAS DE LOS CORTES DE PERFORACIÓN	105
ANEXO B. EVALUACIÓN DE LAS TÉCNICAS ALTERNATIVAS SOBRE LAS PROPIEDADES FISICOQUIMICAS DE LOS LIXIVIADOS.....	108

RESUMEN

TÍTULO: METODOLOGÍA PARA EL TRATAMIENTO DE RIPIOS DE PERFORACIÓN EN UN POZO ESTRATIGRÁFICO PROFUNDO.¹

AUTORES: SAMUEL ANTONIO ARÉVALO GARZÓN
MARIA PAULA TRIANA TAPIAS²

Palabras Claves: Metodología, tratamiento, ripios, perforación, medio ambiente.

DESCRIPCIÓN

La creciente preocupación para encontrar alternativas ambientalmente aceptables en la exploración y explotación de hidrocarburos, ha suscitado el desarrollo de investigaciones que se ocupan de revisar y evaluar cada paso del proceso en cuestión. De acuerdo a lo anterior se decidió estudiar el tratamiento de cortes producto de la perforación con lodos base agua, por cuanto este se constituye en un procedimiento que actualmente genera altos niveles de contaminación.

Por medio de pruebas experimentales se desarrollaron análisis fisicoquímicos con el fin de caracterizar detalladamente los desechos sólidos y líquidos de perforación, lo cual permitió efectuar la evaluación completa de los sistemas de tratamiento, manejo y disposición de ripios, lixiviados y aguas residuales en los pozos ANH-PATIA 1 ST-P y ANH-BVTURA 1 ST-P. Además, se realizó una comparación entre las técnicas de solidificación y estabilización con óxido de calcio implementadas actualmente en los campos petroleros y las técnicas alternativas para la remediación cortes de perforación.

Los resultados obtenidos demostraron que las técnicas de manejo utilizando madera fragmentada y abonos orgánicos son una opción viable para el tratamiento de desechos de perforación base agua en pozos estratigráficos, debido a que estabilizan el pH del corte, aportan gran cantidad nutrientes al suelo y tiene excelentes capacidades de absorción de agua.

Finalmente se presenta una metodología desarrollada que permite identificar y optimizar el tratamiento de los desechos generados por la perforación de pozos estratigráficos, garantizando el cumplimiento de las especificaciones técnicas establecidas por la legislación ambiental y reduciendo el riesgo de generar impactos ambientales.

¹ Proyecto de Grado

² Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director MSc. Cesar Augusto Pineda Gómez. Codirectores Ing. Oscar Fernando López Silva, Alexander Beltrán Barrera.

ABSTRACT

TITLE: METHODOLOGY FOR TREATING OF DRILLING CUTTINGS IN A DEEP STRATIGRAPHIC WELL.³

AUTHORS: SAMUEL ANTONIO ARÉVALO GARZÓN
MARIA PAULA TRIANA TAPIAS⁴

Keywords: Methodology, treatment, cuttings, drilling, environment.

DESCRIPTION

The growing concern for environmentally acceptable alternatives in the exploration and exploitation of hydrocarbons, has led the development of research concerned with reviewing and evaluating each step of the process in question. According to the above it was decided to study the cuttings treatment product of water-based drilling muds, because this becomes in a procedure currently generates high levels of contamination.

By means of experimental tests were developed physicochemical analysis in order to characterize in detail the solid waste and drilling fluids, allowing full evaluation of treatment, management and disposal systems of wastewater, leachate and cuttings in wells ANH -PATIA 1 ST-P and ANH-BVTURA 1 ST-P. Furthermore, a comparison was made between the solidification and stabilization techniques with calcium oxide currently implemented in the oil fields and alternative techniques for remediation of drill cuttings.

The results showed that management techniques using fragmented wood and organic fertilizers are a viable option for the treatment of water-based drilling cuttings in stratigraphic wells because they are able to stabilize pH, contribute a lot of nutrients to the soil and have excellent water absorption capacities.

Finally, is showed a methodology developed for identifying and optimizing the management of waste generated by the drilling of stratigraphic wells, ensuring compliance with the technical specifications set by environmental legislation and reducing the risk of generating environmental impacts.

³ Degree Project

⁴ Physicochemical Engineering's Faculty. Petroleum Engineering School. Director MSc. Cesar Augusto Pineda Gómez. Co-Directors Ing. Oscar Fernando López Silva, Alexander Beltrán Barrera.

INTRODUCCIÓN

Actualmente la industria de los hidrocarburos genera gran contaminación e innumerables impactos ambientales, desde el momento que se realiza la exploración de un campo, hasta la distribución de los productos derivados del petróleo. Los fluidos utilizados durante la perforación, contienen ciertos aditivos de origen químico, los cuales generan impactos tanto en los suelos como en las formaciones con acuíferos presentes, por este motivo las instituciones ambientales son cada vez más exigentes en cuanto a los parámetros de control de los residuos producidos por las actividades petroleras.

Debido a estas exigencias por parte del estado, la industria ha desarrollado e implementado diversos métodos de tratamientos para los desechos obtenidos durante la perforación de un pozo, desde equipos y procedimientos que se pueden catalogar en la actualidad como convencionales, hasta el desarrollo de nuevas tecnologías para mejorar su eficiencia y considerar características físicas y químicas nuevas. Sin embargo, estas nuevas tecnologías no se consideran económicamente viables, o no pueden ser implementadas en ciertas zonas geográficas, por esta razón se continúa utilizando las técnicas convencionales para el tratamiento de ripsos de perforación.

Mediante el desarrollo de este proyecto, se busca realizar un estudio técnico de las estrategias implementadas para el tratamiento de ripsos y aguas residuales provenientes de la perforación de un pozo petrolero, con el fin de plantear una nueva metodología para el caso específico de pozos estratigráficos. El proceso integrará las fases de análisis físico-químicos mediante pruebas de laboratorio, la cualificación y cuantificación de los contaminantes presentes, los parámetros de control y calidad establecidos por la normatividad ambiental vigente, los tipos de tratamiento más apropiados y la disposición final tanto de los residuos sólidos como líquidos generados por el uso de fluidos de perforación base agua.

1. RIPIOS DE PERFORACIÓN

1.1 GENERALIDADES

En la industria de los hidrocarburos el término ripios de perforación hace referencia a todos los recortes de material sólido los cuales han sido extraídos del pozo durante la perforación. Estos sólidos están conformados por una gran variedad de minerales, partículas terrígenas y sustancias líquidas que se encuentran acumuladas en las formaciones geológicas.

Durante la perforación la broca tritura las rocas presentes produciendo grandes cantidades de ripios, estos se mezclan con el fluido de perforación que se bombea hacia el fondo del pozo a través del interior de la tubería de trabajo.

Los fluidos de perforación son suspensiones de sólidos y agentes químicos disueltos en aceite o agua dependiendo de su naturaleza, los cuales se utilizan para mantener el control de la presión hidrostática del pozo, lubricar la broca, extraer los cortes de perforación, estabilizar las paredes del pozo y otras múltiples funciones.

1.1.1 Manejo de los ripios de perforación

Los ripios o cortes de perforación son tratados en piscinas de almacenamiento y de acuerdo a su disposición final pueden ser clasificados de una u otra manera, es decir, aquellos recortes que pueden ser recuperados, reciclados, reutilizados o eliminados se les denomina residuos de perforación. Por otra parte, los recortes que no cumplen con las especificaciones ambientales y que por tanto no pueden ser reciclados o reutilizados se les denomina desechos de perforación.

El tratamiento y disposición de los recortes de perforación dependen de las regulaciones gubernamentales de cada país y pueden comprender:

- ✓ Recortes de perforación base agua.
- ✓ Recortes de perforación base aceite.
- ✓ Fluidos de perforación y completamiento
- ✓ Aguas negras y grises (Aguas residuales domesticas)
- ✓ Aguas de esorrentía

1.1.2 Generación de los rípios de perforación

Las operaciones de perforación modernas generan diversas opciones para la eliminación de los residuos, que varían desde agua de escurrimiento contaminada hasta el envasado de materiales; sin embargo, la mayor parte de los residuos se asocia con el material excavado, o recortes del pozo.

Una vez que el lodo de perforación es inyectado y llega al fondo del pozo, arrastra consigo los sólidos desprendidos de las formaciones geológicas y los transporta hasta la superficie. Estos se incorporan gradualmente al fluido alterando sus propiedades físicas y químicas, por lo que debe ser acondicionado por el equipo de control de sólidos (ECS) que se encuentra instalado en superficie.

1.1.3 Volumen de rípios producidos

Durante las diferentes etapas de la operación, es posible estimar el volumen de residuos generado por el fluido de perforación y los recortes de extraídos. Cuando se perfora la primera sección de un pozo hasta la profundidad de asentamiento del revestimiento conductor, se obtienen la mayor cantidad de recortes, ya que esta es la etapa donde la perforación presenta el mayor diámetro de pozo.

El volumen de los recortes generados durante la perforación no es equivalente al volumen del hueco, generalmente el volumen de recortes es aproximadamente 2 o 3 veces mayor al volumen teórico del hueco. Un método práctico para calcular el volumen total de sólidos extraídos, es realizar un promedio entre el diámetro teórico del hueco y el diámetro máximo obtenido por el registro calíper para un determinado tramo de la perforación.

Posteriormente se estima el volumen mediante el uso de la siguiente expresión.

$$V_{Ripios} = \frac{Dh^2}{1029,4} * H * F_h$$

Donde:

- ✓ Dh: Diámetro promedio del hueco, [in]
- ✓ H: Profundidad, [ft]
- ✓ Fh: Factor de humedad
- ✓ V: Volumen de ripios de perforación, [Bb]

El exceso en volumen se presenta como consecuencia de:

- ✓ Inestabilidad del pozo.
- ✓ Operaciones de cementación y completamiento.
- ✓ Washouts.
- ✓ Creeps.
- ✓ Aditivos del lodo.
- ✓ Deficiencia del equipo de control de sólidos (ECS).

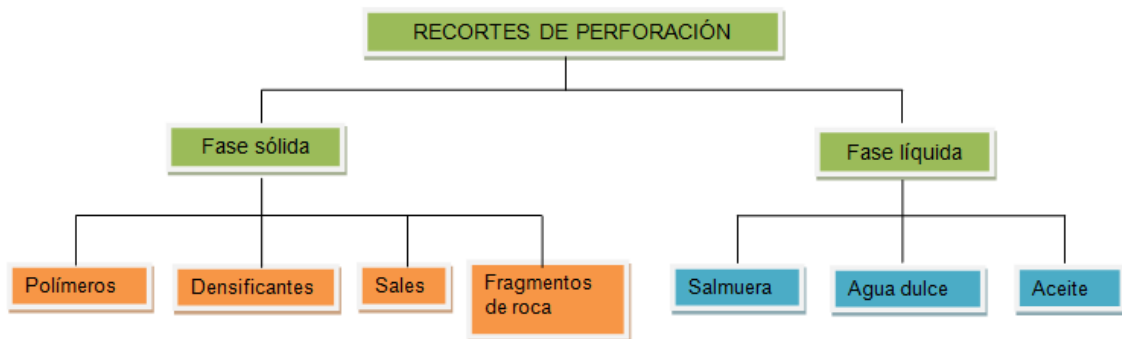
1.1.4 Composición de los ripios de perforación

Los ripios de perforación están constituidos por una fase líquida y una fase sólida que poseen propiedades físicas y químicas que afectan las condiciones del pozo.

La fase líquida puede estar constituida por agua dulce, agua salada, salmuera, aceite diesel, aceite mineral o aceite sintético (oleofinas y esteres).

La fase sólida se compone de materiales viscosificantes los cuales pueden ser naturales ó artificiales (polímeros), densificantes (barita, carbonato de calcio, galena, hematita y siderita), sales (cloruro de sodio, cloruro de potasio, cloruro de calcio, sulfato de calcio, bicarbonato de sodio, sales de amonio y nitratos), aire, espumas y fragmentos de roca provenientes de las diferentes formaciones geológicas.

Figura 1: Composición de los recortes de perforación



Fuente: Autores

1.1.5 Efecto de los ripios sobre el proceso de perforación

Los tipos y las cantidades de sólidos presentes en los sistemas de lodo determinan la densidad del fluido, la viscosidad, los esfuerzos de gel, la calidad del revoque y el control de filtración, así como otras propiedades químicas y mecánicas. Algunos efectos del aumento de los ripios sobre el proceso de perforación son:

- ✓ Aumento en el costo del fluido.
- ✓ Mayor dificultad para mantener las óptimas propiedades geológicas.
- ✓ Aumento en la frecuencia del atascamiento diferencial.
- ✓ Reducción de la vida útil de la broca y un aumento en la rata de desgaste de las piezas de la bomba.
- ✓ Reducción en la rata de penetración (ROP).

1.2 TRATAMIENTO PRIMARIO

La remoción de sólidos es uno de los más importantes aspectos del control del sistema de lodo, ya que tiene un impacto directo sobre la eficacia de la perforación.

El tratamiento primario se logra utilizando uno o varios de los principios básicos de separación de sólidos:

- ✓ Sedimentación.
- ✓ Vibración.
- ✓ Centrifugación.

1.2.1 Objetivos

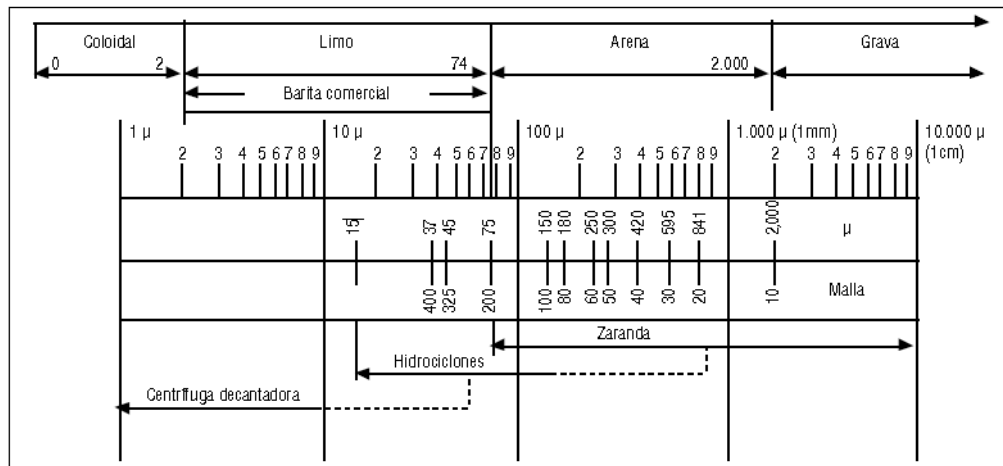
- ✓ Maximizar la extracción de sólidos perforados
- ✓ Minimizar las pérdidas de lodo
- ✓ Minimizar la pérdida de sólidos comerciales (barita)
- ✓ Devolver lodo limpio al pozo
- ✓ Mantener adecuada reología de lodo para que cumpla sus funciones

1.2.2 Clasificación según tamaño de partícula

Es importante entender la manera en que los tamaños de las partículas contenidas en el lodo de perforación se clasifican y los tipos de sólidos que corresponden a cada categoría. Las partículas del lodo de perforación pueden variar de arcillas muy pequeñas (menos de 1/25.400 de pulgada) a recortes muy grandes (más de una pulgada). Debido a las partículas extremadamente pequeñas, los tamaños están indicados en micrones.⁵

1.2.2.1. Tamaño de las partículas/puntos de corte

Figura 2: Clasificación del tamaño de partícula



Fuente: Instituto Americano del Petróleo. Manual de Fluidos de Perforación. Dallas, Texas.

⁵ Instituto Americano del Petróleo. Manual de Fluidos de Perforación. Dallas, Texas.

1.2.2.2. Clasificación API del tamaño de los sólidos

Tabla 1: Clasificación API del tamaño de los sólidos

CATEGORÍA	TAMAÑO	EJEMPLO
Coloidal	2 μ o menos	Bentonita, arcillas y sólidos perforados ultrafinos
Limo	2 - 74 μ (< Malla 200)	Barita, limo y sólidos perforados finos
Arena	74 - 2000 μ (Malla 200 -10)	Arena y sólidos perforados
Grava	Mas de 2000 μ (> Malla 10)	Sólidos perforados, grava y cantos rodados

Fuente: Instituto Americano del Petróleo. Manual de Fluidos de Perforación. Dallas, Texas.

1.2.3 Métodos aplicados para el control de sólidos

Existen cuatro formas de reducir la concentración de sólidos en el lodo y así mantener las propiedades deseadas del fluido de perforación.

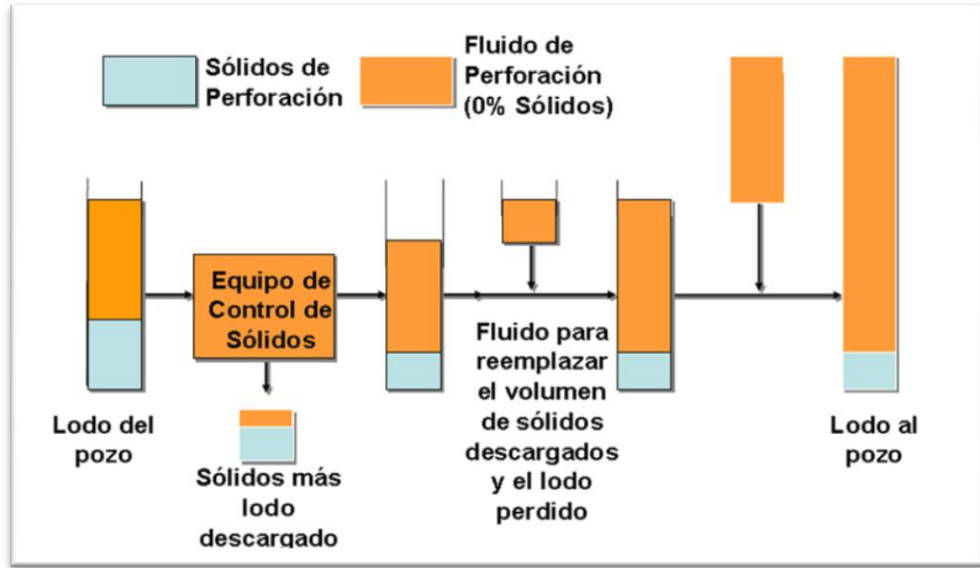
1.2.3.1 Dilución

La dilución consiste en agregar un volumen de fluido base al lodo de perforación, permitiendo la reducción de la concentración de sólidos en volumen. Este es el método más caro para el control de sólidos, y el propósito del control mecánico es el de minimizar los requerimientos de dilución.

1.2.3.2 Desplazamiento

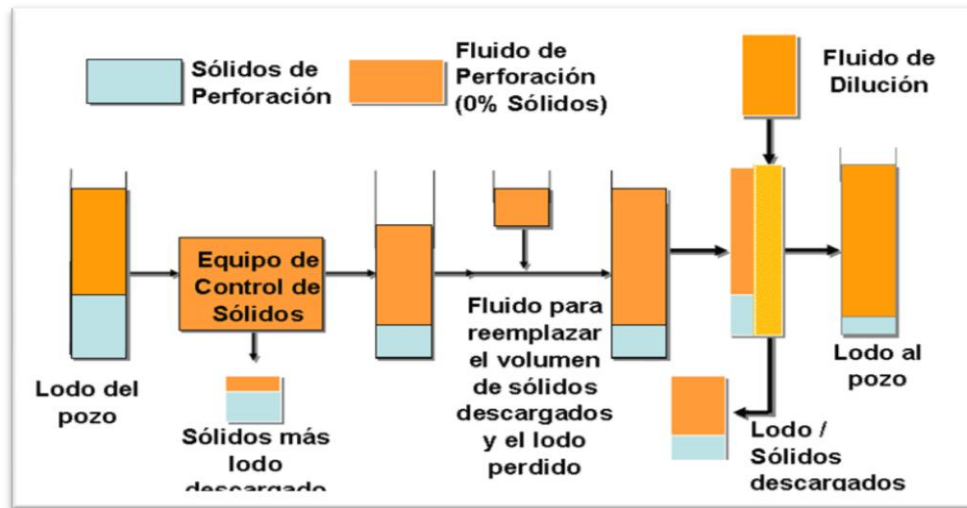
El desplazamiento consiste en la remoción de grandes cantidades de lodo reemplazándolas por un nuevo fluido con óptimas propiedades reológicas.

Figura 3: Método de dilución



Fuente: MI SWACO. 2004. Curso de control de sólidos.

Figura 4: Método de desplazamiento



Fuente: MI SWACO. 2004. Curso de control de sólidos.

1.2.3.3 Asentamiento

Es la separación de partículas sólidas del fluido por efecto de la gravedad debido a la diferencia de densidad entre los sólidos y el líquido. Depende del tamaño de partículas, gravedad específica y viscosidad del lodo.

1.2.3.4 Separación mecánica

Es la separación selectiva de los sólidos perforados del lodo por diferencias de tamaño y masa. Hay varios tipos de equipos los cuales son diseñados para operar eficientemente bajo condiciones específicas.

1.2.4 Equipo para control de sólidos

Es importante optimizar la remoción de sólidos del sistema de fluidos durante la perforación para minimizar los costos de dilución del lodo y reducir la cantidad de líquido y sólidos generados. Cada pieza de equipo del sistema de control de sólidos, desde las zarandas hasta las centrífugas son de suficiente capacidad para el manejo de los volúmenes utilizados durante la perforación.

Figura 5: Puntos de corte en equipos de control de sólidos



Fuente: MI SWACO. 2004. Curso de control de sólidos.

1.2.4.1 Zarandas vibratorias (Shale Shakers)

Los dispositivos de control de sólidos más importantes son las zarandas, las cuales son mallas vibratorias utilizadas para eliminar los recortes del lodo con tamaños mayores a 74 micras. Las zarandas constituyen la primera etapa del sistema de limpieza de lodo y remoción de sólidos siendo esta línea de defensa más eficiente del tratamiento primario.

Las zarandas se diferencian de los otros equipos de eliminación de sólidos en que producen un corte de prácticamente 100% (D100) al tamaño de abertura de la malla. Las zarandas pueden eliminar hasta 90% de los sólidos generados. Las zarandas no pueden eliminar los sólidos que tienen tamaños de limo y coloidales, por lo tanto resulta necesario usar la dilución y otros equipos para controlar los sólidos perforados ultrafinos.⁶

Figura 6: Zaranda vibratoria



Fuente: www.slb.com

⁶ Instituto Americano del Petroleo. *Manual de Fluidos de Perforación*. Dallas, Texas.

1.2.4.2 Hidrociclones

Son dispositivos cónicos de separación de sólidos en los cuales la energía hidráulica se convierte en fuerza centrífuga. El lodo es alimentado tangencialmente por una bomba centrífuga a través de la entrada de alimentación al interior de la cámara de alimentación. Las fuerzas centrífugas así desarrolladas multiplican la velocidad de decantación del material de fase más pesado, forzándolo hacia la pared del cono. Las partículas más livianas se desplazan hacia adentro y arriba en un remolino espiral hacia la abertura de rebasamiento de la parte superior.⁷

Figura 7: Hidrociclón



Fuente: www.slb.com

⁷ Baroid. *Manual de Fluidos de Perforación*. Houston, Texas.

1.2.4.3 Desarenadores (Desanders)

Los desarenadores son estructuras hidráulicas que tienen la función de mejorar la calidad del lodo. En general se usa un hidrociclón de 6 pulgadas de diámetro interior (DI) o más grande, con una unidad compuesta de dos hidrociclones de 12 pulgadas, cada uno de los cuales suele tener una capacidad de 500 gpm.⁸

Los desarenadores son usados en lodos con poco peso para separar partículas tamaño arena mayores de 44 micrones. En lodos pesados no es recomendable usar este equipo debido a que la densidad de la barita es sustancialmente más alta que la de los sólidos perforados y pudiera ser eliminada accidentalmente.

Figura 8: Desarenadores



Fuente: www.adriatech.com

⁸ Instituto Americano del Petroleo. *Manual de Fluidos de Perforación*. Dallas, Texas.

1.2.4.4 Desarcilladores (Desilters)

Los desarcilladores son estructuras hidráulicas que tienen la función de remover las partículas de tamaño limo o arcilla (6 – 40 micras) provenientes de los fluidos de perforación. En general se utiliza un hidrociclón de 4 pulgadas de diámetro interno para deslimizar, con una unidad que contiene 12 o más hidrociclones de 4 pulgadas, cada uno de los cuales suele tener una capacidad de 75 gpm.⁹

La capacidad volumétrica apropiada para los desarcilladores y los desarenadores debería ser igual a 125 - 150% de la velocidad de circulación. Los pozos de gran diámetro requieren un mayor número de hidrociclones.¹⁰

Figura 9: Desarcilladores



Fuente: www.psimax2000.com

⁹ Instituto Americano del Petroleo. *Manual de Fluidos de Perforación*. Dallas, Texas.

¹⁰ MI SWACO. (2004). *Curso de control de sólidos*.

1.2.4.5 Limpiadores de Lodo (Mud Cleaners)

Los limpiadores de lodo son sistemas de procesamiento de separación de dos etapas que comprenden varias combinaciones de filtros, hidrociclones, desarenadores y desarcilladores. Primero, el fluido de perforación es procesado por el desarcillador. Posteriormente la descarga es procesada por una zaranda de alta energía y de malla fina.¹¹

Los limpiadores de lodo generalmente están conformados por 12 o más hidrociclones de 4 pulgadas, ubicados sobre finas mallas con zarandas de alta energía. Este método de remoción de sólidos es recomendado para lodos que contengan considerables cantidades de materiales densificantes o que tengan costosas fases de fluidos.

Figura 10: Limpiador de lodo (*Mud Cleaner*)



Fuente: Autores

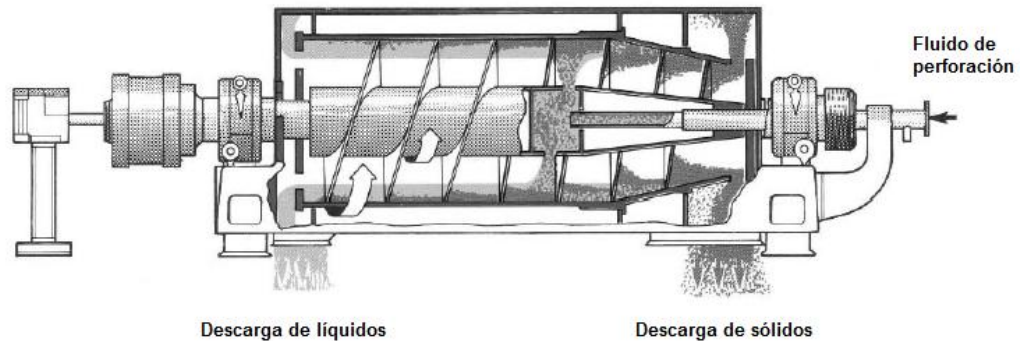
¹¹ Baroid. *Manual de Fluidos de Perforación*. Houston, Texas.

1.2.4.6 Centrífugas

La centrífuga decantadora se compone de un tazón cónico de acero horizontal que gira a una gran velocidad, con un tornillo transportador helicoidal en su interior. Este tornillo transportador gira en la misma dirección que el tazón exterior, pero a una velocidad ligeramente más lenta. La alta velocidad rotacional fuerza los sólidos contra la pared interior del tazón y el tornillo transportador los empuja hacia el extremo, donde son descargados.

En los sistemas de fluidos de perforación densificados, las centrífugas recuperan hasta un 95% de barita, la cual regresa al sistema activo al mismo tiempo que se desechan los sólidos más finos y de gravedad específica baja. El punto de corte de una centrífuga decantadora se encuentra entre el orden de 6 a 10 micrones para sólidos de baja gravedad y de 4 a 7 micrones para sólidos de alta gravedad.¹²

Figura 11: Centrífuga decantadora



Fuente: Instituto Americano del Petróleo. Manual de Fluidos de Perforación. Dallas, Texas.

¹² Baker Hughes INTEQ. (1998). *Fluidos, Manual de Ingeniería*. Houston, Texas.

1.3 TRATAMIENTO SECUNDARIO

1.3.1 Objetivos

El sistema de tratamiento secundario tiene como objetivo principal, procesar los desechos producidos durante la perforación de tal forma que permita:

- ✓ Disminución del volumen de los desechos líquidos generados
- ✓ Re-utilización
- ✓ Disposición
- ✓ Descarga de residuos conservando la integridad del medio ambiente a un costo viable.

La adecuada configuración del sistema de deshidratación puede reducir los del fluido en más del 40% de su costo original, evitando dilución, pérdidas de lodos, optimización de la reología, etc.

1.3.2 Deshidratación del lodo (*Dewatering*)

La deshidratación del lodo (*Dewatering*) es el procedimiento mediante el cual se separa la fase líquida de la sólida en los fluidos de perforación base agua utilizando procesos físicos y químicos.

El procedimiento químico consiste en la aplicación de polímeros coagulantes y floculantes para desestabilizar las cargas eléctricas y aglutinar las partículas. El procedimiento físico consiste en separar mecánicamente las dos fases del fluido floculado utilizando centrifugas que permiten eliminar partículas coloidales con tamaños menores a 2 micras.¹³

¹³ Engineers, A. A. (1999). *Shale Shakers and Drilling Fluids Systems*. Houston, TX.

Las unidades de Dewatering son sistemas compactos que pueden estar ubicados en el equipo de perforación, o pueden ser móviles, conformadas por un sistema de remolques localizados junto al equipo de control de sólidos.

Figura 12: Unidad de Dewatering



Fuente: Autores

1.3.3 Procedimientos químicos para la deshidratación del lodo

1.3.3.1 Coagulación

La coagulación es el proceso mediante el cual se neutraliza químicamente la carga negativa de los coloides suspendidos en la fase acuosa para formar pequeñas partículas de mayor diámetro denominadas flóculos (*Flocs*).

La mayoría del material coloidal suspendido en el agua está conformado por partículas de aceite emulsionado, partículas sólidas, polvo, partículas metálicas y

partículas biológicas. Estas poseen carga negativa, por lo que es necesario agregar polímeros con carga positiva y de bajo peso molecular para llevar a cabo la neutralización de las cargas.

Algunas sales inorgánicas son utilizadas para llevar a cabo el proceso de coagulación. Entre ellas se pueden encontrar el sulfato de aluminio, sulfato férrico, cloruro férrico y cloruro de calcio, entre otras. Las principales desventajas de las sales inorgánicas son:¹⁴

- ✓ Producción de grandes volúmenes de desechos sólidos
- ✓ Los desechos sólidos obtenidos requieren de un tratamiento complejo
- ✓ Los compuestos inorgánicos requieren de un rango limitado de pH para su funcionamiento.
- ✓ Los sólidos añadidos al agua deben ser eliminados posteriormente.

Actualmente, se utilizan coagulantes poliméricos ya que no presentan las desventajas mencionadas anteriormente. Además su costo comercial no es elevado y presentan una serie de ventajas que los convierten en una mejor alternativa para el tratamiento de fluidos de perforación.

Algunas de estas ventajas son:

- ✓ Dosificación mínima del producto
- ✓ Disminución considerable del volumen de desechos sólidos
- ✓ Los compuestos inorgánicos funcionan eficientemente dentro de un amplio rango de pH.

¹⁴ Engineers, A. A. (1999). *Shale Shakers and Drilling Fluids Systems*. Houston, TX.

La coagulación es frecuentemente el primer paso en el proceso de deshidratación del lodo y clarificación de aguas residuales. Se debe realizar agitación continua para aumentar la velocidad de reacción entre el agente coagulante y el agua.¹⁵

1.3.3.2 Floculación

La floculación es el proceso mediante el cual las partículas coloidales neutras de menor tamaño se aglomeran para formar flóculos de mayor tamaño capaces de sedimentarse. Para ello se utilizan agentes floculantes como poliacrilamidas y compuestos de aluminio los cuales congregan las partículas coloidales mediante la alteración de cargas, atracción y entrelazado, dando lugar a flóculos de gran tamaño fácilmente sedimentables.

La mayoría de sales inorgánicas utilizadas como coagulantes también se pueden usar como floculantes. Una gran desventaja de los floculantes inorgánicos es que poseen un peso molecular bajo, esto reduce su capacidad entrelazar y aglomerar partículas coloidales.

Por otra parte, los floculantes poliméricos son ampliamente utilizados para el tratamiento de aguas residuales debido a su alto peso molecular, baja dosificación y reducción de los volúmenes de desechos sólidos producidos.

La dosificación de floculantes poliméricos para la clarificación de aguas residuales es normalmente muy baja, oscila en un rango entre 0,05 ppm a 2 ppm (Para aguas con alta turbiedad).

La principal ventaja de los floculantes poliméricos es el aumento considerable en el tamaño de flóculos, lo que da como resultado una sedimentación eficiente.

¹⁵ Engineers, A. A. (1999). *Shale Shakers and Drilling Fluids Systems*. Houston, TX.

La agitación de la mezcla es otro parámetro que influye sobre la eficiencia de la floculación. Se debe suministrar un mezclado lento y prolongado para permitir que las partículas se congreguen, crezcan y finalmente se sedimenten.

Tabla 2: Polímeros utilizados para el tratamiento de aguas

CARACTERÍSTICAS DE LOS POLIMEROS UTILIZADOS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS			
CLASIFICACIÓN	CARGA	PESO MOLECULAR	FORMA
1. COAGULANTES CATIONICOS Poliaminas Policuaternarios Poli-DADM DMA-EPI	+	5.000 hasta 200.000	Solución líquida
2. FLOCULANTES CATIONICOS Copolímeros de: Acrilamida y Metacrilato Acrilamida y DADM	+	1'000.000 o mas	Polvo Solución líquida Emulsión
3. FLOCULANTES ANIONICOS Poliacrilatos Copolímeros Acrilamida o acrilato	-	1'000.000 o mas	Polvo Solución líquida Emulsión
4. FLOCULANTES NO IONICOS Poliacrilamidas	0	1'000.000 o mas	Polvo Solución líquida Emulsión

Fuente: Engineers, A. A. (1999). Shale Shakers and Drilling Fluids Systems. Houston, TX.

1.3.4 Procedimientos físicos para la deshidratación del lodo

1.3.4.1 Centrifugación

Después de que se lleva a cabo la floculación de los sólidos disueltos en el agua, se bombea la mezcla de fluido hacia una unidad de centrifugación la cual por medio de la fuerza gravitacional, separa y retira los sólidos floculados del sistema. Este equipo opera en un rango de velocidades de entre 3000 a 3400 revoluciones por minuto (rpm). Aunque los sólidos separados por las centrifugas parecen contener un porcentaje de humedad relativamente bajo, el contenido de agua es de aproximadamente del 50% en volumen.¹⁶

Los sólidos separados del sistema de deshidratación pueden ser utilizados como materiales de construcción dependiendo de las regulaciones ambientales locales y el contenido de agua remanente.

Figura 13: Centrifuga de alta velocidad



Fuente: Autores

¹⁶ Engineers, A. A. (1999). *Shale Shakers and Drilling Fluids Systems*. Houston, TX.

1.3.5 Tratamiento de aguas residuales

1.3.5.1 Desinfección

La razón fundamental de la desinfección del agua es disminuir el riesgo de infección por enfermedades hídricas, mediante la destrucción o inactivación de los diversos organismos patógenos que pueden estar presentes en esta.

La cloración se considera como el método más efectivo y económicamente factible para la desinfección de las aguas residuales. Este proceso consiste en la adición de cloro al agua, ya sea cloro puro o alguno de sus compuestos, en las dosis adecuadas para cumplir con la normativa vigente respecto a la calidad bacteriológica y la concentración de desinfectante activo residual que debe estar presente.

Los principales compuestos de cloro empleados para el tratamiento de aguas residuales son el dióxido de cloro, hipoclorito de calcio y el hipoclorito de sodio. Actualmente, el producto más utilizado es el hipoclorito de sodio ya que su manejo y almacenamiento es más sencillo que el de los demás agentes desinfectantes.¹⁷

1.3.5.2 Estabilización de pH

Las aguas residuales obtenidas de la deshidratación del lodo, contienen sustancias ácidas o alcalinas que se deben neutralizar antes de recibir tratamiento químico.

Cuando un volumen de agua residual va a ser sometido a tratamiento, el pH debe ajustarse a un valor mayor a 9 para asegurar el desempeño óptimo de los agentes

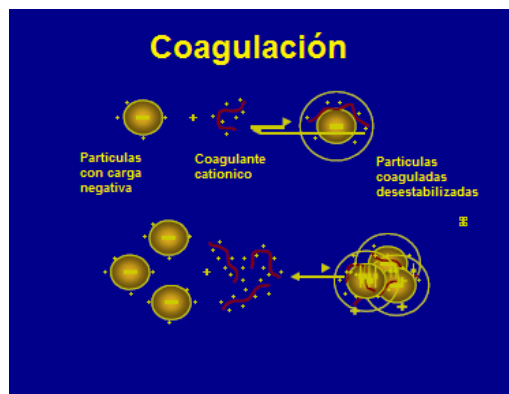
¹⁷ George Tchobanoglous, F. L. (2003). *Wastewater Engineering Treatment and Reuse*. McGraw-Hill Companies, Inc.

coagulantes y floculantes. Las sustancias alcalinas comúnmente utilizadas para la estabilización de pH son el hidróxido de sodio y el hidróxido de calcio.

1.3.5.3 Coagulación/Floculación

La coagulación es el fenómeno de desestabilización de las partículas, que se presenta cuando se adicionan determinados productos químicos al agua, estos causan que las partículas coloidales se agrupen en otras más grandes cuando entren en contacto.

Figura 14: Coagulación de partículas en suspensión

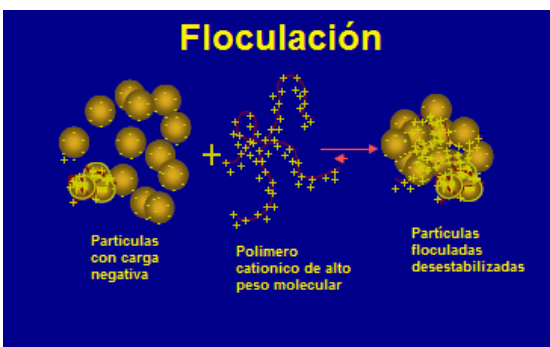


Fuente: MI SWACO. Anexo VI Descripción del sistema de deshidratación de lodo

La floculación es un proceso de agitación continua que permite a las partículas suspendidas, aglomerarse unos a otros para formar flóculos y adquirir una densidad apropiada para su separación por gravedad. Generalmente se utilizan compuestos poliméricos los cuales tienen como función principal alterar las propiedades de los sólidos coagulados.¹⁸

¹⁸ Crittenden, J. C. (2012). *MWH's Water Treatment*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc

Figura 15: Floculación de partículas en suspensión



Fuente: MI SWACO. Anexo VI Descripción del sistema de deshidratación de lodo

1.3.5.4 Oxidación

La oxidación se utiliza para destruir los constituyentes químicos que se encuentran en un estado reducido, tales como los compuestos orgánicos olorosos o tóxicos y los compuestos inorgánicos tales como el hierro, manganeso y sulfuro de hidrógeno.

Los oxidantes que se utilizan con frecuencia en el tratamiento del agua son el cloro, ozono, dióxido de cloro, permanganato, y peróxido de hidrógeno. Estos se añaden normalmente al principio (por ejemplo, pre-oxidación) o final (por ejemplo, desinfección) del proceso de tratamiento de agua.¹⁹ Las principales aplicaciones de oxidación química son:

- ✓ Control de sabor y olores
- ✓ Eliminación de sulfuro de hidrógeno
- ✓ Eliminación del color
- ✓ Remoción de hierro y manganeso
- ✓ Desinfección

¹⁹ Crittenden, J. C. (2012). *MWH's Water Treatment*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc

1.4 MANEJO Y DISPOSICIÓN DE CORTES DE PERFORACIÓN

1.4.1 Técnicas convencionales

1.4.1.1 Almacenamiento temporal

Los ripios que son expulsados del Equipo de Control de Sólidos (ECS) son recibidos en un tanque de volumen pequeño llamado Catch Tank, en este las partículas se asientan por efecto de las fuerzas gravitacionales permitiendo la separación de la fase líquida y fase sólida. En algunas ocasiones este tanque es utilizado con el fin de realizar el manejo de los ripios allí mismo con el fin deshidratarlos, fijarlos y poder transportarlos para su disposición final.

El segundo tanque del sistema de almacenamiento es el de las centrifugas, donde se depositan los cortes producto de la deshidratación del fluido y los cortes removidos en el control de sólidos de baja y alta gravedad (LGS y HGS).

Figura 16: Catch Tank



Fuente: Autores

1.4.1.2 Manejo y disposición final

1.4.1.2.1 Celdas

La construcción de las celdas se realiza con dimensiones de cuatro metros por cuatro metros de área superficial y 4 metros ó 3 metros de profundidad si el nivel freático lo permite. Generalmente tienen una capacidad de 64 metros cúbicos o 403 barriles y se separan un metro entre sí. Una vez se ocupa el volumen total se debe construir una nueva celda.

Mediante la aplicación de esta técnica, se realiza seguimiento a través de muestreos y análisis periódicos de los parámetros y límites permisibles. Su limitación radica en que se necesita una gran cantidad de área disponible dentro de la locación para la disposición de ripios.

Figura 17: Celdas



Fuente: www.baroiddp.com

1.4.1.2.2 Confinamiento en piscinas

Para la aplicación de esta técnica se construyen piscinas de alta capacidad de almacenamiento con la ayuda de una retroexcavadora. Las dimensiones de las piscinas dependen de la profundidad, diámetro de las secciones y tipo de perforación (direccional, horizontal o vertical) del pozo.

Los sólidos secos extraídos del proceso de deshidratación (Dewatering) y los cortes de perforación obtenidos de la centrífuga de alta velocidad, se mezclan en la piscina con los sólidos provenientes del equipo de control de sólidos, esto con el fin de darles mayor consistencia y facilitar el manejo de los mismos. Un porcentaje de silicatos o material secante se dispersa sobre la piscina para luego remover en su interior hasta homogenizar todos los cortes. Además se agrega la tierra nativa que se retiró producto de la excavación durante la construcción de las piscinas y se adiciona para ser estabilizado mediante una mezcla con silicatos y aditivos para control de pH.

Figura 18: Piscinas de confinamiento



Fuente: Autores

1.4.1.2.3 Dispersión en el terreno (*Landspread*)

La técnica de dispersión en el terreno es un procedimiento para el esparcimiento de desechos no tóxicos sobre suelos contaminados, se realiza un cálculo adecuado de dosis de mezcla del desecho con el suelo receptor, así como la dosificación de enmiendas correctoras para ajustar algunos parámetros con el fin de asegurar el cumplimiento de los límites establecidos por la normatividad ambiental.

El desarrollo de la tecnología se basa en el uso de la capacidad intrínseca que presentan los suelos nativos para el secuestro, fijación o inmovilización de elementos químicos, junto a una mejora de dicha capacidad por el mezclado de los ripios de perforación con desechos agroindustriales orgánicos y el manejo de parámetros químicos y de fertilidad del suelo.

Uno de los parámetros del suelo que se ve positivamente modificado es la capacidad de intercambio catiónico por efecto del incremento del pH y del contenido de materia orgánica. Otro aspecto de importancia es el balance de nutrientes, logrado mediante la aplicación de enmiendas complementarias (azufre, cal, yeso, etc.) y fertilizantes.

1.4.1.2.4 Estabilización/Solidificación

La estabilización se refiere al conjunto de técnicas que reducen el riesgo potencial de un desecho. Esta se puede dar mediante alteración química generando compuestos insolubles o a través de entrapamiento del producto solidificado. Los materiales comúnmente utilizados para la estabilización de ripios de

perforación son óxido de calcio, óxido de magnesio, hidróxido de calcio, carbonato de calcio y cemento.²⁰

La solidificación es el procedimiento mediante el cual se encapsulan los residuos en forma de un sólido monolítico de alta integridad estructural. La encapsulación se puede aplicar a residuos conformados por partículas finas (Microencapsulación) o de un bloque grande o un contenedor de desechos (Macroencapsulación). La migración del contaminante se restringe por la disminución del área superficial expuesta a la lixiviación y / o mediante el aislamiento de los residuos dentro de una cápsula impermeable.

1.4.2 Técnicas no convencionales

1.4.2.1 Métodos físicos

1.4.2.1.1 Aglomeración con alquitrán de carbón

Es un procedimiento de extracción que usa un solvente sólido para remover contaminantes. El proceso opera bajo el principio que los constituyentes oleosos residuales son fuertemente adsorbidos sobre la superficie de carbón finamente dividido, y que el aglomerado carbón-orgánico que se forma puede ser separado del suelo en una suspensión acuosa.

1.4.2.1.2 Lavado de suelos

Es un proceso físico que consiste en la excavación del suelo del área contaminada, luego se tamiza para separar objetos grandes, rocas y después se lava con agua o una solución acuosa para remover los contaminantes, el efluente

²⁰ Ifeadi, D. C. (2004). *The Treatment of Drill Cuttings using Dispersion By Chemical Reaction (DCR)*.

contaminado se recupera, se trata y se recicla o se dispone. Generalmente el solvente de extracción es agua, aunque se pueden usar otros cuando los contaminantes son ligeramente solubles en agua.

Los solventes se seleccionan considerando su capacidad de solubilizar los contaminantes y su toxicidad sobre el medio ambiente y la salud. Cuando se van a tratar compuestos poco solubles en agua se utilizan tensoactivos para mejorar la eficiencia de remoción. Los tensoactivos pueden ser muy efectivos para contaminantes orgánicos.

1.4.2.1.3 Ventilación de suelos

Es un método de eliminación pasiva para contaminantes volátiles. El suelo se excava y se vierte una fina capa, de unos 20 cm, sobre una superficie impermeable y se espera a que los compuestos orgánicos volátiles se evaporen.

El riego también favorece el proceso ya que el agua disuelve los contaminantes y produce su desorción, al evaporarse los arrastra hacia la superficie. Además, la humedad acelera la actividad de los microorganismos. También al extender el suelo se aumenta su temperatura y se expone a la acción de los vientos, con lo que aumenta la volatilización.

1.4.2.2 Métodos biológicos

1.4.2.2.1 Bioreactores

Es un proceso de remediación que se lleva a cabo en reactores dispuestos en superficie, acondicionados de microorganismos, control de aire, nutrientes,

humedad y pH. El tratamiento con bioreactores es similar en concepto al tratamiento convencional de lodos activados. Las ventajas de esta técnica son:

Se utilizan pequeños reactores con la facilidad de controlar las condiciones de temperatura, nutrientes y pH.

Los contaminantes son tratados en un proceso cerrado, previniendo cualquier tipo de descarga o filtración al ambiente durante la operación.

Figura 19: Bioreactores



Fuente: www.philippinegeosynthetic.com

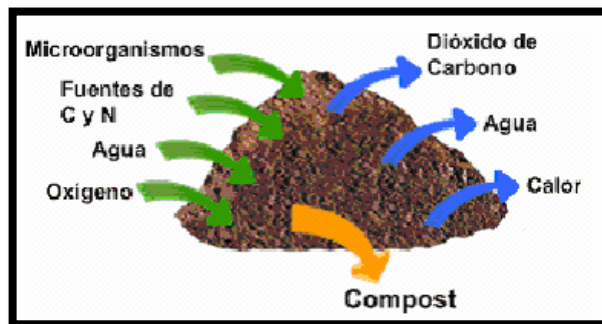
1.4.2.2.2 Compostaje (*Composting*)

En el compostaje, los residuos se mezclan con agentes orgánicos tales como virutas de madera, paja y cáscaras de arroz, con el fin de aumentar la porosidad y la aireación potencial para la degradación biológica.

Generalmente, se adiciona estiércol o residuos agrícolas ya que aumenta la capacidad de retención de agua y la traza de nutrientes en el suelo. La adición de fertilizantes ricos en nitrógeno, fósforo y otros minerales, también puede mejorar la actividad microbiana y reducir el tiempo requerido para lograr el nivel deseado de biodegradación.

Con el fin de facilitar el proceso de biodegradación, la mezcla de material orgánico mantiene rango de humedad entre 40 a 60% en peso. Las temperaturas elevadas (30°C y 70 °C) aumentan la actividad microbiana. Sin embargo, si las temperaturas superan los 70 °C, se puede producir la muerte celular.²¹

Figura 20: Compostaje



Fuente: 'ABAD, M. 2002. Compostaje de residuos orgánicos generados en la hoya de buñol (Valencia).

1.4.2.2.3 Landfarming

El proceso de Landfarming es una tecnología de biorremediación para suelos contaminados con hidrocarburo, mediante la cual los microorganismos producen materiales estabilizados que no generan impactos sobre el medio ambiente. Con

²¹ Argonne National Laboratory & Chevron Texaco. (2008). *Drilling Waste Management Technology* .

el fin de estimular la actividad microbial, se adicionan nutrientes, microorganismos y agentes químicos para mantener el pH neutro y se emplean métodos de arado con tractores para mantener la acción aerobia.

Algunas limitantes de la técnica de biorremediación son la inhabilidad de la bacteria para procesar hidrocarburos presentes en suelos con alto contenido de arcillas, así como la degradación de fracciones pesadas y emulsiones.

1.4.2.3 Métodos térmicos

1.4.2.3.1 Calentamiento por radiofrecuencia

Es una tecnología emergente que emplea la energía de las ondas electromagnéticas en el rango de la radio frecuencia, para calentar el residuo y vaporizar los contaminantes. Se logran temperaturas máximas en el residuos entre los 370 y 500°C. Se emplea una cubierta sobre el área de tratamiento para contener los vapores a medida que ascienden a superficie. El calentamiento por radio frecuencia es adecuado solo para calentar cuerpos que no conduzcan electricidad.²²

1.4.2.3.2 Desorción térmica

La desorción térmica utiliza un proceso no oxidante para vaporizar compuestos volátiles y semivolátiles presentes en los residuos, mediante de la aplicación de calor. Debido a que la desorción térmica depende de la presión de vapor, la eficiencia del tratamiento se relaciona con la volatilidad de los contaminantes. Por lo tanto, la desorción térmica elimina fácilmente los hidrocarburos ligeros, aromáticos, y otros compuestos orgánicos volátiles, pero los compuestos más

²² Argonne National Laboratory & Chevron Texaco. (2008). *Drilling Waste Management Technology* .

pesados tales como hidrocarburos aromáticos policíclicos se eliminan con mayor dificultad.

Los sistemas de desorción térmica de baja temperatura operan típicamente en un rango entre 250°C a 350°C y pueden ser suficientes para tratar los residuos con hidrocarburos ligeros, compuestos aromáticos (por ejemplo, benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos), y otros compuestos orgánicos volátiles, que se eliminan fácilmente. Los sistemas de alta temperatura pueden operar a temperaturas de hasta 520 °C, y pueden producir un menor contenido de aceite residual para desechos con compuestos pesados tales como compuestos aromáticos policíclicos.²³

Figura 21: Unidad de Desorción térmica



Fuente: www.midwestsoil.com

²³ Argonne National Laboratory & Chevron Texaco. (2008). *Drilling Waste Management Technology* .

1.4.2.3.3 Incineración

La incineración se utiliza normalmente para destruir los desechos orgánicos que son altamente tóxicos y altamente inflamables, resistentes a la degradación biológica y que representan un factor de riesgo para la salud humana y el medio ambiente. Las unidades de incineración oxidan los residuos a altas temperaturas, convirtiéndolos en materiales de menor volumen los cuales no presentan mayor riesgo para el medio ambiente. Por lo general estas unidades operan en un rango entre 1.200 y 1.500 °C).²⁴

Algunas de las ventajas de la incineración controlada son:

- ✓ Reducción de volumen de residuos
- ✓ Oxidación completa de residuos
- ✓ Recuperación de recursos.

1.4.2.3.4 Vitrificación

La vitrificación es un proceso de tratamiento térmico que emplea calor para convertir el material contaminado en un producto cristalino, químicamente inerte y estable parecido al vidrio.

El proceso consiste en introducir electrodos dentro del suelo contaminado que debe contener niveles significativos de silicatos. En la superficie los electrodos se conectan al suelo por medio de grafito, se aplica una corriente eléctrica de alta intensidad que pasa a través de estos y el suelo se funde como resultado de la elevada temperatura (mayor a 2000°C).²⁵

²⁴ Argonne National Laboratory & Chevron Texaco. (2008). *Drilling Waste Management Technology* .

²⁵ M. Paolone, R. B. (2003). *A Research on Plants for In-Situ Vitrification of Contaminated Soils*. Bologna, Italia

1.4.2.4 Inyección de ripios de perforación

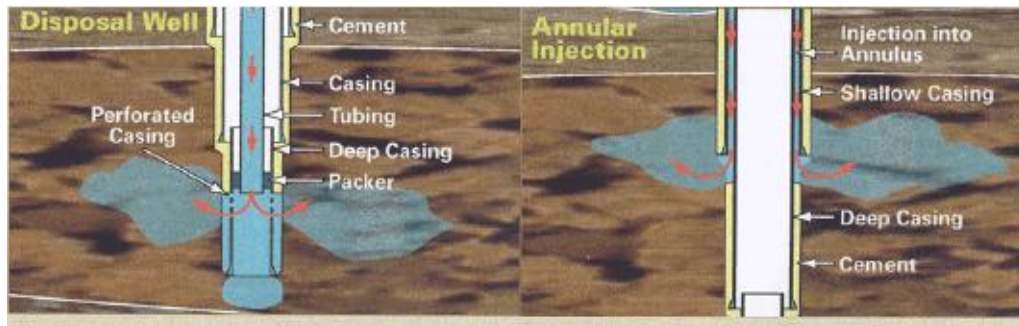
Esta tecnología puede ser aplicada para la disposición de recortes de perforación base agua, aceite o sintética, tanto en plataformas costa fuera como en locaciones terrestres. La inyección de ripios requiere un sistema capaz de enviar los volúmenes de fluidos requeridos hasta el fondo del pozo y generar presiones suficientes para fracturar la roca. Además la tubería instalada en el pozo tiene que estar diseñada para soportar altas presiones de inyección.

Existen dos métodos para la reinyección de desechos de perforación:

- ✓ Inyección anular
- ✓ Inyección en un pozo de disposición.

La inyección anular introduce la mezcla de residuos a través del espacio entre dos sartas de revestimiento. La inyección en un pozo de disposición tiene como objetivo producir una presión mayor a la presión de fractura para almacenar los ripios de perforación en formaciones de alta permeabilidad.

Figura 22: Inyección de ripios de perforación



Fuente: Argonne National Laboratory & Chevron Texaco. (2008). Drilling Waste Management Technology

2. DESARROLLO DE PRUEBAS

2.1 LOCALIZACIÓN DEL PROYECTO

2.1.1 Localización del Pozo ANH-PATÍA 1-ST-P

El pozo ANH-PATÍA 1-ST-P, es un pozo estratigráfico, el cual fue perforado verticalmente hasta una profundidad total de 12.100 pies. Su objetivo principal fue la recuperación de muestras de roca y toma de registros de pozo para el conocimiento geológico de la cuenca Cauca-Patía.

El pozo se localiza en el municipio de Mercaderes, Departamento del Cauca, aproximadamente a 1.400 metros desde la carretera que conduce de Mercaderes al corregimiento de San Joaquín.

Es importante recalcar que a diferencia de los pozos de exploración hidrocarburífera, el área requerida para desarrollar esta investigación geológica del subsuelo, se debe reducir a la estrictamente necesaria.

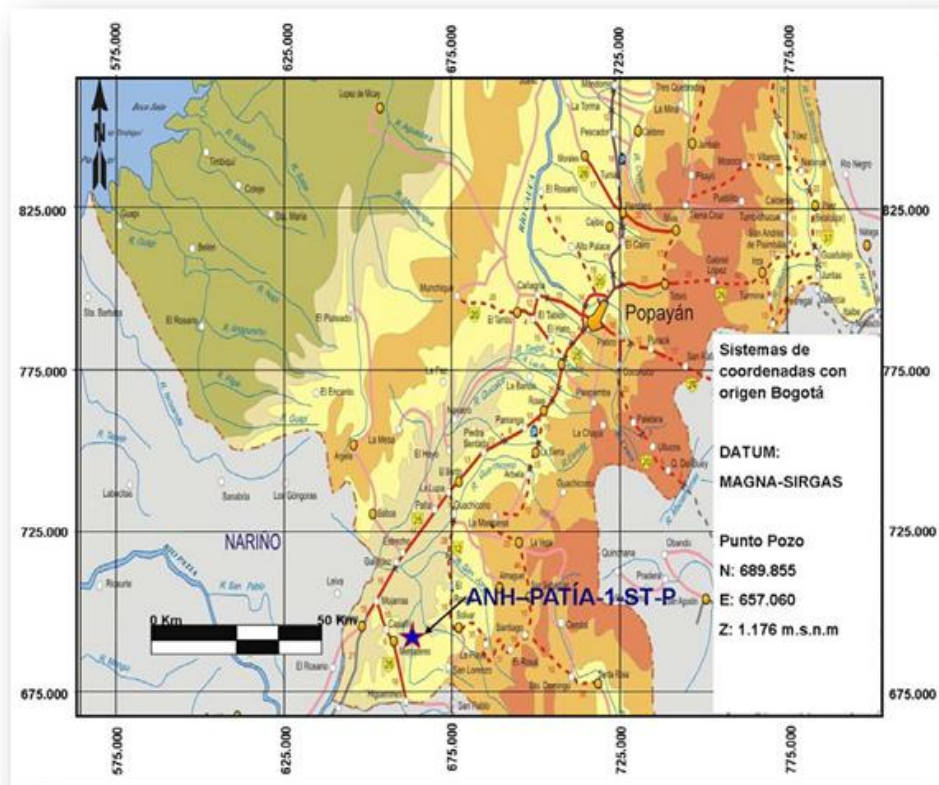
El suministro de agua potable para el pozo será la quebrada San gandinga (rio Dos ríos) a 7 km del pozo o del Acueducto Hidropacífico.

• Condiciones Ambientales

Las condiciones meteorológicas generales de la zona de ubicación del proyecto son:

- Altura promedio (cabecera Urbana): 1.167 msnm
- Temperatura media: 22 °C

Figura 23: Localización del pozo estratigráfico ANH-PATIA 1-ST-P



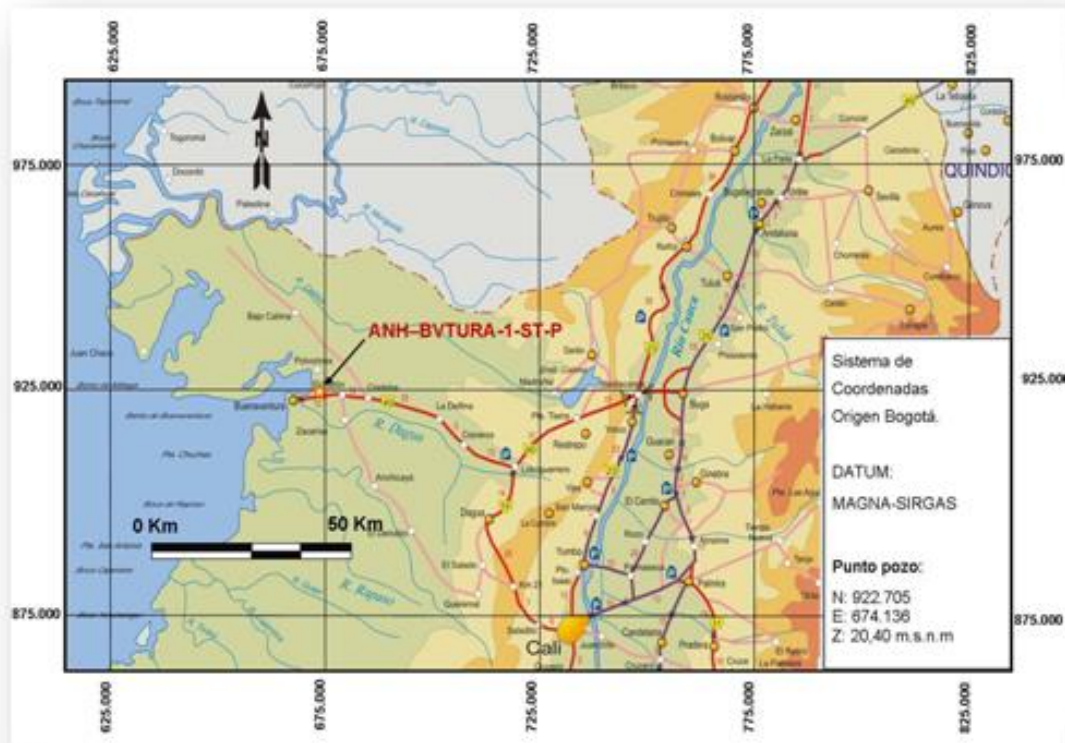
Fuente: UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER. Programa de perforación. Pozo ANH-PATIA 1-ST-P

2.1.2 Localización del Pozo ANH-BVTURA 1-ST-P

El pozo ANH-BVTURA 1-ST-P, es un pozo estratigráfico, el cual fue perforado verticalmente hasta una profundidad total de 12.100 pies. Su objetivo principal recuperación de muestras de roca y toma de registros de pozo para el conocimiento geológico de la cuenca Tumaco.

El pozo estratigráfico ANH-BVTURA 1-ST-P se encuentra localizado a aproximadamente a 6,5 kilómetros del cono urbano principal del municipio de Buenaventura, departamento del Valle del Cauca, en el barrio Isla de la Paz.

Figura 24: Localización del pozo estratigráfico ANH-BVTURA 1-ST-P



Fuente: UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER. Programa de perforación. Pozo ANH-BVTURA-1-ST-P

• Condiciones Ambientales

Las condiciones meteorológicas generales de la zona de ubicación del proyecto son:

- ✓ Altura promedio (cabecera Urbana): 7 msnm.
- ✓ Temperatura media: 29 °C.

2.2 GENERALIDADES POZOS ESTRATIGRÁFICOS ANH-PATIA 1 Y ANH-BVTURA 1

Tabla 3: Ficha técnica. Pozo ANH-PATIA 1 ST-P

NOMBRE DEL POZO	ANH PATIA 1 ST-P	TIPO DE POZO	Estratigráfico
LOCALIZACIÓN	Mercaderes (Cauca)	OPERADOR	Universidad Industrial de Santander
EQUIPO DE PERFORACIÓN	Erazo Valencia Rig # 5	CONTRATISTA	Erazo Valencia
FECHA INICIO PERFORACIÓN	13/06/2012	FECHA TERMINACIÓN	31/08/2012
PROFUNDIDAD FINAL (pies)	12.100	DESVIACIÓN MÁXIMA (°)	0°
TEMPERATURA MÁXIMA (°F)	150	DENSIDAD MÁXIMA (PPG)	11,3 ppg

Fuente: UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER. Programa de perforación. Pozo ANH-PATIA 1-ST-P

Tabla 4: Estado mecánico. Pozo ANH-PATIA 1 ST-P

PROFUNDIDAD (Pies)	DIÁMETRO DEL HUECO (Pulgadas)	DIÁMETRO DEL REVESTIMIENTO (Pulgadas)	TIPO DE FLUIDO
0 / 1000	26"	20"	AQUA BENTONITA
1000 / 6000	17 ½ "	13 3/8"	QDRILLMAXPHPA
6000 / 10000	12 ¼ "	9 5/8"	QDRILLMAXPHPA
10000 / 12100	8 ½ "	Hueco abierto 8 ½ "	QDRILLMAXPHPA

Fuente: UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER. Programa de perforación. Pozo ANH-PATIA 1-ST-P

Tabla 5: Ficha técnica. Pozo ANH-BVTURA 1 ST-P

NOMBRE DEL POZO	ANH BVTURA 1 ST-P	TIPO DE POZO	Estratigráfico
LOCALIZACIÓN	Buenaventura (Valle del Cauca)	OPERADOR	Universidad Industrial de Santander
EQUIPO DE PERFORACIÓN	Erazo Valencia Rig # 7	CONTRATISTA	Erazo Valencia
FECHA INICIO PERFORACIÓN	24/09/2012	FECHA TERMINACIÓN	07/01/2013
PROFUNDIDAD FINAL (pies)	12.100	DESVIACIÓN MÁXIMA (°)	0°
TEMPERATURA MÁXIMA (°F)	150	DENSIDAD MÁXIMA (PPG)	11,0 ppg

Fuente: UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER. Programa de perforación. Pozo ANH-BVTURA-1-ST-P

Tabla 6: Estado mecánico. Pozo ANH-BVTURA 1 ST-P

PROFUNDIDAD (Pies)	DIÁMETRO DEL HUECO (Pulgadas)	DIÁMETRO DEL REVESTIMIENTO (Pulgadas)	TIPO DE FLUIDO
0 / 1000	26"	20"	AQUA BENTONITA
1000 / 6000	17 ½ "	13 3/8"	QDRILLMAXPHPA
6000 / 10000	12 ¼ "	9 5/8"	QDRILLMAXPHPA
10000 / 12100	8 ½ "	Hueco abierto 8 ½ "	QDRILLMAXPHPA

Fuente: Programa de perforación. Pozo ANH-BVTURA 1-ST-P

2.3 EQUIPOS INSTALADOS PARA TRATAMIENTO

La perforación de un pozo implica la generación de desechos líquidos y sólidos debido a las diversas actividades que se requieren en conjunto para el logro del objetivo.

Para el caso, el tratamiento de los desechos de perforación se realizará con base en el sistema de Dewatering y el tratamiento de agua en piscinas, incluyendo productos químicos, equipos, insumos, combustible, mantenimiento de equipo, repuestos, tanques con agitador, y panel de control. Con esto se espera dar cumplimiento a la Legislación Ambiental vigente y a la Licencia Ambiental otorgada por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.

2.3.1 Unidad de Dewatering

La unidad de Dewatering consta de:

- Una centrífuga decantadora y su bomba de alimentación.
- Una bomba centrífuga eléctrica de 4x3”
- Paneles eléctricos.
- Una bomba neumática tipo M16M2.
- Las mangueras, acoples, productos químicos, y demás accesorios para el funcionamiento necesario del proceso.
- Sistemas de dosificación de productos químicos (ácidos, polímeros, etc.), con su bomba de alimentación.
- Sistemas de mezcla y sistema de agitadores mecánicos (no debe utilizarse aire), con su respectiva bomba de alimentación.
- Capacidad instalada de Dewatering de lodo mínimo 500 barriles por día (densidades de lodo en el rango 8,5-12 lpg).

2.3.2 Tratamiento de aguas

El manejo de las aguas residuales en la locación se cuenta con una planta Red Fox la cual realiza el tratamiento de las aguas negras según los parámetros exigidos. El efluente de la planta se recibió, en un Frac Tank de almacenamiento, las aguas industriales generadas por la actividad, y desde este punto se transfería a una unidad de tratamiento de aguas en donde se realizará el ajuste de propiedades finales, cloración y aireación antes de la disposición final.

Dentro de los equipos disponibles para el tratamiento de aguas residuales se tienen los siguientes:

- Dos bombas centrifugas eléctricas 3 x 4”
- Dos bombas eléctricas sumergibles y sus respectivas líneas de flujo.
- Un sistema de aireación en manguera de PVC flexible.
- Un sistema de dosificación y mezcla de los productos químicos (Cyfloc, cal hidratada, hipoclorito de sodio, peróxido y policloruro de aluminio).
- Un Kit y equipo de laboratorio completo para el análisis y control de parámetros de vertimiento y calidad.
- Un tanque de 500 barriles tipo Frac Tank para el almacenamiento de agua.
- Los productos químicos y combustibles necesarios para la operación.
- Un sistema de disposición por aspersion.

2.3.3 Laboratorio

El laboratorio deberá contar con:

- Extractores de gas
- Iluminación adecuada

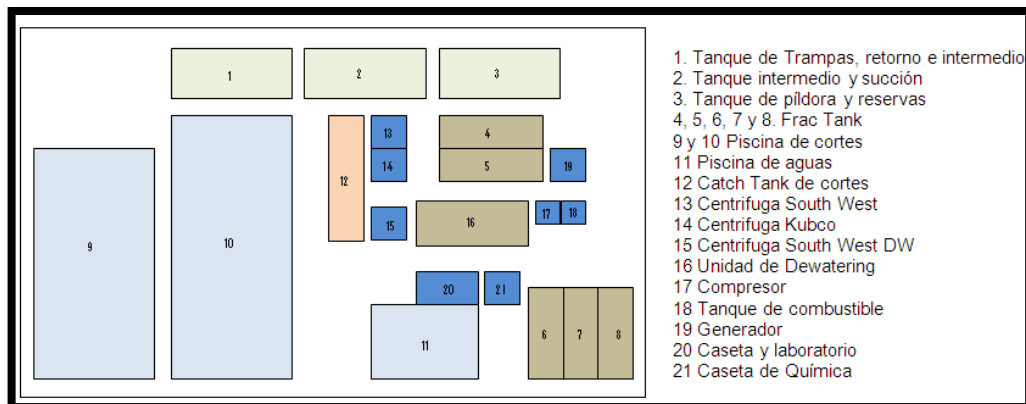
- Aire acondicionado
- Espectrofotómetro
- Todos los elementos que permitan la realización de los siguientes análisis en sitio: Turbiedad, Color, pH, Dureza total, Cloruros, Sulfatos, Alcalinidad, Calcio, Hierro, Fenoles, Nitritos, Nitratos, y Sólidos (totales, disueltos y en suspensión).

2.3.4 Control de sólidos

En el equipo de perforación se contó con el siguiente equipo de control de sólidos:

- Tres Shale Shakers MI Swaco Mongoose de movimiento variable.
- Un desgasificador MI Swaco.
- Un Mud Cleaner MI Swaco.
- Una Centrífuga decantadora Kubco con variador de velocidad.
- Una Centrífuga decantadora South West con variador de velocidad.

Figura 25: Sistema de tratamiento para recortes de perforación



Fuente: UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER. Pliego de condiciones. Pozos ANH-PATIA 1 y ANH-BVTURA 1

2.4 DISEÑO DE PRUEBAS A EJECUTAR

El objetivo de realizar ensayos en laboratorio, es caracterizar los desechos perforación y analizar la alteración de sus propiedades debido a la presencia de diferentes tipos de contaminantes.

Las propiedades de los fluidos se determinan mediante ensayos físicos y químicos.

Los ensayos físicos se realizan de acuerdo a las normas (ISO 10414-1 y API RP 13B-1: Prácticas Recomendadas para Pruebas de Fluidos de Perforación Base-Agua). Los ensayos químicos se realizan con base en el Sistema Integrado de Gestión de MI-SWACO, el cual brinda un Manual de Técnicas de Ensayos de Laboratorio, que indica paso a paso los procedimientos para cada tipo de prueba.

A continuación se presentan las pruebas realizadas para a las muestras de cortes provenientes de los pozos ANH PATIA 1 ST-P y ANH-BVTURA 1 ST-P.

2.4.1 Ensayos físicos

2.4.1.1 Filtrado API

El objetivo del la prueba de filtrado es determinar el volumen de líquido que pierde un fluido de perforación cuando es sometido a una presión diferencial. Para nuestra investigación este ensayo se utilizó para obtener la fracción líquida contenida en el corte de perforación y posteriormente analizar sus propiedades.

El equipo utilizado para llevar a cabo esta prueba se denomina filtroprensa. La prueba consiste en determinar la velocidad a la cual fluye un fluido a través del

papel filtro, esta se realiza bajo las condiciones de tiempo, temperatura y presión especificadas.

La filtroprensa y el desarrollo de la prueba deben cumplir con las especificaciones indicadas por la norma API RP-13B-1. La prueba de filtrado API se realiza a la temperatura ambiente y a una presión de 100 psi. Los resultados se registran como número de mililitros perdidos en 30 minutos.

Figura 26: Filtroprensa API



Fuente: www.eurosul.com

2.4.1.2 Medición de pH

El pH de un fluido, indica el grado de acidez o alcalinidad relativa del fluido. El agua destilada es neutra, esto significa que no tiene ni acidez, ni es alcalina. En la escala de pH este punto está indicado por el número 7.

La medición del pH es una prueba esencial para el control de los desechos de perforación. Las interacciones de la arcilla, la solubilidad de distintos componentes y la eficacia de los aditivos dependen del pH.

Se emplean dos métodos para medir el pH de los fluidos y recortes de perforación base agua: El método colorimétrico modificado, usando tiras de prueba con refuerzo de plástico (palillos); y el método potenciométrico, usando el medidor electrónico de pH con electrodo de vidrio.

El método de tira de plástica se utiliza frecuentemente para medir el pH en los campos petroleros. Los sólidos del lodo, las sales, los productos químicos disueltos y los fluidos de color oscuro generan errores en los valores indicados por las tiras de plástico indicadoras de pH.

Figura 27: Medición de pH



Fuente: Autores

2.4.1.3 Prueba de Retorta

Mediante esta prueba se puede determinar el porcentaje en volumen de humedad contenido en una muestra sólida y con base a los resultados obtenidos cuantificar la eficiencia de los equipos de control de sólidos.

Se coloca una muestra de corte dentro del recipiente metálico y se aprieta la tapa para expulsar parte del líquido. Esto garantiza un volumen correcto.

Se debe calentar la muestra hasta que los componentes líquidos se vaporicen. Los vapores pasan a través de un condensador y se recogen en un cilindro graduado. El volumen de agua se mide directamente en porcentajes.

Figura 28: Equipo de retorta



Fuente: Manual MI 2001 - Manual Fluidos de Perforación

2.4.2 Ensayos químicos

Los análisis químicos son una herramienta que permiten caracterizar el filtrado de los lodos y recortes de perforación, para cuantificar la concentración de contaminantes presentes.

Los principales ensayos químicos que se realizan a los fluidos de perforación son:

- ✓ Dureza
- ✓ Cloruros
- ✓ Alcalinidad del filtrado Mf y Pf

2.4.2.1 Dureza

Mediante esta prueba se determina la concentración de calcio y carbonato de calcio presentes en el fluido. Los reactivos utilizados durante esta prueba son: solución buffer, versenato indicador y versenato titulador.

Al finalizar el ensayo, se registra la cantidad de calcio como el número de mililitros utilizados de versenato titulador.

Figura 29: Determinación de dureza

$$\text{Ca}^{2+} \text{ (mg/l)} = \frac{\text{ml de Versenato titulador} \times 400}{\text{ml de muestra}}$$
$$\text{CaCO}_3 \text{ (mg/l)} = \frac{\text{ml de Versenato titulador} \times 1000}{\text{ml de muestra}}$$

Fuente: Instituto Americano del Petróleo. Manual de Fluidos de Perforación. Dallas, Texas

2.4.2.2 Cloruros

Mediante esta prueba se determina la concentración de cloruros presentes en el filtrado. Los reactivos utilizados durante esta prueba son: fenolftaleína, ácido sulfúrico, cromato de potasio y nitrato de plata.

Al finalizar el ensayo, se registra la cantidad de cloruros como el número de mililitros utilizados de nitrato de plata.

Figura 30: Determinación de cloruros

$$Cl^- \text{ (mg/l)} = (1000 \times \text{ml AgNO}_3) / \text{ml de filtrado}$$

Fuente: Instituto Americano del Petróleo. Manual de Fluidos de Perforación. Dallas, Texas

2.4.2.3 Alcalinidad

La alcalinidad de una solución, se puede definir como la concentración de iones solubles en agua que pueden neutralizar ácido. La alcalinidad está relacionada con la concentración de iones OH⁻, CO₃²⁻ y HCO₃⁻, presente en el filtrado.

Es importante saber que pH y alcalinidad no es lo mismo, a pesar de estar estrechamente relacionados. El pH indica, qué tan ácido o básico es un fluido y la alcalinidad determina, el ión o los iones responsables de esa acidez o basicidad. La comparación entre los valores de alcalinidad, Pf y Mf, permite visualizar problemas de contaminación en el fluido

Figura 31: Determinación de alcalinidad

Si	OH ⁻	CO ₃ ⁻²	HCO ₃ ⁻
$P_T = 0$	0	0	$1.22M_T$
$2P_T < M_T$	0	$1.2P_T$	$1.22(M_T - 2P_T)$
$2P_T = M_T$	0	$1.2P_T$	0
$2P_T > M_T$	$340(2P_T - M_T)$	$1.2(M_T - P_T)$	0
$P_T = M_T$	$340M_T$	0	0

Fuente: Instituto Americano del Petróleo. Manual de Fluidos de Perforación. Dallas, Texas

2.4.2.4 Espectrofotómetro

Los procedimientos desarrollados en laboratorio permiten cuantificar la proporción de contaminantes presentes en los lixiviados. Para su determinación se requiere del uso de un espectrofotómetro DR 2000, con un rango de longitud de onda de 400 a 900 nm. El equipo permite caracterizar muestras líquido con alta precisión y exactitud.

Figura 32: Espectrofotómetro DR 2000



Fuente: Autores

2.5 LIMITES PERMISIBLES PARA LA DISPOSICIÓN DE DESECHOS DE PERFORACIÓN

2.5.1 Aguas residuales

Tabla 7: Valores límite máximos permisibles. Parámetros de pH y temperatura

PARAMETRO	UNIDADES	VALOR LIMITE MAXIMO PERMISIBLE
pH	Unidades de pH	5,0 a 9,0
Temperatura	°C	< 40°C
Material Flotante	-	Ausente
Grasas y Aceites	%	Remoción > 80% en carga
Sólidos Suspendidos	%	Remoción > 80% en carga

Fuente: Ministerio del Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible. Decreto 1594 de 1984. Artículo 72.

Tabla 8: Valores límite máximos permisibles. Parámetros generales

SUSTANCIA	UNIDADES	VALORES LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLE
Arsénico (As)	mg/L	0,5
Bario (Ba)	mg/L	5,0
Cadmio (Cd)	mg/L	0,1
Cobre (Cu)	mg/L	3,0
Cromo (Cr)	mg/L	0,5
Compuestos fenólicos (Fenol)	mg/L	0,2
Mercurio (Hg)	mg/L	0,02
Níquel (Ni)	mg/L	2,0
Plata (Ag)	mg/L	0,5
Plomo (Pb)	mg/L	0,5
Selenio (Se)	mg/L	0,5

Fuente: Ministerio del Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible. Decreto 1594 de 1984. Artículo 74.

Tabla 9: Valores límite máximos permisibles en los vertimientos puntuales de los parámetros de pH y temperatura

PARAMETRO	UNIDADES	VALOR LIMITE MAXIMO PERMISIBLE
pH	Unidades de pH	6,0 a 8,5
Temperatura	°C	La diferencia de temperatura en todo momento entre el vertimiento y el cuerpo de agua superficial receptor (aguas arriba del punto de vertimiento y por fuera de la influencia de la zona de mezcla), debe ser menor a 5,0 °C en función valor absoluto.

Fuente: Ministerio del Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible. Proyecto de vertimiento de aguas. Artículo 18.

Tabla 10: Valores límite máximos permisibles en los vertimientos puntuales de los parámetros generales

PARAMETRO	UNIDADES	VALORES LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES	
		Cuerpo de Agua Superficial	Alcantarillado Publico
Generales			
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L O ₂	150,0	300,0
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5)	mg/L O ₂	30,0	45,0
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg/L	35,0	70,0
Sólidos Sedimentables (SSED)	mg/L	1,0	5,0
Material Flotante	mg/L	0,5	-
Grasas y Aceites	mg/L	10,0	50,0
Fenoles	mg/L	0,02	0,02
Sustancias Activas al Azul de Metileno (SAAM)	mg/L	4,0	8,0
Nutrientes			
Fósforo Total (P)	mg/L	2,0	4,0

Fuente: Ministerio del Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible. Proyecto de vertimiento de aguas. Artículo 30.

Tabla 11: Valores límite máximos permisibles en los vertimientos puntuales de los parámetros de concentración de iones, metales y metaloides

PARAMETRO	UNIDADES	VALORES LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES	
		Cuerpo de Agua Superficial	Alcantarillado Publico
Iones			
Cianuro (CN)	mg/L	0,1	0,2
Cloruros (Cl)	mg/L	1000,0	2000,0
Fluoruros (F)	mg/L	5,0	10,0
Sulfatos (SO ₄) ₂	mg/L	250,0	500,0
Sulfuros (S) ₂	mg/L	1,0	2,5
Metales y Metaloides			
Aluminio (Al)	mg/L	0,5	1,5
Arsénico (As)	mg/L	0,1	0,3
Bario (Ba)	mg/L	0,5	5,0
Boro (B)	mg/L	0,5	2,0
Cadmio (Cd)	mg/L	0,01	0,1
Cobre (Cu)	mg/L	0,5	1,5
Cromo (Cr)	mg/L	0,2	0,4
Estaño (Sn)	mg/L	1,0	1,5
Hierro (Fe)	mg/L	1,0	2,5
Litio (Li)	mg/L	0,1	2,5
Manganeso (Mn)	mg/L	0,1	3,0
Mercurio (Hg)	mg/L	0,01	0,2
Molibdeno (Mo)	mg/L	0,01	0,1
Níquel (Ni)	mg/L	0,5	2,0
Plata (Ag)	mg/L	0,5	1,0
Plomo (Pb)	mg/L	0,1	0,25
Selenio (Se)	mg/L	0,1	0,25
Vanadio (V)	mg/L	0,5	2,0
Zinc (Zn)	mg/L	0,5	2,5
Compuestos Nitrogenados			
Nitrógeno Total (N)	mg/L	10,0	-

Fuente: Ministerio del Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible. Proyecto de vertimiento de aguas.

Artículo 30.

2.5.2 Cortes de perforación

Tabla 12: Valores límite máximos permisibles en disposición de cortes de perforación

PARAMETRO	VALORES LIMITES MAXIMOS PERMISIBLES	
	VALOR	UNIDAD
pH	Adimensional	6 - 9
Arsénico (As)	mg/L	10
Bario (Ba)	mg/L	20.000
Cadmio (Cd)	mg/L	10
Cromo (Cr)	mg/L	500
Mercurio (Hg)	mg/L	10
Plomo (Pb)	mg/L	500
Plata (Ag)	mg/L	200
Selenio (Se)	mg/L	10
Zinc (Zn)	mg/L	500
Grasas y Aceites	% (Peso seco)	< 1
Conductividad Eléctrica	Mmhos/cm	< 4
Relación de adsorción de sodio (RAS)	-	< 12
Porcentaje de sodio intercambiable	%	< 15
Contenido de humedad	%	< 50

Fuente: UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER. Plan de manejo ambiental Pozo ANH-PATIA 1 ST-P. Bucaramanga

2.5.3 Lixiviados

Tabla 13: Valores límite máximos permisibles en disposición de lixiviados

PARAMETRO	UNIDADES	VALORES LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES	
		Rango de valores moderado	Rango de valores elevados
Arsénico (As)	mg/L	0,5	1,7
Bario (Ba)	mg/L	1,5	5,0
Cadmio (Cd)	mg/L	0,008	0,07
Calcio (Ca)	mg/L	500	800
Cianuro (CN)	mg/L	0,01	0,015
Cloruros	mg/L	600	1300
Cobre (Cu)	mg/L	0,03	0,14
Cromo (Cr)	mg/L	0,04	0,3
Demanda bioquímica de oxígeno	mg/L	2000	12000
Demanda química de oxígeno	mg/L	8000	30000
Fenoles	mg/L	1,0	1,6
Fosforo Total	mg/L	1,0	3,0
Hierro (Fe)	mg/L	1,0	2,5
Magnesio (Mg)	mg/L	1700	4600
Manganeso (Mn)	mg/L	30	300
Mercurio (Hg)	mg/L	0,0007	0,002
Níquel (Ni)	mg/L	0,1	0,2
Nitrógeno (Amonio N-NH3)	mg/L	50	250
pH		6,5	8,0
Plata (Ag)	mg/L	0,04	0,05
Plomo (Pb)	mg/L	0,3	1,4
Potasio	mg/L	140	320
Selenio (Se)	mg/L	0,5	1,3
Sodio	mg/L	450	1000
Sólidos Totales	mg/L	6000	20000
Sólidos Totales Suspendidos	mg/L	1300	5000
Sulfatos	mg/L	150	700
Zinc (Zn)	mg/L	4,0	18

Fuente: Wilson, N. (2011). Land treatment of landfill leachate. Minnesota pollution control agency

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados de los análisis fisicoquímicos realizados a las muestras recolectadas en los campos ANH-PATIA 1 y ANH-BVTURA 1, con el fin de evaluar el sistema de tratamiento, manejo y disposición de sólidos, y presentar el diseño de una técnica alternativa para el manejo de rípios de perforación cumpliendo con la normatividad ambiental.

3.1 ANÁLISIS FISICOQUIMICOS DE RIPIOS Y FLUIDOS.

3.1.1 Rípios de perforación

Se observa que las propiedades de los rípios de perforación antes de ser sometidos a tratamiento son mayores a los límites permisibles. Una forma de evaluar estos parámetros es tomando como referencia el pH del fluido de perforación, el cual registró un valor de 10,5 al momento de realizar el muestreo los pozos ANH-PATIA 1 ST-P y ANH-BVTURA 1 ST-P.

El corte extraído del sistema de control de sólidos (ECS) y Dewatering en el pozo ANH-PATIA 1 ST-P conserva las propiedades del lodo. Los sólidos separados por la centrifuga cumplen con el porcentaje de humedad permisible establecido por el Plan de Manejo Ambiental del Pozo.

Los cortes almacenados en las piscinas del pozo ANH-BVTURA 1 ST-P presentan un valor de humedad y pH menor a las del campo ANH-PATIA 1 ST-P.

Tabla 14: Análisis fisicoquímicos de rípios de perforación. Pozo ANH-PATIA 1

PARÁMETRO	UNIDADES	MUESTREO				LÍMITE PERMISIBLE
		Zarandas	Centrífugas	Piscinas	Corte Estabilizado	
pH	(Adim)	10,47	9,93	10,5	12,8	6 -- 9
Humedad	%	59	45	61	46	< 50

Fuente: Autores

Tabla 15: Análisis fisicoquímicos de rípios de perforación pozo ANH-BVTURA 1

PARAMETRO	UNIDADES	MUESTREO		LÍMITE PERMISIBLE
		Piscinas	Corte Estabilizado	
Conductividad	$\mu\text{S}/\text{cm}$	1060	6740	2500
Humedad	%	57	43	< 50
pH	Adim	10,7	11,9	6 -- 9
TDS	mg/L	580	3370	1300

Fuente: Autores

3.1.2 Lixiviados

El lixiviado es la fase líquida contenida en el corte, la cual se suspende y no puede ser removida del sitio de almacenamiento. Se caracteriza por ser la fase con mayor cantidad de contaminantes en solución, generalmente aportados por los aditivos del lodo de perforación.

Tabla 16: Análisis fisicoquímicos de lixiviados. Pozo ANH-PATIA 1

PARAMETROS	UNIDADES	MUESTREO		LÍMITES PERMISIBLES	
		Piscinas	Corte Estabilizado con Cal	Rango de valores moderados	Rango de valores elevados
Bario (Ba)	mg/L	15	3	1,5	5
Calcio (Ca)	mg/L	480	600	500	800
Carbonato de Calcio (CaCO ₃)	mg/L	1200	1200	1250	2000
Cloruros (Cl)	mg/L	500	600	600	1300
Conductividad (Ca)	mg/L	2450	2320	2000	2500
Fluoruros (F)	mg/L	0,05	0,14	5	10
Hierro (Fe)	mg/L	0,07	0,12	1	2,5
Mf	Adim	0,65	0,7	-	-
Pf	Adim	0	0	-	-
pH	Adim	10,2	10,5	6,5	8,0
Potasio (K)	mg/L	730	406	140	320
Sulfatos (SO ₄)	mg/L	50	50	150	700
TDS	mg/L	1225	1160	1300	1800

Fuente: Autores

Un parámetro importante para evaluar y optimizar el manejo de los rios de perforación en los pozos ANH PATIA 1 ST-P y ANH BVTURA 1 ST-P es mediante el análisis de las propiedades físicas y químicas del lixiviado.

Los parámetros que registraron valores elevados durante la perforación del pozo ANH-PATIA 1 ST-P fueron: Bario, Potasio, Conductividad, pH y Alcalinidad

Tabla 17: Análisis fisicoquímicos de lixiviados. Pozo ANH-BVTURA 1

PARAMETROS	UNIDADES	MUESTREO		LÍMITES PERMISIBLES	
		Piscinas	Corte Estabilizado con Cal	Rango de valores moderados	Rango de valores elevados
Bario (Ba)	mg/L	32	9	1,5	5
Calcio (Ca)	mg/L	160	240	500	800
Carbonato de Calcio (CaCO ₃)	mg/L	400	400	1250	2000
Cloruros (Cl)	mg/L	500	800	600	1300
Conductividad (Ca)	mg/L	1740	1620	2000	2500
Fluoruros (F)	mg/L	0,01	0,02	5	10
Hierro (Fe)	mg/L	1,35	0,59	1	2,5
Mf	Adim	0,35	0,4	-	-
Pf	Adim	0	0	-	-
pH	Adim	7,8	8,1	6,5	8,0
Potasio (K)	mg/L	375	35	140	320
Sulfatos (SO ₄)	mg/L	50	50	150	700
TDS	mg/L	870	810	1300	1800

Fuente: Autores

Los parámetros que registraron valores elevados durante la perforación del pozo ANH-BVTURA 1 ST-P fueron: Bario, Potasio, Hierro y pH.

3.1.3 Aguas residuales

El agua proveniente del Dewatering en el pozo ANH-PATIA 1 ST-P se caracteriza por su alto contenido de contaminantes. Posee un color oscuro, olor desagradable y una considerable cantidad de sólidos en suspensión. Las muestras de agua tomadas del Skimmer y del tanque Red Fox, contienen bajas concentraciones de cloruros, calcio y poseen un pH neutro.

Tabla 18: Análisis fisicoquímicos de aguas residuales. Pozo ANH-PATIA 1

PARAMETROS	UNIDADES	MUESTREO					LÍMITES PERMISIBLES	
		Dewatering	Skimmer	Red Fox	Tanque de tratamiento de aguas	Agua Tratada	Rango de valores moderados	Rango de valores elevados
Calcio (Ca)	mg/L	720	80	80	360	280	500	800
Carbonato de Calcio (CaCO ₃)	mg/L	1800	200	200	900	700	1250	2000
Cloruros (Cl)	mg/L	700	300	300	500	500	600	1300
Mf	Adim	0,85	0,45	0,35	0,4	0,25	-	-
Pf	Adim	0	0	0	0	0	-	-
pH	Adim	6,7	7,7	7,5	7,3	7,5	6,5	8,0

Fuente: Autores

Figura 33: Agua de Dewatering. Pozo ANH-BVTURA 1



Fuente: 'Autores'

El agua proveniente del Dewatering en el pozo AHN-BVTURA 1 ST-P presenta alta dureza a causa de las concentraciones calcio y alcalinidad. Además, los valores obtenidos de conductividad y sólidos disueltos totales (TDS) reflejan un alto índice de turbiedad.

Tabla 19: Análisis fisicoquímicos de aguas residuales. Pozo ANH-BVTURA 1

PARAMETROS	UNIDADES	MUESTREO			LÍMITES PERMISIBLES	
		Dewatering	Tanque de tratamiento de aguas	Agua Tratada	Rango de valores moderados	Rango de valores elevados
Calcio (Ca)	mg/L	900	500	220	500	800
Carbonato de Calcio (CaCO ₃)	mg/L	2250	1250	550	1250	2000
Cloruros (Cl)	mg/L	430	130	230	600	1300
Color	Pt-Co	6510	4067	52,9	50	500
Conductividad	μS/cm	4910	2290	2990	2000	2500
Hierro (Fe)	mg/L	3,7	0,31	0,34	1,0	2,5
Mf	Adim	0,85	0,4	0,4	-	-
Oxígeno Disuelto (O ₂)	mg/L	20,1	22,7	25	-	-
Pf	Adim	0	0	0	-	-
pH	Adim	6,5	7,2	7,2	6,5	8,0
Sulfatos (SO ₄)	mg/L	130	10	12	250	500
TDS	mg/L	2450	1140	1470	1300	1800

Fuente: Autores

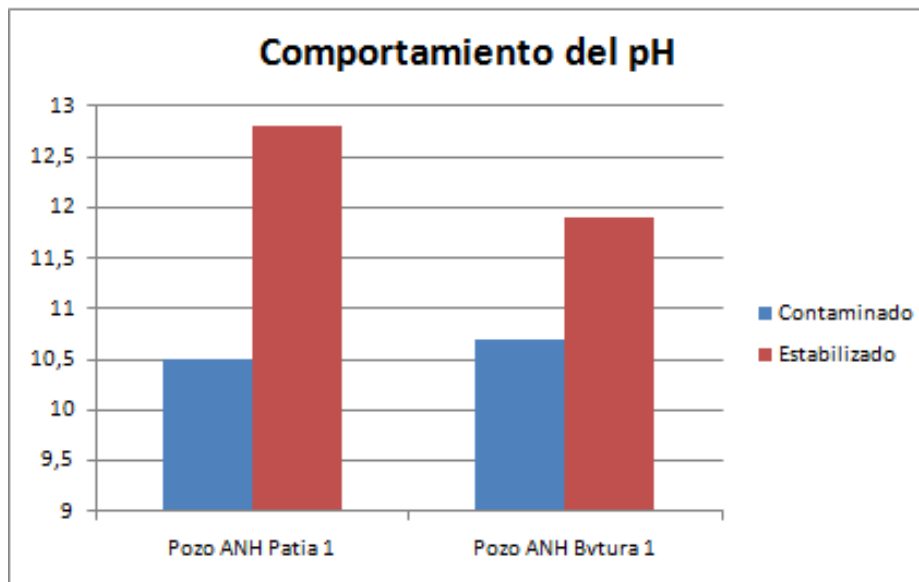
3.2 EVALUACIÓN DEL TRATAMIENTO

3.2.1 Tratamiento de ripsos de perforación

Para evaluar la eficiencia del tratamiento de los ripsos de perforación, se deben analizar las propiedades fisicoquímicas de la fase sólida y los lixiviados. Para este propósito se realiza un muestreo antes y después de aplicar el tratamiento.

La técnica utilizada en los campos ANH-PATIA 1 ST-P y ANH-BVTURA 1 ST-P fue estabilización con óxido de calcio (Cal viva). Este agente químico reacciona con el agua contenida en el corte dando como producto hidróxido de calcio $[Ca(OH)_2]$, debido a su naturaleza alcalina genera un incremento en los niveles de pH.

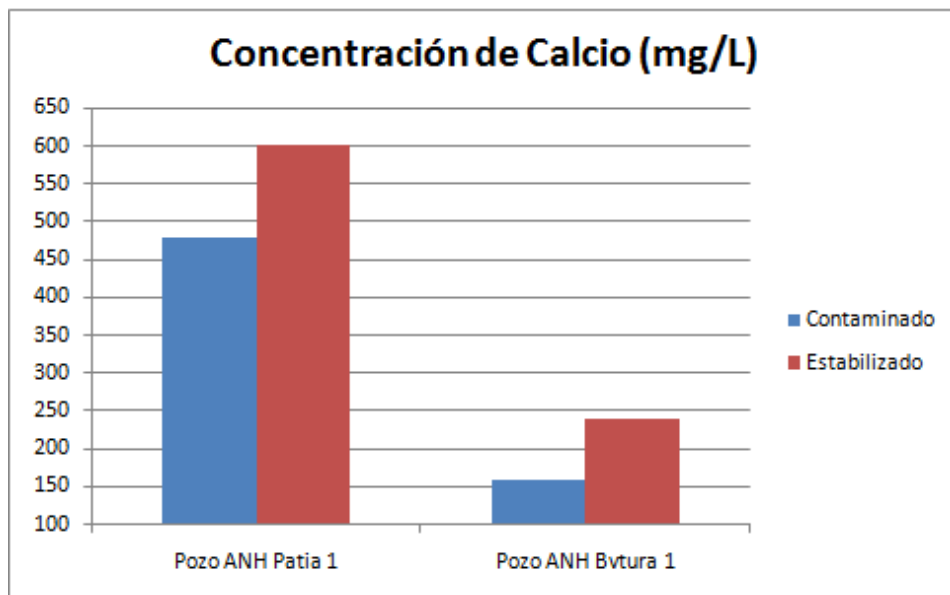
Tabla 20: Comportamiento del pH en los cortes de perforación.
Pozos ANH-PATIA 1 y ANH-BVTURA 1



Fuente: Autores

La cantidad de cal viva adicionada en el tratamiento esta estrictamente relacionada con la concentración de calcio remanente. En los pozos ANH-PATIA 1 y ANH BVTURA 1 la dosificación de cal fue 15 libras de cal por barril de corte, lo cual generó un aumento del 20% y 50% del contenido de calcio respectivamente.

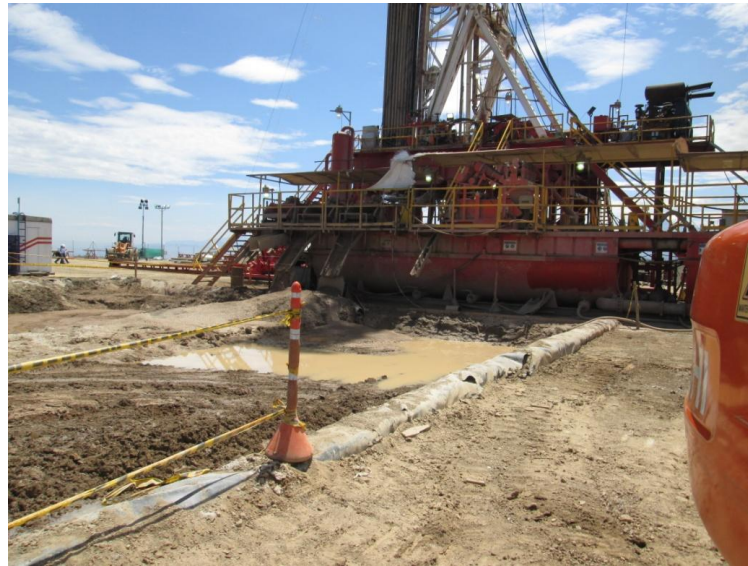
Tabla 21: Comportamiento del calcio en los cortes de perforación.
Pozos ANH-PATIA 1 y ANH-BVTURA 1



Fuente: Autores

La configuración del sistema de tratamiento primario utilizado en el pozo ANH-PATIA ST-P 1 no fue adecuada y como consecuencia los cortes registraron porcentajes de humedad elevados. El sólido debe ser sometido a una etapa de separación por asentamiento gravitacional en el Catch Tank y posteriormente ser trasladado a la piscina de confinamiento por medio de la retroexcavadora. Este procedimiento fue implementado en el pozo ANH-BVTURA 1, donde se registraron mejores porcentajes de humedad.

Figura 34: Manejo de rípios. Pozo ANH-PATIA 1 ST-P



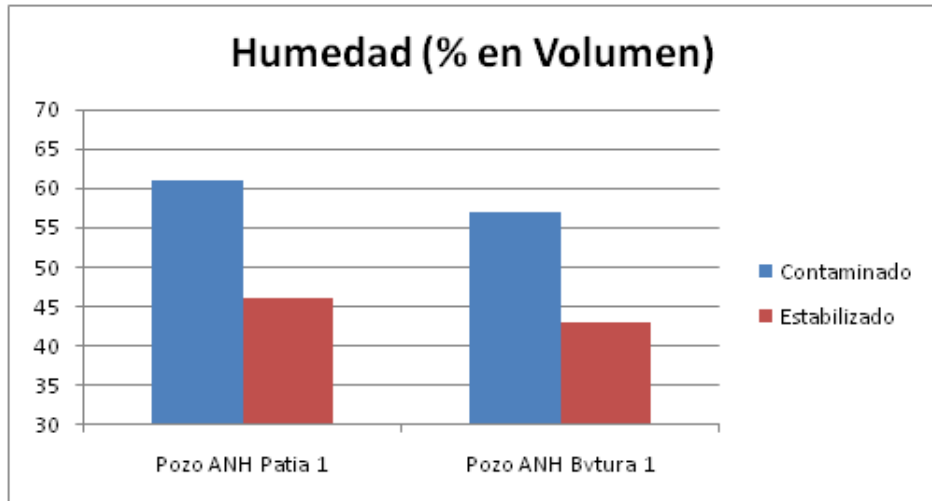
Fuente: Autores

Figura 35: Manejo de rípios. Pozo ANH-BVTURA 1 ST-P



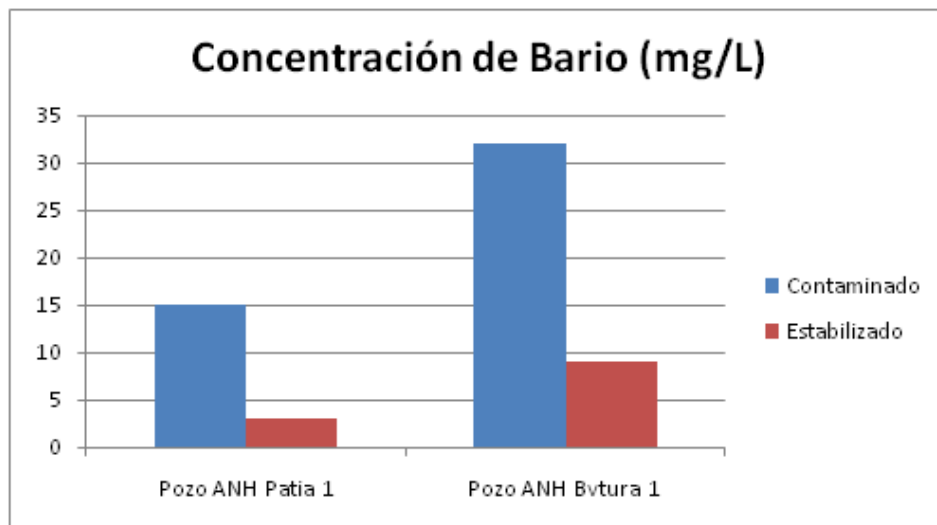
Fuente: Autores

Tabla 22: Comportamiento del porcentaje de humedad en los cortes de perforación. Pozos ANH-PATIA 1 y ANH-BVTURA 1



Fuente: Autores

Tabla 23: Comportamiento del bario en los cortes de perforación. Pozos ANH-PATIA 1 y ANH-BVTURA 1



Fuente: Autores

El tratamiento resultó efectivo para la remoción de bario. Por otra parte compuestos como sulfatos y fluoruros no se ven alterados durante la estabilización, pues no presentaron variaciones apreciables.

Se puede concluir que el manejo de ripsos de perforación en el pozo ANH-BVTURA 1 presentó mejores resultados que en el pozo ANH-PATIA 1, pero no cumple en su totalidad con los límites establecidos por la normatividad ambiental.

3.2.2 Tratamiento de aguas residuales

Para evaluar la eficiencia del tratamiento secundario de los desechos de perforación, se deben analizar las propiedades fisicoquímicas de las aguas residuales. Para este propósito se realiza un muestreo en cada una de las zonas de almacenamiento de aguas.

Las aguas provenientes del Dewatering en los pozos ANH-PATIA 1 y ANH BVTURA 1 se caracterizan por contener altas concentraciones de iones cloruro, esto se debe a la adición de agentes coagulantes (CYFLOC) y floculantes (Policloruro de aluminio). Además, presentan valores elevados de alcalinidad, lo que refleja la presencia de iones carbonatos y bicarbonatos.

Las aguas utilizadas para la limpieza de los equipos se almacenan en el tanque de almacenamiento (Skimmer). Estas se caracterizan por contener bajas concentraciones de calcio y un pH neutro.

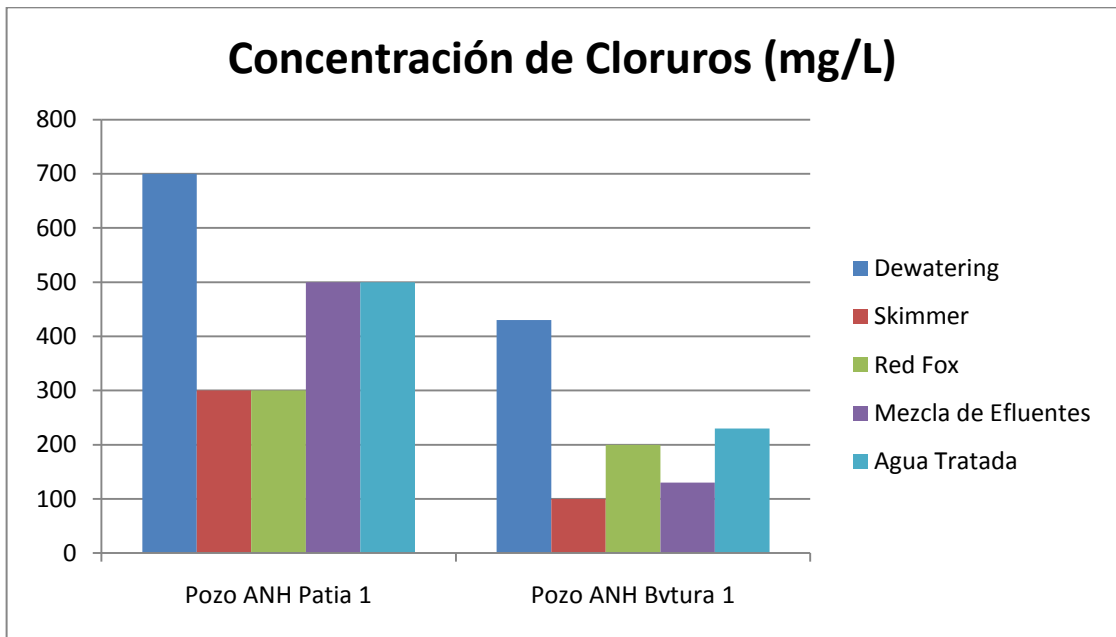
Los efluentes líquidos generados por actividades antrópicas y provenientes de casinos, servicios sanitarios, limpieza de áreas de alojamiento y oficinas se almacenan en el tanque de almacenamiento (Red Fox). Allí reciben un pretratamiento con polisulfato de aluminio y son enviadas al tanque de tratamiento

de aguas. Se caracterizan por contener bajas concentraciones de cloruros, calcio y poseen un pH neutro.

Todos los efluentes líquidos provenientes de la locación (Dewatering, Skimmer y Red Fox) son mezclados y almacenados en el tanque de tratamiento de aguas. La dilución mejora las propiedades del agua facilitando su disposición.

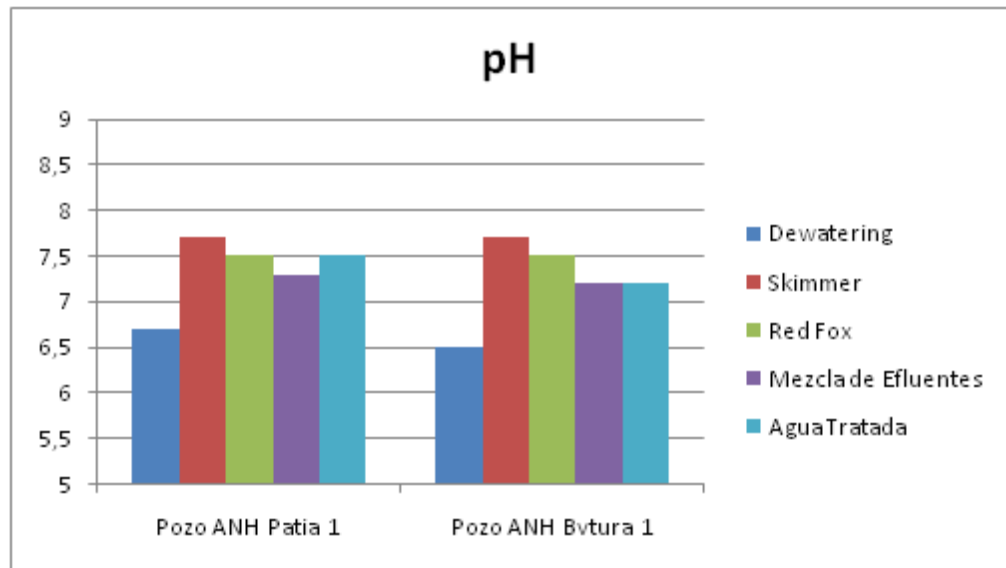
En general, el tratamiento de aguas en los pozos ANH-PATIA 1 ST-P y ANH-BVTURA 1 ST-P cumple con las especificaciones técnicas.

Tabla 24: Concentración de cloruros en el agua. Pozos ANH-PATIA 1 y ANH-BVTURA 1



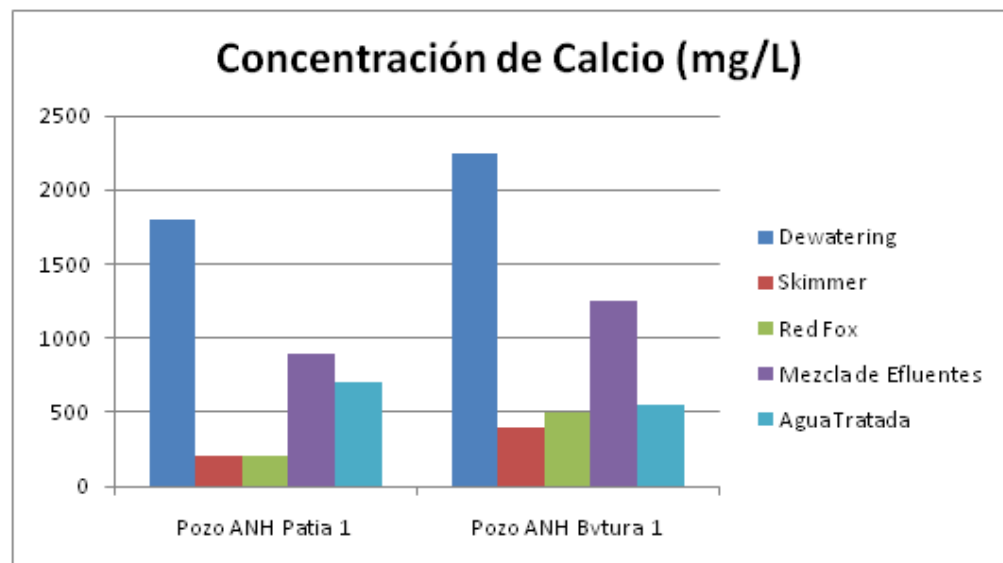
Fuente: Autores

Tabla 25: Valores de pH del agua. Pozos ANH-PATIA 1 y ANH-BVTURA 1



Fuente: Autores

Tabla 26: Dureza del agua. Pozos ANH-PATIA 1 y ANH-BVTURA 1



Fuente: Autores

Figura 36: Muestra de agua (Dewatering). Pozo ANH-PATIA 1 ST-P



Fuente: Autores

Figura 37: Muestra de agua (Red Fox). Pozo ANH-PATIA 1 ST-P



Fuente: Autores

Figura 38: Muestra de agua (Tanque de tratamiento). Pozo ANH-PATIA 1 ST-P



Fuente: Autores

Figura 39: Muestra de agua (Tratada). Pozo ANH-PATIA 1 ST-P



Fuente: Autores

3.3 EFECTO DE LOS CONTAMINANTES SOBRE EL RECURSO SUELO

Una mala operación del sistema primario y secundario para el tratamiento de rios de perforación, puede conllevar a la acumulación de altas concentraciones de sal e incremento en el pH del suelo.

Los minerales comúnmente presentes en el agua y lixiviados del ripo de perforación son cloruro, sulfato, bicarbonato, sodio, potasio, bario, calcio, y magnesio. Estos minerales contenidos en la fase líquida se pueden precipitar en el suelo generando problemas. El sodio, cloruro y bicarbonato son los tres minerales que más contribuyen a la salinidad del suelo y la alcalinidad.

Si los desechos líquidos de perforación contienen altos niveles de bicarbonato y cloruro, es altamente probable que contenga altos niveles de sodio en solución.

La alta concentración de sodio, hace que el material arcilloso presente en el suelo y la materia orgánica se repelan entre sí. Esta repulsión produce que la arcilla se disgregue y se comporte como una partícula individual. Estas pequeñas partículas de arcilla individuales se pueden empaquetar en los poros del terreno generando taponamiento. La dispersión de la arcilla no es un problema en suelos con textura arenosa.

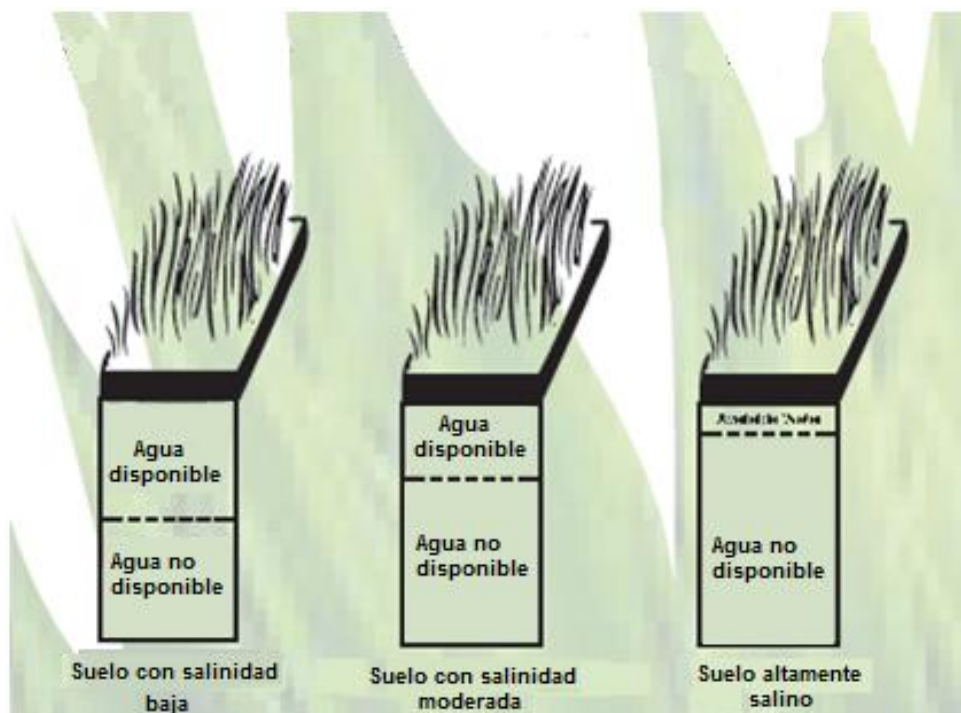
El calcio tiene un efecto contrario sobre el material arcilloso. El calcio produce que las partículas de arcilla se floclen o se junten, comportándose como una partícula mayor tamaño y facilitando el drenaje de líquidos.

El bicarbonato tiende reaccionar con los iones de calcio libre lo cual resulta en la formación de carbonato de calcio en el suelo. Esto genera un aumento en el pH, alcanzando rangos mayores a 8,5 cuando los desechos líquidos contienen una alta concentración de iones bicarbonato.

Los desechos líquidos que contienen altos contenidos de cloruro también presentan alto contenido de sodio. Los iones cloruro afectan la productividad del suelo mediante la reducción de la cantidad de agua disponible para las plantas.

La presencia de nitrógeno, fósforo y potasio mejoran las propiedades del suelo e incrementan la actividad microbiana conllevando a una rápida biodegradación de los desechos de perforación.

Figura 40: Efectos de la salinidad sobre el suelo



Fuente: Harris Laboratories. Alkaline Soils

3.4 EVALUACIÓN DE LAS TÉCNICAS ALTERNATIVAS PARA EL MANEJO DE DESECHOS DE PERFORACIÓN

Las sustancias utilizadas en los tratamientos convencionales han generado un sin número de repercusiones sobre los recursos naturales, esto ha generado la necesidad de optar por nuevos aditivos para optimizar el manejo de desechos peligrosos. Mediante este proyecto se desea mostrar un agente alternativo que conserve las condiciones del suelo y preserve el medio ambiente.

Para determinar la proporción de agente orgánico necesario en el manejo de desechos de perforación, se llevo a cabo el siguiente procedimiento:

1. Tomar 350 mililitros de corte sin tratar.

2. Agregar a cada muestra diferentes proporciones de los aditivos seleccionados:
 - ✓ Abingra Compuesto (100%)
 - ✓ Abingra Fosazucal (100%)
 - ✓ Madera fragmentada (100%)
 - ✓ SMALX 1
 - ✓ SMALX 2

3. Homogeneizar la mezcla y someter a radiación solar durante un periodo de 10 días.

4. Medir periódicamente las propiedades físico-químicas a cada uno de los cultivos, para su posterior análisis.

Figura 41: Porcentaje de Humedad



Fuente: Autores

Figura 42: Propiedades del lixiviado



Fuente: Autores

Mediante ensayos físicos y químicos, se determinó la dosificación óptima para el manejo de cortes de perforación provenientes del pozo AHN-BVTURA 1, la cual fue de 200 libras de agente orgánico por cada barril de corte. Posteriormente las muestras fueron sometidas a tratamiento y se obtuvieron los siguientes resultados por cultivo.

Tabla 27: Técnicas de manejo alternativas para el manejo de cortes de perforación

ANÁLISIS FISCOQUIMICOS DE CORTES									
PARAMETRO	UNIDADES	MUESTREO						Estabilización con Cal	LÍMITE PERMISIBLE
		Piscinas Pozo ANH-BVTURA 1	ABIMGRA COMPUESTO	ABIMGRA FOSAZUCAL	ASERRÍN	SMALX 1	SMALX 2		
Conductividad	μS/cm	1060	1940	1090	700	2550	560	6070	2500
Humedad	%	57	30	35	21	18	21	43	50
pH	Adim	10,7	7,0	8,0	6,5	8,0	6,5	11,9	9
TDS	mg/L	580	980	540	350	1275	230	3370	1300

ANÁLISIS FISCOQUIMICOS DE LIXIVIADOS									
PARAMETROS	UNIDADES	MUESTREO						LÍMITES PERMISIBLES	
		Piscinas Pozo ANH-BVTURA 1	ABIMGRA COMPUESTO	ABIMGRA FOSAZUCAL	ASERRÍN	SMALX 1	SMALX 2	Rango de valores moderados	Rango de valores elevados
Bario (Ba)	mg/L	32	32	9	11	18	24	1,5	5
Calcio (Ca)	mg/L	160	320	500	160	400	400	500	800
Carbonato de Calcio (CaCO ₃)	mg/L	400	800	1000	400	1000	1000	1250	2000
Cloruros (Cl)	mg/L	500	900	400	500	900	500	600	1300
Conductividad (Ca)	mg/L	1740	4100	1220	1010	2510	1060	2000	2500
Floururos (F)	mg/L	0,01	0,02	0,06	0,06	0,02	0,06	5	10
Hierro (Fe)	mg/L	1,35	0,77	0,13	0,17	0,28	0,83	1,0	2,5
Mf	Adim	0,35	0,5	0,45	0,5	0,45	0,5	-	-
Pf	Adim	0	0	0	0	0	0	-	-
pH	Adim	7,8	7,3	7,5	6,5	7,5	8,0	6,5	8,0
Potasio (K)	mg/L	375	406	326	348	406	376	140	320
Sulfatos (SO ₄)	mg/L	50	75	75	75	75	50	150	700
TDS	mg/L	870	2050	610	550	1260	530	1300	1800

Fuente: Autores

Tabla 28: Ficha técnica del Abono ABIMGRA FOSFOAZUCAL

ELEMENTO	CONTENIDO	UNIDADES
Contenido de Calcio (CaO)	34	% Mínimo
Contenido de Azufre (S)	4	% Mínimo
Pentóxido de Fósforo (P ₂ O ₅)	15	% Mínimo
Contenido de Humedad Libre (H ₂ O)	2	% Máximo

Fuente: www.abimgra.com

Tabla 29: Ficha técnica del Abono COMPUESTO ABIMGRA

ELEMENTO	CONTENIDO	CONTENIDO ESTIPULADO NTC-5167 (Para abono orgánico mineral sólido)
Humedad Máxima	12,6%	Máximo 15%
Cenizas	54,5%	La suma de estos parámetros mas la humedad deberá ser 100%
Pérdidas por Volatización	32,9%	
Carbono Orgánico	10,9%	Mínimo 5% - Máximo 15%
pH	6,98	Reportar
Conductividad Eléctrica	38,9 dS/m	Reportar
Cap. Retención de Humedad	62,9%	No Aplica
Densidad	0,77 g/cm ₃	Reportar
Nitrógeno Total (N)	1,1%	N, P ₂ O ₅ ,K ₂ O,CaO,MgO, Elementos menores, reportar si la riqueza total de cada elemento mínimo es 2%
Fósforo (P ₂ O ₅)	2,3%	
Potasio (K ₂ O)	1,8%	
Calcio (CaO)	21,4%	
Magnesio (MgO)	0,7%	
Azufre (S)	2,1%	
Elementos Menores (Fe,Cu,Mn,Zn,S)	Trazas	
MATERIAS PRIMAS		
Gallinaza compostada	60%	
Polihalita (K ₂ MgCa ₂ (SO ₄) ₄ .H ₂ O)	20%	
Roca Fosfórica (36% Pentóxido de Fósforo)	10%	
Bases de Azufre	10%	

Fuente: www.abimgra.com

La etapa final de evaluación del tratamiento se lleva a cabo mediante la sensibilización de cada una de las propiedades fisicoquímicas del corte de perforación para así seleccionar la técnica alternativa de mayor efectividad. (Ver Anexo A y Anexo B).

3.5 DISEÑO DE METODOLOGÍA PARA EL TRATAMIENTO DE CORTES EN POZOS ESTRATIGRÁFICOS

El diseño de la metodología contiene la evaluación de los tratamientos realizados en los pozos ANH-PATIA 1 ST-P, ANH-BVTURA 1 ST-P y la técnica alternativa para el manejo de recortes de perforación.

La metodología se separa en dos etapas.

- ✓ Tratamiento primario de cortes de perforación
- ✓ Tratamiento secundario de cortes de perforación

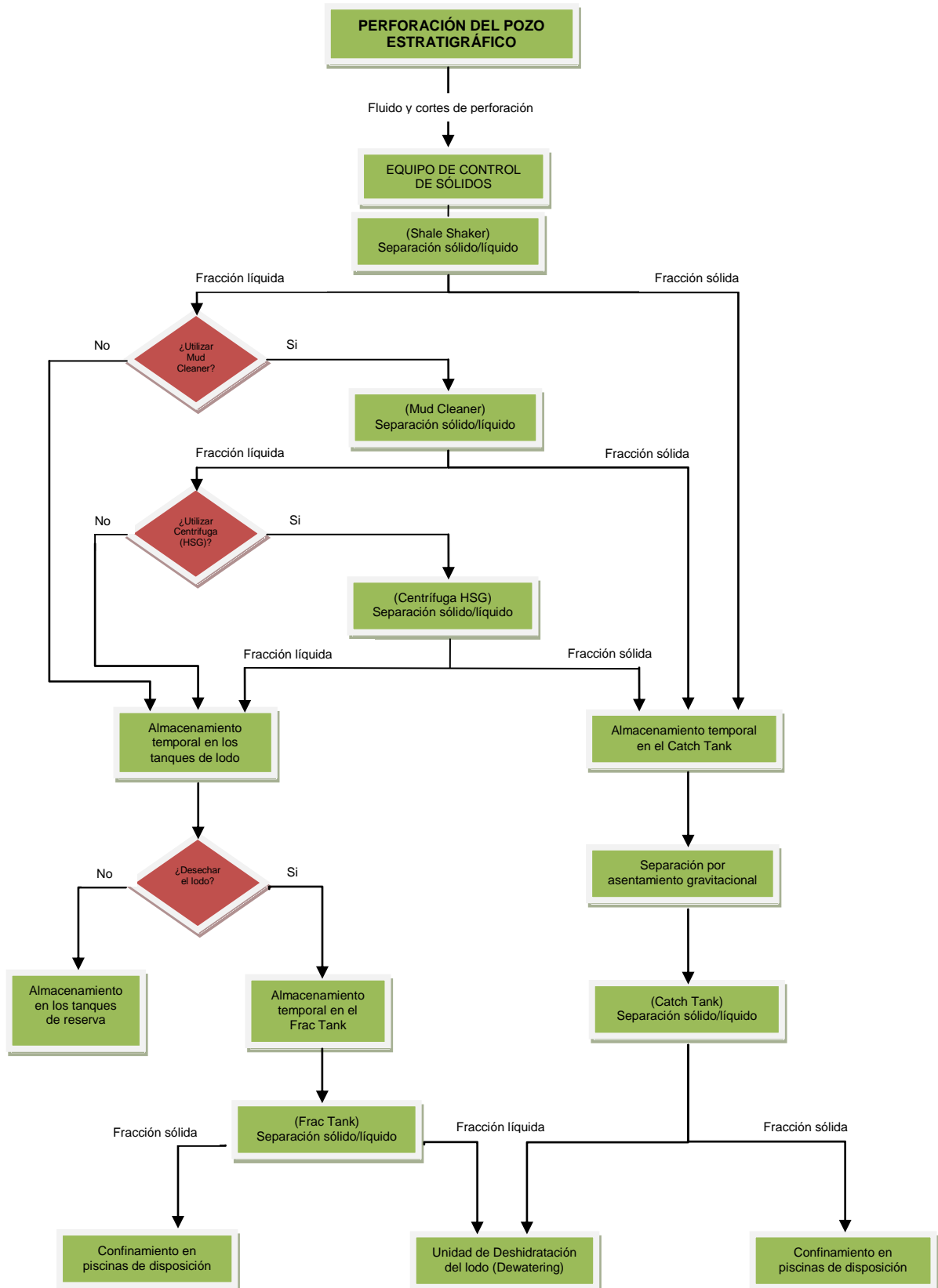
En el tratamiento primario se tienen en cuenta los procesos y equipos utilizados para obtener una eficiente separación de la fase sólida.

En el tratamiento secundario se describe la operación de la unidad de deshidratación del lodo y disposición de cortes en las piscinas de confinamiento. Las técnicas seleccionadas para el manejo de cortes son:

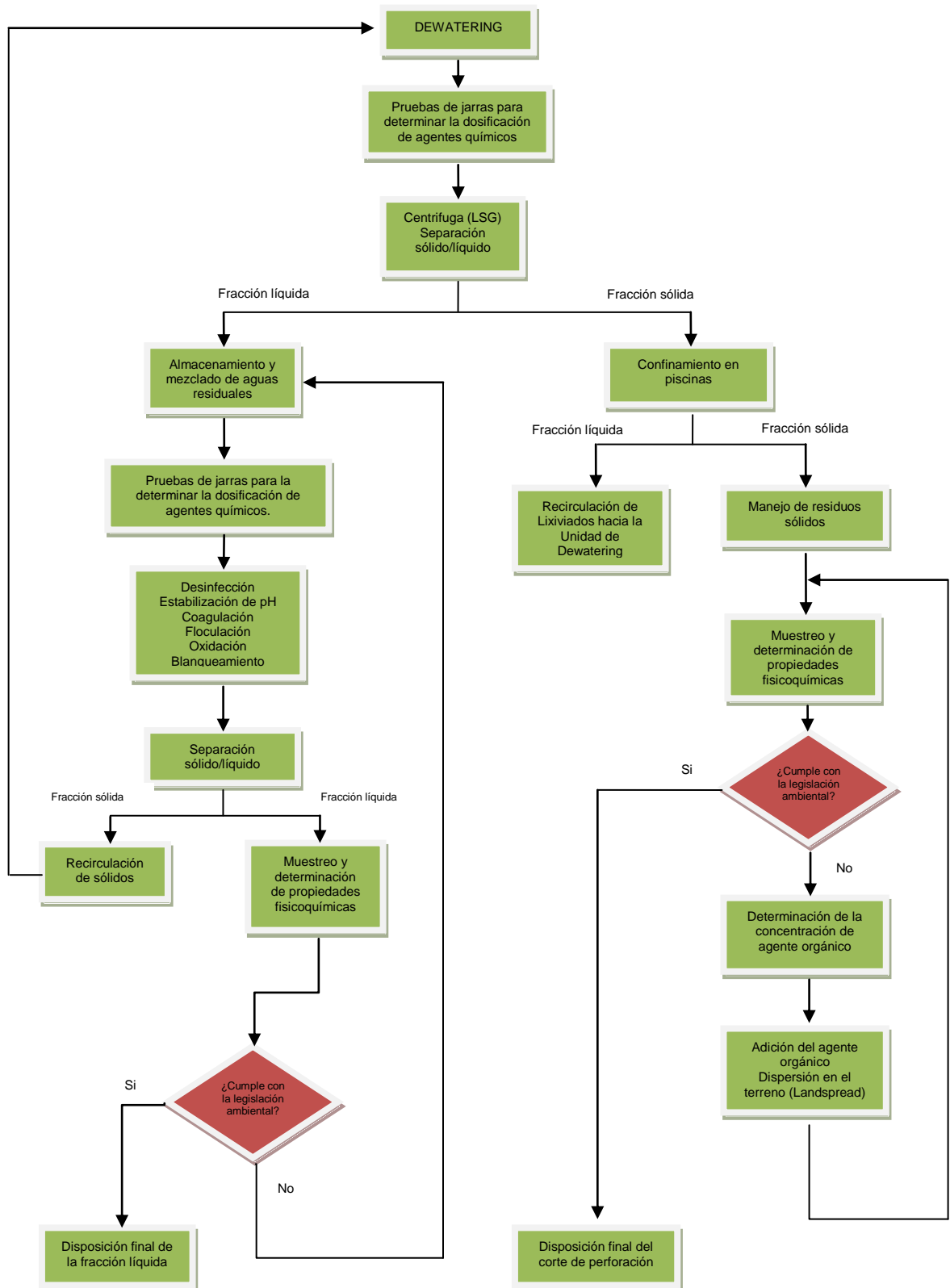
- ✓ Dispersión en el terreno (Landsread)
- ✓ Estabilización con Abono y/o Aserrín

A diferencia del óxido de calcio, el uso las sustancias orgánicas estabilizan el pH y aportan una gran cantidad de nutrientes al suelo.

3.5.1 Tratamiento primario de cortes en pozos estratigráficos



3.5.2 Tratamiento secundario de cortes en pozos estratigráficos



4. CONCLUSIONES

El manejo de cortes de perforación en el pozo ANH-BVTURA 1 presentó mejores resultados que en el pozo ANH-PATIA 1, sin embargo no cumple en su totalidad con los límites establecidos por la legislación ambiental vigente.

La madera fragmentada es la mejor opción para el manejo de desechos de perforación en pozos estratigráficos, debido a que estabiliza el pH del corte, aporta nutrientes al suelo y tiene excelentes capacidades de absorción de agua.

La técnica de estabilización con cal viva proporciona una disminución considerable de la fracción líquida contenida en los cortes de perforación, sin embargo sus efectos sobre pH del suelo y la baja remoción de contaminantes la convierte en una opción ineficiente.

El manejo de cortes con agentes orgánicos (abono y madera fragmentada), proporciona suelos estables para ser reforestados con plantas autóctonas de cada zona.

La configuración del sistema de control de sólidos es un factor crítico para la obtención de bajos porcentajes de humedad en los cortes de perforación.

Las técnicas utilizadas para el tratamiento de aguas residuales en los pozos ANH-PATIA 1 y ANH-BVTURA 1 fueron eficientes y cumplieron con las especificaciones establecidas por el Decreto 1594 de 1984.

Mediante los análisis fisicoquímicos en laboratorio se puede realizar una caracterización detallada de los desechos sólidos y líquidos de perforación, la cual facilite la selección de las técnicas apropiadas para su remediación.

La legislación colombiana en aspectos de disposición final de residuos líquidos está limitada, debido a que la generación de normas que controlan este aspecto a nivel nacional aún se encuentran en etapa de desarrollo y maduración, lo cual obliga a dejar el control de esta situación a las normas establecidas en otros países.

La metodología desarrollada permite identificar y optimizar el tratamiento de los desechos generados por la perforación de pozos estratigráficos, garantizando el cumplimiento de las especificaciones técnicas establecidas por la legislación ambiental y reduciendo el riesgo de generar impactos ambientales.

5. RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar una simulación prolongada en un periodo de 20 a 30 días, para evaluar el efecto de los microorganismos sobre las propiedades del corte de perforación.

Se recomienda realizar un análisis económico para la determinación del agente orgánico más rentable utilizado en la técnica alternativa propuesta para el manejo de cortes de perforación.

Se debe realizar análisis fisicoquímicos detallados, evaluando parámetros importantes tales como: contenido de sodio, aluminio, fenoles y metales pesados.

En zonas de alta pluviosidad las piscinas deben estar cubiertas para evitar que se cope su capacidad rápidamente.

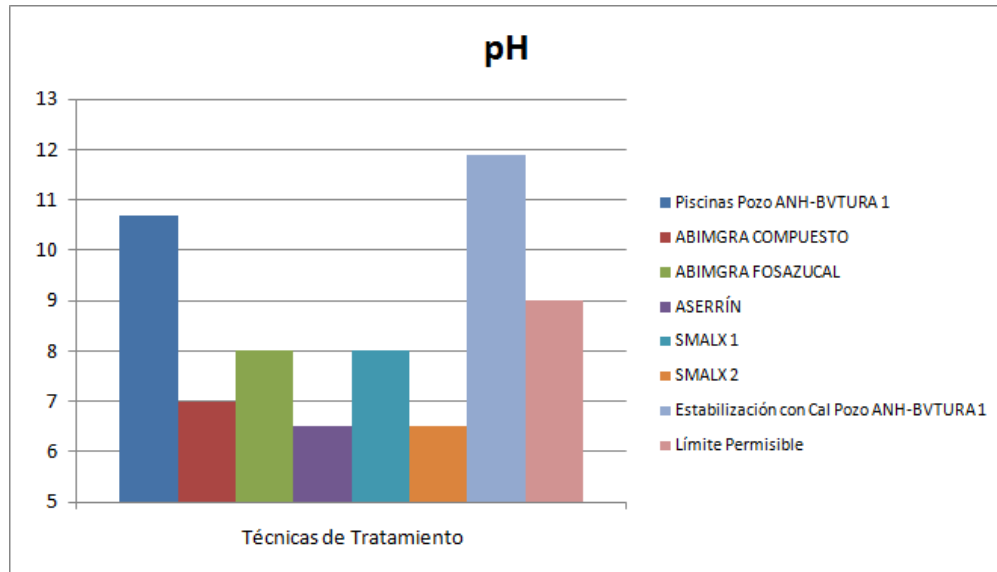
Debido a los altos volúmenes de madera fragmentada requerida para el manejo de cortes de perforación, esta debe almacenada en lugares amplios, bajo condiciones moderadas de temperaturas con el fin de evitar riesgos de incendio.

Desarrollar nuevas investigaciones en las cuales se realice la implementación de proyectos pilotos de las diferentes técnicas alternativas para el manejo de residuos de perforación existentes en el mundo, que difieran de los actualmente aplicados en la industria colombiana.

En los próximos días existirán regulaciones ambientales mucho más estrictas por lo cual se recomienda evaluar todas las alterativas posibles en cuanto a tecnología, educación ambiental al personal y agentes químicos para lograr minimizar el impacto al medio ambiente.

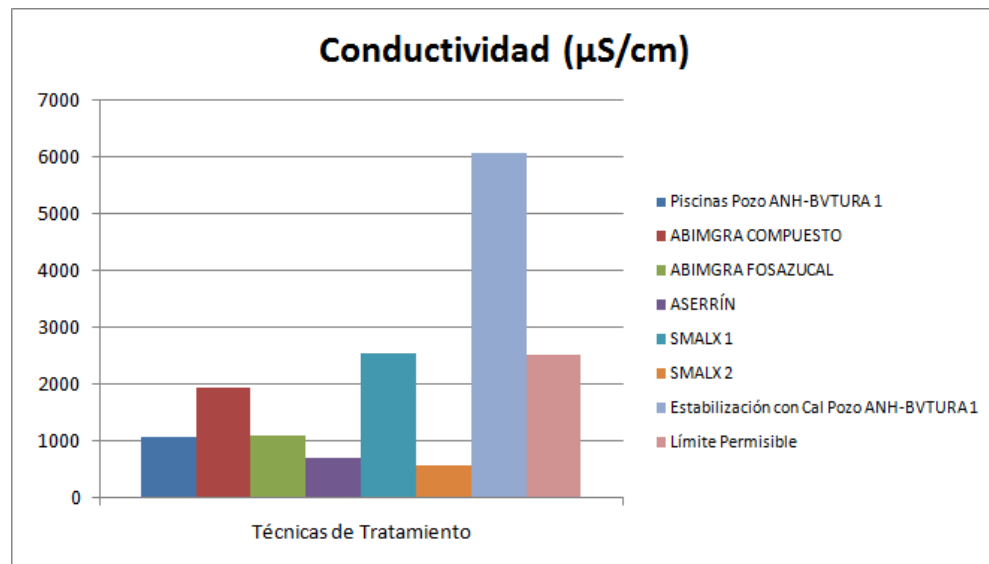
ANEXO A. EVALUACIÓN DE LAS TÉCNICAS ALTERNATIVAS SOBRE LAS PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DE LOS CORTES DE PERFORACIÓN

COMPORTAMIENTO DEL PH.



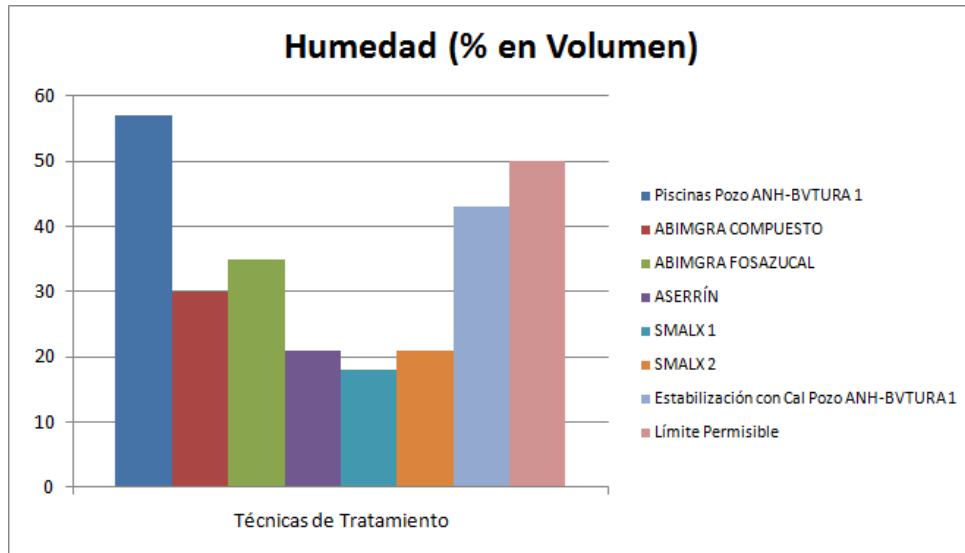
Fuente: Autores

CONDUCTIVIDAD.



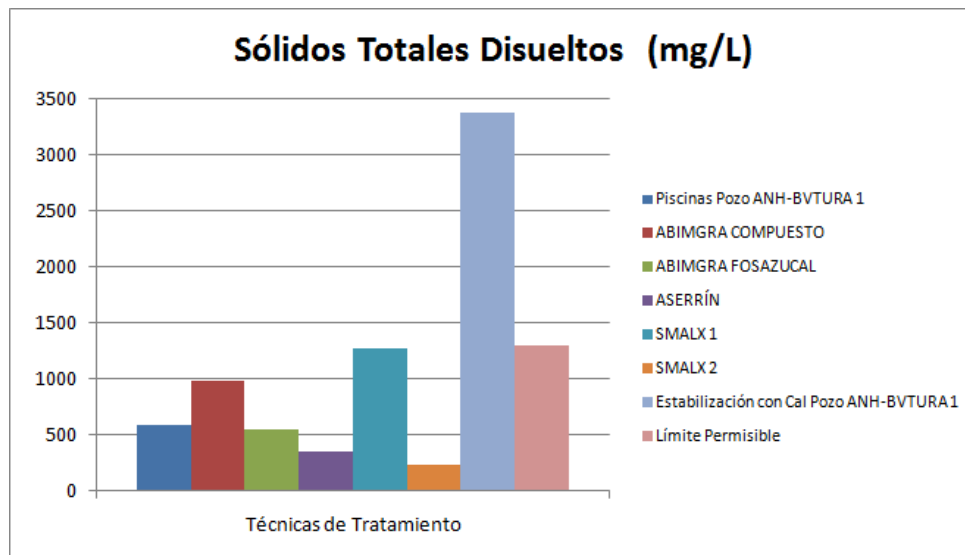
Fuente: Autores

PORCENTAJE DE HUMEDAD.



Fuente: Autores

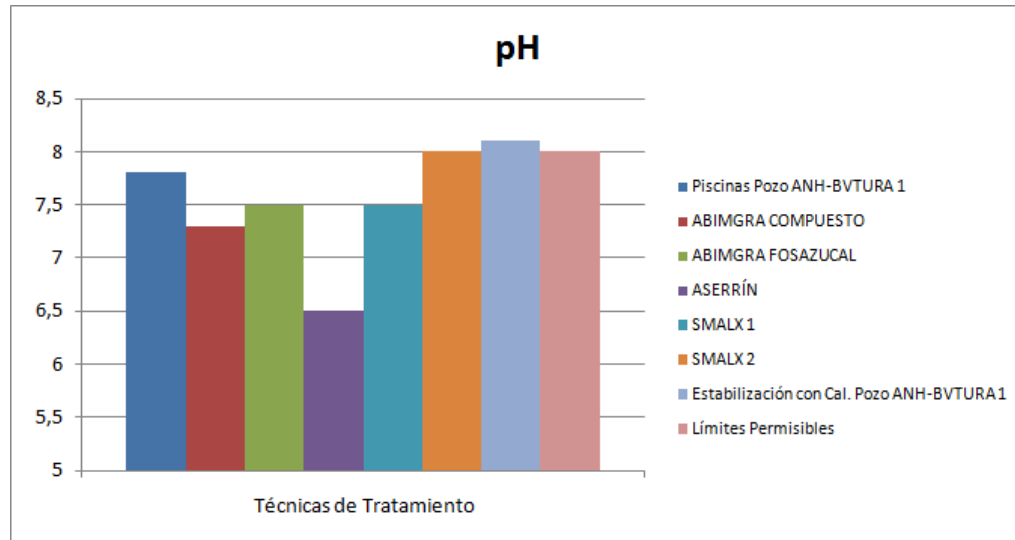
SÓLIDOS TOTALES DISUELTOS.



Fuente: Autores

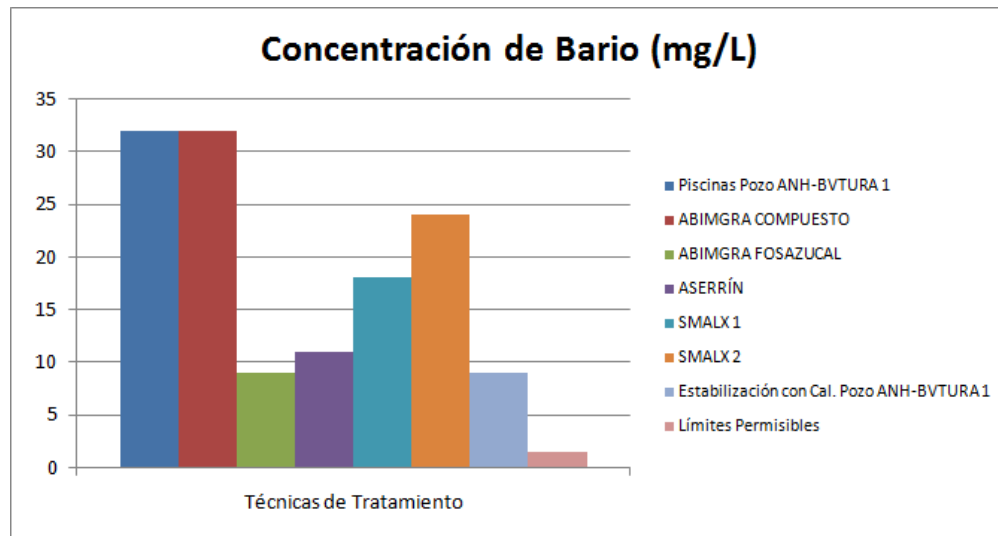
ANEXO B. EVALUACIÓN DE LAS TÉCNICAS ALTERNATIVAS SOBRE LAS PROPIEDADES FISICOQUIMICAS DE LOS LIXIVIADOS

COMPORTAMIENTO DEL PH.



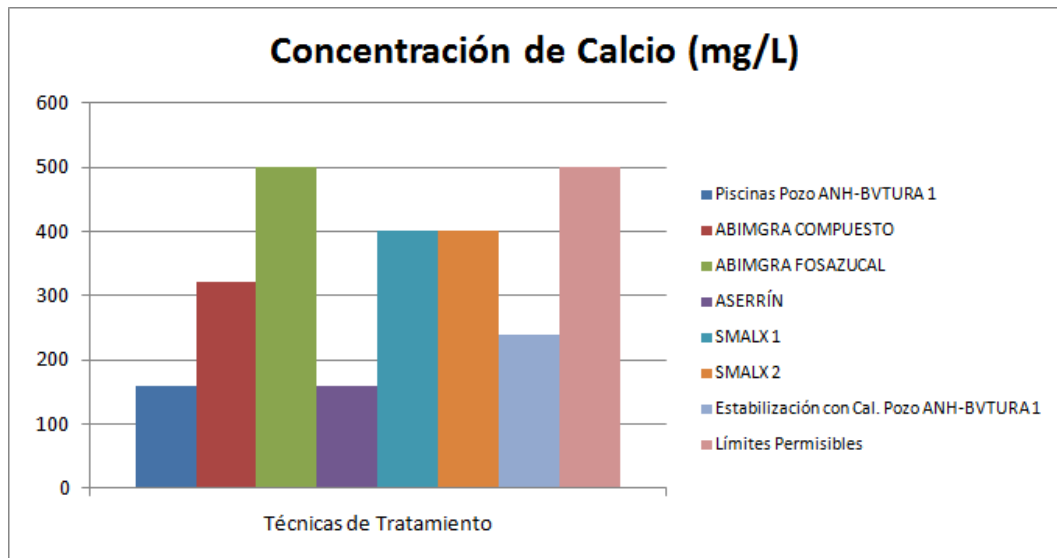
Fuente: Autores

CONCENTRACIÓN DE BARIO.



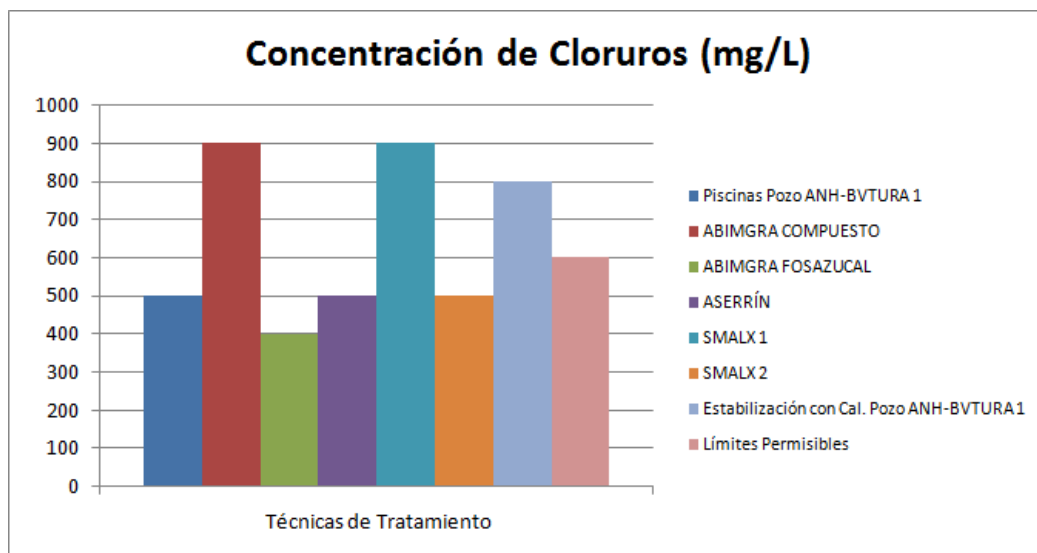
Fuente: Autores

CALCIO



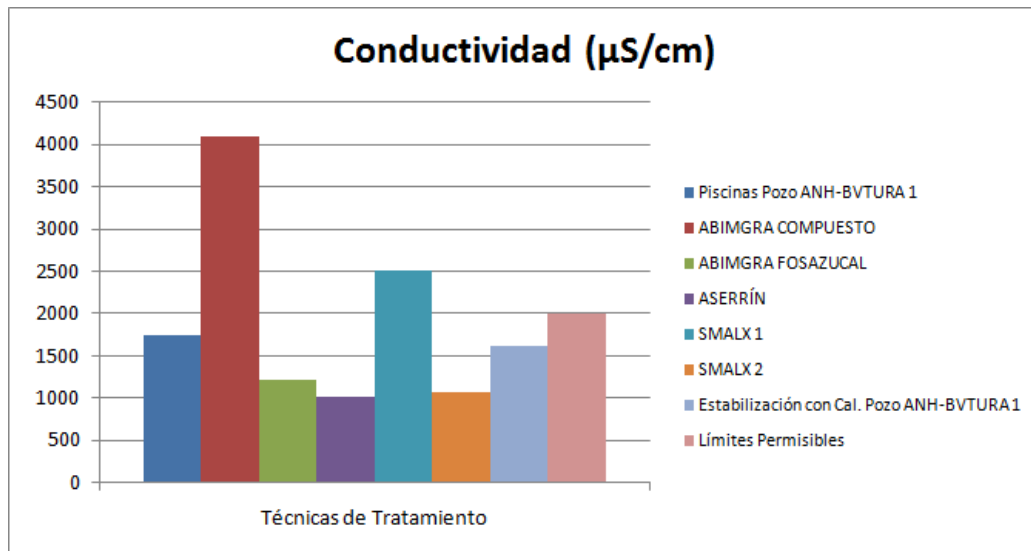
Fuente: Autores

CLORUROS.



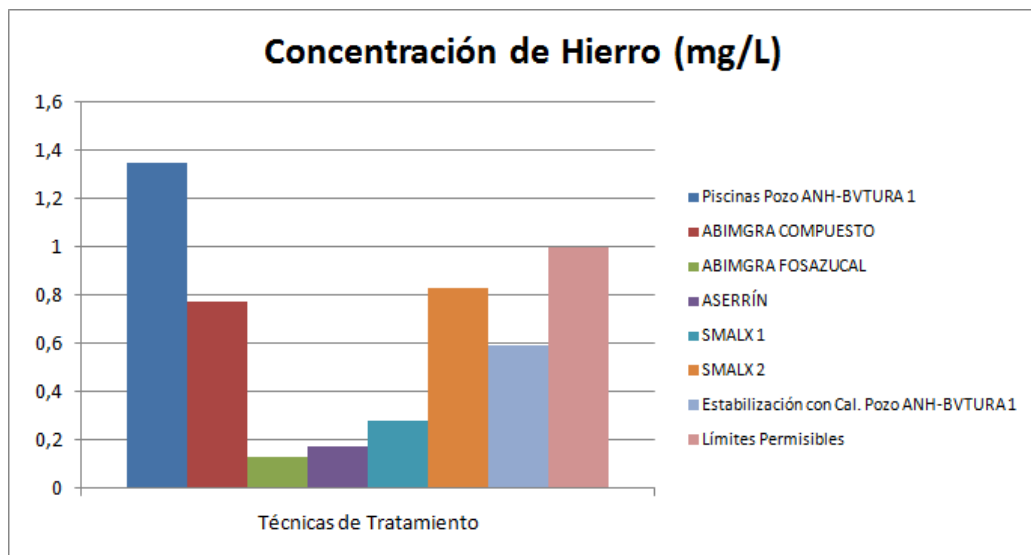
Fuente: Autores

CONDUCTIVIDAD.



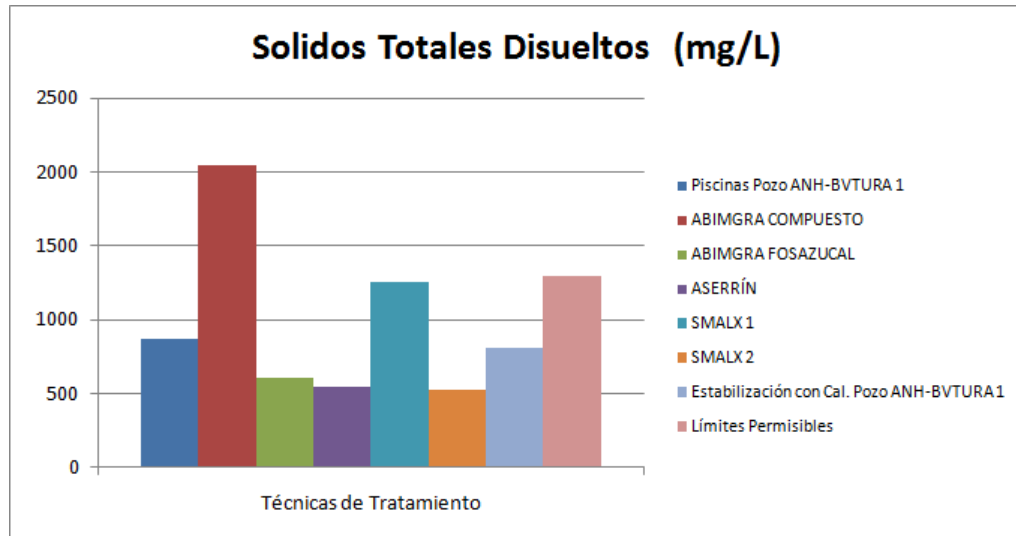
Fuente: Autores

HIERRO TOTAL.



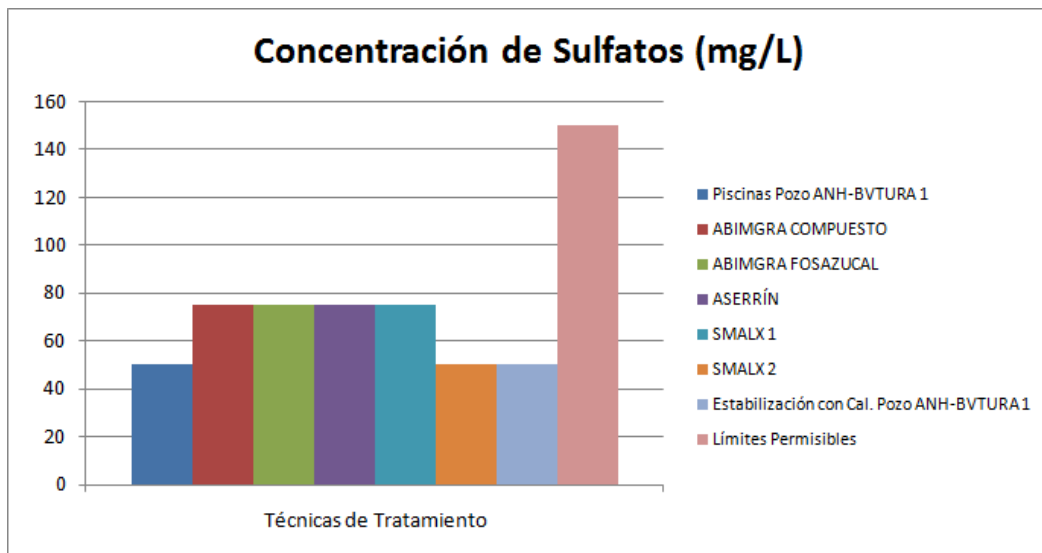
Fuente: Autores

SOLIDOS TOTALES DISUELTOS



Fuente: Autores

SULFATOS.



Fuente: Autores

BIBLIOGRAFÍA

1. Amoco Production Company. Drilling fluids manual.
2. Argonne National Laboratory & Chevron Texaco. (2008). Drilling Waste Management Technology.
3. Baker Hughes INTEQ. (1998). Fluidos, Manual de Ingeniería. Houston, Texas.
4. Baroid. Manual de Fluidos de Perforación. Houston, Texas.
5. Conner, J. .. (1989). Chemical fixation and solidification of hazardous wastes. New York ISBN 0-4422-0511-2 .
6. Crittenden, J. C. (2012). MWH's Water Treatment. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
7. Engineers, A. A. (1999). Shale Shakers and Drilling Fluids Systems. Houston, TX.
8. George Tchobanoglous, F. L. (2003). Wastewater Engineering Treatment and Reuse. McGraw-Hill Companies, Inc.
9. Ifeadi, D. C. (2004). The Treatment of Drill Cuttings using Dispersion By Chemical Reaction (DCR).
10. Instituto Americano del Petroleo. Manual de Fluidos de Perforación. Dallas, Texas.
11. Instituto Americano del Petroleo. Norma API RP 13B-1.
12. International Organization of Standardization. ISO 10414-1.

13. John A. Veil, J. R. (2003). 'Innovative Website for Drilling Waste Management. Society of Petroleum Engineers - 80603-MS.
14. M. Paolone, R. B. (2003). A Research on Plants for In-Situ Vitrification of Contaminated Soils. Bologna, Italia.
15. MI SWACO. (2004). Curso de control de sólidos.
16. Ministerio del Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible. Decreto 1594 de 1984.
17. Ministerio del Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible. (n.d.). Proyecto de vertimiento de aguas.
18. Santander, U. I. (2012). Plan de manejo ambiental Pozo ANH-PATIA ST-P 1. Bucaramanga.
19. Santander, U. I. (2012). Programa de perforación. Pozo ANH-PATIA ST-P 1. Bucaramanga.
20. Santander, U. I. (2012). Programa de perforación. Pozo ANH-BVTURA 1 ST-P 1. Bucaramanga.
21. Wilson, N. (2011). Land treatment of landfill leachate. Minnesota: Minnesota pollution control agency.