

Identificación de oportunidades de mejora de la gestión de los lodos de perforación a partir del análisis del ciclo de vida de los principales aditivos usados en Colombia

María José Rodríguez Reyes y Jorge Nicolás Mancilla Ávila

Trabajo de grado para optar a título de ingeniero de Petróleos

Director

Erik Giovany Montes Páez

MSc. Ingeniería de Hidrocarburos

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería de Petróleos

Bucaramanga

2025

Agradecimientos

Primero que todo, quiero agradecer a Dios por todas sus bendiciones, por darme la fuerza necesaria en cada etapa de esta travesía y por siempre guiarme por el buen camino. Su presencia ha sido fundamental en cada paso que he dado.

A mi mamá, mi pilar mas grande, gracias por tu amor y apoyo incondicional, por estar siempre a mi lado en este camino. Sin ti, este logro no habría sido posible. Tu esfuerzo, dedicación y confianza en mi han sido siempre la motivación más grande para mí.

A mi abuela, gracias por tu apoyo y por ser siempre una fuente de ánimo y motivación. Tus palabras y tu cariño me han acompañado en todo momento.

A mi papá y a mis hermanos, gracias por siempre creer en mí y por acompañarme en este proceso. Ustedes han sido una parte muy importante de este camino.

A toda mi familia, gracias por su cariño, por su apoyo y por animarme siempre a ser mejor. Cada palabra de ánimo y de aliento han sido fundamental en este proceso.

A María José, mi compañera y amiga, gracias por estar siempre para mí, por tu apoyo en los momentos difíciles y celebrar conmigo cada pequeño logro. Gracias por tantos momentos compartidos y por ser tan importante y valiosa en este camino.

A mis amigos, gracias por su compañía, por los buenos momentos, por las risas y por las palabras de aliento cuando más las necesitaba. Gracias por estar ahí.

A mi mejor amigo Julián Guarín, ahora me acompaña desde el cielo, gracias por estar para mi incluso cuando no creía en mí mismo. Se que desde allá arriba me cuidas y me guías. Te mando un abrazo inmenso hasta el cielo. Siempre estarás conmigo. Lo logramos Guaró.

A todos, gracias por ser parte de este logro.

Nicolas Mancilla

Agradecimientos

A Dios, gracias por ser mi refugio constante, por caminar a mi lado cuando todo parecía cuesta arriba y recordarme, una y otra vez, que nunca estuve sola. Tu presencia me sostuvo, me dio fuerza cuando la necesitaba y paz en medio de la incertidumbre.

A mis padres y hermanos, gracias por creer en mí desde el primer momento, por confiar en cada paso que di y alentarme siempre a ser mejor. Gracias por su apoyo incondicional, por los consejos, por ser guía y sostén. Por estar ahí, firmes, en cada decisión, en cada logro, en cada caída.

A mis abuelos, mis segundos padres y ángeles en la Tierra. Gracias por su amor incondicional, por su ternura, por sus consejos llenos de sabiduría. Su presencia ha sido mi bendición, mi hogar y mi calma.

A mis amigos y futuros colegas Joseph Chadid y Nicolás Mancilla, gracias por hacer de este camino universitario algo más liviano y especial. Su amistad, compañía y alegría convirtieron los retos en aprendizajes compartidos y cada logro en una celebración verdadera.

A todos ustedes, gracias por ser parte esencial de este capítulo tan importante en mi vida.

Maria José Rodríguez

Tabla de Contenido

Introducción	12
1. Objetivos	14
1.1. Objetivo general.....	14
1.2. Objetivos específicos	14
2. Marco teórico: Generalidades y componentes del lodo	15
2.1. Propiedades de los fluidos de perforación	15
2.2. Fases de los Lodos de Perforación.....	16
2.3. Clasificación de los lodos de perforación base agua	17
2.4. Funciones de los lodos de perforación.....	17
2.5. Aditivos de los lodos de perforación	19
2.5.1. Tipos de aditivos	20
2.5.2. Aditivos más utilizados en Colombia	22
2.5.3. Uso de aditivos de perforación base agua.....	24
2.5.4. Propósito y función de los aditivos.....	25
2.5.5. Comportamiento de los aditivos	25
2.5.6. Efecto en la estabilidad del pozo y rendimiento	26
2.6. Preparación y formulación.....	27
2.7. Factores claves en la selección del fluido	31
3. Ciclo de vida.....	31
3.1. Fundamentos del análisis del ciclo de vida.....	32
3.2. Fases del ciclo de vida	33
3.2.1. Procesamiento de Materias Primas	34
3.2.2. Fabricación.....	34
3.2.3. Almacenamiento y Empaque	34
3.2.4. Transporte y distribución	35
3.2.5. Uso	38
3.2.6. Gestión de Residuos.....	38
3.3. Ciclo de vida por aditivo.....	39
3.3.1. Barita.....	40
3.3.2. Bentonita	45

3.3.3.	Carbonato de calcio.....	48
3.3.4.	Celulosa polianionica.....	51
3.4.	Fases del ciclo de vida de un lodo base agua.....	54
3.4.1.	Selección de Materias Primas	55
3.4.2.	Transporte y distribución	55
3.4.3.	Diseño y Formulación.....	55
3.4.4.	Mezcla y Preparación.....	56
3.4.5.	Circulación y Uso	56
3.4.6.	Tratamiento y Recirculación.....	56
3.4.7.	Disposición Final	57
3.5.	Análisis del ciclo de vida (ACV)	58
3.6.	Inventario del ciclo de vida (ICV)	58
3.6.1.	Extracción y producción	59
3.6.2.	Fabricación del aditivo.....	60
3.6.3.	Transporte y distribución	62
3.6.4.	Uso en perforación.....	63
3.6.5.	Gestión de residuos y disposición final	64
3.7.	Evaluación del impacto ambiental	66
3.7.1.	Impactos de la Bentonita.....	66
3.7.2.	Impactos de la Barita	71
3.7.3.	Impactos del Carbonato de Calcio	75
3.7.4.	Impactos de la Celulosa Polianionica	80
3.7.5.	Evaluación General del Impacto	85
4.	Cumplimiento normativo	91
4.1.	Cumplimiento normativo y oportunidades de mejora	91
4.1.1.	Comparación de Parámetros Ambientales y Económicos	93
4.1.2.	Selección de aditivos con base en parámetros ambientales y económicos	95
4.2.	Normativa vigente colombiana para el ciclo de vida.....	95
4.2.1.	Principales Normas y Regulaciones Ambientales	96
4.2.2.	Normas de Seguridad y Salud Ocupacional.....	99
4.2.3.	Representación Gráfica del Marco Regulatorio.....	101

4.2.4. Informes y estudio de caso.....	103
4.3. Normatividad Ambiental del Ciclo de Vida	104
5. Selección final	105
5.1. Resultado Comparativo.....	106
5.2. Situaciones de perforación.....	116
Conclusiones	119
Recomendaciones	120
Referencias Bibliográficas	123

Lista de Tablas

Tabla 1. Aditivos Lodos Base Agua en General	22
Tabla 2. Factores Claves que afectan la selección del sistema de fluido	31
Tabla 3. Extracción y Producción de Materias Primas.....	59
Tabla 4. Fabricación del Aditivo	60
Tabla 5. Transporte y Distribución	62
Tabla 6. Uso en la Perforación Petrolera.....	63
Tabla 7. Gestión de Residuos y Disposición Final.....	64
Tabla 8. Resumen Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida de la Bentonita.....	69
Tabla 9. Resumen Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida de la Barita.....	74
Tabla 10. Resumen Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida del Carbonato de Calcio .	79
Tabla 11. Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida de la Celulosa Polianiónica	84
Tabla 12. Clasificación y Caracterización de Impactos	86
Tabla 13. Valoración Cualitativa del Impacto.....	88
Tabla 14. Puntos Críticos de Impacto en el Ciclo de Vida.....	89
Tabla 15. Normas y Regulaciones Hidrocarburos Colombia	98
Tabla 16. Normas de Seguridad y Salud Ocupacional	99
Tabla 17. Principales Normas y Regulaciones Ambientales.....	101
Tabla 18. Aditivos Componentes de BARASILC.....	106
Tabla 19. Aditivos Componentes de CARBONOX /AKTAFLO-S.....	107
Tabla 20. Aditivos Componentes de CARBONOX/Q-BROXIN	108
Tabla 21. Aditivos Componentes de ENVIRO-THON de bajo pH	109
Tabla 22. Aditivos Componentes de EZ MUD	110

Tabla 23. Aditivos Componentes de THERMA-DRIL	111
Tabla 24. Aditivos Componentes de PAC / DEXTRID	112
Tabla 25. Aditivos Componentes de POLYNOX	113
Tabla 26. Aditivos Componentes de Sal Saturada	114
Tabla 27. Selección Final Aditivos y Sistemas	115
Tabla 28. Sistemas y Situaciones de Perforación (Recomendados)	116

Lista de Figuras

Figura 1. Diamante de Peligros de la NFPA para la Barita	44
Figura 2. Diamante de Peligros de la NFPA para la Bentonita	47
Figura 3. Diamante de Peligros de la NFPA para el Carbonato de Calcio	50
Figura 4. Diamante de Peligros de la NFPA para la Celulosa Polianionica.....	53
Figura 5. Fases del Ciclo de Vida Fluidos de Perforación Base Agua	57

Resumen

Título: Identificación de Oportunidades de Mejora de la Gestión de los Lodos de Perforación a Partir del Análisis del Ciclo de Vida de los Principales Aditivos Usados en Colombia*

Autor: María José Rodríguez Reyes, Jorge Nicolás Mancilla Ávila **

Palabras Clave: aditivos, análisis de ciclo de vida (ACV), gestión de residuos, impacto ambiental, impacto económico, Industria petrolera, lodos de perforación, sostenibilidad.

Descripción: La industria petrolera en Colombia enfrenta importantes desafíos en la gestión de los lodos de perforación, cuya composición y disposición pueden generar impactos ambientales y económicos significativos. Actualmente, la falta de un análisis detallado del ciclo de vida de los aditivos empleados en estos lodos limita la toma de decisiones sostenibles en la industria. Este estudio analiza el ciclo de vida de los principales aditivos utilizados en la elaboración de lodos de perforación en Colombia, con el fin de identificar oportunidades de mejora en su gestión. A partir de la revisión bibliográfica, el análisis normativo y la evaluación comparativa de información primaria (Operadoras), se identificaron brechas en la gestión actual, como la ausencia de criterios claros para la selección de aditivos y la falta de evaluación integral de sus impactos ambientales y económicos. Se resalta la importancia de aplicar el enfoque de ciclo de vida para optimizar la gestión de aditivos, promoviendo prácticas sostenibles que reduzcan el impacto ambiental sin afectar la eficiencia. Se sugiere definir criterios claros de selección, fortalecer la normativa y aplicar estrategias de mejora continua que integren lo ambiental y lo económico.

* Tesis de Grado.

** Facultad de Ingenierías Fisicoquímica. Escuela de Ingeniería de Petróleos.

Abstract

Title: Identification of Opportunities to Improve Drilling Mud Management Based on Life Cycle Analysis of The Main Additives Used in Colombia*

Author: María José Rodríguez Reyes, Jorge Nicolás Mancilla Ávila **

KeyWords: additives, life cycle assessment (LCA), waste management, environmental impact, economic impact, Oil industry, drilling muds, sustainability.

Description: The oil industry in Colombia faces significant challenges in managing drilling muds, whose composition and disposal can generate considerable environmental and economic impacts. Currently, the lack of a detailed life cycle analysis of the additives used in these muds limits the implementation of sustainable decision-making in the sector. This study examines the life cycle of the main additives used in the preparation of drilling muds in Colombia to identify opportunities for improvement in their management. Through a comprehensive review of the literature, regulatory analysis, and benchmarking, gaps in the current management practices were identified, including the absence of clear criteria for additive selection and the lack of an integrated evaluation of their environmental and economic impacts. The importance of applying the life cycle approach to optimize additive management is emphasized, promoting sustainable practices that reduce environmental impact without compromising efficiency. It is suggested to define clear selection criteria, strengthen regulations, and implement continuous improvement strategies that integrate both environmental and economic aspects.

* Bachelor Thesis

** Faculty of Physical and Chemical Engineering, School of Petroleum Engineering.

Introducción

La industria petrolera desempeña un papel fundamental en el desarrollo económico global y, en particular, en Colombia, donde la exploración y explotación de hidrocarburos representan una actividad clave. Dentro de este sector, los lodos de perforación juegan un rol esencial en la eficiencia y seguridad de las operaciones, cumpliendo funciones críticas como la lubricación y enfriamiento de la sarta de perforación, el control de la presión en el pozo y la remoción de recortes del subsuelo. Sin embargo, el manejo inadecuado de estos fluidos y de los aditivos que los componen puede generar impactos ambientales significativos, lo que evidencia la necesidad de realizar un análisis integral de su ciclo de vida y establecer estrategias para una gestión ambientalmente responsable de los residuos generados.

En este contexto, la presente investigación tiene como objetivo general identificar oportunidades de mejora en la gestión de los lodos de perforación a partir del análisis del ciclo de vida de los principales aditivos empleados en la industria petrolera colombiana. Para ello, se abordan una serie de objetivos específicos que permitirán comprender mejor la problemática y proponer soluciones viables y sostenibles.

Inicialmente, se abordan las generalidades y componentes del lodo de perforación base agua, incluyendo sus propiedades físico-químicas, clasificación y funciones operativas dentro del proceso. Posteriormente, se realiza una descripción detallada de los aditivos más utilizados en Colombia, considerando sus tipos, aplicaciones, comportamiento dentro del fluido, influencia en la estabilidad del pozo y los principales factores involucrados en su formulación y selección.

Luego, se define el concepto de ciclo de vida aplicado a los aditivos del lodo de perforación base agua, desarrollando un análisis completo de las etapas de extracción, fabricación, transporte, uso en campo y disposición final. A partir de ello, se construye un

inventario del ciclo de vida (ICV) para cada aditivo evaluado, permitiendo identificar los impactos ambientales asociados a cada fase.

Además, se analiza la normativa ambiental vigente en Colombia en relación con el manejo de residuos y la sostenibilidad en operaciones petroleras, con el fin de verificar el nivel de cumplimiento regulatorio y evidenciar posibles oportunidades de mejora. Finalmente, se lleva a cabo una comparación de los aditivos considerando parámetros técnicos, ambientales y económicos, lo cual contribuye a seleccionar las alternativas más viables para su implementación, fortaleciendo la toma de decisiones informadas en la industria petrolera colombiana.

En términos generales, este estudio demuestra que el análisis del ciclo de vida es una herramienta útil para optimizar la gestión de aditivos en los lodos de perforación, al permitir identificar formulaciones más sostenibles y poner en evidencia vacíos en la regulación ambiental vigente. A partir de los hallazgos obtenidos, se proponen recomendaciones orientadas a ampliar el enfoque hacia otros tipos de lodos, fortalecer el desarrollo de bases de datos técnicas y fomentar nuevas investigaciones que impulsen la sostenibilidad del sector.

1. Objetivos

1.1. Objetivo general

Identificar oportunidades de mejora en la gestión de lodos de perforación a partir del análisis del ciclo de vida de los principales aditivos usados en la industria petrolera en Colombia

1.2. Objetivos específicos

Definir de manera general el concepto de ciclo de vida de un lodo de perforación base agua, identificando los componentes del mismo; con el propósito de tener una base teórica para la comprensión del desarrollo del presente proyecto.

Realizar una descripción de los principales aditivos empleados en la industria petrolera en Colombia, incluyendo sus aplicaciones y objetivos en las operaciones de perforación.

Identificar la normativa vigente en Colombia asociada al manejo de residuos y seguridad, detallando los protocolos y requisitos necesarios para garantizar un manejo seguro e integral durante el ciclo de vida de los aditivos del lodo.

Realizar una selección basada en la comparación de las propiedades específicas de los aditivos del lodo de perforación a partir de parámetros ambientales y económicos, con el propósito de establecer la opción más factible para la industria petrolera.

2. Marco teórico: Generalidades y componentes del lodo

Los lodos de perforación son fluidos utilizados en la industria petrolera durante las operaciones de perforación de pozos. Según la API (American Petroleum Institute), un lodo de perforación se define como un fluido circulante que facilita las actividades de perforación rotatoria, contribuyendo a la seguridad, eficiencia y sostenibilidad de las operaciones.

Los lodos de perforación son fluidos esenciales, diseñados específicamente para facilitar y optimizar las operaciones de perforación de pozos. Estos fluidos están formulados con una combinación de agua, aceite o gas como base, junto con sólidos suspendidos y aditivos químicos que les otorgan propiedades únicas y necesarias para soportar las exigencias operativas. La formulación de los lodos varía según las condiciones geológicas del pozo y las demandas específicas del proyecto, lo que garantiza su efectividad en distintos entornos y frente a diversos desafíos operativos, siempre que los componentes químicos sean cuidadosamente seleccionados según las condiciones del pozo (Schlumberger, s. f.).

2.1. Propiedades de los fluidos de perforación

Los fluidos de perforación poseen una serie de propiedades físicas y químicas que deben ser monitoreadas y controladas constantemente para asegurar el buen desempeño del pozo. Estas propiedades determinan el comportamiento del fluido frente a las condiciones operativas del subsuelo y son fundamentales para garantizar la estabilidad del pozo, la eficiencia en la limpieza del corte y la protección de las formaciones.

Las propiedades físicas de los lodos de perforación incluyen parámetros como el peso o densidad, la viscosidad medida mediante el embudo API, la viscosidad plástica, el punto cedente, la resistencia o fuerza de gel y la capacidad de filtrado bajo condiciones API y HPHT. Por su parte, las propiedades químicas abarcan variables como la dureza, el contenido de

cloruros, la alcalinidad y el índice MBT (prueba de azul de metileno), que permiten evaluar la calidad y estabilidad química del fluido (Drilling Manual, 2022).

2.2. Fases de los Lodos de Perforación

Las fases que componen un lodo de perforación determinan sus propiedades físicas y químicas, y, en consecuencia, su capacidad para cumplir con las exigencias de la perforación. Cada fase tiene características específicas que influyen directamente en el comportamiento del fluido y su interacción con el pozo (American Association of Petroleum Geologists, 2022).

Fase Continua. La fase continua de un lodo de perforación es el líquido que constituye la base del fluido y en el cual se suspenden los sólidos y aditivos. Actúa como el medio que facilita la distribución homogénea de los componentes del lodo, permitiendo que este cumpla sus funciones operativas de manera eficiente. Es esencial para garantizar la estabilidad física y química del lodo durante las operaciones de perforación

Fase Dispersa. La fase dispersa en un lodo de perforación se refiere a las partículas sólidas que se encuentran suspendidas en la fase continua. Estas partículas pueden incluir arcillas, polímeros y otros aditivos que desempeñan un rol fundamental en las propiedades físicas y químicas del fluido. La fase dispersa es esencial para modificar características clave del lodo, como su viscosidad, capacidad de transporte de recortes, estabilización del pozo, entre otras.

Fase Sólida. La fase sólida está formada por los recortes de roca generados durante la perforación. Estos sólidos juegan un papel tan importante en la condición y mantenimiento del lodo que se les asigna aparte. Aunque todas las partículas sólidas en un lodo podrían pertenecer a su fase discontinua, su relevancia operativa demanda un control específico dentro del sistema.

Los lodos base agua son fluidos esenciales en la industria de perforación, caracterizados por tener agua dulce o salada como su fase continua. Estos lodos se utilizan principalmente

debido a su simplicidad, bajo costo y adaptabilidad a diversas condiciones geológicas. La fase dispersa suele incluir materiales como bentonita o atapulgita, que ayudan a suspender los sólidos generados durante la perforación y a mantener la estabilidad del pozo.

Su principal función es servir como medio para transportar los recortes de roca hacia la superficie y controlar las presiones dentro del pozo, garantizando así la seguridad y eficiencia de las operaciones. Además, los lodos base agua pueden ajustarse con diversos aditivos para mejorar su rendimiento, lo que los convierte en una opción versátil para la mayoría de los proyectos de perforación.

2.3. Clasificación de los lodos de perforación base agua

La clasificación de los lodos de perforación base agua se realiza en función del aditivo principal que define sus propiedades y comportamiento en el pozo. Cada tipo de lodo está diseñado para cumplir con ciertas funciones según las condiciones operativas, geológicas y ambientales (Castillejo & Consejo Profesional Ingenieria Petróleos, 2023). Los principales tipos de lodos base agua se pueden agrupar de la siguiente manera:

Sistema Base Agua + Arcilla No Densificado

Sistema Base Agua + Lignosulfonato

Sistema Base Agua Calados (Cal Hidratada)

Sistema Base Agua Saturados con Sal

Sistema Base Agua Inhibido

2.4. Funciones de los lodos de perforación

Los lodos de perforación desempeñan un conjunto de funciones esenciales para garantizar la seguridad, eficiencia y sostenibilidad de las operaciones de perforación. Estas funciones son fundamentales para enfrentar los desafíos que presentan las condiciones

geológicas y operativas específicas de cada pozo (Society of Petroleum Engineers, 2025). Entre las principales funciones de los lodos de perforación se encuentran las siguientes:

Enfriamiento de la broca y lubricación. El fluido de perforación cumple una función vital al circular a través de la sarta, llegando hasta la broca para absorber el calor generado por la fricción con la formación. Este proceso ayuda a mantener la integridad de los componentes mecánicos, prolonga la vida útil de la herramienta de corte y evita su sobrecalentamiento. Adicionalmente, el fluido reduce la fricción entre la sarta de perforación y las paredes del pozo, actuando como lubricante durante el avance del pozo.

Transporte de recortes y derrumbes a la superficie. El lodo transporta los recortes generados durante la perforación hacia la superficie mediante el flujo ascendente en el espacio anular. Las propiedades reológicas del lodo, como la viscosidad y el límite de fluencia, permiten que las partículas sólidas se mantengan suspendidas y sean arrastradas eficientemente, asegurando la limpieza del pozo y el correcto funcionamiento de las herramientas de perforación.

Suspensión de recortes en el espacio anular. Cuando se detiene la circulación, los lodos de perforación mantienen los recortes y derrumbes en suspensión gracias a su capacidad de gelificación y resistencia estructural en estado estático. Esta característica evita la sedimentación de sólidos en el pozo, lo que podría generar bloqueos y dificultar la reanudación de las operaciones.

Estabilización de las paredes del pozo. El lodo estabiliza las paredes del pozo mediante la presión hidrostática, contrarrestando las presiones de formación y evitando colapsos o derrumbes. Además, forma una torta elástica de espesor adecuado, que no solo reduce la filtración hacia las formaciones, sino que también refuerza la integridad estructural del pozo, asegurando su estabilidad durante las operaciones.

Control de presiones de formación. Los lodos equilibran las presiones dentro del pozo ajustando su densidad y propiedades hidráulicas. Este equilibrio evita reventones y pérdidas de circulación, garantizando un entorno operativo seguro y minimizando riesgos para el personal y el equipo.

Lubricación y enfriamiento de la broca. El lodo actúa como un lubricante que reduce la fricción entre la broca y las formaciones perforadas, además de disipar el calor generado durante la perforación. Esto protege la broca del desgaste térmico y mecánico, prolongando su vida útil y mejorando la eficiencia operativa.

Transmisión de potencia hidráulica. Los lodos sirven como un medio para transmitir energía hidráulica desde la superficie hasta las herramientas de perforación. Su flujo controlado permite una interacción eficiente con las formaciones, optimizando el corte de las mismas y facilitando la perforación.

Ayuda en la toma de registros eléctricos. Los lodos proporcionan un medio adecuado para realizar mediciones geofísicas y eléctricas en el pozo. Su composición específica permite diferenciar las propiedades de las formaciones atravesadas, facilitando un análisis detallado y preciso del subsuelo.

Reducción del peso de la sarta de perforación. Los lodos alivian parcialmente el peso de la sarta de perforación mediante el factor de flotación generado. Esto reduce la carga sobre la estructura del equipo de perforación y facilita las maniobras, especialmente en pozos profundos.

2.5. Aditivos de los lodos de perforación

Los aditivos de los lodos de perforación son materiales químicos o naturales diseñados para ajustar y mejorar las propiedades fisicoquímicas de los fluidos de perforación. Su propósito principal es garantizar que los lodos se adapten a las condiciones específicas de cada pozo,

proporcionando estabilidad y funcionalidad en entornos operativos diversos. Estos aditivos se seleccionan considerando factores como el tipo de lodo, las características geológicas de la formación y los requisitos técnicos de las operaciones.

Entre las propiedades que los aditivos pueden modificar se encuentran la viscosidad, la densidad, la capacidad de transporte de recortes y el control de filtración. Además, algunos aditivos ofrecen funciones adicionales como la inhibición de la reactividad química de las formaciones, la protección contra la corrosión y la mejora en la lubricación de los equipos. Estas capacidades hacen que los aditivos no solo optimicen el rendimiento del lodo, sino que también aseguren la integridad del pozo y la eficiencia de las operaciones (BAROID, 1999).

2.5.1. Tipos de aditivos

Los aditivos de lodos de perforación pueden clasificarse en diferentes categorías según la función específica que cumplen dentro del fluido. Cada tipo de aditivo está diseñado para modificar una o más propiedades del lodo, permitiendo que éste se adapte a los requerimientos específicos del pozo y las condiciones geológicas (Caenn et al., 2016). A continuación, se describen los principales tipos de aditivos empleados en la industria petrolera:

Densificantes. Los densificantes aumentan la densidad del lodo, permitiendo equilibrar las presiones del pozo y prevenir problemas como reventones o colapsos. Son críticos en pozos profundos y de alta presión, donde el control de las condiciones es esencial para la estabilidad del sistema. Estos aditivos contribuyen a mantener la integridad del pozo al contrarrestar las fuerzas ejercidas por las formaciones geológicas.

Viscosificantes. Los viscosificantes modifican la viscosidad del lodo para facilitar el transporte de recortes y la suspensión de materiales pesados. Esto evita la acumulación de sólidos en el fondo del pozo y asegura la limpieza del espacio anular. Su uso es indispensable en

sistemas con alta carga de sólidos, mejorando la eficiencia y la estabilidad durante las operaciones.

Dispersantes. Los dispersantes mejoran la homogeneidad del lodo al evitar la aglomeración de partículas sólidas. Esto garantiza una circulación eficiente y evita problemas de sedimentación, incluso en condiciones operativas desafiantes. Son esenciales para mantener un flujo constante y asegurar que las propiedades del fluido se mantengan estables durante la perforación.

Controladores de Filtrado. Los controladores de filtrado limitan la pérdida de fluido hacia las formaciones permeables al formar una torta delgada y uniforme en las paredes del pozo. Esto protege las formaciones y garantiza la estabilidad estructural del pozo, evitando problemas que puedan interrumpir las operaciones.

Materiales de Pérdida de Circulación. Estos materiales sellan fracturas y porosidades en las formaciones, previniendo la pérdida de lodo hacia el subsuelo. Su aplicación asegura la continuidad de las operaciones al mantener la presión adecuada en el sistema y evitar interrupciones costosas.

Lubricantes. Los lubricantes reducen la fricción entre la sarta de perforación y las paredes del pozo, facilitando las maniobras en pozos desviados o horizontales. Además, disminuyen el desgaste de los equipos, prolongando su vida útil y mejorando la eficiencia mecánica durante la perforación.

Floculantes. Los floculantes promueven la aglomeración de partículas finas, formando estructuras más grandes que facilitan la separación de sólidos y líquidos. Esto simplifica la gestión de residuos y mejora la claridad del fluido, garantizando operaciones más limpias y sostenibles.

Bactericidas. Los bactericidas inhiben el crecimiento de microorganismos en el lodo, evitando la degradación de aditivos orgánicos y la generación de gases no deseados. Son fundamentales para mantener la estabilidad química del lodo, especialmente en ambientes con altas temperaturas o exposición prolongada.

Antiespumantes. Los antiespumantes controlan la formación de espuma en el lodo, asegurando un flujo constante y mejorando las propiedades hidráulicas del sistema. Esto es crucial en operaciones donde la espuma puede interferir con el control de presión y la eficiencia general de las operaciones.

Anticorrosivos. Los anticorrosivos protegen las herramientas metálicas contra la oxidación y corrosión, prolongando su vida útil y reduciendo costos de mantenimiento. Forman una barrera protectora en las superficies metálicas, evitando daños por fluidos agresivos y gases ácidos, esenciales en operaciones prolongadas y complejas.

2.5.2. *Aditivos más utilizados en Colombia*

La perforación de pozos de petróleo y gas en Colombia implica el uso de diversos aditivos regulados por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Estos aditivos son fundamentales para la eficiencia de las operaciones, y su manejo adecuado es clave para minimizar el impacto ambiental (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2024). A continuación, se presenta en la Tabla 1 los aditivos más utilizados en el país, en base a dicha guía.

Tabla 1.

Aditivos Lodos Base Agua en General

Función	Aditivo Químico Lodo Base Agua
Densificante. Incremento de la densidad del fluido.	Barita (BaSO4)
	Orimatita

	Sales Carbonato de Calcio (CaCO_3) Dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$)
Viscosificante. Mejora la habilidad de los fluidos para remover los cortes del hoyo y mantener en suspensión el material denfiscante.	Bentonita (Silicato de Al y Na) Atapulguita (Silicato de Al y Mg) CMC (derivados de la goma xántica) Goma xanthan (derivados de la celulosa) HEC (derivado de la celulosa)
Control de Filtrado. Reduce el volumen de filtrado que el fluido pierde a la formación, debido al efecto de la presión diferencial y a la permeabilidad de las formaciones.	Controladores mecánicos: Asfaltos, lignito procesado con aminas. Arcillas: Bentonita Polímeros: Almidones CMC: Poliacrilato de sodio, celulósico polianiónico, adelgazante o defloculante.
Control Reológico. Control de la concentración del viscosificante primario. Adelgazantes (reducen la filtración y disminuye el espesor del revoque), dispersantes o desfloculantes. Cambios en la interacción fisicoquímica entre los sólidos y las sales disueltas.	Taninos Silicatos y Fosfatos. Lignitos Lignosulfonatos Modificados Aceite Mineral
Materiales Floculantes. Cusan la coagulación de los sólidos en el sistema para ayudar a la remoción de estos en la superficie. La coagulación. Se logra mediante la atracción excesiva de cargas en la superficie de los sólidos causados por polímeros. La floculación se logra mediante la atracción excesiva de cargas causadas por sales minerales.	Sales Cal hidratada Polímeros sintéticos Poliacrilamidas. Goma Guar Goma Xántica. Polímeros Acrílicos Yeso
Estabilizadores de Lutitas. Evita el hinchamiento de las lutitas sensibles al agua. La hidratación y el alivio de las tensiones residuales en las lutitas contribuyen a la inestabilidad y derrumbe del hoyo.	Polímeros Naturales o sintéticos de alto peso molecular. Asfaltos Cloruro de potasio (KCl) Glicoles

	Cloruro de Calcio (CaCl_2) Cal/Yeso Aminas
<i>Protección contra la corrosión.</i> La corrosión en los tubulares ocurre por la acción de agentes como el oxígeno, CO_2 y H_2S , así como también otras sustancias químicas que pueden crear un potencial eléctrico espontáneo.	Sales solubles de sulfito y Cromato Zinc Cal
<i>Inhibidores de Precipitados.</i> Reducen la formación de precipitados.	Polímeros de bajo peso molecular. Fosfonatos.
<i>Precipitantes.</i> Tienen la función de remover componentes solubles, mediante una reacción que lo convierte en precipitados insolubles.	Cal y Yeso precipitan los Carbonatos Soda Ash Na_2CO_3 precipita el Calcio. NaOH, $\text{pH} > 10$ precipita el Mg Bicarbonato de sodio
<i>Diluyentes y dispersantes.</i>	Taninos, polifosfatos, lignito, lignosulfonatos.
<i>Materiales de pérdida de circulación.</i>	Materiales fibrosos naturales, sólidos inorgánicos, sólidos insolubles inertes.
<i>Lubricantes.</i>	Aceites, líquidos sintéticos, grafito, tensioactivos, glicoles, glicerina
<i>Bactericidas y biocidas.</i>	Glutaraldehído, THPS, otros aldehídos.
<i>Antiespumantes.</i>	Alcoholes, siliconas, estearato de aluminio, alquilfosfatos.

Nota. Tomado de fluidos de perforación, videoconferencia Consejo Profesional de petróleos.

2.5.3. Uso de aditivos de perforación base agua

El uso de aditivos en los lodos de perforación base agua se define por la necesidad de modificar y controlar las propiedades físicas y químicas del fluido, con el fin de asegurar un desempeño eficiente durante las distintas etapas del proceso de perforación. La aplicación de estos productos se basa en criterios técnicos asociados al comportamiento del lodo frente a las

condiciones del pozo, lo que exige una formulación adecuada, capaz de responder a los desafíos operativos.

Estos aditivos son incorporados de forma progresiva o puntual, según los requerimientos que surjan en el desarrollo del pozo, lo que permite mantener la estabilidad del sistema de fluido, prevenir afectaciones a la formación y facilitar el control de parámetros críticos como la reología, la densidad, el control de sólidos y la pérdida de filtrado. En este contexto, su uso está directamente relacionado con la eficiencia operativa y la seguridad del proceso (Ali et al., 2022).

2.5.4. Propósito y función de los aditivos

Los aditivos en los lodos base agua no representan una función por sí mismos, sino que son componentes esenciales que permiten modificar, mejorar o mantener las propiedades del fluido para que este cumpla sus funciones operativas de forma eficiente. Cada aditivo tiene un propósito técnico particular, ya sea controlar la reología, estabilizar formaciones, reducir el filtrado, aumentar la densidad o inhibir reacciones no deseadas en el pozo.

Su función está directamente relacionada con las condiciones específicas del entorno de perforación y con los requerimientos del diseño del fluido, de manera que su correcta selección y dosificación permite optimizar el desempeño del sistema. De este modo, los aditivos constituyen un recurso clave para ajustar el lodo a las demandas técnicas del proceso sin comprometer su estabilidad ni su eficiencia (Emmanuel Emeka Okoro et al., 2020).

2.5.5. Comportamiento de los aditivos

El comportamiento de los aditivos en el lodo de perforación depende de su naturaleza química y de la interacción con los componentes del lodo, como agua, arcilla y otros aditivos (Lake, s. f.). La estabilidad de las propiedades del lodo durante la perforación está influenciada por varios factores, entre ellos:

Interacción con sólidos suspendido. Aditivos como la bentonita desempeñan un papel fundamental en la suspensión de sólidos dentro del lodo, ya que su capacidad de hidratación y formación de estructuras gelatinosas mejora la viscosidad y evita la sedimentación. Este comportamiento es clave para mantener una circulación continua y prevenir obstrucciones en el sistema de perforación.

Estabilidad térmica. En pozos profundos, la temperatura del entorno de perforación puede ser elevada, lo que puede afectar la estabilidad de los aditivos. Por ejemplo, los polímeros y los dispersantes pueden degradarse bajo temperaturas altas, perdiendo su capacidad de controlar la viscosidad o de dispersar sólidos, lo que podría disminuir la eficiencia de la perforación.

Reactividad química. Algunos aditivos, especialmente los polímeros sintéticos y los tensioactivos, pueden ser sensibles a la química del pozo, lo que implica que su efectividad puede variar dependiendo de la interacción con los fluidos de formación o las propiedades del agua del pozo. La presencia de iones de calcio o magnesio, por ejemplo, puede influir en la viscosidad y la dispersión de los aditivos.

2.5.6. Efecto en la estabilidad del pozo y rendimiento

Los aditivos de perforación tienen efectos directos sobre la estabilidad del pozo y el rendimiento general de la perforación (Lee, s. f.). Estos efectos son determinantes para evitar fallas durante la perforación y para maximizar la eficiencia operativa:

Estabilidad del pozo. La función principal de los lodos de perforación es proteger las paredes del pozo para evitar deslizamientos y colapsos. Aditivos como la bentonita y los polímeros formulan lodos que mantienen una presión hidrostática adecuada en el pozo y evitan que las paredes se derrumben. La capacidad de los aditivos para mejorar la suspensión de sólidos

también asegura que los recortes no obstruyan el pozo, lo que podría generar problemas durante la perforación.

Rendimiento de perforación. Los aditivos también influyen directamente en la tasa de penetración (ROP, por sus siglas en inglés). Los lodos con aditivos lubricantes permiten que la broca de perforación se desplace más fácilmente a través de las formaciones rocosas, lo que mejora la tasa de penetración. Además, los aditivos que controlan la fricción reducen el desgaste del equipo, lo que disminuye el tiempo de inactividad y mejora la eficiencia operativa.

Prevención de la invasión de agua. Los aditivos también ayudan a controlar la invasión de agua de formación en el lodo de perforación. Esto es crucial, ya que la invasión de agua puede alterar las propiedades del lodo y dañar las formaciones de roca, lo que puede reducir la productividad del pozo. Los aditivos como los polímeros y los lignosulfonatos ayudan a sellar las formaciones y evitar la filtración excesiva.

2.6. Preparación y formulación

La fase de preparación y formulación de los aditivos de perforación base agua es esencial para garantizar la calidad y funcionalidad del lodo de perforación. Este proceso involucra diversas actividades industriales que incluyen la mezcla y fabricación de los aditivos, el consumo energético asociado y la generación de residuos. Esta sección describe los procesos involucrados y su impacto ambiental.

2.6.1. Procesos Industriales de Mezcla y Fabricación

La preparación y formulación de aditivos de perforación base agua se lleva a cabo mediante procesos industriales que combinan los componentes más usados, como bentonita, barita, carbonato de calcio, y celulosa polianiónica, para crear una mezcla que cumpla con las especificaciones requeridas para la perforación. Los principales procesos de fabricación son:

Mezcla y Dispersión. Los componentes sólidos, como la bentonita y el carbonato de calcio, se mezclan con agua y otros aditivos para formar una suspensión homogénea. Este proceso puede incluir el uso de equipos de dispersión para asegurar que los aditivos se disuelvan completamente en la base acuosa. En este proceso, se busca una distribución uniforme de las partículas para maximizar las propiedades deseadas, como la viscosidad y la capacidad de suspender los sólidos.

Polimerización de Aditivos Sintéticos. Para los polímeros sintéticos, como la poliacrilamida, se utilizan procesos de polimerización en los que se combinan monómeros derivados de petróleo (como el acrilonitrilo) en condiciones controladas para formar largas cadenas poliméricas. Estos polímeros se disuelven luego en agua y se estabilizan para su inclusión en la mezcla final del lodo de perforación.

Activación de Bentonita. La bentonita puede someterse a un proceso de activación mediante el uso de sales de sodio para mejorar su capacidad de hinchamiento y dispersión en el agua. Este tratamiento aumenta la eficiencia del lodo de perforación, proporcionando mayor estabilidad y mejor capacidad de soporte de sólidos.

Emulsificación de Líquidos. Algunos aditivos, como los fluidos emulsionantes o tensoactivos, son incorporados en el proceso de emulsificación, donde se combinan agua y aceite en un proceso controlado para obtener una emulsión estable. Esto mejora las propiedades de la formulación, como la lubricación y el control de la pérdida de circulación del lodo.

2.6.2. Consumo Energético y Residuos Generados

La preparación de los aditivos de perforación base agua requiere una considerable cantidad de energía debido a los procesos industriales involucrados, especialmente en la mezcla, polimerización y secado de algunos aditivos. Además, la fabricación de estos productos genera

una cantidad significativa de residuos, que deben ser gestionados adecuadamente (Badaró et al., 2022).

Consumo Energético: Los procesos industriales de mezcla, polimerización, activación y emulsificación requieren un alto consumo energético. La polimerización de polímeros sintéticos, por ejemplo, implica reacciones químicas que requieren calor, y la dispersión de los sólidos en los líquidos puede necesitar equipos de alto rendimiento que consumen electricidad. El consumo energético es, por tanto, un factor crítico que influye en la huella de carbono global del proceso de fabricación.

Generación de Residuos Sólidos. Los residuos generados en la preparación de los aditivos de perforación pueden incluir polvo de los materiales sólidos (como bentonita y carbonato de calcio), residuos de productos químicos utilizados para la activación de la bentonita, y otros subproductos de la fabricación de polímeros. Estos residuos deben ser gestionados correctamente para evitar impactos negativos en el medio ambiente. Por ejemplo, los residuos químicos generados durante la polimerización pueden ser peligrosos y requieren un manejo especial para evitar su liberación en el ambiente.

Residuos Líquidos y Gaseosos. Durante la fabricación de los aditivos líquidos, como emulsiones o soluciones poliméricas, puede generarse un exceso de líquido que no se utiliza en la formulación final. Este exceso, si no se maneja adecuadamente, puede contaminar fuentes de agua cercanas. Además, los procesos industriales que utilizan calor y energía también emiten gases de efecto invernadero, como dióxido de carbono, contribuyendo a la huella de carbono del proceso.

Reutilización y Reciclaje. En algunas fábricas, se implementan medidas para reducir los residuos mediante el reciclaje de materiales sobrantes. Por ejemplo, los subproductos de la

activación de la bentonita pueden ser reutilizados en otros procesos industriales, mientras que los residuos sólidos pueden ser tratados o reciclados para disminuir su impacto ambiental.

2.6.3. Impacto Ambiental y Sostenibilidad

El impacto ambiental de la fase de preparación y formulación es significativo debido al alto consumo energético y los residuos generados. Para mejorar la sostenibilidad del proceso, es necesario:

Optimizar la cantidad utilizada de lodo. Los cálculos operativos y estrategia de perforación son fundamental para disminuir la cantidad de lodo necesario, lo anterior implica mayores registros al pozo y sus alrededores, y así, obtener la información que facilite la toma de decisiones.

Optimizar el uso de energía. Implementar tecnologías más eficientes energéticamente, como el uso de fuentes de energía renovable o la mejora de la eficiencia de los procesos industriales, puede ayudar a reducir la huella de carbono del proceso de fabricación.

Gestión adecuada de residuos. Adoptar prácticas de gestión de residuos, como la reutilización de subproductos y la correcta disposición de residuos peligrosos, es esencial para minimizar el impacto ambiental de la fabricación de los aditivos.

La preparación y formulación de los aditivos de perforación base agua es una fase crítica que requiere un manejo cuidadoso de los recursos energéticos y la gestión adecuada de los residuos. Las empresas deben considerar el impacto ambiental de estos procesos y adoptar prácticas más sostenibles para reducir su huella de carbono y minimizar la contaminación asociada.

2.7. Factores claves en la selección del fluido

La selección del fluido de perforación base agua depende de múltiples factores operacionales, geológicos y ambientales que influyen directamente en el desempeño del sistema.

Tabla 2.

Factores Claves que afectan la selección del sistema de fluido

Aplicación	Intervalo superficial, intervalo intermedio, intervalo productivo, método de completación, tipo de producción, presión.
Agua de preparación	Tipo de agua, concentración de cloruro, concentración de dureza.
Problemas potenciales	Problema con lutitas, Embolamiento de la barrena/ Conjunto de fondo (BHA)
Geología	Tipo de lutita, tipo de arena, permeabilidad, otros tipos de formación.
Plataforma/ equipo de perforación	Locación remota, capacidad limitada en la superficie
Contaminación	Sólidos, Cemento, Gas ácidos (CO ₂ , H ₂ S), Anhídrita/Yeso, Sal
Datos de perforación	Profundidad de agua, tamaño del pozo, ángulo del pozo, Torque/ Arrastre, Velocidad de perforación, Peso del lodo, Temperatura máxima.

Nota. Tomado de fluidos de perforación, videoconferencia Consejo Profesional de Ingeniería de petróleos.

3. Ciclo de vida

El decreto 1073 de 2015, art 2.2.1.2.3.2 del ministerio de energía en relación con artículo 16 de la Ley 9 de 1991 enlista las empresas de servicios inherentes al sector de los hidrocarburos, entre ellas en el ítem de Perforación de pozos de hidrocarburos menciona Fluidos de Perforación,

estos cumplen un ciclo de vida que es parte de una suma conjunta de fases y componentes respecto a sus actividades (MinEnergía, vista web 2025)

El ciclo de vida se define como el conjunto de fases consecutivas e interrelacionadas por las que pasa un producto, proceso o sistema, desde la obtención de materias primas hasta su disposición final. Para el caso de los fluidos de perforación base agua estas fases incluyen la extracción y producción de materias primas, fabricación de los aditivos, transporte, uso durante la operación de perforación, gestión de residuos y disposición final. El concepto de ciclo de vida permite abordar de manera integral las implicaciones de cada etapa en términos de impacto ambiental y eficiencia económica. A través de esta perspectiva, se logra comprender cómo cada acción o decisión dentro de un proceso afecta el sistema completo y su interacción con el entorno, como lo es la definición de los aditivos empleados en la formulación del lodo de perforación base agua. (ISO, 2006)

La definición de ciclo de vida está estrechamente vinculada a la idea de un enfoque sistemático, donde se analizan las relaciones y flujos entre las fases para identificar las conexiones existentes y las posibles mejoras. Esta metodología permite analizar el origen de los materiales, su transformación en productos útiles, el sistema de uso y su retorno al medio ambiente en forma de desechos o recursos recuperables. El objetivo principal del concepto es promover una visión holística que fomente la sostenibilidad y permita tomar decisiones más informadas en la planificación de procesos industriales.

3.1. Fundamentos del análisis del ciclo de vida

El análisis del ciclo de vida (ACV) que se usa en este trabajo sigue los lineamientos de la norma internacional ISO 14040:2006, la cual explica los principios y pasos generales para realizar este tipo de estudios. Esta norma incluye aspectos como la definición del objetivo, el

análisis del inventario (ICV), la evaluación de los impactos ambientales (EICV), la interpretación de los resultados, así como las limitaciones del análisis y el uso de criterios técnicos o subjetivos (ISO, 2006).

Para este estudio, se tienen en cuenta las siguientes etapas del ciclo de vida: extracción y producción de materias primas, fabricación de los aditivos, transporte, uso en la perforación, y la gestión y disposición final de los residuos. En cada fase se identifican los insumos (entradas) y los productos o residuos generados (salidas).

El objetivo principal de aplicar el ACV en esta investigación es analizar esos flujos y determinar los impactos ambientales, así como encontrar oportunidades de mejora en la forma como se gestionan los lodos de perforación base agua. El análisis se centra en los aditivos más usados en Colombia: barita, bentonita, carbonato de calcio y celulosa polianiónica (PAC). A partir de esta evaluación, se busca encontrar puntos críticos en el ciclo de vida de cada uno, que permitan mejorar tanto el impacto ambiental como el desempeño operativo de los lodos, y así proponer prácticas más sostenibles en el sector.

Es importante considerar que las fases del ciclo de vida pueden variar dependiendo del objeto de estudio, ya sea un producto o un servicio. En algunos casos, no todas las fases serán aplicables o necesarias, mientras que en otros podrían incorporarse fases adicionales. A pesar de estas variaciones, el ciclo de vida tiene como objetivo fundamental evaluar de manera integral el recorrido de los recursos o servicios implicados, garantizando un análisis concreto y adaptado a las particularidades de cada sistema.

3.2. Fases del ciclo de vida

El análisis del ciclo de vida permite descomponer un proceso en etapas clave, desde la obtención de materias primas hasta la gestión de residuos. A continuación, se describen de

manera general las fases consideradas en este estudio, las cuales servirán de base para examinar el ciclo de vida de los aditivos usados en lodos de perforación base agua.

3.2.1. Procesamiento de Materias Primas

El procesamiento transforma las materias primas extraídas en insumos preparados para fases posteriores. Este proceso incluye operaciones como trituración, refinación, fundición, mezclado y tratamientos químicos o térmicos. Estas actividades están diseñadas para optimizar las propiedades de los materiales y garantizar su funcionalidad en las fases siguientes.

La etapa de procesamiento requiere el uso de maquinaria avanzada y sistemas de control que aseguren la calidad de los materiales producidos. Este proceso es altamente técnico y debe ajustarse a las especificaciones del producto final, involucrando pruebas de calidad rigurosas y ajustes continuos para cumplir con los estándares industriales.

3.2.2. Fabricación

La etapa de fabricación consiste en la transformación de los insumos procesados en productos terminados. Este proceso abarca operaciones como moldeo, corte, ensamblaje, soldadura y acabado. Cada operación requiere la implementación de tecnologías específicas y métodos optimizados para maximizar la precisión y la eficiencia de producción.

El diseño del sistema de fabricación está alineado con las especificaciones técnicas del producto, considerando factores como resistencia, durabilidad y funcionalidad. La estandarización de procesos y la automatización desempeñan un papel clave en esta etapa para garantizar un rendimiento uniforme y la capacidad de escalar la producción según la demanda.

3.2.3. Almacenamiento y Empaque

La etapa de almacenamiento y empaque es fundamental para preservar la calidad de los productos y garantizar su integridad durante las fases posteriores del ciclo de vida. El

almacenamiento implica el diseño y mantenimiento de espacios adecuados que permitan proteger los productos de factores externos como humedad, temperatura y contaminación. Este proceso debe ser gestionado mediante sistemas que optimicen la organización y acceso a los inventarios, asegurando una adecuada rotación y reducción de desperdicios.

El empaque, por su parte, se diseña para cumplir con múltiples funciones: proteger el producto, facilitar su manipulación y transporte, y comunicar información relevante al consumidor o usuario final. La selección de materiales para el empaque debe estar alineada con los requisitos técnicos del producto, considerando tanto su funcionalidad como su sostenibilidad.

3.2.4. Transporte y distribución

La distribución abarca el traslado de los productos desde los centros de producción hasta los puntos de consumo. Esta etapa incluye la planificación logística y la gestión de rutas para optimizar las operaciones de transporte. Según las distancias y necesidades del mercado, el traslado puede realizarse por vía terrestre, marítima o aérea.

La coordinación eficiente entre los diferentes modos de transporte y los centros de distribución es esencial para minimizar tiempos de entrega y garantizar la calidad de los productos al llegar a su destino.

Rutas de Transporte y Huella de Carbono. Los aditivos de perforación base agua son transportados a lo largo de diversas rutas que pueden involucrar múltiples modos de transporte. Dependiendo de la ubicación de la extracción, la producción y el destino final, las rutas pueden ser terrestres, ferroviarias, marítimas o aéreas. Cada uno de estos modos de transporte genera una huella de carbono distinta, influenciada por la distancia, el tipo de combustible y la eficiencia del medio utilizado.

Transporte Terrestre. El transporte por camiones cisterna, tolvas y otros vehículos especializados es el más utilizado para la distribución de aditivos de perforación. Estos vehículos suelen funcionar con combustibles fósiles (principalmente diésel), lo que contribuye a la emisión de CO₂ y otros gases de efecto invernadero. La huella de carbono dependerá de la cantidad de aditivos transportados y la distancia recorrida, con un impacto ambiental más alto en trayectos largos debido al consumo de combustibles.

Transporte Ferroviario. En situaciones donde se requiere mover grandes volúmenes de aditivos o materias primas, el transporte ferroviario es una opción más sostenible. Este medio tiene una huella de carbono más baja en comparación con el transporte terrestre debido a la mayor capacidad de carga por trayecto. Sin embargo, su implementación depende de la disponibilidad de infraestructuras ferroviarias adecuadas.

Transporte Marítimo. Para la importación de aditivos, especialmente polímeros sintéticos y sulfonatos, el transporte marítimo es común. Aunque el transporte marítimo es más eficiente en términos de emisiones por tonelada transportada, genera impacto ambiental en los puertos y ecosistemas marinos, especialmente si no se siguen las regulaciones de seguridad y control de derrames (Alther, 2006).

Transporte Aéreo. El transporte aéreo, aunque ocasional, puede ser necesario en situaciones de emergencia o cuando los aditivos tienen un valor alto y requieren una entrega rápida. Este medio tiene la mayor huella de carbono debido a la alta demanda de energía y combustibles utilizados para el vuelo.

La huella de carbono en el transporte de aditivos de perforación base agua depende de diversos factores, incluyendo el tipo de vehículo, el combustible utilizado, y las distancias

recorridas. Además, los avances en logística y optimización de rutas pueden contribuir significativamente a reducir las emisiones.

Costos Asociados al Transporte. El transporte de aditivos de perforación representa un componente importante de los costos operativos en la industria petrolera. Los costos asociados varían según diferentes factores y deben ser gestionados de manera eficiente para mejorar la rentabilidad y reducir el impacto ambiental.

Distancia y Ubicación. Los costos de transporte aumentan con la distancia entre la fuente de los aditivos y el lugar de perforación. Si los aditivos son importados, los costos se incrementan debido a la necesidad de utilizar múltiples modos de transporte (marítimo, terrestre, ferroviario, aéreo) y la infraestructura necesaria para la logística internacional (U.S. Geological Survey, 2020).

Tipo de Aditivo. Los aditivos sólidos y en polvo, como la bentonita y el carbonato de calcio, requieren transporte especializado en contenedores adecuados para evitar derrames o pérdidas de material. En cambio, los líquidos, como los polímeros sintéticos, requieren cisternas y equipos especializados, lo que también incrementa los costos operativos.

Precio del Combustible. Los fluctuantes precios de los combustibles fósiles (como el diésel) influyen directamente en los costos del transporte. La dependencia del transporte terrestre y marítimo de combustibles no renovables implica una variabilidad en los costos de acuerdo con los cambios en los precios del mercado energético.

Regulaciones y Aranceles. Dependiendo del país y la región, las normativas ambientales, las tarifas portuarias y los aranceles aduaneros pueden aumentar el costo de transporte. Las regulaciones ambientales son especialmente estrictas en países con políticas verdes, lo que puede

implicar cargos adicionales por el transporte de materiales peligrosos o emisiones de gases contaminantes.

Eficiencia Logística. Una gestión eficiente de las rutas, la consolidación de cargas y la optimización del uso de los vehículos de transporte son prácticas clave para reducir los costos. La implementación de tecnología de logística avanzada, como sistemas de seguimiento y planificación de rutas, también puede generar ahorros significativos y minimizar los impactos ambientales.

3.2.5. Uso

Durante la etapa de uso, los productos desempeñan su función principal, proporcionando los beneficios para los cuales fueron diseñados. Esta etapa incluye la interacción del usuario con el producto y, en muchos casos, el consumo de recursos adicionales como energía, agua o insumos específicos.

El rendimiento del producto en esta fase depende en gran medida de la calidad de su diseño y fabricación. Factores como la facilidad de operación, la fiabilidad y la adaptabilidad a diferentes condiciones de uso son críticos para maximizar la utilidad del producto durante su vida útil.

3.2.6. Gestión de Residuos

La etapa de fin de vida comprende las actividades necesarias para gestionar los productos cuando han cumplido con su función. Esto incluye reciclaje, valorización energética y eliminación en rellenos sanitarios. El reciclaje permite recuperar materiales que pueden reintegrarse en nuevas cadenas de producción, mientras que la valorización energética aprovecha los residuos como fuente de energía secundaria.

El diseño para el fin de vida, conocido como "diseño para reciclaje," busca facilitar la separación y recuperación de materiales, minimizando los desechos no reutilizables. Este enfoque asegura una transición más eficiente hacia sistemas productivos más sostenibles (UNAM Ingeniería, 2014).

3.3. Ciclo de vida por aditivo

Aunque un lodo de perforación base agua puede contener múltiples aditivos, en este capítulo se analiza el ciclo de vida de cuatro específicos: barita, bentonita, carbonato de calcio y celulosa polianiónica (PAC). La selección de estos aditivos no pretende excluir la relevancia de otros, sino representar un panorama general a partir de los compuestos más utilizados y significativos en el contexto colombiano. Esta decisión se fundamenta en su frecuencia de uso en la formulación de lodos base agua, su disponibilidad en el país y la posibilidad de encontrar información técnica confiable para cada uno. Además, fueron considerados por ser representativos de diferentes tipos de aditivos dentro del sistema de lodo: densificantes (barita y carbonato de calcio), viscosificantes (bentonita) y polímeros modificadores reológicos (PAC).

A través del análisis de su ciclo de se busca identificar los impactos asociados a cada etapa y proponer oportunidades de mejora en su gestión ambiental. Aunque todos presentan implicaciones importantes, se destaca que la celulosa polianiónica cuenta con cierto grado de biodegradabilidad, lo que la diferencia de otros aditivos cuya permanencia en el ambiente puede ser mayor. Si bien la información técnica disponible sobre algunos compuestos es limitada, estos cuatro permiten establecer una base sólida y representativa para el análisis ambiental de los lodos de perforación en Colombia.

3.3.1. Barita

La barita es un mineral no metálico compuesto principalmente por sulfato de bario (BaSO_4). Se caracteriza por su alta densidad, baja solubilidad y naturaleza inerte. Su color varía entre blanco, grisáceo, verdoso o rojizo, y suele encontrarse en forma de cristales tabulares, fibrosos o laminares. Presenta un alto peso específico, generalmente en un rango de 4.3 a 4.6 g/cm^3 , lo que lo distingue de otros minerales con características similares (Schlumberger, s. f.-a).

3.3.1.1. Extracción

La barita es un mineral natural de sulfato de bario que se extrae principalmente en minas a cielo abierto o subterráneas. La extracción de barita, un mineral crucial para diversas aplicaciones industriales, especialmente en la industria petrolera, se realiza mediante técnicas de minería subterránea y a cielo abierto. En los métodos subterráneos, como el sistema de tumbe sobre carga, se emplean procedimientos controlados para el derrumbe y recolección del mineral desde niveles inferiores, seguido de su transporte a la superficie. Este sistema permite acceder a yacimientos profundos mientras se asegura la estabilidad estructural de las excavaciones.

En minería a cielo abierto, el proceso comienza con la remoción del material de recubrimiento, utilizando maquinaria pesada como palas y cargadores para exponer los estratos más ricos en barita. El mineral es luego extraído y transportado para su procesamiento inicial. Esta modalidad es común en áreas donde los depósitos se encuentran cerca de la superficie, facilitando la explotación eficiente.

En Colombia, los principales yacimientos de barita se encuentran en los departamentos de Santander, Boyacá y Cundinamarca. Estos depósitos contienen baritina de alta pureza, lo que favorece su extracción para diferentes aplicaciones industriales (Guerra Flórez & Villarreal Orozco, 2019).

3.3.1.2. Fabricación del aditivo (barita procesada)

Después de su extracción, la barita pasa por una serie de procesos físicos que conforman su etapa de fabricación. Esto incluye la trituración, concentración, secado y molienda, los cuales permiten obtener un producto con las características granulométricas requeridas para su uso en lodos de perforación (Guerra Flórez & Villarreal Orozco, 2019).

3.3.1.3. Trituración

Una vez extraída la barita, se procede a la etapa de trituración, un proceso esencial para adecuar el material a las especificaciones requeridas en fases posteriores. Esta etapa se realiza con trituradoras de quijada y/o cono, empleando cribas vibratorias en el circuito con el objetivo de maximizar la eficiencia del proceso y minimizar la generación de partículas ultrafinas.

Los fragmentos de mineral demasiado grandes son seleccionados cuidadosamente para ser triturados, siempre y cuando su contenido de barita sea alto. El material pasa a través de un cilindro rotatorio con huecos de aproximadamente una pulgada de diámetro, permitiendo la separación de fragmentos de mayor tamaño, que posteriormente se someten a una trituración secundaria. Este circuito adicional homogeniza los tamaños de partícula, garantizando la preparación adecuada para procesos subsecuentes como la separación gravimétrica (Guerra Flórez & Villarreal Orozco, 2019).

3.3.1.4. Concentración

Posterior a la trituración, se lleva a cabo el proceso de concentración, cuyo propósito es aumentar el peso específico del mineral al eliminar las impurezas presentes. El mineral triturado se clasifica en mesas concentradoras, donde se diferencian tres categorías principales: concentrados, medios y colas (residuos). Este procedimiento puede repetirse hasta tres veces para

maximizar la recuperación del material útil, logrando una recuperación de la barita que oscila entre el 80 % y el 85 %.

Los concentrados, una vez separados, son transferidos a un secador rotatorio para eliminar la humedad restante. Los medios son enviados nuevamente a las mesas concentradoras para un reprocesamiento adicional, mientras que las colas son dirigidas a presas de jales o áreas designadas para su disposición final (Guerra Flórez & Villarreal Orozco, 2019).

3.3.1.5. Secado

Tras el proceso de concentración, la barita pasa a la etapa de secado. Esta etapa tiene como propósito principal extraer la humedad contenida en la barita mediante el intercambio de calor entre el aire caliente, proveniente de la cámara de combustión, y el mineral procesado.

El secado se realiza en un secador rotatorio donde tanto los medios como los concentrados son introducidos. Este proceso asegura el libre flujo del material en las fases siguientes al reducir significativamente su contenido de humedad. La operación inicia con la combustión dentro de una cámara sellada; simultáneamente, un ventilador induce el aire que se desea calentar, transportándolo hacia el secador mediante un sistema de tuberías conectadas.

En el secador, que funciona como una cámara vibratoria, se efectúa la transferencia de calor por conducción. El aire caliente pasa a través de la barita, promoviendo la pérdida de humedad y asegurando que el material esté en condiciones óptimas (Subsecretaría de Minería, 2020).

3.3.1.6. Molienda

Luego del secado, la barita es sometida a un proceso de molienda, diseñado para alcanzar tamaños de partícula específicos que cumplan las necesidades y especificaciones del cliente. La

molienda se realiza mediante molinos de martillos, los cuales permiten un control preciso sobre el tamaño de las partículas.

Durante este proceso, la barita se reduce progresivamente hasta obtener una granulometría muy fina, esencial para su posterior aplicación en la industria. Además de ajustar el tamaño de la partícula, este proceso contribuye a mejorar la uniformidad del material, optimizando así su desempeño en usos industriales, como su empleo en fluidos de perforación (Subsecretaría de Minería, 2020).

3.3.1.7. Transporte y distribución

La barita procesada se transporta hacia las locaciones de perforación, generalmente empacada en sacos o distribuida a granel, dependiendo de los requerimientos logísticos y operativos del proyecto (Paeres & Velandia, 2007).

3.3.1.8. Uso en la perforación

Una vez completada la etapa de transporte, la barita se incorpora a los lodos de perforación con el propósito fundamental de incrementar su densidad. Este proceso es crucial, ya que la densidad adecuada del lodo es indispensable para mantener un equilibrio adecuado de presiones dentro del pozo. En operaciones de perforación profunda, como las que se llevan a cabo en varias regiones de Colombia, como los Llanos Orientales y la región del Caribe, la barita desempeña un papel esencial al prevenir flujos no deseados de gas, aceite o agua desde las formaciones permeables hacia el barreno. Tal situación podría comprometer la estabilidad del pozo y dificultar su operación.

El uso de la barita en los lodos de perforación se centra principalmente en la estabilización del pozo, ya que, al aumentar la densidad del lodo, se genera una presión hidrostática capaz de contrarrestar las presiones de formación. Este mecanismo ayuda a evitar el

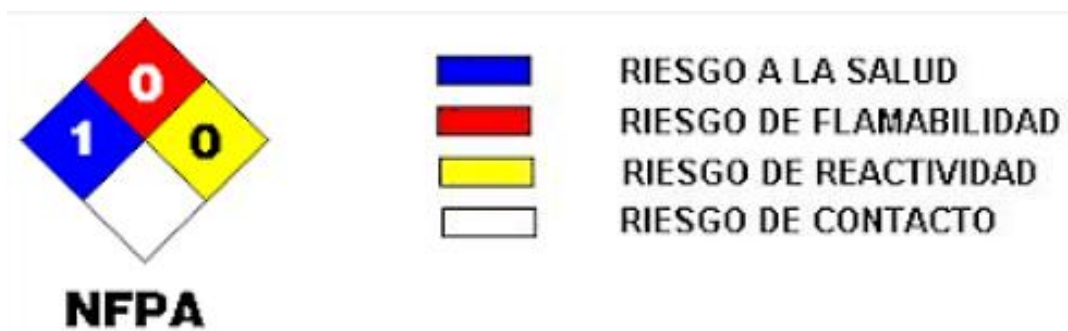
colapso de las paredes del pozo y el desmoronamiento de las capas de roca circundantes, lo cual es crucial para garantizar tanto la seguridad como la eficiencia de las operaciones de perforación. Especialmente en áreas donde las perforaciones pueden alcanzar profundidades significativas, como es el caso de las perforaciones realizadas en Colombia, el control de estas presiones se vuelve indispensable (Jaberi et al., 2023).

Asimismo, la incorporación de barita en los lodos no solo contribuye al control de las presiones, sino que también facilita la suspensión y el transporte de los recortes de perforación hacia la superficie. Al incrementar la viscosidad y densidad del lodo, la barita asegura que los recortes sean eficientemente transportados sin riesgo de acumulación en el fondo del pozo. Esto no solo optimiza el proceso de perforación, sino que también minimiza el riesgo de obstrucción en el equipo de perforación, mejorando la eficiencia operativa general y reduciendo los tiempos de inactividad (*Barite In Drilling Mud Properties & Formula*, 2021).

3.3.1.9. Gestión de residuos y disposición final

Figura 1.

Diamante de Peligros de la NFPA (National Fire Protection Association) para la Barita



Nota. Tomado Overtech S.A

Aunque la barita es un mineral inerte y no tóxico, su alta densidad la convierte en un desafío al ser parte de los lodos de perforación usados. Para minimizar impactos, se implementan

sistemas de control de sólidos mediante dispositivos como hidrociclones, separadores y centrifugadoras, que permiten recuperar la barita reutilizable y reducir el volumen de residuos (Busari, 2024).

Los residuos restantes, como recortes mezclados con barita, generalmente se clasifican como desechos no peligrosos y pueden disponerse mediante enterramiento controlado en vertederos autorizados. Alternativamente, algunos residuos se valoran como materiales para construcción o cemento, aprovechando el potencial reciclable (Lebedev & Cherepovitsyn, 2024).

3.3.2. *Bentonita*

La bentonita es una arcilla sedimentaria compuesta principalmente por montmorillonita, un filosilicato de estructura laminar del grupo de las esmectitas. Su composición incluye silicato de aluminio hidratado con proporciones variables de hierro, magnesio, sodio y calcio. Después del uso, el lodo que contiene bentonita puede estar contaminado con hidrocarburos, metales pesados o recortes del pozo. Este material debe tratarse adecuadamente.

Destaca por su alta capacidad de absorción de agua, lo que le permite expandirse y formar suspensiones coloidales estables. Esta propiedad se debe a la disposición de sus láminas cristalinas y la presencia de cationes intercambiables en sus espacios interlaminares. Según el catión predominante, se clasifica en sódica o cálcica, lo que influye en su grado de hinchamiento y estabilidad (Schlumberger, s. f.-a).

3.3.2.1. Extracción

La obtención de bentonita comienza con estudios geológicos para identificar yacimientos adecuados. Su extracción se realiza principalmente mediante minería a cielo abierto, utilizando maquinaria pesada como excavadoras, cargadores frontales y volquetas. Esta fase puede generar

alteraciones en el terreno, degradación de suelos y afectación a la cobertura vegetal (Subsecretaría de Minería, 2017).

3.3.2.2. Fabricación del aditivo (bentonita procesada)

Una vez extraída, la bentonita es sometida a distintos procesos como trituración, secado, molienda y tamizado, que conforman su etapa de fabricación. Estas operaciones permiten acondicionar la arcilla para cumplir con las propiedades requeridas (Subsecretaría de Minería, 2017).

3.3.2.3. Trituración

Luego de la extracción, la bentonita, que presenta una dureza de 1 a 2 en la escala de Mohs y un contenido de humedad cercano al 30 %, es sometida a trituración para reducir su tamaño de partícula. Para materiales húmedos y pegajosos como este, se recomienda el uso de trituradoras de rodillos dentados, que permiten desintegrar eficientemente grandes trozos de arcilla. Este proceso mejora el rendimiento general y puede incrementar la producción entre un 30 % y 40 % (FTM, 2023).

3.3.2.4. Secado y molienda

Después de la trituración, la bentonita se seca para reducir su humedad desde un 25–35 % hasta niveles entre el 5 % y el 12 %, utilizando generalmente secadores rotatorios. Luego, se realiza la molienda para obtener un polvo fino, ya sea de bentonita natural o activada. En muchos casos, también se aplica una activación química con carbonato de sodio, mejorando su hinchamiento y capacidad reológica como viscosificante en los lodos de perforación (FTM, 2023).

3.3.2.5. Tamizado

Tras el tratamiento, el material es tamizado para obtener una granulometría uniforme. Esto garantiza una distribución adecuada en la mezcla del lodo y contribuye a la eficiencia de sus funciones durante la operación de perforación (Subsecretaría de Minería, 2017).

3.3.2.6. Transporte y distribución

La bentonita procesada se empaca, usualmente en sacos de 25 o 50 kg, y se transporta hacia los sitios de almacenamiento o zonas de perforación. Este transporte puede implicar largos trayectos por vía terrestre, generando emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) por el uso de diésel en camiones. El impacto de esta fase dependerá de la distancia recorrida, la eficiencia del transporte y la infraestructura logística disponible (Paeres & Velandia, 2007).

3.3.2.7. Uso en la perforación

En el sitio de perforación, la bentonita se mezcla con agua para formar parte de los lodos base agua. Durante esta etapa, su función principal es actuar como viscosificante, es decir, aumentar la viscosidad del fluido para facilitar el transporte de recortes hacia la superficie y mantenerlos en suspensión, incluso cuando se detiene la circulación. Además, ayuda a estabilizar las paredes del pozo y a controlar pérdidas de fluido. Aunque esta fase no genera grandes impactos directos, sí influye en la eficiencia operativa y en la cantidad de residuos generados al final del proceso (Subsecretaría de Minería, 2017).

3.3.2.8. Gestión de residuos y disposición final

Figura 2.

Diamante de Peligros de la NFPA para la Bentonita

Nota. Tomado de ISQUISA.

Finalizado su uso, los lodos con bentonita pueden contener hidrocarburos y metales, por lo que requieren tratamientos previos como separación de fases con hidrociclones o centrifugadoras, antes de su disposición final. Los residuos sólidos se clasifican según su nivel de contaminación. Si cumplen con los parámetros ambientales, pueden ser tratados mediante técnicas como *landfarming* (tratamiento de residuos en suelos controlados); de lo contrario, se estabilizan mediante solidificación para su confinamiento seguro (Gallio, s. f.).

3.3.3. Carbonato de calcio

El carbonato de calcio (CaCO_3) es un compuesto químico que se encuentra de forma natural en rocas sedimentarias como la caliza. Se presenta como un sólido blanco, de textura fina, inodoro y con una densidad promedio de 2.7 g/cm^3 . En la industria, se emplea en forma pulverizada o con tamaños de partícula controlados, resultado de procesos de trituración y

clasificación. Esta forma dimensionada permite su uso en distintos fluidos técnicos. Además, el carbonato de calcio es insoluble en agua, pero puede disolverse fácilmente en soluciones ácidas como el ácido clorhídrico (Schlumberger, s. f.-c).

3.3.3.1. Extracción

El carbonato de calcio se obtiene principalmente a partir de la extracción de piedra caliza, la cual es una roca sedimentaria rica en calcita. En Colombia, esta extracción se realiza en canteras mediante técnicas de minería a cielo abierto, que implican perforación, voladura y recolección del material. La piedra caliza extraída se selecciona por su pureza antes de pasar a procesos de trituración y molienda (Matyjaszewski et al., 2012).

3.3.3.2. Fabricación del aditivo (carbonato de calcio procesado)

Una vez extraído, el mineral es sometido a procesos de trituración y molienda para obtener partículas con el tamaño adecuado según su aplicación en lodos de perforación. En algunos casos, el carbonato de calcio se somete a procesos de clasificación y purificación, e incluso puede recibir tratamientos térmicos o químicos para modificar sus propiedades reológicas y mejorar su desempeño. El producto final se presenta generalmente en forma de polvo fino (Matyjaszewski et al., 2012).

3.3.3.3. Trituración, secado y molienda

Luego de su extracción, la piedra caliza es sometida a trituración para reducir el tamaño del material. Posteriormente, se realiza un secado controlado cuando el mineral presenta humedad significativa, lo que facilita su manipulación y evita la compactación durante la molienda. Esta etapa puede llevarse a cabo mediante secadores rotatorios.

A continuación, el carbonato de calcio seco se muele hasta alcanzar una granulometría específica según el requerimiento técnico. La molienda puede producir desde partículas gruesas

hasta polvos finos, que luego son clasificados y purificados. En algunos casos, el material también se somete a tratamientos térmicos o químicos para ajustar sus propiedades físicas (Ryabtsev et al., 2021).

3.3.3.4. Transporte y distribución

El carbonato de calcio ya procesado se embala en sacos, tambores o se transporta a granel hasta los centros de almacenamiento o directamente a los sitios de perforación. Esta fase implica el uso de transporte terrestre pesado, lo cual representa una fuente relevante de emisiones atmosféricas debido al consumo de combustibles fósiles (Paeres & Velandia, 2007).

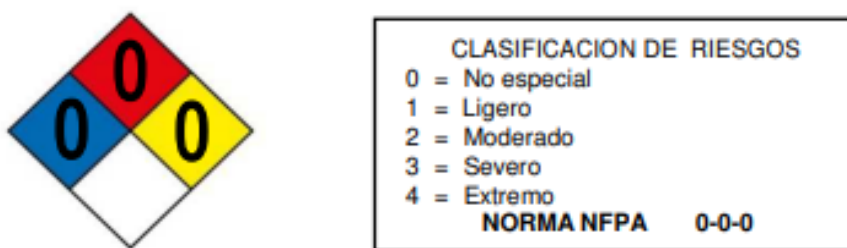
3.3.3.5. Uso en la perforación

En campo, el carbonato de calcio es incorporado en la formulación de lodos base agua como densificante y como agente de control de pérdidas. Su función principal es aumentar la densidad del fluido y sellar zonas permeables, contribuyendo al control de presiones en el pozo y a la eficiencia operativa durante la perforación (Ilhan, 2023).

3.3.3.6. Gestión de residuos y disposición final

Figura 3.

Diamante de Peligros de la NFPA para el Carbonato de Calcio



Nota. Tomado de PEMEX, 2019.

Tras su uso en perforación, el carbonato de calcio permanece en los lodos residuales, que también pueden contener hidrocarburos, aditivos y recortes de roca. A pesar de su relativa benignidad ambiental, los residuos deben tratarse adecuadamente antes de su disposición. Se recomienda usar sistemas de separación sólidos-líquidos como centrifugadoras o hidrociclones para recuperar el sólido y reducir el volumen de desecho.

Los residuos sólidos, al no ser considerados peligrosos, suelen clasificarse como no peligrosos y pueden disponerse en vertederos autorizados, introducirse en proyectos de recuperación de suelos o utilizarse como ingredientes en materiales de construcción tras procesos de solidificación o estabilización (Yang et al., 2024).

3.3.4. Celulosa polianiónica

La celulosa polianiónica (PAC) es un polímero derivado de la celulosa natural, modificado químicamente para mejorar sus propiedades físico-químicas. Se presenta comúnmente como un polvo o gránulo blanco o amarillo claro, inodoro y no tóxico. Su estructura química le permite disolverse fácilmente en agua fría o caliente, y destaca por su buena estabilidad térmica, tolerancia a la sal y resistencia bacteriana. Debido a estas características, es ampliamente utilizada como aditivo técnico en formulaciones industriales (Celotech, s. f.).

3.3.4.1. Extracción

La celulosa polianiónica (PAC) se deriva de la celulosa vegetal (generalmente obtenida de madera, algodón o pulpa de papel). La celulosa es procesada químicamente para introducir grupos aniónicos, creando el PAC (Hengxin Polymer Material, 2024).

3.3.4.2. Fabricación del aditivo (celulosa polianiónica procesada)

La producción de celulosa polianiónica (PAC) comienza con el tratamiento químico de fibras de celulosa vegetal provenientes de fuentes como la pulpa de madera o el algodón. Inicialmente, el material se somete a un proceso de alcalinización mediante una solución de hidróxido de sodio (NaOH), que permite romper parcialmente la estructura cristalina de la celulosa y exponer los grupos hidroxilo, haciéndolos más susceptibles a reacciones químicas. Luego, se lleva a cabo la eterificación, en la que se adiciona ácido monocloroacético, introduciendo grupos carboximetilo en la cadena molecular de la celulosa. Esta modificación confiere al PAC sus propiedades aniónicas y funcionales para el control de filtrado y aumento de viscosidad. Finalizada esta reacción, se procede a la neutralización del medio con carbonato de sodio, estabilizando el pH y deteniendo el proceso químico. Finalmente, el producto se purifica mediante lavados sucesivos que eliminan residuos de reactivos y subproductos como cloruro de sodio (Hengxin Polymer Material, 2024).

3.3.4.3. Secado

Una vez purificado, el PAC es sometido a un proceso de secado térmico. Este se realiza comúnmente en hornos o secadores industriales bajo condiciones controladas de temperatura, con el objetivo de reducir su contenido de humedad a niveles inferiores al 10 %. Esta etapa resulta esencial para garantizar la estabilidad fisicoquímica del aditivo durante su almacenamiento y transporte, así como para prolongar su vida útil sin degradación ni aglutinamiento del material (Hengxin Polymer Material, 2024).

3.3.4.4. Molienda y tamizado

Tras el secado, el PAC se somete a un proceso de molienda en seco con el fin de obtener un polvo fino con características granulométricas uniformes. Esta etapa puede incluir el uso de

molinos de rodillos, bolas o martillos, según la capacidad de producción requerida. Posteriormente, el material molido se tamiza para separar partículas fuera de especificación y asegurar una textura homogénea. La distribución controlada del tamaño de partícula facilita su disolución en fluidos de perforación y asegura un desempeño constante en campo (Hengxin Polymer Material, 2024).

3.3.4.5. Transporte y distribución

El PAC (celulosa polianiónica) es transportado desde las plantas de fabricación hasta los sitios de perforación en presentaciones como sacos, tambores o a granel. Este proceso logístico se realiza principalmente por vía terrestre mediante camiones especializados que garantizan condiciones adecuadas de manejo y almacenamiento para evitar la degradación del producto (Resource, s. f.).

3.3.4.6. Uso en la perforación

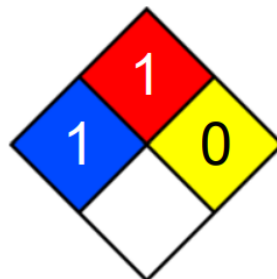
En las operaciones de perforación, el PAC se emplea como un aditivo viscosificante y controlador de pérdida de filtrado en los lodos base agua. Su aplicación consiste en mezclarlo con agua y otros componentes en campo, ajustando su concentración según los requerimientos técnicos del pozo. Este polímero mejora la viscosidad del fluido, permite mantener los recortes en suspensión y reduce el filtrado de agua hacia la formación, protegiendo la estructura del pozo (KIMA CHEMICAL CO., LTD., s. f.).

3.3.4.7. Gestión de residuos y disposición final

Figura 4.

Diamante de Peligros de la NFPA para la Celulosa Polianionica

Clasificaciones NFPA	Peligro para la salud	1
	Peligro de incendio	1
	Peligro de reactividad	0
	Peligro específico	N. D.



Nota. Tomado de PEMEX, 2019.

El PAC, al ser biodegradable y soluble en agua, representa una alternativa más amigable frente a otros aditivos sintéticos. Tras su uso en lodos base agua, puede degradarse en compuestos menos dañinos; sin embargo, al mezclarse con recortes y otros residuos, requiere tratamiento previo. Se recomienda la separación sólido-líquido y la estabilización del material mediante encapsulado o confinamiento, evitando riesgos para el suelo y cuerpos de agua (Jining Fortune Biotech Co., Ltd., 2023).

3.4. Fases del ciclo de vida de un lodo base agua

El ciclo de vida de un lodo de perforación base agua permite comprender las etapas clave que atraviesa este fluido desde la selección de materias primas hasta su disposición final. Este análisis es esencial para identificar los impactos ambientales, técnicos y operativos asociados al uso de aditivos en la industria petrolera, especialmente en el contexto colombiano.

A partir de los ciclos de vida analizados para cada aditivo, se identifican fases comunes que facilitan un enfoque integral. Estas fases son evaluadas individualmente con el fin de aportar una visión clara de su función dentro del sistema productivo y de su contribución a la eficiencia

y sostenibilidad del proceso de perforación (*Composition And Properties Of Drilling And Completion Fluids*, s. f.).

A continuación, se describen las principales etapas que conforman el ciclo de vida de un lodo de perforación base agua:

3.4.1. Selección de Materias Primas

Se identifican los aditivos que formarán parte de la formulación del lodo, considerando sus propiedades físicas y químicas para cumplir funciones específicas en la operación. Los aditivos más utilizados incluyen bentonita, barita, carbonato de calcio y celulosa polianiónica.

3.4.2. Transporte y distribución

Los aditivos se transportan desde las plantas de producción hasta los sitios de perforación, generalmente por vía terrestre. Esta fase implica consumo de combustibles fósiles y generación de emisiones, siendo clave para el análisis del impacto ambiental del ciclo de vida.

3.4.3. Diseño y Formulación

El diseño de un lodo de perforación base agua comienza con la selección de los componentes necesarios para satisfacer las condiciones específicas del pozo. Este proceso implica determinar la composición adecuada de agua, arcillas, aditivos químicos y otros modificadores, teniendo en cuenta factores como la presión, la temperatura y las características geológicas de la formación.

La formulación se realiza en laboratorios especializados, donde se prueban las propiedades reológicas, la densidad y la capacidad de inhibición del fluido. Estos parámetros aseguran que el lodo pueda cumplir funciones críticas, como estabilizar el pozo, transportar los recortes a la superficie y minimizar el daño a las formaciones productivas.

3.4.4. Mezcla y Preparación

Una vez formulado, el lodo se prepara en las instalaciones de perforación mediante la mezcla de sus componentes en tanques de almacenamiento. Este proceso incluye la agitación constante del fluido para garantizar una distribución uniforme de los aditivos y la homogeneidad de sus propiedades.

El agua actúa como fase continua, mientras que los sólidos, como bentonita y barita, y los aditivos químicos forman la fase discontinua. Durante esta etapa, también se ajustan las propiedades del lodo según los requisitos operativos específicos de la perforación.

3.4.5. Circulación y Uso

La circulación del lodo es una fase dinámica en la que el fluido es bombeado a través de la sarta de perforación, pasa por la barrena y retorna a la superficie por el espacio anular del pozo. Durante este proceso, el lodo desempeña funciones clave, como la remoción de los recortes generados por la barrena, el enfriamiento y lubricación del equipo de perforación y la transmisión de energía hidráulica.

Esta fase también implica la recolección de datos sobre el rendimiento del lodo, permitiendo ajustes continuos para mantener sus propiedades dentro de los rangos deseados. El monitoreo constante asegura que el fluido sea eficaz en todo momento.

3.4.6. Tratamiento y Recirculación

En la superficie, el lodo retornado es procesado para eliminar los sólidos acumulados y restaurar sus propiedades originales. Este tratamiento incluye el uso de zarandas vibratorias, hidrociclones y centrifugas para separar los recortes de roca y otros contaminantes.

Adicionalmente, se reponen aditivos y agua para compensar las pérdidas durante la circulación y se ajustan las propiedades reológicas según sea necesario. La recirculación del lodo permite su reutilización eficiente, reduciendo los costos y minimizando el impacto ambiental.

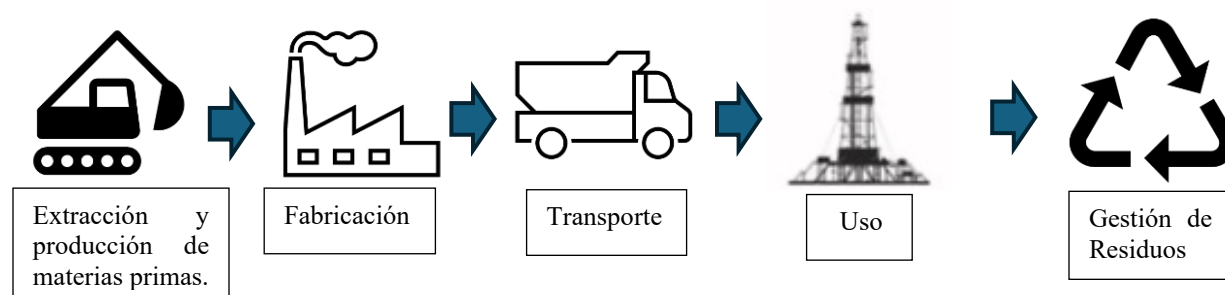
3.4.7. Disposición Final

Una vez completada la perforación, el lodo que ya no puede ser reutilizado se somete a procesos de disposición controlados. Esto incluye su tratamiento para remover componentes potencialmente peligrosos y su confinamiento en instalaciones diseñadas específicamente para este propósito.

Los procedimientos de disposición final varían según las regulaciones locales y las características del lodo residual, pero siempre buscan minimizar su impacto en el medio ambiente mediante su estabilización y aislamiento seguro.

Figura 5.

Fases del Ciclo de Vida Fluidos de Perforación Base Agua



Nota. La ilustración presenta una síntesis gráfica de las etapas comunes identificadas en los ciclos de vida de los aditivos evaluados, y tiene como propósito servir de referencia general para el análisis desarrollado en el presente trabajo.

3.5. Análisis del ciclo de vida (ACV)

Metodología. Se utilizará un enfoque basado en la Norma ISO 14040 para estructurar el análisis del ciclo de vida (ACV), aplicando herramientas de evaluación de impactos ambientales y considerando datos de la industria petrolera en Colombia.

Este análisis permite identificar áreas críticas en las operaciones, lo que resulta esencial para optimizar recursos, minimizar emisiones y mejorar la sostenibilidad de los sistemas. Regulaciones internacionales como las normas mencionadas, consolidan el ACV como un estándar técnico, promoviendo su uso en sectores industriales para evaluar y comparar procesos de manera objetiva.

En la industria petrolera, el ciclo de vida y su análisis tienen un papel fundamental debido a la naturaleza intensiva de recursos de sus operaciones. Aunque cada actividad presenta particularidades, el análisis del ciclo de vida sirve como una guía para integrar principios de sostenibilidad en todas las fases de la cadena de valor (Al Zarkani, Mezher, & El-Fadel, 2023).

El análisis del ciclo de vida permite:

- Identificar oportunidades para mejorar el desempeño ambiental de productos en las distintas fases de su ciclo de vida.
- Aportar información a quienes toman decisiones en la industria, organizaciones gubernamentales o no gubernamentales (por ejemplo, para la planificación estratégica, el establecimiento de prioridades, el diseño y rediseño de productos o procesos).

3.6. Inventario del ciclo de vida (ICV)

El inventario del ciclo de vida es una fase clave dentro del Análisis del Ciclo de Vida (ACV), ya que permite recopilar, organizar y cuantificar todos los flujos de entrada y salida

(como materiales, energía, emisiones y residuos) asociados a cada etapa del ciclo de vida de un producto o proceso. En este caso, se establece el inventario de los principales aditivos utilizados en la formulación de lodos base agua en la industria petrolera colombiana, considerando las fases desde la extracción de materias primas hasta su disposición final.

3.6.1. Extracción y producción

Esta etapa inicial del ciclo de vida identifica los recursos naturales que se utilizan para obtener cada aditivo desde su fuente. Se presentan en la tabla los insumos y procesos necesarios para la extracción, así como los residuos y alteraciones al medio ambiente que pueden generarse.

Tabla 3.

Extracción y Producción de Materias Primas

Aditivo	Entradas	Salidas
Bentonita	Recursos naturales: depósitos de bentonita	Desechos mineros: material estéril
	Energía: maquinaria para remover y cargar el material	Emisiones de CO ₂ y partículas por maquinaria
	Agua: para control de polvo o procesos secundarios	Alteración del paisaje y posible contaminación de aguas
Barita	Recursos naturales: depósitos de barita	Material estéril (desechos de roca)
	Energía para maquinaria de extracción	Emisiones de CO ₂ y material particulado
	Agua para control de polvo y operaciones auxiliares	Alteración del suelo y posible contaminación de aguas subterráneas

Carbonato de Calcio	Piedra caliza o mármol	Polvo fino de carbonato de calcio
	Energía para molienda, trituración y, a veces, calcinación	Emisiones de CO ₂ y polvo durante la molienda
	Agua para purificación (si es necesario)	Residuos sólidos de procesamiento (material no conforme o material residual)
Celulosa Polianionica	Celulosa vegetal (madera, algodón, pulpa de papel)	Subproductos de la modificación química (por ejemplo, reactivos residuales)
	Productos químicos como anhídrido acético o ácido acético para modificar la celulosa	Emisiones de CO ₂ y compuestos volátiles generados durante la síntesis química
	Agua para disolución y purificación de la celulosa	Desperdicios sólidos del proceso de fabricación

Nota. Esta tabla resume en flujo de entrada y salida de componentes de la fase de extracción y producción.

3.6.2. *Fabricación del aditivo*

Una vez extraídas las materias primas, estas deben ser transformadas hasta obtener los aditivos con las propiedades deseadas. En esta fase se detallan las entradas requeridas para su procesamiento y las emisiones o residuos que pueden producirse. La siguiente tabla recoge la información correspondiente para cada aditivo.

Tabla 4 .

Fabricación del Aditivo

Aditivo	Entradas	Salidas
Bentonita	Bentonita cruda	Polvo de bentonita lista para uso industrial
	Energía para molienda, secado y procesamiento	Emisiones de partículas durante la molienda
	Reactivos químicos si se activa (por ejemplo, carbonato de sodio)	Residuos sólidos del proceso
		Gasto energético significativo
Barita	Barita cruda	Polvo fino de barita (grado API)
	Energía eléctrica y térmica para molienda y secado	Emisiones de polvo y CO ₂ por consumo energético
	Agua para limpieza (en caso de lavado húmedo)	Residuos sólidos del proceso (material no conforme)
		Consumo energético significativo
Carbonato de Calcio	Piedra caliza o mármol	Polvo fino de carbonato de calcio
	Energía para molienda, trituración y, a veces, calcinación	Emisiones de CO ₂ y polvo durante la molienda
	Agua para purificación (si es necesario)	Residuos sólidos de procesamiento (material no conforme o material residual)
Celulosa Polianionica	Celulosa vegetal	Celulosa polianiónica en polvo o en solución
	Reactivos químicos (como anhídrido acético, ácido acético o álcalis)	Residuos de reactivos químicos no reaccionados

Agua para disolución y purificación	Emisiones de compuestos volátiles y CO ₂ debido a los procesos térmicos y químicos
Energía para la mezcla y secado	Residuos de empaques del material final

Nota. Esta tabla resume en flujo de entrada y salida de componentes de la fase de Fabricación.

3.6.3. Transporte y distribución

Después de fabricados, los aditivos deben ser llevados a los campos de perforación. Esta fase está marcada por el consumo de combustibles, la logística de movilización y la huella ambiental del traslado. La tabla que se muestra a continuación detalla cómo varían estas entradas y salidas según el tipo de aditivo.

Tabla 5.

Transporte y Distribución

Aditivo	Entradas	Salidas
Bentonita	Vehículos de carga	Emisiones (CO ₂ , NO _x)
	Combustibles fósiles	Posible generación de polvo si no hay manejo adecuado
	Infraestructura logística	Huella de carbono del transporte
Barita	Combustible (camiones, trenes o barcos)	Emisiones de CO ₂ , NO _x y material particulado
	Vehículos de transporte y embalaje	Residuos de sacos o empaques
		Huella ambiental del transporte

Carbonato de Calcio	Combustible (camiones, trenes o barcos)	Emisiones de CO ₂ , NO _x y polvo durante el transporte
	Vehículos de transporte y empaques	Residuos de empaques de los productos (sacos, bolsas, etc.)
		Huella de carbono asociada al transporte
Celulosa Polianionica	Combustible para el transporte	Emisiones de CO ₂ , NO _x y partículas durante el transporte
	Vehículos de carga (camiones, barcos, trenes)	Residuos de empaques (sacos, cajas, plásticos)
		Huella de carbono asociada al transporte

Nota. Esta tabla resume en flujo de entrada y salida de componentes de la fase de transporte y distribución

3.6.4. *Uso en perforación*

Durante la operación en campo, cada aditivo cumple una función técnica específica. En esta parte se registran los materiales que se consumen y los impactos que resultan del uso de los aditivos, como el consumo de agua o la generación de residuos. La tabla a continuación presenta los elementos principales de esta fase para cada aditivo.

Tabla 6 .

Uso en la Perforación Petrolera

Aditivo	Entradas	Salidas
Bentonita	Bentonita en polvo	Lodo de perforación ya formulado
	Agua (potable, de río, mar o salmuera)	Emisiones menores durante la manipulación
	Energía para mezclado y circulación	Residuos de sacos o empaques
		Parte del lodo puede perderse en la formación o contaminarse

Barita	Barita en polvo	Lodo pesado con barita
	Agua	Pérdidas de fluido por filtración en la formación
	Energía para mezclado y bombeo	Residuos de empaques y polvo en el ambiente
		Generación de lodos usados con barita
Carbonato de Calcio	Carbonato de calcio en polvo	Lodo de perforación con carbonato de calcio
	Agua (potable o de fuente de perforación)	Emisiones menores durante la manipulación de polvo
	Energía para la mezcla y circulación del lodo	Residuos de sacos o empaques
		Pérdidas de fluido debido a filtración en la formación
Celulosa Polianionica	Celulosa polianiónica en polvo	Lodo de perforación formulado con PAC
	Agua (potable, de río, salmuera, etc.)	Emisiones menores durante la manipulación del PAC (polvo)
	Otros aditivos (como bentonita, barita, etc.)	Residuos de empaques
	Energía para la mezcla y bombeo	Pérdidas de fluido a la formación o posibles filtraciones

Nota. Esta tabla resume en flujo de entrada y salida de componentes de la fase de Uso en la perforación petrolera.

3.6.5. Gestión de residuos y disposición final

Al terminar su ciclo de utilidad, los residuos generados por los aditivos deben ser gestionados bajo la normatividad ambiental. Esta sección examina los procesos requeridos para tratarlos y las posibles consecuencias ambientales si no se manejan adecuadamente. A continuación, se incluye una tabla que caracteriza esta fase para los diferentes aditivos.

Tabla 7.

Gestión de Residuos y Disposición Final

Aditivo	Entradas	Salidas
Bentonita	Lodo contaminado	Lodos tratados o confinados (en celdas, rellenos, etc.)
	Energía y productos químicos para su tratamiento	Aguas residuales tratadas
	Infraestructura de disposición	Emisiones del tratamiento (secado, estabilización, etc.)
Barita		Lodos estabilizados o confinados (alta densidad dificulta la biodegradación)
	Lodo residual con barita	
	Energía y productos para estabilización	Efluentes líquidos con trazas minerales
	Equipos de tratamiento	Emisiones del tratamiento
Carbonato de Calcio		Riesgo de acumulación en el suelo si no se gestiona correctamente
	Lodo residual con carbonato de calcio	Lodo tratado o confinados en rellenos de seguridad
	Energía y productos para estabilización	Efluentes líquidos con trazas de minerales o contaminantes.
	Equipos de tratamiento para lodo y aguas residuales	Emisiones generadas por el proceso de tratamiento (secado, compostaje, etc.)
Celulosa Polianiónica	Lodo residual con PAC	Lodo tratado o estabilizado (con PAC y otros aditivos)
	Equipos para tratamiento de lodo (centrífugas, sistemas de	Residuos de tratamiento

separación)	Efluentes líquidos con trazas de productos químicos o compuestos no biodegradables
Energía y productos químicos para estabilización	Emisiones generadas por el proceso de tratamiento

Nota. Esta tabla resume en flujo de entrada y salida de componentes de la fase de Gestión de Residuos y Disposición final.

3.7. Evaluación del impacto ambiental

La evaluación del impacto permite identificar los efectos ambientales, sociales y económicos asociados a las diferentes fases del ciclo de vida de los aditivos utilizados en los lodos base agua. Este análisis busca destacar las implicaciones más relevantes en términos de emisiones, consumo de recursos, riesgos sociales y costos operativos, con base en las características particulares de cada aditivo.

3.7.1. Impactos de la Bentonita

La Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida (EICV) de la bentonita se realiza a lo largo de las diferentes fases de su ciclo, evaluando los impactos ambientales, sociales y económicos asociados. A continuación, se detallan los impactos más relevantes en cada fase.

3.7.1.1. Extracción y Producción de Materias Primas

Impactos Ambientales. La extracción de bentonita genera impactos como la destrucción de hábitats naturales y la alteración de ecosistemas debido a la remoción de grandes volúmenes de tierra. Además, la contaminación de aguas subterráneas puede ocurrir debido a los productos químicos utilizados en la extracción y el polvo generado durante el proceso. También se emiten gases de efecto invernadero, como el CO₂, por el uso de maquinaria pesada.

Impactos Sociales. Las comunidades locales pueden verse afectadas por el ruido y la alteración del paisaje, además de los posibles desplazamientos derivados de la actividad minera. También pueden experimentar la pérdida de acceso a ciertos recursos naturales debido a la minería.

Impactos Económicos. La extracción de bentonita puede acarrear costos operativos elevados, incluyendo el uso de maquinaria y la gestión de permisos ambientales. Además, la inversión en infraestructura y la compensación por los impactos sociales generan gastos adicionales.

3.7.1.2. Fabricación del Aditivo (Bentonita Procesada)

Impactos Ambientales. Durante la fabricación de la bentonita procesada, las emisiones de polvo son una preocupación significativa, junto con el alto consumo de energía para las actividades de molienda y secado. Además, se generan residuos sólidos que pueden ser difíciles de manejar.

Impactos Sociales. Los trabajadores pueden estar expuestos a sustancias químicas o al polvo producido en el proceso de fabricación, lo que representa un riesgo para la salud. Las condiciones laborales en las plantas de producción también deben ser adecuadas para evitar accidentes.

Impactos Económicos. El proceso de fabricación implica costos elevados por la energía utilizada en las etapas de molienda y secado. También se requiere inversión en maquinaria de procesamiento y tecnología avanzada para asegurar la calidad del producto.

3.7.1.3. Transporte y Distribución

Impactos Ambientales. El transporte de la bentonita hacia los sitios de perforación implica el consumo de combustibles fósiles, lo que genera emisiones de CO₂ y contribuye al

cambio climático. Además, el desperdicio de combustible debido a la ineficiencia logística también tiene un impacto ambiental. La generación de residuos de empaques es otra preocupación, especialmente si los envases no se reciclan adecuadamente.

Impactos Sociales. El transporte de grandes cantidades de bentonita puede generar congestión en áreas locales y un aumento del tráfico, lo que afecta la calidad de vida de las personas en las cercanías de las rutas de transporte.

Impactos Económicos. Los costos asociados con el transporte de bentonita incluyen los gastos logísticos y el consumo de combustibles. Los daños en la infraestructura por el paso de vehículos pesados también implican costos de mantenimiento y reparación.

3.7.1.4. Uso en la Perforación Petrolera

Impactos Ambientales. El uso de bentonita en los lodos de perforación puede generar pérdidas de fluido que se filtran en la formación geológica, lo que puede causar contaminación potencial del subsuelo y las aguas subterráneas. Además, se generan residuos sólidos y líquidos que deben ser manejados adecuadamente para evitar impactos negativos en el entorno.

Impactos Sociales. Durante la manipulación del lodo de perforación, los trabajadores pueden estar expuestos al polvo o accidentes relacionados con el manejo de equipos pesados y materiales químicos.

Impactos Económicos. El uso de bentonita representa un gasto significativo en la formulación de lodos de perforación, sumado a los costos operativos para manejar los lodos y residuos generados.

3.7.1.5. Gestión de Residuos y Disposición Final

Impactos Ambientales. La disposición final de los lodos de perforación puede causar contaminación de suelos y aguas si no se gestionan adecuadamente. En algunos casos, la emisión

de gases y otros contaminantes durante el tratamiento de los residuos también puede contribuir a la contaminación ambiental.

Impactos Sociales. Las comunidades cercanas a los sitios de disposición final pueden verse afectadas por la contaminación ambiental derivada de los residuos mal gestionados, lo que impacta su salud y bienestar.

Impactos Económicos. La gestión y disposición final de los residuos implican **costos** significativos relacionados con el tratamiento de lodos y su disposición en sitios autorizados. También se requiere inversión en tecnologías de reciclaje o tratamiento para minimizar los impactos.

La Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida (EICV) de la bentonita permite identificar los principales impactos ambientales, sociales y económicos a lo largo de su ciclo de vida. Estos impactos deben ser cuidadosamente gestionados para minimizar los efectos negativos, a través de la implementación de prácticas sostenibles, tecnologías limpias y una adecuada gestión de residuos.

Tabla 8.

Resumen Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida de la Bentonita

	Impactos Ambientales	Impactos Sociales	Impactos Económicos
Extracción y Producción de Materias Primas	Destrucción de hábitats naturales.	Impacto en las comunidades locales (ruido, alteración de paisajes, posibles desplazamientos).	Costos de extracción.
	Contaminación de aguas subterráneas.		Costos asociados a permisos y regulaciones ambientales.
	Emisión de CO ₂ y polvo.		

	Impactos Ambientales	Impactos Sociales	Impactos Económicos
Fabricación del Aditivo	Emisión de partículas de polvo. Consumo elevado de energía. Generación de residuos sólidos.	Posible exposición de trabajadores a químicos o polvo. Condiciones laborales en las fábricas.	Costos de producción (energía, materias primas). Inversión en maquinaria y tecnología de procesamiento.
Transporte y Distribución	Emisiones de CO ₂ debido al transporte. Desperdicio de combustible. Generación de residuos de empaques.	Aumento del tráfico local, congestión.	Costos de transporte y logística. Costos por daños en infraestructuras.
Uso en la Perforación Petrolera	Pérdida de fluido a la formación (contaminación potencial). Generación de residuos sólidos y líquidos.	Riesgos laborales durante la manipulación del lodo (accidentes, exposición al polvo).	Costos de aditivos y equipo de perforación. Costos operativos para el manejo del lodo.
Gestión de Residuos y Disposición Final	Contaminación de suelos y aguas si no se gestionan adecuadamente. Emisiones durante el tratamiento de residuos.	Afectación de las comunidades cercanas a los sitios de disposición final.	Costos asociados a la disposición final Inversión en tecnologías de tratamiento de residuos.

Nota. En el listado anterior se ha identificado los impactos de los componentes bióticos, abióticos y sociales en las fases del ciclo de vida de la bentonita.

3.7.2. Impactos de la Barita

La barita es un mineral de alta densidad utilizado principalmente como agente densificante en lodos de perforación. A lo largo de su ciclo de vida, desde la extracción hasta la disposición final de residuos, se generan diversos impactos ambientales, sociales y económicos que deben ser considerados en un análisis de Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida (EICV). A continuación, se detallan los impactos más relevantes en cada fase.

3.7.2.1. Extracción y Producción de Materias Primas

Impactos Ambientales. La extracción de barita implica la alteración de suelos y hábitats naturales, con la consecuente pérdida de biodiversidad. Además, las aguas subterráneas pueden verse contaminadas por los productos utilizados durante la minería. La actividad minera también está asociada con emisiones de CO₂, especialmente por el uso de maquinaria pesada, y polvo generado en las operaciones de excavación (Ghazi, 2008).

Impactos Sociales. Las comunidades locales pueden enfrentar la alteración de paisajes y el desplazamiento de comunidades debido a la expansión de las actividades mineras. Además, el ruido generado por las máquinas y el transporte de la barita afecta la calidad de vida local.

Impactos Económicos. La extracción de barita genera costos asociados a la obtención de permisos y al cumplimiento de regulaciones ambientales. Además, el coste de la maquinaria y la mano de obra es significativo. Sin embargo, la minería de barita puede generar ingresos para las empresas y las economías locales si se maneja adecuadamente.

3.7.2.2. Fabricación del Aditivo (Barita Procesada)

Impactos Ambientales. Durante la fabricación de barita procesada, el consumo de energía es elevado, especialmente durante el proceso de trituración y molienda del mineral. Esto puede generar emisiones de CO₂ y residuos sólidos que deben ser gestionados adecuadamente.

Impactos Sociales. En las fábricas de procesamiento, los trabajadores pueden estar expuestos a riesgos asociados con la manipulación del mineral, como la exposición al polvo de barita, lo que puede afectar su salud a largo plazo. También es importante considerar las condiciones laborales en las plantas de producción.

Impactos Económicos. La producción de barita procesada implica costos operativos relacionados con el uso de energía y el mantenimiento de maquinaria. Las empresas también deben invertir en tecnologías de procesamiento para asegurar la calidad del producto.

3.7.2.3. Transporte y Distribución

Impactos Ambientales. El transporte de barita a las plataformas de perforación implica el uso de vehículos pesados, lo que genera emisiones de CO₂, contaminación por gasolinas y aceites, y desperdicio de combustible. Además, los empaques y envases generan residuos si no son gestionados adecuadamente.

Impactos Sociales. El transporte de grandes volúmenes de barita puede generar congestión del tráfico en las rutas utilizadas, lo que afecta a las comunidades cercanas y puede generar incidentes o accidentes viales.

Impactos Económicos. Los costos de transporte de la barita son una parte importante de la cadena de suministro, y pueden verse afectados por la variabilidad en los precios de combustible y los costos de infraestructura. Además, los daños a la infraestructura vial también pueden generar costos adicionales para las comunidades o los gobiernos locales.

3.7.2.4. Uso en la Perforación Petrolera

Impactos Ambientales. El uso de barita en los lodos de perforación contribuye a la pérdida de fluido a la formación durante la perforación, lo que puede resultar en contaminación del subsuelo y las aguas subterráneas si no se gestionan adecuadamente los lodos. Además, la

generación de residuos sólidos y líquidos durante las operaciones de perforación puede afectar el entorno natural.

Impactos Sociales. El manejo de lodos de perforación que contienen barita conlleva ciertos riesgos laborales, como la exposición al polvo y otros productos químicos. También pueden ocurrir accidentes relacionados con la manipulación y el transporte del lodo.

Impactos Económicos. El uso de barita genera costos asociados a la compra de aditivos y a las operaciones de perforación, como la preparación de lodos y el mantenimiento de los equipos de perforación. También hay costos adicionales por el manejo de residuos generados en el proceso.

3.7.2.5. Gestión de Residuos y Disposición Final

Impactos Ambientales. La disposición final de los residuos que contienen barita puede generar contaminación del suelo y las aguas si no se gestionan correctamente. En algunos casos, los residuos del lodo de perforación pueden tener un alto contenido de metales pesados y otros compuestos tóxicos.

Impactos Sociales. Las comunidades cercanas a los sitios de disposición final de residuos pueden verse afectadas por la contaminación ambiental, lo que puede generar problemas de salud y calidad de vida. Además, la percepción pública de la industria puede verse afectada negativamente si no se realizan prácticas de disposición responsables.

Impactos Económicos. La gestión de residuos implica costos significativos asociados al tratamiento, almacenamiento y disposición final en lugares autorizados. Además, la inversión en tecnologías de tratamiento o reciclaje puede ser necesaria para minimizar el impacto ambiental de los residuos generados.

El ciclo de vida de la barita implica varios impactos significativos en las áreas ambientales, sociales y económicas. A lo largo de su ciclo, desde la extracción hasta la disposición final de residuos, es esencial implementar prácticas de gestión sostenible para reducir estos impactos, como el uso de tecnologías más limpias, la mejora de las condiciones laborales y la gestión adecuada de residuos. Además, el análisis de estos impactos debe estar alineado con las regulaciones ambientales y las expectativas de responsabilidad social empresarial.

Tabla 9.

Resumen Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida de la Barita

Fase	Impactos Ambientales	Impactos Sociales	Impactos Económicos
Extracción y Producción de Materias Primas	Alteración de suelos y hábitats naturales	Desplazamiento de comunidades locales Ruido y alteración del paisaje	Costos de extracción
	Contaminación de aguas subterráneas		Costos asociados a permisos y regulaciones ambientales
	Emisión de CO ₂ y polvo		
Fabricación del Aditivo	Consumo de energía y recursos.	Condiciones laborales de los trabajadores	Costos operativos de la planta
	Generación de residuos sólidos y emisiones de CO ₂ .	Posibles riesgos para la salud	Inversión en maquinaria de procesamiento
Transporte y Distribución	Emisiones de CO ₂ debido al transporte.	Congestión del tráfico local	Costos de transporte y distribución
	Desperdicio de combustible y contaminación del aire.		Daños a infraestructuras locales

Fase	Impactos Ambientales	Impactos Sociales	Impactos Económicos
Uso en la Perforación Petrolera	Pérdida de fluido a la formación (contaminación potencial) Generación de residuos sólidos y líquidos	Riesgos laborales en el manejo de lodo de perforación	Costos de aditivos y equipos de perforación Costos operativos para manejo del lodo.
Gestión de Residuos y Disposición Final	Contaminación del suelo y aguas si no se gestionan adecuadamente Emisiones generadas durante el tratamiento de residuos.	Afectación de las comunidades cercanas a los sitios de disposición final.	Costos asociados con la disposición final y tratamiento de residuos.

Nota. En el listado anterior se ha identificado los impactos de los componentes bióticos, abióticos y sociales en las fases del ciclo de vida de a barita.

3.7.3. Impactos del Carbonato de Calcio

El carbonato de calcio es un aditivo ampliamente utilizado en la industria de perforación para lodos, particularmente como agente de control de viscosidad y densificación. Su ciclo de vida implica varios impactos ambientales, sociales y económicos que deben ser evaluados para implementar prácticas sostenibles en cada una de sus fases. A continuación, se detallan los impactos relevantes en cada fase.

3.7.3.1. Extracción y Producción de Materias Primas

Impactos Ambientales. La extracción de carbonato de calcio implica la alteración de suelos y hábitats naturales, lo que puede llevar a la destrucción de ecosistemas y la pérdida de biodiversidad. Además, la contaminación de aguas superficiales y subterráneas es una preocupación debido a los productos químicos y el polvo generado durante el proceso. Las

emisiones de CO₂ también están asociadas con las operaciones de extracción debido al uso de maquinaria pesada.

Impactos Sociales. La actividad minera puede generar desplazamientos de comunidades locales y la alteración del paisaje de la región, afectando negativamente la calidad de vida. Además, los trabajadores en las minas pueden estar expuestos a riesgos de salud debido a la exposición al polvo y a las condiciones laborales no siempre ideales.

Impactos Económicos. La extracción de carbonato de calcio genera costos operativos significativos, incluyendo la maquinaria pesada utilizada para extraer el mineral y el cumplimiento de regulaciones ambientales. Las empresas también deben invertir en infraestructura para las operaciones mineras y el mantenimiento de equipos.

3.7.3.2. Fabricación del Aditivo (Carbonato de Calcio Procesado)

Impactos Ambientales. La fabricación del carbonato de calcio implica el consumo de grandes cantidades de energía debido a la molienda y el proceso de refinamiento del mineral. Durante estas etapas, se generan emisiones de CO₂ y residuos sólidos que deben ser gestionados adecuadamente para evitar la contaminación del entorno.

Impactos Sociales. El proceso de fabricación puede exponer a los trabajadores a condiciones laborales peligrosas debido a la exposición al polvo de carbonato de calcio. Además, la planta de procesamiento puede generar ruido y alteraciones en las comunidades cercanas debido a las actividades industriales.

Impactos Económicos. Los costos operativos de las plantas de procesamiento incluyen el uso de energía, materiales auxiliares y el mantenimiento de maquinaria. Además, las inversiones en tecnología de procesamiento son necesarias para garantizar la calidad del producto final y cumplir con las regulaciones de seguridad.

3.7.3.3. Transporte y Distribución

Impactos Ambientales. El transporte de carbonato de calcio hacia las plataformas de perforación implica el uso de vehículos pesados que generan emisiones de CO₂, contribuyendo al cambio climático. También se produce un desperdicio de combustible si las rutas no son óptimas, y los residuos de empaques pueden contribuir a la contaminación si no se gestionan adecuadamente.

Impactos Sociales. El transporte de grandes volúmenes de carbonato de calcio puede generar congestión del tráfico en las rutas de transporte, afectando la vida cotidiana de las personas que viven cerca de estas rutas. También puede aumentar el riesgo de accidentes viales relacionados con el paso de camiones pesados.

Impactos Económicos. Los costos asociados con el *transporte y la logística* de carbonato de calcio son elevados, especialmente por la necesidad de vehículos especializados para el transporte de productos pesados y la infraestructura vial utilizada. Además, los daños a las infraestructuras locales (puentes, carreteras) también pueden generar costos adicionales.

3.7.3.4. Uso en la Perforación Petrolera

Impactos Ambientales. El uso de carbonato de calcio en los lodos de perforación puede generar pérdida de fluido hacia las formaciones geológicas, lo que puede ocasionar contaminación del suelo y las aguas subterráneas si no se maneja adecuadamente. Además, la generación de residuos sólidos y líquidos es inevitable durante las operaciones de perforación y debe ser gestionada para evitar impactos negativos en el medio ambiente.

Impactos Sociales. La manipulación de lodos de perforación que contienen carbonato de calcio puede generar riesgos laborales, especialmente por la exposición al polvo y a otros

productos químicos. También es importante tener en cuenta los riesgos de accidentes relacionados con las operaciones de perforación.

Impactos Económicos. El uso de carbonato de calcio en los lodos de perforación implica un costo significativo relacionado con la compra de aditivos y la operación de equipos de perforación. Además, los costos adicionales para manejar y desechar los residuos generados por los lodos también son una parte importante de los gastos operativos.

3.7.3.5. Gestión de Residuos y Disposición Final

Impactos Ambientales. La disposición final de los lodos de perforación que contienen carbonato de calcio puede generar contaminación del suelo y las aguas si los residuos no se manejan adecuadamente. La emisión de gases durante el tratamiento de residuos es otro posible impacto si se incineran o descomponen sin la tecnología adecuada.

Impactos Sociales. Las comunidades cercanas a los sitios de disposición final pueden verse afectadas por la contaminación ambiental. La exposición prolongada a residuos mal gestionados puede afectar la salud de los residentes cercanos.

Impactos Económicos. La gestión de residuos de carbonato de calcio implica costos significativos asociados con el tratamiento y la disposición final. Si los residuos se reciclan o reutilizan, también se deben hacer inversiones en tecnologías de reciclaje para reducir el impacto ambiental.

La Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida (EICV) del carbonato de calcio revela que su ciclo de vida tiene implicaciones importantes para el medio ambiente, las comunidades y la economía. Desde la extracción hasta la gestión de residuos, cada fase tiene impactos que deben ser mitigados mediante el uso de tecnologías más limpias, mejores prácticas laborales y una gestión adecuada de los residuos. Para reducir los efectos negativos de su ciclo de vida, las

empresas deben integrar prácticas sostenibles que minimicen los impactos y optimicen la eficiencia en cada fase.

Tabla 10.

Resumen Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida del Carbonato de Calcio

Fase	Impactos Ambientales	Impactos Sociales	Impactos Económicos
Extracción y Producción de Materias Primas	Alteración de suelos y hábitats naturales.	Desplazamiento de comunidades locales. Alteración del paisaje y del entorno natural.	Costos de extracción y permisos ambientales.
	Contaminación de aguas superficiales y subterráneas. Emisiones de CO ₂ y polvo.		Costos operativos de maquinaria y equipos.
Fabricación del Aditivo	Consumo de energía y recursos.	Condiciones laborales en la planta de fabricación.	Costos operativos asociados a la planta de procesamiento.
	Emisiones de CO ₂ durante el proceso de trituración y molienda	Posibles riesgos para los trabajadores debido a la exposición al polvo.	Inversión en maquinaria y tecnología.
Transporte y Distribución	Emisiones de CO ₂ por el transporte.	Congestión del tráfico en las rutas de transporte.	Costos de transporte y logística.
	Desperdicio de combustible y generación de residuos de empaques.		Impacto de la infraestructura local debido al tránsito pesado.
Uso en la Perforación Petrolera	Pérdida de fluido a la formación (contaminación potencial).	Riesgos laborales durante la manipulación de los lodos de perforación.	Costos de aditivos y equipos de perforación. Costos operativos relacionados con la

Fase	Impactos Ambientales	Impactos Sociales	Impactos Económicos
	Generación de residuos sólidos y líquidos.		mezcla y manejo del lodo.
Gestión de Residuos y Disposición Final	Contaminación del suelo y aguas si no se gestionan adecuadamente. Emisiones durante el tratamiento de residuos.	Afectación de las comunidades cercanas a los sitios de disposición final.	Costos asociados al tratamiento y disposición final de residuos. Inversión en tecnologías de reciclaje o tratamiento.

Nota. En el listado anterior se ha identificado los impactos de los componentes bióticos, abióticos y sociales en las fases del ciclo de vida del carbonato de calcio.

3.7.4. Impactos de la Celulosa Polianionica

La celulosa polianiónica (PAC) es un aditivo ampliamente utilizado en la industria de perforación para controlar la viscosidad de los lodos. A lo largo de su ciclo de vida, desde la extracción hasta la gestión de residuos, es importante evaluar los impactos que genera en el medio ambiente, las comunidades y la economía. A continuación, se detallan los impactos más relevantes en cada fase.

3.7.4.1. Extracción y Producción de Materias Primas

Impactos Ambientales. La extracción de celulosa implica la utilización de recursos naturales, principalmente madera o productos derivados de fuentes vegetales. El proceso de modificación química de la celulosa para crear PAC puede implicar el uso de productos químicos peligrosos que tienen un impacto negativo en el ambiente si no se gestionan adecuadamente. Además, durante la extracción y procesamiento de estos materiales, se generan emisiones de CO₂ y residuos derivados de los procesos químicos (Bautista Cuadros & Flórez Barreto, 2011).

Impactos Sociales. Las condiciones laborales en las plantaciones de madera o en las instalaciones de extracción de celulosa pueden ser peligrosas para los trabajadores. Además, la exposición a productos químicos en el proceso de modificación de la celulosa puede poner en riesgo la salud de los empleados. Es importante también considerar los impactos sobre las comunidades locales, especialmente si se realizan prácticas no sostenibles en la extracción de madera.

Impactos Económicos. La extracción de celulosa para la producción de PAC genera costos operativos asociados con la obtención de materia prima, el uso de maquinaria, y el cumplimiento de las normas ambientales. Además, el proceso de modificación química de la celulosa también representa una inversión significativa en recursos, tanto humanos como materiales.

3.7.4.2. Fabricación del Aditivo (Celulosa Polianiónica)

Impactos Ambientales. La fabricación de PAC involucra una modificación química de la celulosa que requiere gran cantidad de energía y puede generar residuos líquidos y sólidos que contienen productos químicos. Estas emisiones pueden tener un impacto ambiental si no se gestionan adecuadamente. El proceso también contribuye a las emisiones de CO₂ derivadas de la electricidad utilizada en la planta de fabricación.

Impactos Sociales. El proceso de fabricación puede exponer a los trabajadores a riesgos de salud derivados de la exposición a sustancias químicas utilizadas en la modificación de la celulosa. Además, la planta de producción puede generar ruido y emisiones de polvo, afectando la calidad de vida de las comunidades cercanas.

Impactos Económicos. Los costos operativos en las fábricas de PAC son altos debido a la necesidad de energía para los procesos de modificación y la gestión de residuos generados.

Además, las fábricas deben invertir en tecnologías de modificación química para producir PAC de alta calidad, lo que aumenta los costos de producción.

3.7.4.3. Transporte y Distribución

Impactos Ambientales. El transporte de PAC hacia las plataformas de perforación genera emisiones de CO₂, especialmente si se realiza mediante camiones pesados. Además, los empaques utilizados en el transporte pueden generar residuos si no se gestionan adecuadamente, contribuyendo a la contaminación.

Impactos Sociales. El transporte de grandes volúmenes de PAC puede generar congestión del tráfico, especialmente si las rutas de distribución pasan por áreas densamente pobladas. Además, la exposición al riesgo de accidentes viales también es una preocupación en el transporte de materiales pesados.

Impactos Económicos. Los costos de transporte y logística son una parte significativa de los gastos asociados con el PAC. Las infraestructuras viales también se ven afectadas por el paso constante de vehículos pesados, lo que puede generar costos adicionales de mantenimiento a nivel local.

3.7.4.4. Uso en la Perforación Petrolera

Impactos Ambientales. El uso de PAC en los lodos de perforación genera pérdidas de fluido hacia las formaciones subterráneas, lo que podría ocasionar contaminación del suelo y las aguas subterráneas si no se maneja adecuadamente. Además, durante la perforación, se genera residuos sólidos y líquidos que deben ser gestionados para evitar impactos ambientales negativos.

Impactos Sociales. El manejo de lodos de perforación que contienen PAC conlleva riesgos laborales, como la exposición al polvo y otros productos químicos. También pueden ocurrir accidentes relacionados con el manejo y transporte de los lodos.

Impactos Económicos. El uso de PAC en los lodos de perforación genera costos asociados a la compra del aditivo y los equipos de perforación necesarios para mantener la calidad del lodo. Además, el manejo de residuos generados por la perforación y el tratamiento de los lodos representa un costo significativo durante las operaciones.

3.7.4.5. Gestión de Residuos y Disposición Final

Impactos Ambientales. La gestión de residuos de lodos de perforación que contienen PAC puede generar contaminación del suelo y las aguas si no se gestionan adecuadamente. La emisión de gases durante la incineración o tratamiento de residuos también contribuye al cambio climático.

Impactos Sociales. Las comunidades cercanas a los sitios de disposición final pueden verse afectadas por contaminación de suelos y aguas si los residuos no son gestionados adecuadamente. La salud de las personas que viven cerca de estos sitios puede verse comprometida si se produce una contaminación significativa.

Impactos Económicos. La gestión de residuos de PAC puede generar costos elevados asociados con el tratamiento y la disposición final de los residuos. Si los residuos son reciclados o reutilizados, se requiere tecnología avanzada para el tratamiento, lo que implica inversiones adicionales.

El ciclo de vida de la celulosa polianiónica (PAC) tiene impactos ambientales, sociales y económicos significativos, desde la extracción de la materia prima hasta la gestión final de los residuos. A lo largo de todas las fases, es crucial aplicar prácticas sostenibles que minimicen los

efectos negativos, como el uso eficiente de recursos, la gestión adecuada de residuos y la protección de la salud de los trabajadores. Además, la implementación de tecnologías de reciclaje y tratamiento de residuos ayudará a reducir los impactos ambientales y los costos asociados a la disposición final.

Tabla 11.

Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida de la Celulosa Polianiónica

Fase	Impactos Ambientales	Impactos Sociales	Impactos Económicos
Extracción y Producción de Materias Primas	Consumo de recursos naturales (madera o productos derivados de la celulosa)	Condiciones laborales en la extracción de madera o cultivos de celulosa	Costos asociados a la obtención de materia prima
	Uso de productos químicos para la modificación de la celulosa	Posibles efectos sobre la salud de los trabajadores debido a la exposición a químicos	Costos operativos en el procesamiento de celulosa
	Emisiones de CO ₂ y residuos de procesos químicos		
Fabricación del Aditivo	Consumo de energía en la modificación química	Exposición al riesgo de los trabajadores a sustancias químicas durante la fabricación	Costos operativos de la planta de fabricación
	Generación de residuos líquidos y sólidos		Inversión en equipos y tecnologías de modificación química
	Emisiones de CO ₂ debido a los procesos de producción		

Fase	Impactos Ambientales	Impactos Sociales	Impactos Económicos
Transporte y Distribución	Emisiones de CO ₂	Congestión en las rutas	Costos de transporte y
	generadas por el	de transporte	distribución
	transporte	Potencial impacto en las	Daños a infraestructuras
	Residuos de empaques y embalajes	comunidades cercanas a las rutas de distribución	locales debido al paso de camiones pesados
Uso en la Perforación Petrolera	Pérdida de fluido hacia formaciones geológicas	Riesgos laborales	Costos relacionados con la compra de PAC y el
	Potencial contaminación del suelo y aguas subterráneas	asociados a la manipulación de lodos de perforación	manejo del lodo de perforación
	Generación de residuos sólidos y líquidos		Costos operativos durante la perforación
Gestión de Residuos y Disposición Final	Contaminación de suelos y aguas si no se gestionan adecuadamente	Posibles impactos sobre las comunidades cercanas a los sitios de disposición final	Costos de gestión de residuos y disposición final
	Emisiones durante el tratamiento y disposición final de residuos		Inversión en tecnologías de tratamiento y reciclaje

Nota. En el listado anterior se ha identificado los impactos de los componentes bióticos, abióticos y sociales en las fases del ciclo de vida de la celulosa polianiónica.

3.7.5. Evaluación General del Impacto

Tiene como finalidad identificar y cuantificar los efectos ambientales asociados a cada etapa del ciclo de vida de los lodos de perforación en la industria petrolera de Colombia. Las categorías de impacto ambiental seleccionadas para este estudio se agrupan en tres ejes principales:

3.7.5.1. Impactos en la salud humana

Toxicidad humana (HT). Evaluación de sustancias químicas liberadas por los aditivos y su posible afectación a trabajadores y comunidades cercanas.

Formación de material particulado (PMF). Evaluación de emisiones generadas en el manejo de aditivos y residuos.

3.7.5.2. Impactos en el Ecosistema (Biótico y Abiótico)

Eutrofización (EUF). Potencial contaminación del agua por lixiviación de componentes químicos de los lodos.

Ecotoxicidad acuática y terrestre (ET). Evaluación de la toxicidad de los aditivos que pueden afectar la biodiversidad.

3.7.5.3. Impactos en el uso de recursos (Social)

Cambio climático (GWP). Emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a la producción, transporte y disposición de los lodos.

Consumo de agua (WU). Evaluación del volumen de agua utilizado en la formulación de los lodos y su impacto en zonas con estrés hídrico.

Consumo energético (CED). Cuantificación de la energía utilizada en la fabricación y transporte de los aditivos, así como en la operación del sistema de circulación.

3.7.5.4. Clasificación y Caracterización de Impactos

Se establecen los flujos de materiales y emisiones a partir del Inventario del Ciclo de Vida (ICV), y se asignan a las categorías de impacto mencionadas:

Tabla 12.

Clasificación y Caracterización de Impactos

Flujo de entrada/salida	Categoría de impacto	Descripción del impacto
Consumo de polímeros, bentonita, barita, inhibidores.	Cambio climático, Ecotoxicidad.	Producción y transporte generan emisiones de CO ₂ y residuos químicos.
Consumo de agua en la mezcla de lodos.	Uso de agua.	Alta demanda de agua, riesgo de agotamiento en zonas áridas.
Emisión de compuestos volátiles de los aditivos.	Toxicidad humana, Ecotoxicidad.	Pueden afectar la salud de trabajadores y comunidades cercanas.
Generación de residuos de lodo contaminado	Eutrofización, Toxicidad terrestre	Posible filtración de metales pesados y compuestos tóxicos al suelo y cuerpos de agua.
Consumo de diésel en bombas y equipos.	Cambio climático, Formación de material particulado	Contribuye a la emisión de CO ₂ y partículas contaminantes.

Nota. Luego de identificar los impactos se procede en la tabla anterior a caracterizar e identificar sus relacionamientos.

3.7.5.5. Normalización y Ponderación

Se puede identificar que un lodo producto de mezclar diferentes aditivos debe ser obtenido mientras se disminuye la cantidad de agua utilizada, también se requiera menor energía para su transporte y otras actividades, produzca una menor cantidad de residuos, y, por último, no emita compuestos tóxicos.

Para facilitar la interpretación de los resultados, los impactos caracterizados se comparan con valores de referencia de impactos ambientales globales y sectoriales. Se asignan ponderaciones en función de la criticidad de cada impacto en el contexto colombiano.

Valoración cualitativa del impacto

Tabla 13.

Valoración Cualitativa del Impacto

Impacto Ambiental	Barita	Bentonita	Carbonato de Calcio	Celulosa Aniónica
Cambio climático (GWP)	B	M	B	A
Consumo de agua (WU)	B	M	B	A
Ecotoxicidad (ET)	M	M	B	A
Toxicidad humana (HT)	M	M	B	A
Formación de material particulado (PMF)	M	M	B	A
Eutrofización (EUF)	B	M	B	A
Consumo energético (CED)	B	M	B	A

Nota. Ponderación final con las siguientes equivalencias, realizadas en el análisis cualitativo de impactos, B (Bajo), M (Medio), A (Alto).

A partir del análisis de impacto, se identifican los puntos críticos del sistema donde se pueden implementar mejoras.

Sustitución de Aditivos con menor impacto ambiental. Uso de aditivos biodegradables o de menor toxicidad.

Reducción del consumo de agua. Implementación de sistemas de recirculación de lodos.

Optimización del consumo energético. Uso de fuentes de energía más eficientes o alternativas renovables.

Mejora en la disposición final. Desarrollo de tecnologías para la reutilización o tratamiento de lodos contaminados.

La fase de interpretación del ciclo de vida tiene como objetivo analizar los resultados obtenidos en la Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida (EICV) para identificar oportunidades de mejora en la gestión de los lodos de perforación. Se enfocará en la identificación de los principales puntos críticos del sistema, su contribución a los impactos ambientales y la formulación de estrategias de optimización.

3.7.5.6. Identificación de Puntos Críticos

Los puntos críticos del sistema corresponden a las fases o procesos con mayor contribución a los impactos ambientales identificados en la EICV.

Tabla 14.

Puntos Críticos de Impacto en el Ciclo de Vida

Fase del sistema	Impactos más relevantes	Causa principal
Producción de aditivos	Cambio climático, Toxicidad humana y Ecotoxicidad	Procesos industriales y transporte de insumos químicos.

Preparación y mezcla de lodos	Consumo de agua, Generación de residuos	Uso de grandes volúmenes de agua y productos químicos.
Circulación del lodo en la perforación	Formación de material particulado, Consumo energético	Operación de bombas y desgaste de equipos.
Recuperación y tratamiento de lodos	Eutrofización, Toxicidad terrestre	Disposición inadecuada de los lodos contaminados.
Disposición final	Cambio climático, Ecotoxicidad	Transporte y métodos de confinamiento no sostenibles.

Nota. La producción y uso de aditivos, junto con la gestión final de los lodos, son las fases con mayor impacto ambiental en el ciclo de vida del sistema.

3.7.5.7. Limitaciones del ACV

A pesar de los esfuerzos para realizar un ACV riguroso, existen ciertas limitaciones que deben considerarse:

Disponibilidad de datos. Muchos de los componentes y aditivos utilizados en los lodos de perforación corresponden a formulaciones químicas registradas como propiedad intelectual de dichas compañías, lo cual implica que esta información se encuentra protegida por normas de confidencialidad y derechos comerciales, formando parte de su cadena de valor estratégica.

Suposiciones y estimaciones. Debido a la falta de información detallada en algunas fases del ciclo de vida, se realizaron ciertas suposiciones que pueden influir en los resultados.

Alcance del Estudio. No se incluyeron algunos impactos indirectos, como el transporte de equipos y el mantenimiento de infraestructura.

Variabilidad en la industria. Las prácticas de gestión de lodos varían entre empresas y regiones, lo que puede afectar la aplicabilidad general de los resultados.

Factores económicos y regulatorios. No se evaluaron los costos económicos detallados ni la influencia de futuras regulaciones ambientales en la viabilidad de las estrategias propuestas.

3.7.5.8. Análisis de Sensibilidad

Se analiza cómo cambios en ciertas variables pueden afectar los resultados del ACV.

Ejemplo 1. Sustitución de aditivos convencionales por alternativas biodegradables

Reducción del impacto en toxicidad humana y ecotoxicidad.

Ejemplo 2. Uso de sistemas de recirculación de lodos, Disminución del consumo de agua.

Ejemplo 3. Uso de fuentes de energía renovable en el bombeo, reducción de emisiones de CO₂, implementar alternativas en el tipo de aditivos y mejorar el manejo de lodos genera reducciones significativas en el impacto ambiental.

4. Cumplimiento normativo

4.1. Cumplimiento normativo y oportunidades de mejora

La gestión de los residuos generados por los aditivos de perforación debe cumplir con las normativas ambientales locales e internacionales, que están diseñadas para proteger el medio ambiente y la salud pública. El cumplimiento de estas regulaciones es crucial para evitar sanciones legales y para minimizar el impacto ambiental de las actividades de perforación. Entre las normativas clave se incluyen:

Normativas sobre residuos peligrosos. En muchos países, los residuos de perforación que contienen aditivos y otros productos químicos deben ser tratados como residuos peligrosos.

Esto implica que deben ser gestionados de acuerdo con regulaciones específicas para su transporte, almacenamiento y disposición.

Normativas ambientales locales. Cada país o región puede tener regulaciones adicionales sobre el manejo de residuos de perforación. Estas regulaciones incluyen límites sobre la cantidad de residuos que pueden ser depositados en vertederos, los requisitos para el tratamiento de los lodos de perforación, y las especificaciones sobre el reciclaje de aditivos y materiales.

Directrices internacionales sobre la gestión de residuos. Organizaciones internacionales, como la Organización Internacional del Trabajo (OIT) y la Organización de las Naciones Unidas (ONU), proporcionan directrices para el manejo seguro y responsable de los residuos industriales, incluidos los generados por la industria petrolera.

Oportunidades de mejora. A pesar de las normativas existentes, siempre hay oportunidades para mejorar las prácticas de gestión de residuos en la industria de perforación. Algunas de las estrategias incluyen:

Desarrollo de aditivos más sostenibles. La investigación y el desarrollo de nuevos aditivos biodegradables o menos tóxicos puede reducir la carga de residuos peligrosos generados durante las operaciones de perforación.

Implementación de prácticas de reciclaje avanzadas. Mejorar las tecnologías de reciclaje y reutilización de aditivos y lodos de perforación puede reducir significativamente la cantidad de residuos generados y disminuir la dependencia de vertederos y otros métodos de disposición.

Mejorar la eficiencia en el tratamiento de residuos. El uso de tecnologías de tratamiento más eficientes, como el tratamiento biológico y térmico avanzado, puede mejorar la efectividad

del tratamiento de residuos, reduciendo el impacto ambiental y el costo asociado a la disposición final.

La gestión de residuos generados por los aditivos de perforación base agua es un desafío significativo, pero también una oportunidad para mejorar la sostenibilidad de las operaciones de perforación. El cumplimiento de las normativas es esencial, pero también lo es la implementación de prácticas de mejora continua en la gestión de estos residuos. A medida que la industria avanza hacia una mayor sostenibilidad, es fundamental adoptar tecnologías innovadoras y prácticas responsables que minimicen los impactos ambientales y maximicen la reutilización de recursos (Buendía Pretel, 2016).

4.1.1. Comparación de Parámetros Ambientales y Económicos

La evaluación del impacto ambiental y los costos económicos asociados a cada etapa del ciclo de vida de los aditivos de perforación base agua es esencial para comprender la sostenibilidad de estas sustancias dentro de la industria petrolera. Este análisis permite no solo identificar las áreas con mayor impacto ambiental, sino también proporcionar datos valiosos para mejorar la eficiencia económica y ecológica del proceso.

Optimización de la Selección de Aditivos. La sustitución de aditivos tradicionales por alternativas más ecológicas o biodegradables podría reducir significativamente los impactos negativos durante las fases de extracción, preparación y disposición. Por ejemplo, el uso de polímeros biodegradables y aditivos no tóxicos disminuiría la contaminación y facilitaría la gestión de residuos. También se podrían investigar aditivos derivados de fuentes renovables o recicladas, lo que disminuiría la dependencia de recursos no renovables.

Mejoras en los Procesos de Producción. Las industrias pueden adoptar tecnologías más limpias en la fabricación y formulación de aditivos, tales como la mejora de la eficiencia

energética de las plantas de producción y la implementación de sistemas de captura y reutilización de emisiones. Asimismo, los procesos de polimerización y secado podrían optimizarse para reducir el consumo de energía y la generación de residuos peligrosos.

Optimización del Transporte. Mejorar la logística de transporte de los aditivos, por ejemplo, utilizando transporte multimodal, podría reducir las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas al traslado de materiales. Además, la incorporación de tecnologías más limpias, como camiones eléctricos o de bajo consumo, podría mitigar el impacto del transporte en el medio ambiente.

Reciclaje y Reutilización de Aditivos. Implementar procesos de reciclaje de aditivos en las fases de perforación y gestión de residuos sería una forma efectiva de reducir los residuos generados y disminuir el uso de recursos naturales. Este proceso podría implicar la reutilización de los lodos de perforación tratados y la recuperación de aditivos que aún sean funcionales para su aplicación en nuevos pozos.

Mejora en la Gestión de Residuos. La adopción de mejores prácticas para el manejo de residuos, como el tratamiento biológico y la deshidratación de lodos de perforación, puede reducir el impacto ambiental asociado con la disposición de residuos. Además, la mejora de las infraestructuras de tratamiento y disposición final garantizaría que los residuos peligrosos no contaminen los ecosistemas.

El ciclo de vida de los aditivos de perforación base agua presenta varios puntos críticos en cuanto a su impacto ambiental y económico. Si bien cada etapa del ciclo de vida genera efectos negativos, existen múltiples oportunidades de mejora que pueden contribuir a reducir la huella de carbono y mejorar la eficiencia de los procesos. La adopción de tecnologías más limpias, la optimización del uso de los recursos y la mejora en la gestión de residuos no solo

ayudarían a mitigar los impactos ambientales, sino también a generar beneficios económicos a largo plazo.

Normativa Vigente en Colombia La regulación del manejo de residuos y seguridad industrial en la industria petrolera está regida por varias normativas, entre ellas:

Resolución 0631 de 2015: Establece los límites de vertimientos industriales.

Ley 1333 de 2009: Regula los procesos sancionatorios ambientales.

Decreto 4741 de 2005. Controla la gestión de residuos peligrosos. Estas normativas establecen los protocolos para garantizar un manejo seguro e integral de los aditivos de los lodos de perforación.

4.1.2. Selección de aditivos con base en parámetros ambientales y económicos

Para establecer la opción más viable en la industria petrolera, se realizará un análisis comparativo de los aditivos en función de:

Impacto ambiental. Evaluación de biodegradabilidad, toxicidad y potencial de reciclaje.

Costo y disponibilidad. Comparación de precios y accesibilidad en el mercado colombiano.

Eficiencia operativa. Análisis de desempeño en la optimización del lodo de perforación.

El análisis del ciclo de vida de los aditivos utilizados en lodos de perforación permite identificar oportunidades de mejora en su gestión. La selección de aditivos basada en criterios ambientales y económicos contribuirá a la sostenibilidad y eficiencia de las operaciones de perforación en Colombia.

4.2. Normativa vigente colombiana para el ciclo de vida

El manejo adecuado de los residuos y la seguridad en el uso de los aditivos del lodo de perforación en Colombia están regulados por diversas normativas ambientales y de seguridad

industrial. Estas regulaciones establecen los protocolos y requisitos necesarios para garantizar una gestión segura e integral durante todo el ciclo de vida de los aditivos. A continuación, se presenta un análisis detallado de la normativa vigente.

4.2.1. Principales Normas y Regulaciones Ambientales

El marco normativo ambiental en Colombia establece lineamientos estrictos para la gestión de residuos generados por la industria petrolera, con el fin de minimizar el impacto ambiental de los lodos de perforación y sus aditivos. Estas regulaciones buscan garantizar la protección de los recursos naturales, la sostenibilidad de las operaciones y la reducción de riesgos asociados a la contaminación del suelo y cuerpos de agua.

La **Ley 99 de 1993** es la base del sistema ambiental en Colombia, creando el Sistema Nacional Ambiental (SINA) y estableciendo principios fundamentales de desarrollo sostenible. A través de esta normativa, se define la autoridad competente encargada de regular las actividades industriales con impacto ambiental, incluyendo la industria petrolera. Esta ley otorga a las entidades ambientales facultades para supervisar y sancionar incumplimientos en la gestión de residuos (*Ley 99 de 1993 - Gestor Normativo, s. f.*).

El **Decreto 4741 de 2005** regula específicamente el manejo de residuos peligrosos, determinando las obligaciones de los generadores, transportadores y gestores de estos desechos. Esta norma establece que las empresas petroleras deben implementar sistemas de trazabilidad y planes de manejo ambiental para el tratamiento, almacenamiento y disposición final de los residuos peligrosos, incluyendo aquellos derivados de los aditivos del lodo de perforación. Además, promueve la adopción de tecnologías limpias y procesos de minimización de residuos. (*Decreto 4741 de 2005 - Gestor Normativo, s. f.*).

En relación con el vertimiento de aguas residuales, la **Resolución 0631 de 2015** fija los límites máximos permisibles para la descarga de efluentes líquidos en cuerpos de agua y sistemas de alcantarillado. Dado que la perforación petrolera genera grandes volúmenes de aguas residuales con contaminantes provenientes de los lodos, esta norma obliga a las empresas a tratar sus desechos líquidos antes de su disposición, reduciendo la carga contaminante y protegiendo los ecosistemas acuáticos (*Resolución 631 de 2015* -, s. f.).

El **Decreto 1076 de 2015**, conocido como el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible, compila y unifica varias normas ambientales aplicables a la industria. Dentro de este decreto se establecen los procedimientos para la obtención de licencias ambientales, permisos de vertimientos y regulaciones sobre la gestión de residuos peligrosos. Esta normativa es clave para garantizar que las actividades petroleras cumplan con los estándares ambientales requeridos en cada una de sus fases operativas (*Decreto 1076 de 2015*, s. f.).

Por otro lado, la **Ley 1252 de 2008** prohíbe la producción, importación y manejo inadecuado de residuos peligrosos, estableciendo sanciones severas para aquellas empresas que no cumplan con los lineamientos ambientales. Esta norma refuerza la responsabilidad del generador y promueve prácticas de gestión responsable de desechos industriales, fomentando la reducción y reutilización de residuos en lugar de su disposición final (*Ley 1252 de 2008* -, s. f.).

La **Resolución 1433 de 2004** define criterios técnicos específicos para la gestión ambiental de residuos generados en la exploración y producción de hidrocarburos. Esta resolución enfatiza la necesidad de implementar estrategias de reducción, tratamiento y disposición segura de los residuos de perforación, con especial énfasis en los lodos base agua y sus aditivos. Su cumplimiento es crucial para evitar impactos negativos en el entorno (*Resolución 1433 de 2004* -, s. f.).

Finalmente, el **Decreto 1609 de 2002** regula el transporte de sustancias peligrosas, estableciendo lineamientos para el embalaje, rotulación, almacenamiento y manejo durante el traslado de estos materiales. En el contexto de los lodos de perforación, esta normativa es vital para asegurar que los aditivos y residuos peligrosos sean transportados con medidas de seguridad adecuadas, reduciendo los riesgos de derrames o contaminación accidental (*Decreto 1609 de 2002 - Gestor Normativo, s. f.*).

El cumplimiento de estas regulaciones es fundamental para que la industria petrolera opere de manera responsable y sostenible. Su correcta aplicación no solo minimiza los impactos ambientales, sino que también previene sanciones legales y refuerza el compromiso de las empresas con la protección de los ecosistemas y la salud pública. Implementar sistemas efectivos de control y monitoreo, así como adoptar tecnologías de gestión ambiental innovadoras, representa una oportunidad clave para mejorar el desempeño ambiental del sector de hidrocarburos en Colombia.

La normativa ambiental en Colombia busca garantizar el uso sostenible de los recursos naturales y la adecuada gestión de los residuos generados en la industria petrolera. A continuación, se presentan las principales regulaciones aplicables al manejo de los lodos de perforación y sus aditivos:

Tabla 15.

Normas y Regulaciones Hidrocarburos Colombia

Norma/Regulación	Descripción
Ley 99 de 1993	Crea el Sistema Nacional Ambiental (SINA) y establece principios de desarrollo sostenible en Colombia.
Decreto 4741 de 2005	Regula el manejo de residuos peligrosos y su correcta disposición.

Resolución 0631 de 2015	Fija los límites permisibles de vertimientos industriales a cuerpos de agua.
Decreto 1076 de 2015	Define las normas ambientales en el sector industrial, incluyendo la disposición de residuos.
Ley 1252 de 2008	Prohíbe la introducción y manejo inadecuado de residuos peligrosos en el país.
Resolución 1433 de 2004	Establece parámetros para la disposición de residuos generados en la exploración y producción de hidrocarburos.

Nota. Lo anterior es una compilación normativa ambiental resultante del proceso de investigación.

4.2.2. Normas de Seguridad y Salud Ocupacional

El manejo de sustancias químicas peligrosas, como los aditivos del lodo de perforación, requiere el cumplimiento de estrictas normativas de seguridad industrial. En Colombia, estas regulaciones incluyen

Tabla 16.

Normas de Seguridad y Salud Ocupacional

Norma/Regulación	Descripción
Resolución 2400 de 1979	Establece normas generales de seguridad en el trabajo.
Decreto 1443 de 2014	Regula el Sistema de Gestión de Seguridad y Salud en el Trabajo (SG-SST).
Resolución 5018 de 2019	Obliga a las empresas a implementar protocolos de manejo de sustancias químicas peligrosas.

Norma Técnica Colombiana NTC 1692	Especifica requisitos para el almacenamiento y manipulación de productos químicos.
Resolución 0312 de 2019	Determina estándares mínimos del SG-SST en actividades industriales.
Decreto 1072 de 2015	Reglamenta la seguridad y salud en el trabajo en el sector de hidrocarburos.

Nota. Lo anterior es una compilación normativa en seguridad y salud ocupacional resultante del proceso de investigación.

4.2.2.1. Protocolos de Manejo Seguro de Aditivos del Lodo

Para garantizar la seguridad de los trabajadores y la protección ambiental, es fundamental seguir protocolos estrictos en cada fase del ciclo de vida de los aditivos del lodo de perforación:

Almacenamiento y Transporte.

Segregar los productos químicos según su compatibilidad.

Etiquetado adecuado conforme a la normatividad del SG-SST.

Uso de contenedores certificados para evitar derrames y fugas.

Implementación de planes de contingencia para emergencias químicas.

Manejo y Aplicación:

Implementación de fichas de seguridad (MSDS) en cada sitio de operación.

Uso de equipos de protección personal (EPP) adecuados para cada tipo de aditivo.

Capacitación continua del personal sobre riesgos y medidas preventivas.

Monitoreo constante de los niveles de exposición a químicos.

Disposición Final

Identificación de los residuos peligrosos según la clasificación de la Resolución 0631 de 2015.

Aplicación de tecnologías de tratamiento para la reducción de impactos ambientales.

Uso de rellenos de seguridad aprobados por la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA).

Implementación de estrategias de reutilización y valorización de residuos.

4.2.3. Representación Gráfica del Marco Regulatorio

A continuación, se presenta una tabla del marco normativo en el manejo de residuos y seguridad de los aditivos del lodo de perforación, relacionando cada etapa con las regulaciones aplicables:

Tabla 17.

Principales Normas y Regulaciones Ambientales

Etapas del Proceso	Descripción	Regulación Aplicable
Evaluación Ambiental Inicial	Análisis del impacto ambiental antes de iniciar actividades de perforación. Se requiere una licencia ambiental y la definición de medidas de mitigación.	Ley 99 de 1993: Marco general del Sistema Nacional Ambiental (SINA). Decreto 1076 de 2015: Licencias ambientales y permisos.
Selección y Uso de Aditivos del Lodo	Determinación de los aditivos químicos a emplear en la formulación del lodo base agua, considerando su impacto ambiental.	Resolución 1433 de 2004: Criterios técnicos para exploración y producción de hidrocarburos. - Ley 1252 de 2008: Regulación de residuos peligrosos.

Generación de Residuos y Emisiones	Producción de residuos líquidos y sólidos durante la perforación. Implementación de planes de gestión de residuos y minimización de impactos.	Decreto 4741 de 2005: Regulación sobre manejo de residuos peligrosos. - Resolución 0631 de 2015: Límites para vertimientos de aguas residuales.
Transporte y Almacenamiento de Residuos	Traslado de residuos peligrosos a instalaciones de almacenamiento o tratamiento autorizado. Cumplimiento de normas de seguridad para evitar contaminación.	Decreto 1609 de 2002: Transporte de sustancias peligrosas.
Tratamiento y Disposición Final	Aplicación de métodos de tratamiento y disposición final de residuos según estándares ambientales.	Ley 1252 de 2008: Prohibición del manejo inadecuado de residuos peligrosos. Decreto 1076 de 2015: Regulaciones sobre disposición ambiental de residuos.
Monitoreo y Control	Seguimiento del cumplimiento normativo y evaluación de la efectividad de las medidas ambientales implementadas.	Ley 99 de 1993: Supervisión ambiental y cumplimiento de normas. - Resolución 1433 de 2004: Criterios de seguimiento para la gestión de residuos.

Nota. Descripción normativa realizada a cada una de las fases.

Este marco regulatorio establece los lineamientos que las empresas del sector deben seguir para asegurar la sostenibilidad de sus operaciones y la reducción de impactos ambientales asociados a los aditivos del lodo de perforación base agua. Su aplicación permite una gestión

responsable de los residuos y garantiza el cumplimiento de las normativas ambientales en Colombia.

La normativa vigente en Colombia establece un marco riguroso para el manejo seguro e integral de los aditivos del lodo de perforación. El cumplimiento de estas regulaciones no solo garantiza la seguridad de los trabajadores y del medio ambiente, sino que también optimiza la eficiencia operativa de la industria petrolera. La implementación de tecnologías de tratamiento y estrategias de reducción de residuos representa una oportunidad clave para la mejora en la gestión ambiental del sector.

La identificación de oportunidades de mejora en este contexto permitirá el desarrollo de estrategias más sostenibles y responsables en la gestión de estos materiales, asegurando el cumplimiento normativo y minimizando los impactos ambientales de la industria de hidrocarburos en Colombia.

4.2.4. Informes y estudio de caso

La gestión de lodos de perforación y la seguridad en el uso de aditivos en el sector de hidrocarburos en Colombia están reguladas por un marco normativo específico. A continuación, se presentan informes, estudios de caso y noticias que ilustran la aplicación de estas leyes en el país.

Documento de Orientación para la Clasificación y Reporte de Residuos Peligrosos en el Sector de Hidrocarburos (2022): El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia publicó este documento con el objetivo de guiar a las empresas del sector en la correcta clasificación y reporte de los residuos peligrosos generados durante actividades como perforación exploratoria, producción, refinación y transporte de hidrocarburos. Se detallan los

tipos de residuos, incluyendo los lodos de perforación, y se proporcionan lineamientos para su gestión adecuada conforme a la normativa vigente (MinAmbiente, 2022).

Informe de la Contraloría General de la República sobre el Fracking (2019). Este informe analiza los potenciales impactos ambientales del uso de la técnica de fracturamiento hidráulico en Colombia. Aunque se centra en yacimientos no convencionales, aborda aspectos relacionados con la gestión de residuos y la aplicación de normativas ambientales pertinentes, proporcionando un contexto sobre la regulación de actividades extractivas en el país (Colombia Libre de Fracking, 2022).

Noticias de Interés

Desafíos en la Gestión de Residuos en el Sector Petrolero (2024). En noviembre de 2024, Ecopetrol enfrentó desafíos relacionados con la gestión de residuos y la aplicación de normativas ambientales, en medio de investigaciones y cambios en su administración. Estos eventos resaltan la importancia de una gestión ambiental rigurosa y el cumplimiento de las regulaciones en el sector de hidrocarburos.

Estos documentos y eventos evidencian la aplicación práctica de las normativas ambientales en Colombia, así como los desafíos y avances en la gestión de lodos de perforación y la seguridad en el uso de aditivos en el sector de hidrocarburos.

4.3. Normatividad Ambiental del Ciclo de Vida

La normatividad ambiental vinculada al ciclo de vida proporciona un marco esencial para evaluar y gestionar los impactos ambientales asociados con productos, servicios y procesos. Estas normativas buscan garantizar que las actividades humanas se desarrollen de manera sostenible, considerando todas las etapas del ciclo de vida desde una perspectiva técnica y sistemática.

Norma ISO 14040:2006: La norma ISO 14040:2006 establece los principios y el marco general para la realización de un Análisis del Ciclo de Vida (ACV). Este estándar internacional proporciona una metodología estructurada para identificar, cuantificar y evaluar los impactos ambientales generados por un producto o proceso a lo largo de su ciclo de vida. El ACV se organiza en cuatro fases fundamentales: definición del objetivo y alcance, análisis del inventario, evaluación del impacto ambiental e interpretación.

En la primera fase, la definición del objetivo y alcance, se delimita el propósito del estudio y se establecen los límites del sistema bajo análisis, asegurando que el enfoque esté alineado con las necesidades del proyecto. El análisis del inventario recopila datos sobre las entradas (materias primas, energía) y salidas (emisiones, residuos) asociadas al sistema. Posteriormente, la evaluación del impacto ambiental transforma estos datos en indicadores clave que permiten medir los efectos sobre el medio ambiente. Finalmente, la fase de interpretación integra los resultados obtenidos, ofreciendo conclusiones y recomendaciones para mejorar el desempeño ambiental y optimizar el uso de recursos.

Esta norma destaca por su enfoque integral y su capacidad para abordar los desafíos ambientales desde una perspectiva global, facilitando la implementación de estrategias efectivas de mitigación y sostenibilidad. Además, proporciona una base sólida para comparar productos y procesos, permitiendo a las organizaciones tomar decisiones informadas y fundamentadas (ISO, 2006)

5. Selección final

Existen diversos sistemas de lodo base agua, cada uno con formulaciones específicas que emplean distintos tipos de aditivos según las condiciones del pozo y los objetivos operacionales.

Sin embargo, en este estudio se enfocará la selección en los aditivos previamente evaluados, tomando como referencia el *Manual de Fluidos de Perforación – Baroid* y la ponencia del ingeniero de fluidos Sergio Guzmán, del Consejo Nacional de Ingenieros de Petróleos.

5.1. Resultado Comparativo

A continuación, se presentan los diferentes sistemas de lodo base agua. Cada sistema incluye una tabla con su formulación típica, detallando los aditivos utilizados, sus funciones específicas y las concentraciones comúnmente empleadas. (Guzmán, 2022).

BARASILC

Esta tabla detalla productos y da las concentraciones de productos típicas para formular un sistema BARASILC.

Tabla 18.

Aditivos Componentes de BARASILC

Aditivo	Función	Concentraciones típicas, lb/bbl (kg/m³)
Carbonato de Sodio	Removedor de calcio	Según se requiera
Soda cáustica/Potasa caustica	Fuente de alcalinidad	Según se requiera
BARASIL-S	Estabilizador de formación	40 - 80 (114 - 228)
DEXTROID	Agente de control de pérdida de fluido	2 - 8 (6 - 23)
PAC	Agente de control de pérdida de fluido	0.5 - 4 (1.4 - 11)
FILTER-CHEK	Agente de control de pérdida de fluido	2 - 8 (6 - 23)
BARAZAN PLUS	Viscosificador	0.2 - 2.5 (0.6 - 7)
BAROID	Agente densificante	Según se requiera
*AQUAGEL	Viscosificador/agente de	1 - 10 (3 - 29)

	suspensión	
*GEM GP/CP	Mejoramiento de lubricidad ROP	3 - 5 % en volumen
*BARACOR 95	Secuestrante/amortiguador de CO ₂	0.5 - 4 (1.4 - 11)
*BARA-DEFOAM HP	Desespumante	Según se requiera
*BARASCAV D	Secuestrante de oxígeno	0.2 - 1 (0.6 - 3)

Nota. El sistema BARASILC incluye bentonita y barita, presentes en el producto DEXTRID; celulosa polianiónica, incorporada mediante PAC; y barita, aportada también por BAROID, según lo expuesto por Guzmán (2022).

CARBONOX/AKTAFLO-S

Esta tabla detalla productos y sus concentraciones típicas para la formulación de un sistema CARBONOX/AKTAFLO-S.

Tabla 19.

Aditivos Componentes de CARBONOX/AKTAFLO-S

Aditivo	Función	Concentraciones típicas, lb/bbl (kg/m³)
AQUAGEL	Viscosificador/agente de suspensión	8 - 20 (23 - 57)
CARBONOX	Adelgazante/Agente de control de filtración	10 – 30 (29 - 86)
*Q-BROXIN	Adelgazante hasta 350°F (177°C)	2 – 6 (6 – 17)
Soda cáustica	Fuente de Alcalinidad	2 – 6 (6 – 17)
AKTAFLO-S	Surfactante	4 – 8 (11 – 23)
BAROID	Agente densificante	Según se requiera
BARO-TROL	Agente de control de filtración	4 – 8 (11 – 23)

*PAC-L	Agente de control de filtración	0.25 – 1-5 (0.7 – 4)
*PAC-R	hasta 300°F (149°C)	
*Cal	Fuente de alcalinidad	0.25 – 1.0 (0.7 – 3)
*BARODENSE	Agente densificante	Según se requiera
*BARANEX	Agente de control de filtración hasta 350°F (177°C)	4 – 6 (11 – 17)

Nota. El sistema CARBONOX/AKTAFLO-S contiene barita, presente en el producto BAROID, y celulosa polianiónica, incorporada mediante los aditivos PAC-L y PAC-R, según lo expuesto por Guzmán (2022).

CARBONOX / Q-BROXIN

Esta tabla detalla productos y sus concentraciones típicas para formular un sistema CARBONOX/Q-BROXIN.

Tabla 20.

Aditivos Componentes de CARBONOX/Q-BROXIN

Aditivo	Función	Concentraciones típicas, lb/bbl (kg/m³)
AQUAGEL	Viscosificador/agente de suspensión	10 – 35 (29 – 100)
Q-BROXIN	Adelgazante/agente de control de filtración hasta 350°F (177°C)	4 – 12 (11 – 34)
Soda cáustica	Fuente de alcalinidad	2 – 6 (6 – 17)
CARBONOX	Adelgazante/Agente de control de filtración	6 – 20 (17 – 57)
BAROID	Agente densificante	Según se requiera
*BARAZAN PLUS	Viscosificador hasta 275°F (135°C)	0.25 – 1.5 (0.7 – 4)
BARAZAN D PLUS		

*CC-16	Adelgazante/agente de control de filtración	6 – 12 (17 – 34)
*Cal	Fuente de alcalinidad	0.25 – 1.0 (0.7 – 3)
*PAC-R	Agente de control de filtración	0.25 – 1.5 (0.7 – 4)
*PAC-L	Agente de control de filtración	0.25 – 1.5 (0.7 – 4)
*DEXTRID	Agente de control de filtración	4 – 6 (11 – 17)
*BARODENSE	Agente densificante	Según se requiera
*BARANEX	Agente de control de filtración hasta 350°F (177°C)	2 – 6 (6 – 17)
*POLYAC	Agente de control de filtración hasta 400°F (204°C)	1 – 6 (3 – 17)

Nota. El sistema CARBONOX/AKTAFLO-S incluye barita, presente en el producto BAROID, y celulosa polianiónica, incorporada mediante los aditivos PAC-L y PAC-R, según lo expuesto por Guzmán (2022).

ENVIRO-THIN de bajo pH

Esta tabla detalla los productos y da sus concentraciones típicas para formular un sistema ENVIRO-THIN de bajo pH.

Tabla 21.

Aditivos Componentes de ENVIRO-THON de bajo pH

Aditivo	Función	Concentraciones típicas, lb/bbl (kg/m³)
AQUAGEL	Viscosificador	15 – 25 (43 – 71)
ENVIRO-THIN	Desfloculante	2 – 8 (6 – 23)
Soda cáustica	Fuente de alcalinidad	Según se requiera
CARBONOX	Agente de control de pérdida de fluido	2 – 10 (6 – 29)
PAC	Agente de control de pérdida	0.5 – 2.0 (1.4 – 6.0)

	de fluido	
BAROID	Agente densificante	Según se requiera
*EZ-MUD	Estabilizador de lutitas	0.25 – 0.5 (0.7 – 1.4)
*BARAZAN PLUS	Viscosificador	0.5 (1.4)
*BARO-TROL	Agente de control de pérdida de fluido	2 – 6 (6 – 17)
*BARASCAV	Secuestrante de oxígeno	0.1 – 0.2 (0.3 – 0.6)
*Bicarbonato de sodio	Agente de control de dureza	Según se requiera
*THERMA-THIN	Desfloculante	0.5 – 1.0 (1.4 – 3)

Nota. El sistema ENVIRO-THIN de bajo pH incluye celulosa polianiónica, incorporada mediante el aditivo PAC, según lo expuesto por Guzmán (2022).

EZ MUD

Esta tabla detalla los productos y da sus concentraciones típicas para formular un sistema EZ-MUD.

Tabla 22.

Aditivos Componentes de EZ MUD

Aditivo	Función	Concentraciones típicas, lb/bbl (kg/m³)
Soda cáustica/Potasa caustica	Fuente de alcalinidad (pH 9 – 10)	0.1 – 1.5 (0.3 – 4)
Carbonato de Sodio	Removedor de calcio	Según se requiera
AQUAGEL	Viscosificador/agente de suspensión	5 – 17.5 (14 – 50.0)
EZ-MUD	Estabilizador de lutitas	0.5 – 3 (1.4 – 9)
EZ-MUD DP		0.2 – 1 (0.6 – 3)
CELLEX	Agente de control de pérdida de fluido	0.2 – 3.5 (0.6 – 10.0)

PAC	Agente de control de pérdida de fluido	0.2 – 3.5 (0.6 – 10.0)
BAROID	Agente densificante	Según se requiera
BARAZAN PLUS	Viscosificador	0.1 – 10 (0.3 – 3)
*DEXTRID	Agente de control de filtración	Según se requiera
*BARO-TROL	Agente de control de pérdida de fluido	Según se requiera
*FILTER-CHEK	Agente de control de pérdida de fluido	Según se requiera
*ALDACIDE G	Biocida	Según se requiera
*THERMA-THIN	Desfloculante	0.2 – 3.0 (0.6 – 9)

Nota. El sistema EZ-MUD contiene celulosa polianiónica a través del aditivo PAC y barita mediante el producto BAROID, según lo expuesto por Guzmán (2022).

THERMA-DRIL

Esta tabla detalla los productos y da sus concentraciones típicas para formular un sistema THERMA-DRIL.

Tabla 23.

Aditivos Componentes de THERMA-DRIL

Aditivo	Función	Concentraciones típicas, lb/bbl (kg/m³)
Carbonato de Sodio	Removedor de calcio	0 – 0.2 (0 – 0.6)
AQUAGEL	Viscosificador	5 – 8 (14 – 23)
THERMA-THIN	Desfloculante	3 – 5 (8 – 14)
Soda cáustica	Fuente de alcalinidad	Según se requiera
THERMA -CHEK	Agente de control de filtración	4 – 8 (12 – 23)
BAROID	Agente densificante	Según se requiera
BARASCAV	Secuestrante de oxígeno	0.25 – 1 (0.7 – 2.8)

*THERMA-VIS	Viscosificador	0 – 1.5 (0 – 4.3)
*BARACOR 95	Secuestrante/amortiguador de CO ₂	0 – 0.8 (0 – 2.3)

Nota. El sistema THERMA-DRIL contiene barita, presente en el producto BAROID, según lo expuesto por Guzmán (2022).

PAC / DEXTRID

Esta tabla detalla los productos y da sus concentraciones típicas para formular un sistema PAC/DEXTRID.

Tabla 24.

Aditivos Componentes de PAC / DEXTRID

Aditivo	Función	Concentraciones típicas, lb/bbl (kg/m³)
AQUAGEL	Viscosificador	5 – 8 (14 – 23)
DEXTRID	Agente de control de filtración	4 – 6 (12 – 17)
PAC	Agente de control de filtración	1.5 – 4.0 (4 – 12)
Soda cáustica/Potasa caustica	Fuente de alcalinidad	0.5 – 1.0 (1.4 – 3)
BAROID	Agente densificante	Según se requiera
*BARAZAN PLUS	Viscosificador	0.25 – 1.0 (0.7 – 3)
*Carbonato de Sodio	Reductor de dureza del agua de relleno	Según se requiera
*KCl/NaCl	Inhibidor de lutitas reactivas	Según se requiera
THERMA-THIN	Desfloculante	Según se requiera
BARASCAV	Secuestrante de oxígeno	Según se requiera
*Cal	Secuestrante de CO ₂	Según se requiera

Nota. El sistema PAC/DEXTRID contiene celulosa polianiónica, presente en el aditivo PAC, y barita, incluida en el producto BAROID, según lo expuesto por Guzmán (2022).

POLYNOX

Esta tabla detalla los productos y da sus concentraciones típicas para formular un sistema POLYNOX.

Tabla 25.

Aditivos Componentes de POLYNOX

Aditivo	Función	Concentraciones típicas, lb/bbl (kg/m³)
AQUAGEL	Viscosificador	10 – 25 (29 – 71)
LIGNOX	Desfloculante	4 – 8 (12 – 23)
Soda cáustica/Potasa caustica	Fuente de alcalinidad	2 – 6 (6 – 17)
CAL	Fuente de calcio	4 – 12 (12 – 34)
CARBONOX	Desfloculante/agente de control de pérdida de fluido	8 – 12 (23 – 34)
DEXTRID IMPERMEX	Agente de control de pérdida de fluido hasta 250°F (121°C)	4 – 6 (12 – 17)
BAROID	Agente densificante	Según se requiera
*THERMA -CHEK	Agente de control de pérdida de fluido	1 – 2 (3 – 6)
*BARANEX	Agente de control de pérdida de fluido hasta 350°F (177°C)	4 – 8 (12 – 23)
*THERMA-THIN	Desfloculante AT	1 – 4 (3 – 12)
BARAZAN PLUS BARAZAN D PLUS	Viscosificador	Según se requiera

Nota. El sistema POLYNOX contiene barita, presente en el producto BAROID, según lo expuesto por Guzmán (2022).

Sal Saturada

Esta tabla detalla los productos y da sus concentraciones típicas para formular un sistema saturado de agua salada.

Tabla 26.

Aditivos Componentes de Sal Saturada

Aditivo	Función	Concentraciones típicas, lb/bbl (kg/m³)
ZEOGEL	Viscosificador/agente de suspensión	10 – 20 (29 – 58)
IMPERMEX	Agente de control de filtración	4 – 8 (12 – 23)
Sal (cloruro de sodio)	Fuente de cloruro	Según se requiera
BAROID	Agente densificante	Según se requiera
*AQUAGEL	Viscosificador	Según se requiera
*DEXTRID	Agente de control de filtración	4 – 6 (12 – 17)
*PAC	Agente de control de filtración	0.25 – 0.5 (0.7 – 1.5)
BARAZAN PLUS	Viscosificador	0.25 – 2.0 (0.7 – 6)
*ALDACIDE G	Biocida	Según se requiera

Nota. El sistema Sal Saturada contiene barita, presente en el producto BAROID, y celulosa polianiónica, incorporada mediante el aditivo PAC, según lo expuesto por Guzmán (2022).

Luego de presentar las formulaciones de los distintos sistemas de lodo base agua, se consolida una tabla de selección final que resume los aditivos evaluados en función de su compatibilidad dentro de cada sistema.

Tabla 27.*Selección Final Aditivos y Sistemas*

Componentes	Carbonato de Calcio	Barita	Bentonita	Celulosa Poli aniónica (Lb/Bbl)
BARASILC		Según se requiera		0,5 - 4
CARBONOX/ AKTAFLO-S		Según se requiera		0,25 – 1,5
CARBONOX/ Q- BROXIN		Según se requiera		0,25 – 1,5
Bajo pH - ENVIROTHIN				0,5 - 2
EZ-MUD		Según se requiera		0,2 – 3,5
THERMA-DRIL		Según se requiera		
PAC/DEXTRID		Según se requiera		1,5 - 4
POLYNOX		Según se requiera		
Saturado de sal		Según se requiera		0,25 – 0,5

Nota. Compilación de los aditivos más utilizados según videoconferencia del CPIP (Guzmán, 2022).

Como se puede observar, tras analizar la formulación de los sistemas de lodo base agua, es evidente que aditivos como la barita y la celulosa polianiónica están presentes de forma frecuente debido a sus funciones clave: la barita como agente densificante para controlar la presión hidrostática del pozo, y la celulosa polianiónica como agente de control de filtrado para reducir la pérdida de fluido hacia la formación.

En términos ambientales, la celulosa polianiónica presenta un impacto moderado durante su extracción y fabricación debido al uso de productos químicos y consumo energético, pero en la etapa de disposición final puede representar una alternativa más favorable frente a otros aditivos, al ser biodegradable. La barita, por su parte, genera impactos considerables durante su extracción y transporte, como alteración de suelos, emisiones y generación de polvo, pero en su fase de uso se comporta de forma estable y no genera residuos peligrosos si se maneja

adecuadamente. No obstante, su disposición final requiere control, ya que puede contener metales pesados.

Desde el punto de vista económico, la barita tiene un bajo costo y amplia disponibilidad en el país, lo que reduce gastos logísticos y facilita su incorporación en operaciones nacionales. Por otra parte, la celulosa polianiónica implica una inversión más alta en su adquisición y fabricación, debido al proceso de modificación química y su necesidad de tecnologías especializadas. Sin embargo, su aporte a la eficiencia operativa puede representar ahorros a largo plazo al disminuir pérdidas de fluido y reducir riesgos de inestabilidad durante la perforación.

A partir de lo anterior, estas características ponen a la barita y a la celulosa polianiónica como opciones estratégicas dentro de los sistemas de lodos base agua, ya que permiten alcanzar el equilibrio entre desempeño técnico, sostenibilidad ambiental y viabilidad en el contexto de la industria petrolera colombiana.

5.2. Situaciones de perforación

Después de haber seleccionado los aditivos más representativos a partir de los sistemas de lodos base agua evaluados, en este apartado se presentan recomendaciones sobre qué sistema resulta más adecuado para distintas situaciones de perforación.

Tabla 28.

Sistemas y Situaciones de Perforación (Recomendados)

Sistemas	Situaciones de Perforación							
	Lutitas Reactivas /gumbo	Perf. Agua profunda	Perf. horizontal	Aumento ROP	Alta dens. (>16.0) 1.92 sg	Lechos de sal	BHT 300°F (149°C)	Pozos desviados
BARASILC								
CARBONOX/ AKTAFLO-S								
CARBONOX/ Q-BROXIN								

Bajo pH - ENVIROTHI N							
EZ-MUD							
THERMA- DRIL							
PAC/DEXTRI D							
POLYNOX							
Saturado de sal							

Nota. La anterior tabla detalla sistemas base agua y provee un indicador que califica cada sistema de acuerdo a su aplicabilidad, A mayor intensidad del color más recomendable es el sistema a emplear, estos datos se adoptan de la experiencia en la ponencia (Guzmán, 2022).

Respecto a las situaciones generales de perforación, se recomienda la utilización de ciertos sistemas de lodo base agua en función de su desempeño frente a condiciones específicas del pozo. Como se ha evidenciado a lo largo del estudio, tanto la barita como la celulosa polianiónica son aditivos recurrentes y fundamentales en la mayoría de los sistemas evaluados. La dosificación de barita depende en gran medida de factores operacionales y de control externo, mientras que la celulosa polianiónica puede ajustarse directamente por barril (Bbl), lo que facilita su manejo en campo.

En este sentido, la selección final del sistema más adecuado también considera la cantidad estimada de agua requerida, priorizando aquellos que impliquen un menor consumo del recurso. A continuación, se presentan las recomendaciones basadas en la tabla de referencia de sistemas y su correspondencia con diferentes situaciones de perforación (Guzmán, 2022):

- **Lutitas reactivas / Gumbo:** se recomienda el sistema **EZ-MUD**.
- **Perforación en agua profunda:** se recomienda el sistema **EZ-MUD**.
- **Perforación horizontal:** se recomienda el sistema **PAC/DEXTRID**.

- **Aumento de ROP (velocidad de penetración):** se recomienda el sistema **EZ-MUD**.
- **Requerimientos de alta densidad (>16 lb/gal o 1,92 sg):** se recomienda el sistema **AKTAFLO-S** o **Q-BROXIN**.
- **Presencia de lechos de sal:** se recomienda el uso de lodo **saturado de sal**.
- **Temperaturas elevadas (BHT de 149°C o 300°F):** se recomienda el sistema **AKTAFLO-S**.
- **Pozos desviados:** se recomienda el sistema **EZ-MUD**.

Estas recomendaciones buscan facilitar la toma de decisiones en campo al seleccionar un sistema de lodo base agua eficiente y adaptable a las condiciones del entorno operativo (BAROID, 1999).

Conclusiones

El análisis del ciclo de vida aplicado a los lodos base agua permitió establecer una base metodológica útil para comprender su gestión en el contexto colombiano. A partir del marco teórico y metodológico, se definieron las etapas fundamentales del ciclo de vida de estos lodos, incluyendo la producción, formulación, uso y disposición final. Estas fases se organizaron en la *Ilustración 5 (p. 57)*, lo que permitió tener una visión completa del sistema evaluado y orientar tanto el análisis técnico como ambiental desarrollado en el trabajo. Este enfoque se consolidó como una herramienta integral para interpretar los impactos asociados al uso de aditivos en cada fase del ciclo.

La comparación de aditivos utilizados en la formulación de lodos base agua evidenció diferencias notables tanto en su impacto ambiental como en su comportamiento técnico. La celulosa polianiónica, por ejemplo, mostró calificaciones altas en todas las categorías evaluadas, lo que indica una mayor huella ambiental (*Tabla 13, p. 88*), mientras que el carbonato de calcio presentó un desempeño ambiental más favorable. Esta diferencia también se ve reflejada en la clasificación de impactos según los flujos de entrada y salida de cada aditivo (*Tabla 12, p. 86*). Esta caracterización técnica y ambiental permite integrar criterios relevantes para tomar decisiones más sostenibles en la selección de aditivos, sin comprometer la eficiencia operativa del sistema.

La revisión del marco normativo colombiano permitió evidenciar una ausencia de lineamientos específicos sobre los aditivos utilizados en los lodos de perforación. Aunque existen disposiciones generales sobre residuos peligrosos y sustancias químicas (*Tabla 15, p.*

98), no se contemplan regulaciones particulares para el ciclo de vida de estos insumos. Esta falta de normativa limita la trazabilidad y el control técnico durante su uso en campo, dificultando la implementación de prácticas seguras y responsables. Los hallazgos obtenidos respaldan la necesidad de actualizar el marco regulatorio mediante enfoques como el análisis del ciclo de vida, que promuevan una gestión más sostenible en el sector petrolero.

La selección de aditivos más viables para la formulación de lodos base agua, considerando criterios técnicos, económicos y ambientales, permitió identificar oportunidades reales de mejora en su gestión. La *Tabla 28 (p. 116)* evidencia que aditivos como la barita y la celulosa polianiónica son ampliamente utilizados en sistemas de lodo, dada su funcionalidad en condiciones específicas del pozo. Sin embargo, el análisis ambiental reveló que algunos de ellos, como la celulosa, generan impactos significativos en todas las categorías evaluadas (*Tabla 13, p. 88*), lo que plantea el reto de equilibrar la eficiencia técnica con la sostenibilidad ambiental. Esta conclusión refuerza la necesidad de tomar decisiones más informadas en el diseño de formulaciones, buscando un mejor desempeño integral del sistema de perforación.

Recomendaciones

Se recomienda ampliar este análisis no solo a otras formulaciones de lodo, como los lodos base aceite o sintéticos, sino también a más tipos de aditivos utilizados en la industria. Esto permitiría comparar su comportamiento técnico, económico y ambiental frente a los lodos base agua. Así se lograría una visión más completa que fortalezca la propuesta y facilite su aplicación en distintos contextos operativos.

Se considera complementar este trabajo con más investigaciones, tanto a través de bibliografía especializada como por medio de herramientas de simulación. Esto permitiría validar los resultados obtenidos desde una perspectiva técnica y ambiental, incluso sin necesidad de tener acceso directo a campo. Además, reforzaría las conclusiones del estudio y serviría como base para futuras pruebas prácticas.

Una de las principales limitaciones encontradas fue la poca disponibilidad de información técnica y ambiental sobre algunos aditivos. Por eso, se sugiere que futuros estudios se enfoquen en construir bases de datos más completas. Esto facilitaría la comparación entre alternativas y serviría como herramienta útil para investigadores, empresas y autoridades del sector.

Se recomienda que la industria petrolera en Colombia empiece a considerar más los criterios ambientales a la hora de elegir los aditivos que va a utilizar. Además, se deberían reforzar los procesos de capacitación sobre el manejo responsable de los lodos, así como implementar tecnologías que permitan tratarlos y reutilizarlos, ayudando así a reducir los impactos negativos sobre el ambiente.

Integrar el análisis de ciclo de vida en la gestión de los lodos no solo puede ayudar a tomar decisiones técnicas más acertadas, sino también a mejorar la regulación existente en Colombia. Este enfoque facilitaría una mejor articulación entre la academia, las empresas del sector y las entidades de control, y permitiría diseñar estrategias de operación más sostenibles y adaptadas a la realidad del país.

Aunque aditivos como la celulosa polianiónica tienen ventajas técnicas claras y se usan con frecuencia, los resultados muestran que también tienen una alta huella ambiental. Por eso, sería importante que se revise de forma más crítica su uso generalizado y se fomente el estudio de alternativas más sostenibles. Esto puede ayudar a lograr un equilibrio entre rendimiento técnico y responsabilidad ambiental.

Referencias Bibliográficas

- Al Zarkani, H., Mezher, T., & El-Fadel, M. (2023). Life cycle assessment in the petroleum industry: A systematic framework towards improved environmental performance. *Journal of Cleaner Production*, 395, 136251.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136251>
- Ali, I., Ahmad, M., & Ganat, T. A. (2022). Experimental study on water-based mud: investigate rheological and filtration properties using cupressus cones powder. *Journal Of Petroleum Exploration And Production Technology*, 12(10), 2699-2709.
<https://doi.org/10.1007/s13202-022-01471-8>
- Amanullah, M., & Al-Tahini, A. M. (2009). Environment friendly drilling fluids: A review. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 31(18), 1623–1633. <https://doi.org/10.1080/15567030802041699>
- American Association of Petroleum Geologists. (2022). *Drilling fluid*.
https://wiki.aapg.org/Drilling_fluid
- Badaró, L., M.S. Sad, C., Ribeiro, E., & Filgueiras, P. (2022). Environmental impacts related to drilling fluid waste and treatment methods: A critical review. *ResearchGate*.
- BAROID. (1999). *Manual de Fluidos de Perforación*.
- Bautista Cuadros, A., & Flórez Barreto, E. (2011). Factibilidad del uso de almidón de yuca como aditivo en lodos de perforación. *Revista Colombiana de Química*, 40(2), 123–130.

Buendía Pretel, T. (2016). Alternativas de tratamiento de las sustancias químicas peligrosas en los lodos de perforación. *Revista Ingeniería y Desarrollo*, 34(2), 45–58.

Busari, M. (2024). Drilling Waste Management: Strategies For Sustainability. En *ResearchGate*.

Caenn, R., Darley, H., & R. Gray, G. (2016). *Composition and Properties of Drilling and Completion Fluids*. Google Books.

Castillejo, J. & Consejo Profesional Ingenieria Petroleos. (2023). *Curso básico Fluidos de Perforación - Modulo 1 - Jorge Castillejo* [Vídeo]. YouTube.
<https://www.youtube.com/watch?v=DEBt9leJhh0>

Celotech. (s. f.). *¿Para qué se utiliza el PAC en la perforación? | Celotech PAC en el sector del petróleo y el gas*. <https://www.celotech.com/es/technology/what-is-pac-used-for-in-drilling>

Composition and Properties of Drilling and Completion Fluids. (s. f.). Google Books.
<https://books.google.com.co/books?id=kS6lCgAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=es#v=onepage&q&f=false>

Decreto 1076 de 2015. (s. f.).
<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=78153>

Decreto 1609 de 2002 - Gestor normativo. (s. f.). Función Pública.
<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=6101>

Decreto 4741 de 2005 - Gestor normativo. (s. f.). Función Pública.
<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=18718>

Dirección General de Desarrollo Minero. (2017). Perfil de mercado de la bentonita. Secretaría de Economía, México.

Drilling Manual. (2022). *Drilling Mud Properties Guide in oil & gas Wells.*
<https://www.drillingmanual.com/drilling-mud-fluid-properties>

Emmanuel Emeka Okoro, Anita Zuokumor, Ikechukwu Stanley Okafor, & K. C. Igwilo. (2020).
Determining the optimum concentration of multiwalled carbon nanotubes as filtrate loss additive in field-applicable mud systems.

FTM. (2023). *¿Cómo secar, moler y granular la arcilla bentonita?*
<https://www.ftmmachinery.com/es/blog/bentonite-processing-process-and-equipment.html>

Gallio, J. (s. f.). Drilling Waste Management - A Look at Disposal Methods and Regulatory Considerations. *The Panther Companies.*
<https://www.thepanthercompanies.com/blog/drilling-waste-management-a-look-at-disposal-methods-and-regulatory-considerations>

Garcés Castro, J. A., & Largacha Martínez, A. Y. (2022). Evaluación de la huella de carbono y la huella hídrica, asociadas a la perforación, fracturamiento y producción en yacimientos convencionales y no convencionales en el Valle Medio del Magdalena. Universidad

Industrial de Santander.

<https://noesis.uis.edu.co/handle/20.500.14071/11918Noesis+1Noesis+1>

Ghazi, M., Quaranta, G., Duplay, J., & Khodja, M. (2008). Análisis del ciclo de vida (ACV) de lodos de perforación en zonas áridas: Caracterización específica de emisiones. *Revista Internacional de Ingeniería Ambiental*, 25(3), 201–210.

Guerra Flórez, J. L., & Villarreal Orozco, J. A. (2019). Evaluación de barita de minas colombianas para las formulaciones de lodos de perforación. Universidad Industrial de Santander. <https://noesis.uis.edu.co/handle/20.500.14071/13287Noesis>

Guía ambiental para la disposición de desechos de perforación en la actividad petrolera. (s.f.). Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Colombia.

Guzmán, S. [CPIP]. (2022, 9 diciembre). *Fluidos de perforación base agua - Modulo 2 - Sergio Guzmán* [Vídeo]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=BV8XRaEGx48>

Hengxin Polymer Material. (2024). *Manufacturing Process of Polyanionic Cellulose (PAC)*. https://en.hengxinpolymer.com/news_details/18.html

Hernández, J. (2015). Condiciones para el empleo de bentonita en un fluido de perforación base agua de mar en función del comportamiento hidráulico. *Revista de Ingeniería de Petróleos*, 10(1), 55–65.

Ilhan, V. (2023, 26 julio). *Calcium Carbonate for Drilling*. PetroNaft. <https://www.petronaftco.com/calcium-carbonate-for-drilling>

Ilinykh, G., Fellner, J., Sliusar, N., & Korotaev, V. (2022). Life cycle assessment of drilling waste management in Russia. *Journal of Cleaner Production*, 350, 131484. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131484>

INNES, G., Thore Eia, J., & Nesse, S. (2022). Drill cuttings treatment alternatives. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 208, 109321. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.109321>

Instituto Argentino del Petróleo y del Gas. (2009). Consideraciones ambientales para la construcción de locaciones y la gestión de lodos y recortes durante la perforación de pozos. Buenos Aires, Argentina.

ISO. (2006). ISO 14040:2006. Gestión ambiental: Análisis del ciclo de vida: Principios y marco de referencia. International Organization for Standardization.

Jaberi, J. A., Bageri, B., Elkatatny, S., & Patil, S. (2023). Primary Investigation of Barite-Weighted Water-Based Drilling Fluid Properties. *ACS Omega*, 8(2), 2155-2163. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c06264>

Jining Fortune Biotech Co., Ltd. (2023, 22 agosto). *Pac Drilling Fluid: Environmental Considerations and Sustainability*. <https://www.sdfchem.com/environmental-considerations-and-sustainability.html>

KIMA CHEMICAL CO., LTD. (s. f.). *Polyanionic Cellulose (PAC) in Water-Based Drilling Fluid Additives*. <https://www.kimacellulose.com/polyanionic-cellulose-pac-in-water-based-drilling-fluid-additives.html>

Lake, L. W. (s. f.). *Petroleum Engineering Handbook*.

Lebedev, A., & Cherepovitsyn, A. (2024). Waste Management during the Production Drilling Stage in the Oil and Gas Sector: A Feasibility Study. *Resources*, 13(2), 26.
<https://doi.org/10.3390/resources13020026>

Lee, S. (s. f.). *Mastering Wellbore Stability in Well Control*.
<https://www.numberanalytics.com/blog/mastering-wellbore-stability-in-well-control>

Ley 1252 de 2008 -. (s. f.). <https://www.minambiente.gov.co/documento-normativa/ley-1252-de-2008>

Ley 99 de 1993 - Gestor Normativo. (s. f.). Función Pública.
<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=297>

Matyjaszewski, K., Martin Mölle, Martin Mölle, & Mölle, M. (2012). *Polymer Science: A Comprehensive Reference* [ELSEVIER].

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2024). Guía de manejo ambiental para perforación de petróleo y gas. Bogotá, Colombia.

Mohd Amirul Hakim Bin Sulaiman & Mohd Amirul Hakim. (2008). *Banana Trunk As A Lost Circulation Material In Hydrocarbon Drilling Fluid*. UTPEDIA.
<https://utpedia.utp.edu.my/id/eprint/248>

Olivera Alamilla, A., & Trujillo Cárcamo, A. (2020). Propiedades reológicas y tixotrópicas requeridas para un lodo base acuosa de naturaleza arcillosa. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 19(1), 45–58.

Paeres, A., & Velandia, C. (2007). *CARACTERIZACIÓN DEL PROCESO PRODUCTIVO Y PROPUESTA DE UN MODELO DE MEJORA EN “BENTONITAS COLOMBIANAS LTDA.*

Resolución 1433 de 2004 -. (s. f.). <https://www.minambiente.gov.co/documento-normativa/resolucion-1433-de-2004>

Resolución 631 de 2015 -. (s. f.). <https://www.minambiente.gov.co/documento-normativa/resolucion-631-de-2015>

Resource, P. (s. f.). *Polyanionic Cellulose Manufacturing Plant Project Report 2025: Costs & ROI.* <https://www.procurementresource.com/reports/polyanionic-cellulose-manufacturing-plant-project-report>

Rivas Mira, M. (2020). Huella de carbono de la empresa Aditivos y Químicos S.A.S, Colombia. *Revista de Ingeniería Ambiental*, 14(2), 123–135.

Rubí Villegas, R. (2017). La química de los lodos de perforación: Ejemplos y aplicaciones en ciencias de la tierra. *Revista de Ciencias de la Tierra*, 30(1), 15–25.

Ryabtsev, P., Vladimir Kuksov, & Kuksov, V. (2021). SMART BRIDGING AGENT ENHANCED WELL PRODUCTIVITY IN DEPLETED PRODUCTION FORMATION. *En American Association Of Drilling Engineers.*

Schlumberger. (s. f.-a). *barite*. <https://glossary.slb.com/es/terms/b/barite>

Schlumberger. (s. f.-a). *bentonite*. <https://glossary.slb.com/es/terms/b/bentonite>

Schlumberger. (s. f.). *drilling fluid*. https://glossary.slb.com/en/terms/d/drilling_fluid

Schlumberger.(s.f.-c). *calcium_carbonate*. https://glossary.slb.com/es/terms/c/calcium_carbonate

Secretaría de Economía. (2022). Etapas del proceso productivo para la pequeña y mediana minería. Gobierno de México.

Servicio Geológico Colombiano. (2012). La caliza en Colombia: Geología, recursos, calidad y potencial. Bogotá, Colombia.

Servicio Geológico Colombiano. (2019). Recursos minerales de Colombia: Volumen 1. Bogotá, Colombia.

Sierra, M., & Salazar, G. (1999). Principales tipos de lodos empleados en la perforación de pozos de gas, aceite o agua. *Boletín Técnico de Petróleos*, 12(3), 33–45.

Subsecretaría de Minería. (2017). *PERFIL DE MERCADO DE LA BENTONITA*.

Subsecretaría de Minería. (2017). Perfil de mercado del yeso. Secretaría de Economía, México.

Subsecretaría de Minería. (2020). *PERFIL DE MERCADO DE LA BARITA*.

Williamson, D. (2013). Fundamentos de los fluidos de perforación. Universidad Nacional Autónoma de México.
<https://ru.dgb.unam.mx/bitstream/20.500.14330/TES01000713252/3/0713252.pdf>

Yang, J., Yang, Y., Tian, L., Zhou, J., & Wang, Y. (2024). Risk and Pollutant Protective Concentration Levels of Drilling Waste Used to Pave Oil and Gas Field Well Sites. *Water*, 17(1), 30. <https://doi.org/10.3390/w17010030>