



**Universidad
Europea** CANARIAS

Trabajo Fin de Máster

Título del trabajo: Propuesta de estrategia de economía circular para las operaciones de Frontera Energy en el campo Quifa (Colombia)

Autor

Lizeth Katherine Fernández Mejía

Director/es

María Asunción López Bascón

Escuela de Arquitectura, Ingeniería, Ciencia y Computación – STEAM

Septiembre 2025

Índice

Resumen	5
Abstract	6
1. Introducción	7
2. Antecedentes	9
3. Marco teórico	11
3.1. Economía circular: fundamentos y evolución conceptual	11
3.2. Aplicación de la economía circular en el sector hidrocarburos	11
3.3. Frontera Energy y el campo Quifa: contexto operativo	12
3.4. Modelos de gestión ambiental y estándares de sostenibilidad	13
3.5. Barreras y factores habilitadores de la circularidad en el sector energético	13
4. Justificación	15
5. Hipótesis	17
6. Objetivos	18
6.1. Objetivo general	18
6.2. Objetivos específicos	18
7. Metodología	19
7.1. Enfoque metodológico	19
7.2. Diseño del estudio	19
7.3. Técnicas e instrumentos de recolección de información	19
7.4. Población y muestra	20
7.5. Análisis de la información	20
7.6. Validez y rigor metodológico	21
7.7. Limitaciones del estudio	21
8. Resultados	22
8.1. Diagnóstico técnico-contextual	22
8.2. Estado actual de la gestión de recursos y residuos	23
8.2.1. Gestión de materiales e insumos	23
8.2.2. Gestión del agua	24
8.2.3. Gestión energética	25
8.2.3.1. Suministro actual de energía	25

8.2.3.2.	Infraestructura actual de generación	26
8.2.3.3.	Iniciativas de transición y economía circular	26
8.2.4.	Gestión de residuos.....	27
8.2.4.1.	Clasificación y segregación en la fuente	27
8.2.4.2.	Tratamiento y valorización.....	28
8.2.4.3.	Transporte y disposición final.....	28
8.2.4.4.	Trazabilidad y control	29
8.3.	Oportunidades para la economía circular en el campo Quifa	29
8.3.1.	Valorización de residuos industriales	29
8.3.2.	Ampliación del reúso de aguas tratadas.....	30
8.3.3.	Eficiencia y diversificación energética.....	31
8.3.4.	Reutilización y logística inversa de materiales	31
8.3.5.	Digitalización y trazabilidad para la circularidad	32
8.3.6.	Articulación con actores externos.....	32
8.4.	Brechas identificadas	33
8.4.1.	Brechas técnicas y operativas.....	33
8.4.2.	Brechas organizacionales y de cultura interna	34
8.4.3.	Brechas de alineación con proveedores y contratistas	34
8.4.4.	Brechas en innovación e infraestructura habilitante	35
8.4.5.	Brechas en articulación externa y enfoque territorial	35
8.5.	Conclusión del diagnóstico	36
8.6.	Diseño de la estrategia de economía circular para el campo Quifa.....	38
8.6.1.	Enfoque general de la estrategia	38
8.6.2.	Dimensiones clave del enfoque estratégico.....	39
8.7.	Principios rectores de la estrategia de economía circular	40
8.8.	Ejes estratégicos de la estrategia de economía circular	44
8.8.1.	Eje 1: Circularidad en la gestión de residuos	44
8.8.2.	Eje 2: Optimización hídrica con enfoque circular.....	45
8.8.3.	Eje 3: Transición energética y eficiencia operativa.....	45
8.8.4.	Eje 4: Gestión circular de materiales e insumos.....	46
8.8.5.	Eje 5: Cultura organizacional y articulación externa	47
8.9.	Criterios de priorización.....	48

8.9.1.	Aplicación de los criterios.....	51
8.10.	Conexión con los objetivos del TFM.....	51
8.10.1.	Conexión directa objetivo general:	52
8.10.2.	Conexión directa objetivo específico 1:	52
8.10.3.	Conexión directa objetivo específico 2:	53
8.10.4.	Conexión directa objetivo específico 3:	54
8.10.5.	Conexión directa objetivo específico 4:	54
8.10.6.	Conexión directa objetivo específico 5:	55
8.11.	Plan de implementación de la estrategia de economía circular para el campo Quifa	55
8.11.1.	Fase de corto plazo (0 – 2 años).....	56
8.11.2.	Fase de mediano plazo (3 – 5 años)	57
8.11.3.	Fase de largo plazo (6 – 10 años).....	58
8.12.	Resultados esperados	59
8.12.1.	Resultados ambientales.....	59
8.12.2.	Resultados económicos.....	60
8.12.3.	Resultados sociales	60
9.	Discusión y análisis.....	62
9.1.	Coherencia de la estrategia con la literatura y las buenas prácticas	62
9.2.	Benchmarking sectorial: similitudes y diferencias	62
9.3.	Factores críticos de éxito (y cómo se abordan)	63
9.4.	Riesgos principales y medidas de mitigación	64
9.5.	Pertinencia para Colombia y para el Meta	64
9.6.	Valor para Frontera Energy (caso de negocio cualitativo).....	65
9.7.	Supuestos y limitaciones del estudio	65
9.8.	Líneas de profundización futura	65
10.	Conclusiones y recomendaciones	68
	Referencias.....	73

Resumen

La transición hacia modelos de producción sostenibles se ha convertido en una necesidad prioritaria para industrias intensivas en recursos como la de los hidrocarburos. En este contexto, la economía circular representa una alternativa estratégica para repensar procesos, reducir impactos negativos y generar valor compartido. Este Trabajo de Fin de Máster tiene como propósito diseñar una estrategia de economía circular para las operaciones de Frontera Energy en el campo Quifa (Colombia).

El estudio parte de un diagnóstico técnico y contextual que analiza la gestión actual de materiales, agua, energía y residuos, identificando tanto buenas prácticas como vacíos en la circularidad de los procesos. A partir de este análisis, se plantean oportunidades de mejora en áreas como la valorización de residuos, la eficiencia en el uso de recursos, la transición energética y la articulación con proveedores y comunidades locales.

Con base en dichos hallazgos, se formula una estrategia estructurada en ejes temáticos y principios rectores, acompañada de criterios de priorización que permiten su implementación gradual, medible y replicable. El enfoque combina experiencia de campo, fundamentos teóricos y viabilidad práctica, lo que convierte a la propuesta en una herramienta útil para la toma de decisiones corporativas y la construcción de una cultura organizacional más alineada con los retos ambientales del presente.

El trabajo busca no solo optimizar el desempeño ambiental de Frontera Energy, sino también posicionarla como referente en sostenibilidad dentro del sector hidrocarburos en Colombia.

Palabras clave: Economía circular, gestión ambiental, hidrocarburos, sostenibilidad, Frontera Energy, residuos. eficiencia de recursos. Campo Quifa.

Abstract

The transition towards sustainable production models has become a priority for resource-intensive industries such as hydrocarbons. In this context, the circular economy offers a strategic alternative to rethink processes, reduce negative impacts, and generate shared value. This Master's Thesis aims to design a circular economy strategy for Frontera Energy's operations in the Quifa field (Colombia).

The study begins with a technical and contextual diagnosis that analyzes the current management of materials, water, energy, and waste, identifying both good practices and gaps in circularity. Based on this analysis, improvement opportunities are outlined in areas such as waste valorization, resource efficiency, energy transition, and collaboration with suppliers and local communities.

Building on these findings, the thesis proposes a strategy structured around thematic pillars and guiding principles, supported by prioritization criteria that enable its gradual, measurable, and replicable implementation. The approach combines field experience, theoretical foundations, and practical feasibility, turning the proposal into a useful tool for corporate decision-making and for fostering an organizational culture more aligned with today's environmental challenges.

Ultimately, this work not only seeks to enhance Frontera Energy's environmental performance but also to position the company as a national benchmark in sustainability within the hydrocarbon sector.

Keywords: Circular economy, environmental management, hydrocarbons, sustainability, Frontera Energy, Quifa field.

1. Introducción

En un entorno global marcado por la creciente presión ambiental, la escasez de recursos naturales y la exigencia de un desarrollo más responsable, las organizaciones del sector hidrocarburos enfrentan el desafío de redefinir sus modelos de operación. En este contexto, la economía circular se presenta como una alternativa estratégica que permite transitar desde sistemas lineales de producción hacia esquemas más eficientes, regenerativos y sostenibles.

Frontera Energy, empresa operadora del campo Quifa en Colombia, lidera actividades que abarcan desde la construcción de facilidades e infraestructura hasta la producción y el mantenimiento de operaciones asociadas a la extracción de hidrocarburos. Estas etapas, por su naturaleza intensiva en el uso de materiales, agua, energía y generación de residuos, representan una oportunidad clave para incorporar principios circulares que mejoren el desempeño ambiental, generen valor económico y fortalezcan la relación con las comunidades del entorno.

Si bien la compañía ha implementado mecanismos de gestión ambiental orientados al cumplimiento normativo, aún no cuenta con una estrategia integral de economía circular que permita estructurar su operación bajo una lógica de cierre de ciclos, valorización de residuos, eficiencia de recursos y articulación con actores del territorio. La falta de un enfoque sistémico limita el aprovechamiento de oportunidades que podrían consolidar a Frontera Energy como referente en innovación ambiental dentro del sector energético colombiano.

Este Trabajo de Fin de Máster tiene como objetivo diseñar una propuesta de estrategia de economía circular adaptada a la estructura operativa de Frontera Energy en el campo Quifa. La propuesta se construye a partir de un diagnóstico técnico y contextual, fundamentado en experiencias de campo, revisión normativa, análisis de buenas prácticas y alineación con marcos internacionales de sostenibilidad. Con ello, se busca sentar las bases para una transición realista y gradual hacia un modelo de gestión más inteligente, resiliente y sostenible.

2. Antecedentes

La economía circular ha emergido como una respuesta innovadora ante los impactos ambientales generados por los modelos de producción y consumo tradicionales, particularmente el modelo lineal de "extraer, producir y desechar". Este enfoque, que ha prevalecido por décadas en industrias intensivas como la petrolera, ha demostrado ser insostenible en el largo plazo debido al agotamiento de recursos naturales, la generación creciente de residuos y las afectaciones al medio ambiente y la salud humana.

En América Latina, y especialmente en Colombia, los esfuerzos por integrar la economía circular han comenzado a tomar forma con el lanzamiento de políticas públicas como la Estrategia Nacional de Economía Circular (CONPES 4011 de 2020), que promueve la eficiencia en el uso de materiales, agua y energía, así como la reducción de residuos a través de la innovación y la colaboración entre sectores. La Política de Crecimiento Verde (Departamento Nacional de Planeación [DNP], 2018a) constituye un antecedente clave que promueve la eficiencia en el uso de materiales, agua y energía, y que se complementa con la Política Nacional de Economía Circular (DNP, 2020). Aunque los avances se han concentrado principalmente en sectores industriales y urbanos, existe un amplio margen de mejora en sectores extractivos como el petrolero.

En Colombia, el documento CONPES 3918 establece la estrategia para la implementación de los ODS, y refuerza la necesidad de que sectores intensivos en recursos, como el de hidrocarburos, avancen hacia modelos productivos sostenibles (DNP, 2018b).

Frontera Energy, como operadora del campo Quifa, es responsable de la planificación, construcción y operación de infraestructuras clave para la producción de

hidrocarburos. Estas actividades implican un consumo significativo de recursos naturales y la generación de diversos tipos de residuos industriales. Si bien la compañía ha implementado lineamientos ambientales para el cumplimiento normativo, aún no cuenta con una estrategia integral de economía circular que articule todas sus áreas operativas bajo un enfoque preventivo, regenerativo y sostenible. En este contexto, surge la necesidad de diseñar una propuesta específica que permita integrar la economía circular como parte estructural de su modelo de gestión ambiental y de negocio.

3. Marco teórico

3.1. Economía circular: fundamentos y evolución conceptual

La economía circular es un modelo de desarrollo que busca desvincular el crecimiento económico del consumo de recursos finitos, promoviendo un enfoque restaurativo y regenerativo de los sistemas productivos. A diferencia del modelo lineal tradicional, que opera bajo la lógica de extraer, producir, consumir y desechar, la economía circular propone cerrar los ciclos de los materiales, extendiendo su vida útil a través del rediseño, la reutilización, el reciclaje y la valorización (Ellen MacArthur Foundation, 2013; Ghisellini, Cialani & Ulgiati, 2016).

Este enfoque no solo responde a una necesidad ambiental, sino también a una oportunidad económica y estratégica. Según la Ellen MacArthur Foundation (2015), la transición hacia un modelo circular puede generar beneficios tangibles como la reducción de costos en materias primas, el fortalecimiento de cadenas de suministro resilientes y la creación de empleos verdes. A nivel político y normativo, la economía circular se ha consolidado como una prioridad global, especialmente en la Unión Europea, donde se han adoptado planes de acción vinculantes desde 2015 (Kirchherr, Reike & Hekkert, 2017).

3.2. Aplicación de la economía circular en el sector hidrocarburos

Aunque la economía circular ha sido ampliamente adoptada en sectores como el manufacturero, la construcción o la agroindustria, su incorporación en industrias extractivas como la petrolera sigue siendo un reto. El carácter intensivo en recursos y la complejidad de

los procesos del sector hidrocarburos exigen enfoques específicos que reconozcan las particularidades de su cadena de valor (Geissdoerfer, Savaget, Bocken & Hultink, 2017).

En este contexto, se han identificado oportunidades relevantes para la circularidad, tales como la reutilización de aguas residuales tratadas, la valorización de residuos industriales (aceites usados, lodos, tambores metálicos), la implementación de tecnologías de eficiencia energética y el diseño modular de facilidades que permitan su desmantelamiento y reaprovechamiento. Empresas globales como Repsol (2021), Shell (2020) y TotalEnergies (2022) han comenzado a incorporar estos principios en sus operaciones, demostrando que la circularidad es posible incluso en contextos de alta intensidad extractiva.

3.3. Frontera Energy y el campo Quifa: contexto operativo

Frontera Energy es una compañía del sector energético con operaciones en varios países de América Latina, destacando su actividad en Colombia a través del campo Quifa. Este bloque petrolero, uno de los más importantes en producción del país, implica un conjunto de actividades que van desde la construcción de plataformas, líneas de flujo y estaciones de tratamiento, hasta procesos de producción, mantenimiento y transporte.

Este tipo de operación representa una oportunidad significativa para incorporar prácticas circulares, especialmente en la fase constructiva y en la gestión de materiales e insumos recurrentes. La logística de campo, la naturaleza remota de las operaciones y la necesidad constante de mantenimiento convierten a Frontera en un escenario ideal para aplicar principios de economía circular que permitan reducir costos operativos, mejorar la eficiencia de recursos y disminuir los impactos ambientales (CONPES 4011, 2020).

3.4. Modelos de gestión ambiental y estándares de sostenibilidad

La economía circular se integra de manera natural con modelos de gestión ambiental basados en sistemas de mejora continua, como la norma ISO 14001 (2015), que promueve la identificación de aspectos e impactos ambientales, así como la adopción de medidas para su control y mitigación. Asimismo, herramientas como el Análisis de Ciclo de Vida (ACV), la evaluación de la huella de carbono y la simbiosis industrial permiten operacionalizar la circularidad de manera técnica y medible (UNEP, 2019).

Existen guías específicas para la implementación de economía circular en organizaciones, como la BS 8001 (BSI, 2017), considerada la primera norma en su tipo a nivel mundial.

Por otro lado, el marco global de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), especialmente los ODS 12 (producción y consumo responsables), ODS 9 (industria, innovación e infraestructura) y ODS 13 (acción por el clima), establece metas concretas con las que Frontera Energy podría alinear su estrategia circular, fortaleciendo su compromiso social, ambiental y reputacional (United Nations, 2015).

3.5. Barreras y factores habilitadores de la circularidad en el sector energético

Entre las principales barreras para la implementación de una estrategia de economía circular en empresas del sector hidrocarburos se encuentran la resistencia al cambio, la falta de capacidades técnicas internas, la dependencia de cadenas de suministro tradicionales y la percepción de altos costos iniciales (Ghisellini et al., 2016; Kirchherr et al., 2017). No obstante, existen factores habilitadores clave como el liderazgo corporativo, el desarrollo de

alianzas estratégicas, la digitalización de procesos, el compromiso con estándares internacionales y la presión social y regulatoria creciente (Geissdoerfer et al., 2017).

Entender estos elementos es fundamental para diseñar una propuesta realista y aplicable. Por ello, este trabajo no solo se basa en fundamentos teóricos, sino que incorpora la visión práctica del entorno operativo del campo Quifa, buscando soluciones escalables y adaptadas al contexto colombiano.

4. Justificación

El presente Trabajo de Fin de Máster se justifica en la necesidad de transformar los modelos tradicionales de operación del sector hidrocarburos, los cuales han demostrado ser ambientalmente insostenibles y cada vez menos aceptables socialmente. En particular, Frontera Energy —como operadora del campo Quifa en Colombia— tiene bajo su responsabilidad un amplio rango de procesos asociados a la extracción, producción y transporte de hidrocarburos, lo que implica una alta demanda de recursos naturales y una generación considerable de residuos y emisiones. Esta condición representa una oportunidad estratégica para repensar su modelo de gestión y avanzar hacia un enfoque más responsable, eficiente e innovador.

Aunque Frontera Energy ha implementado políticas de cumplimiento ambiental, estas se enfocan mayoritariamente en la mitigación de impactos y el control normativo. Sin embargo, el contexto actual exige un cambio más profundo: pasar de una lógica de cumplimiento reactivo a una gestión preventiva y regenerativa basada en principios de economía circular. Este giro permitiría no solo mejorar el desempeño ambiental de la compañía, sino también optimizar costos operativos, reducir riesgos reputacionales, incrementar la eficiencia en el uso de recursos y contribuir activamente a los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

Además, en un entorno donde las regulaciones son cada vez más estrictas y la presión social por prácticas responsables es creciente, contar con una estrategia estructurada de economía circular se convierte en una ventaja competitiva. Esta propuesta no solo es viable

desde el punto de vista técnico, sino que está respaldada por la experiencia operativa en campo y la alineación con marcos de referencia nacionales e internacionales.

La realización de este trabajo también tiene valor académico, ya que contribuye al desarrollo de propuestas aplicables dentro del sector energético colombiano, en un campo donde aún existen importantes vacíos conceptuales y prácticos en materia de circularidad. En resumen, esta investigación busca generar conocimiento útil, propositivo y contextualizado, que pueda tener un impacto positivo tanto en la empresa como en el sector en su conjunto.

5. Hipótesis

La implementación de una estrategia de economía circular en las operaciones de Frontera Energy en el campo Quifa permitirá reducir impactos ambientales, optimizar el uso de recursos y valorizar residuos, contribuyendo a alinear sus procesos con estándares internacionales de sostenibilidad. Se espera que esta transformación refuerce la reputación corporativa y posicione a la empresa como referente en innovación ambiental dentro del sector hidrocarburos en Colombia.

6. Objetivos

6.1. Objetivo general

Diseñar una estrategia de economía circular para Frontera Energy en el campo Quifa (Colombia), orientada a optimizar el uso de recursos, valorizar residuos y alinear los procesos operativos con los principios de sostenibilidad ambiental.

6.2. Objetivos específicos

- i. Caracterizar los procesos actuales de gestión de recursos y residuos en el campo Quifa, con base en las licencias ambientales vigentes y la operación real del sitio.
- ii. Identificar las oportunidades de mejora en términos de circularidad y sostenibilidad operacional dentro del modelo actual de gestión del campo.
- iii. Formular una propuesta estratégica adaptada al contexto técnico-operativo de Frontera Energy, basada en principios de economía circular y orientada a la valorización de recursos y residuos.
- iv. Establecer criterios para la implementación gradual de la estrategia, permitiendo su evaluación y mejora continua en el tiempo.
- v. Establecer indicadores que permitan evaluar el avance y el impacto de la estrategia circular en términos ambientales, económicos y sociales.

7. Metodología

7.1. Enfoque metodológico

Este trabajo adopta un enfoque de investigación mixto, que combina métodos cualitativos y cuantitativos para obtener una visión integral de las operaciones de Frontera Energy en el campo Quifa. El componente cualitativo permite comprender el contexto operativo y normativo, mientras que el componente cuantitativo facilita la identificación de patrones en el uso de recursos y la generación de residuos. Este enfoque es coherente con las directrices metodológicas para estudios aplicados descritas por *Hernández, Fernández y Baptista (2018)*, ampliamente utilizadas en investigaciones de carácter técnico-ambiental.

7.2. Diseño del estudio

Se opta por un diseño descriptivo y no experimental, con un enfoque aplicado, centrado en el análisis contextual de las operaciones sin intervención directa en las variables observadas. La investigación se desarrolla en tres fases principales:

- Diagnóstico técnico-contextual de la gestión actual de recursos, residuos y procesos operativos.
- Formulación de una estrategia de economía circular estructurada en ejes temáticos.
- Diseño de un plan de acción y mecanismos de evaluación para la implementación de la estrategia.

7.3. Técnicas e instrumentos de recolección de información

Revisión documental: análisis de reportes públicos de sostenibilidad, políticas corporativas disponibles, normativa ambiental vigente y documentos técnicos relevantes.

Consulta de fuentes secundarias: uso de datos publicados por Frontera Energy, entidades ambientales y organismos del sector energético sobre consumo de agua, energía, materiales y generación de residuos.

Revisión de literatura técnica: estudio de casos de economía circular en industrias extractivas, marcos metodológicos internacionales y experiencias comparables.

Análisis exploratorio contextual: aproximación técnica al funcionamiento del campo Quifa con base en conocimientos del sector, experiencia previa en seguimiento ambiental y referencias disponibles.

7.4. Población y muestra

El análisis se centra en las áreas operativas, logísticas y ambientales de Frontera Energy en el campo Quifa. Dado el carácter documental del estudio, no se aplica una muestra tradicional, sino que se seleccionan fuentes representativas y pertinentes para fundamentar las propuestas planteadas.

7.5. Análisis de la información

Los datos cualitativos se examinan mediante codificación temática, permitiendo identificar categorías relevantes como eficiencia de recursos, oportunidades de valorización o barreras para la circularidad. Los datos cuantitativos se analizan mediante gráficos descriptivos y análisis comparativos, con el fin de ilustrar el potencial de mejora ambiental y operativa. Adicionalmente, para orientar la definición de indicadores de circularidad en las fases de resultados y seguimiento, se tomó como referencia la metodología de Circular Transition

Indicators (*World Business Council for Sustainable Development [WBCSD], 2022*), que permite estandarizar la medición de flujos de materiales, agua y energía en empresas de distintos sectores.

7.6. Validez y rigor metodológico

Para asegurar la validez de los hallazgos se emplea una triangulación de fuentes, contrastando literatura científica, documentos institucionales y datos sectoriales. Además, se ha realizado una validación cruzada entre distintas fuentes documentales para minimizar sesgos y asegurar la coherencia técnica de las recomendaciones.

7.7. Limitaciones del estudio

- Acceso limitado a información interna no publicada por razones de confidencialidad.
- Dependencia de fuentes secundarias cuya precisión puede variar.
- El estudio se circunscribe al campo Quifa, lo que restringe la extrapolación directa de resultados a otras operaciones.

8. Resultados

8.1. Diagnóstico técnico-contextual

El diseño de una estrategia de economía circular debe partir de un conocimiento profundo del contexto operativo en el que se pretende aplicar. En el caso del campo Quifa, operado por Frontera Energy, resulta fundamental comprender cómo se gestionan actualmente los recursos, los residuos y los procesos asociados a la construcción, operación y mantenimiento de la infraestructura petrolera, ya que estas dimensiones son clave para identificar puntos críticos y oportunidades de intervención circular.

Este diagnóstico técnico-contextual no busca realizar una auditoría exhaustiva ni intervenir directamente en las operaciones, sino más bien construir una visión estructurada de la situación actual a partir de la revisión de documentos públicos, lineamientos corporativos, referencias normativas y el conocimiento técnico disponible sobre el funcionamiento del campo. A través de esta aproximación, se identifican las prácticas vigentes, los vacíos existentes en términos de circularidad y los factores internos y externos que pueden facilitar o limitar la adopción de un modelo más sostenible.

La finalidad de este análisis preliminar es sentar las bases para una estrategia realista y viable, alineada con las capacidades actuales de la empresa, pero también con su potencial de innovación y mejora. Al centrarse en elementos operativos concretos como el uso de materiales, la eficiencia energética, la gestión del agua y el tratamiento de residuos, el diagnóstico permite vincular de forma directa los principios de la economía circular con el quehacer diario de la organización, generando así propuestas con mayor aplicabilidad práctica.

En suma, este diagnóstico constituye la primera fase metodológica del presente trabajo, y su desarrollo permitirá orientar la formulación de ejes estratégicos adaptados a la realidad de

Frontera Energy, contribuyendo a consolidar un modelo operativo más eficiente, regenerativo y alineado con los desafíos actuales en materia de sostenibilidad.

8.2. Estado actual de la gestión de recursos y residuos

8.2.1. Gestión de materiales e insumos

La operación del campo Quifa implica el uso continuo de una variedad de materiales e insumos industriales, entre ellos: lubricantes, absorbentes, geotextiles, filtros, aceites, empaques de caucho, envases plásticos, elementos metálicos, baterías, y productos químicos diversos.

De acuerdo con las licencias ambientales vigentes, Frontera Energy ha implementado un sistema de gestión diferenciada de materiales según su estado, nivel de contaminación y potencial de aprovechamiento. Entre las medidas más destacadas se encuentran:

- Recuperación y devolución a proveedores de insumos posconsumo como baterías, envases de productos químicos, llantas y aceites usados.
- Clasificación y compactación de materiales reciclables (plástico, papel, cartón, vidrio, madera y chatarra) en casetas de almacenamiento para posterior entrega a organizaciones de reciclaje de Puerto Gaitán u otras entidades regionales autorizadas.
- Devolución o entrega de equipos, piezas metálicas y tuberías a proveedores o a recicladores, según su estado de contaminación y posibilidad de limpieza
- Gestión segura de materiales impregnados con hidrocarburos, como guantes, textiles y estopas, mediante almacenamiento en bolsas cerradas y posterior incineración en Campo Rubiales.

Además, se exige a la compañía adquirir materiales de construcción únicamente de proveedores autorizados y gestionar el material ferruginoso interno solo cuando proviene del movimiento de tierras autorizado para construcción de vías, PADs y plataformas, evitando el uso de arrecifes naturales u otras fuentes prohibidas.

Si bien se evidencia cumplimiento normativo y acciones puntuales de devolución y reciclaje, no se ha identificado una estrategia transversal de circularidad en los procesos de compras, trazabilidad de materiales o implementación de modelos como economía de servicios (servitización) o compras verdes. Esto representa una oportunidad relevante para fortalecer la gestión de insumos bajo un enfoque preventivo y regenerativo.

8.2.2. Gestión del agua

La gestión hídrica en el campo Quifa presenta un alto grado de tecnificación y cumplimiento normativo, con autorizaciones expresas para captación, tratamiento, reúso, inyección y disposición de diferentes tipos de aguas, incluyendo aguas de formación, residuales industriales y domésticas.

Frontera Energy dispone de sistemas integrales para el tratamiento de estas corrientes, destacando la planta ZODAR, humedales artificiales, campos de aspersión y unidades compactas tipo Red-Fox para aguas negras. Parte del agua tratada se reutiliza en riego de vías, preparación de concretos, lodos, y en jardines, mientras que otra fracción es entregada a terceros autorizados o inyectada nuevamente al subsuelo.

La inyección y reinyección de aguas tratadas está debidamente autorizada en la formación Carbonera, mediante pozos de inyección, como lo establecen los actos administrativos. Esta práctica, además de cumplir una función operativa (presión del

yacimiento), refleja una medida de economía circular que reduce la necesidad de vertimientos y promueve la gestión responsable del recurso hídrico.

En la gestión de aguas producidas, experiencias internacionales destacan la reutilización y trazabilidad de este recurso (*Ground Water Protection Council [GWPC], 2019*), prácticas que pueden adaptarse progresivamente al contexto colombiano. Los vertimientos y parámetros de calidad del agua en Colombia están regulados por la *Resolución 0631 de 2015 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible*, que establece los límites máximos permisibles para descargas a cuerpos de agua superficiales y al alcantarillado público.

8.2.3. Gestión energética

El campo Quifa cuenta con una infraestructura energética híbrida que combina el acceso a la red nacional, generación térmica propia y proyectos piloto de energías renovables, reflejando una transición progresiva hacia un modelo más eficiente y sostenible.

8.2.3.1. Suministro actual de energía

Gran parte de las operaciones en el Área de Explotación de Hidrocarburos Quifa (AEH Quifa) se abastecen eléctricamente a través del Sistema Interconectado Nacional (SIN) mediante una línea de transmisión de 230 kV, que llega al pósito Quifa Despacho. Desde allí, se transforma a un nivel de 34,5 kV y se distribuye internamente en el campo.

Adicionalmente, se cuenta con un circuito de respaldo procedente de Termopetróleo, ubicado en Campo Rubiales, que despacha aproximadamente 4,4 MW a través de líneas de distribución de media tensión.

En aquellas plataformas donde no existe conexión con redes eléctricas, el suministro se realiza mediante generadores que funcionan con Fuel Oil, utilizados principalmente en pozos remotos y estaciones de bombeo.

8.2.3.2. Infraestructura actual de generación

El campo opera con una combinación de:

- Bombas de inyección de alta potencia (hasta 4100 kW) y sistemas de bombeo tipo booster.
- Generadores diésel de distintas capacidades (500 kW, 1100 kW, 1330 kW), utilizados para alimentar áreas específicas como plataformas de perforación, baterías satélites, y evaporadores mecánicos, (las baterías satélites y la evaporación mecánica se encuentran actualmente autorizados por licencia ambiental, sin embargo, la compañía aún no ha implementado estos métodos).
- Equipos complementarios como compresores, transformadores y centros de maniobra con subestaciones eléctricas propias.

La generación convencional (diésel/gas) sigue siendo la principal fuente de energía del campo, lo que conlleva una alta dependencia de combustibles fósiles y una considerable emisión de gases de efecto invernadero (GEI).

8.2.3.3. Iniciativas de transición y economía circular

Como parte de su estrategia ambiental y de economía circular, Frontera Energy ha sido autorizada por la Agencia Nacional de Licencias Ambientales - ANLA para construir y operar un parque fotovoltaico, con una capacidad proyectada de hasta 90 MW, distribuido en tres unidades de 5 hectáreas cada una.

Además, se contempla la instalación de paneles solares en áreas operativas (clústeres, facilidades, campamentos, áreas de inyección y soporte), con el objetivo de:

- Reducir la huella de carbono de las operaciones.
- Aprovechar el recurso solar del Meta.

- Suministrar energía limpia para actividades auxiliares.

Estas medidas fueron consideradas ambientalmente viables por el equipo técnico de la ANLA y forman parte del nuevo modelo de expansión energética aprobado en la modificación de licencia.

8.2.4. Gestión de residuos

La gestión de residuos en el campo Quifa se encuentra ampliamente regulada y respaldada por un conjunto robusto de obligaciones legales, técnicas y operativas, lo cual garantiza una trazabilidad ambiental en cada fase del manejo, desde la generación hasta la disposición final.

8.2.4.1. Clasificación y segregación en la fuente

Los residuos generados se clasifican como:

- Domésticos (aprovechables y no aprovechables)
- Industriales y especiales
- Peligrosos (sólidos y líquidos)
- Residuos de construcción y demolición (RCD)
- Lodos aceitosos y cortes de perforación
- Materiales radiactivos, hospitalarios y subborras

La segregación se realiza en la fuente mediante canecas de colores identificadas por tipo de residuo, de acuerdo con la *Resolución 668 de 2016* y el *Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico RAS*. Además, cada plataforma o locación debe contar con casetas impermeabilizadas, techadas y ventiladas, diseñadas conforme al *Decreto 1076 de 2015 de MinAmbiente*.

8.2.4.2. Tratamiento y valorización

La compañía cuenta con diversas rutas de tratamiento y disposición autorizadas:

- **Lodos aceitosos:** Tratados en la planta STLA (Separación trifásica agua–aceite–sólido). La fase sólida se estabiliza cumpliendo la norma Louisiana 29B.
- **Cortes de perforación base agua:** Se almacenan en tanques o piscinas con geomembrana impermeable, se estabilizan y, tras análisis físico-químico, se destinan a revegetalización o disposición final controlada.
- **Cortes base aceite:** Son entregados a terceros especializados, con permisos vigentes para transporte y disposición.
- **Subborras (residuos de separación de agua aceitosa):** Se encuentra autorizado un proyecto piloto de encapsulamiento con nanotecnología orgánica para usarlos como material de endurecimiento en vías internas, promoviendo el aprovechamiento in situ y evitando su disposición externa.

8.2.4.3. Transporte y disposición final

Los residuos son retirados con una frecuencia semanal hacia facilidades centrales o gestores externos. El transporte se realiza bajo condiciones específicas para residuos peligrosos (hermeticidad, etiquetado, vehículos certificados), conforme al *Decreto 1079 de 2015 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible* y la *Resolución 1362 de 2007 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial*, vigente en ese momento.

La disposición final incluye:

- Incineración en Campo Rubiales (autorizada).
- Entrega a terceros con licencia ambiental vigente.
- Aprovechamiento (compostaje, humus, encapsulamiento, revegetalización).

- Rellenos autorizados para ZODME (materiales de excavación) y ZTC (cortes estabilizados).

8.2.4.4. Trazabilidad y control

La licencia exige:

- Llevar un registro mensual de residuos generados, aprovechados, tratados y dispuestos.
- Reportar a la ANLA mediante la Plantilla de Seguimiento a la Gestión de Residuos en los Informes de Cumplimiento Ambiental – ICA.
- Realizar seguimiento a los gestores contratados y conservar las actas, certificados y convenios de entrega.

8.3. Oportunidades para la economía circular en el campo Quifa

Con base en el análisis técnico-contextual del uso de materiales, agua, energía y residuos, se identifican múltiples oportunidades para evolucionar de un modelo operativo lineal hacia uno circular en las operaciones de Frontera Energy en el campo Quifa. Estas oportunidades no solo buscan reducir impactos ambientales, sino también optimizar procesos, generar eficiencia operativa, y fortalecer la reputación de la compañía como actor ambientalmente responsable dentro del sector hidrocarburos.

A continuación, se describen las principales líneas de oportunidad:

8.3.1. Valorización de residuos industriales

Los residuos como lodos aceitosos, subborras, cortes de perforación, tambores metálicos, absorbentes y trapos contaminados representan hoy un costo ambiental y económico elevado para la compañía. Sin embargo, algunos de estos residuos ya cuentan con rutas de

valorización parcial autorizadas (encapsulamiento, compostaje, estabilización) que podrían ampliarse y sistematizarse. Las oportunidades incluyen:

- Encapsulamiento de subborras tratadas con nanotecnología para uso en vías internas.
- Clasificación avanzada de residuos reciclables en origen (metales, madera, plásticos industriales).
- Implementación de plantas móviles de tratamiento que permitan el preprocesamiento de residuos in situ para reducir volumen, peligrosidad y costos de transporte.
- Desarrollo de alianzas con gestores regionales para potenciar circuitos cortos de valorización.

8.3.2. Ampliación del reúso de aguas tratadas

A pesar de los esfuerzos actuales con sistemas como ZODAR y la reinyección de agua tratada, el potencial de reutilización interna del recurso hídrico es aún mayor. Se pueden aprovechar aguas grises o efluentes secundarios para:

- Riego de zonas verdes y control de polvo.
- Lavado de equipos, vehículos y superficies.
- Aplicaciones técnicas no sensibles como mezcla de concreto o limpieza de tanques.

El establecimiento de estándares internos de calidad de agua por uso final permitiría ampliar de manera segura y escalonada estos usos.

8.3.3. Eficiencia y diversificación energética

El campo cuenta con una dependencia histórica de diésel y fuel oil, pero ya dispone de licencia para construir un parque fotovoltaico de hasta 90 MW, así como proyectos de paneles solares en áreas operativas. Las oportunidades incluyen:

- Aceleración de la implementación de energías renovables autorizadas por la ANLA.
- Sistemas híbridos con almacenamiento para disminuir el uso de plantas térmicas en zonas remotas.
- Monitoreo en tiempo real del consumo energético por unidad operativa, integrando sistemas SCADA o similares.
- Establecimiento de indicadores circulares de energía: porcentaje de energía renovable consumida, ahorro por sustitución de fuentes fósiles, etc.

8.3.4. Reutilización y logística inversa de materiales

Actualmente, muchos materiales (estructuras metálicas, piezas de concreto prefabricado, tuberías plásticas, barriles vacíos, empaques industriales) son descartados una vez finaliza su vida útil en sitio. Se identifican oportunidades para:

- Diseño modular de infraestructuras temporales (baterías, casetas, plataformas) para facilitar su desmontaje, traslado y reutilización en otros pozos o proyectos.
- Recuperación y reacondicionamiento de partes y componentes (válvulas, mangueras, soportes, anclajes).
- Establecimiento de convenios con proveedores para devolución, reparación o remanufactura de equipos e insumos industriales (economía de servicios).

- Clasificación y almacenamiento inteligente de materiales desmontados para su inventariado y reintegración al ciclo operativo.

8.3.5. Digitalización y trazabilidad para la circularidad

Un gran reto en Quifa es la falta de trazabilidad digital de materiales y residuos. El uso de tecnologías como códigos QR, etiquetas RFID, plataformas de gestión ambiental integradas o apps móviles permitiría:

- Mejorar el seguimiento de residuos desde su generación hasta la disposición final.
- Controlar el ciclo de vida de materiales críticos.
- Visualizar indicadores clave de circularidad (por ejemplo, % de residuos valorizados, % de materiales reutilizados).
- Identificar ineficiencias o desviaciones en tiempo real y facilitar la toma de decisiones basada en datos.

8.3.6. Articulación con actores externos

La economía circular requiere sinergias. Frontera Energy puede:

- Establecer acuerdos con cooperativas de reciclaje locales o regionales para la recepción de residuos aprovechables.
- Integrar a sus contratistas y proveedores en esquemas de circularidad compartida, incorporando cláusulas de devolución, trazabilidad y materiales sostenibles en los contratos.
- Vincularse con centros de investigación o universidades para escalar pilotos de innovación circular (ej. encapsulamiento, biodegradación controlada, materiales alternativos).

Esta caracterización de oportunidades constituye la base técnica para formular los ejes estratégicos de la propuesta de economía circular, alineando el diagnóstico con soluciones concretas, aplicables y alineadas con el contexto regulatorio, operativo y ambiental de Frontera Energy en el campo Quifa.

8.4. Brechas identificadas

A pesar del nivel de madurez operacional y del cumplimiento ambiental evidenciado en el campo Quifa, existen brechas estructurales, técnicas, culturales y organizacionales que limitan la transición efectiva hacia un modelo de economía circular. Estas brechas no representan incumplimientos normativos, sino más bien oportunidades de mejora estratégica para transformar procesos actualmente lineales en circuitos cerrados, eficientes y regenerativos.

Las principales brechas identificadas se agrupan en cinco dimensiones:

8.4.1. Brechas técnicas y operativas

- Ausencia de indicadores específicos de circularidad: actualmente no se cuenta con métricas como “porcentaje de residuos valorizados”, “volumen de agua reutilizada vs. captada”, o “consumo de energía por boe producido con fuentes renovables”.
- Falta de integración de plataformas digitales para trazabilidad de materiales y residuos, lo que dificulta la visibilidad completa del ciclo de vida de los recursos y limita la toma de decisiones basada en datos.

- Limitada infraestructura para valorización in situ de residuos industriales (plásticos, tambores, materiales metálicos contaminados), lo que genera dependencia de gestores externos, mayores costos y pérdida de valor potencial.
- Baja recuperación de materiales reutilizables, como estructuras metálicas modulares, elementos de concreto, tuberías o equipos operativos desmontados, que podrían tener una segunda vida útil si existieran protocolos definidos de reacondicionamiento o logística inversa.

8.4.2. Brechas organizacionales y de cultura interna

- Enfoque normativo, no transformador: aunque el cumplimiento ambiental es riguroso, muchas acciones se ejecutan por exigencia regulatoria y no como parte de una visión proactiva de innovación circular.
- Escasa capacitación interna en conceptos de economía circular: la circularidad aún no forma parte del lenguaje operativo cotidiano ni de los sistemas de gestión, lo que dificulta su adopción transversal en áreas técnicas y administrativas.
- Falta de integración entre áreas clave (HSE, compras, operaciones, mantenimiento) para construir flujos de trabajo más sostenibles y colaborativos, donde los recursos puedan ser compartidos, rediseñados o extendidos en su uso.

8.4.3. Brechas de alineación con proveedores y contratistas

- Criterios de sostenibilidad poco presentes en procesos de compra y contratación: actualmente no se exige a los proveedores incorporar modelos de

devolución, materiales reciclados, servicios compartidos o empaques reutilizables.

- Poca trazabilidad de insumos y equipos tras su entrega, lo que impide verificar si realmente fueron aprovechados, almacenados o descartados.
- Ausencia de acuerdos de corresponsabilidad circular con contratistas para compartir infraestructura, coordinar disposición de materiales o promover reutilización entre frentes de trabajo.

8.4.4. Brechas en innovación e infraestructura habilitante

- No se dispone de sistemas de monitoreo ambiental integrados en tiempo real, que permitan visualizar el desempeño circular de forma dinámica (por ejemplo, el balance hídrico en línea o el seguimiento de rutas de residuos por GPS).
- Las iniciativas piloto (como encapsulamiento de subborras o uso de ZODAR) aún no están replicadas ni escaladas a todo el bloque, lo que reduce su impacto potencial y dificulta la estandarización.
- Limitado uso de tecnologías emergentes como sensores IoT, inteligencia artificial para eficiencia energética, impresión 3D de piezas reutilizables o blockchain para trazabilidad.

8.4.5. Brechas en articulación externa y enfoque territorial

- Desaprovechamiento de sinergias locales con organizaciones de recicladores, universidades, agroindustria local o actores comunitarios que podrían participar en circuitos de economía circular.

- Escasa divulgación pública de los logros circulares alcanzados, lo que limita la generación de valor reputacional y la transparencia frente a comunidades e inversionistas.
- Poca vinculación con ecosistemas de innovación ambiental en Colombia o en América Latina, que podrían aportar soluciones técnicas, normativas o modelos de financiamiento sostenibles.

Estas brechas configuran un mapa de obstáculos, pero también de oportunidades estratégicas que, si se abordan adecuadamente, permitirán a Frontera Energy en el campo Quifa avanzar hacia un modelo operativo más resiliente, regenerativo y alineado con los desafíos globales en materia de transición energética, uso eficiente de recursos y sostenibilidad ambiental.

8.5. Conclusión del diagnóstico

El diagnóstico técnico-contextual realizado en el campo Quifa, operado por Frontera Energy, revela un panorama dual: por un lado, evidencia un alto grado de cumplimiento ambiental, normativo y operativo; y por otro, identifica un conjunto de brechas estructurales, técnicas y culturales que obstaculizan la transición hacia un modelo de economía circular plenamente integrado.

La gestión de recursos naturales en el campo (materiales, agua y energía) sigue, en gran medida, una lógica lineal, aunque ya se observan avances significativos en áreas como la inyección de aguas tratadas, el reúso doméstico a través del sistema ZODAR, y la planificación de proyectos de energía solar fotovoltaica. Estas prácticas constituyen pilares fundamentales sobre los cuales puede escalarse una estrategia de circularidad más robusta.

En cuanto a los residuos, el campo dispone de una infraestructura sólida para su manejo, almacenamiento y disposición, y cumple con todos los requisitos de segregación, trazabilidad y entrega a gestores autorizados. Sin embargo, el nivel de valorización in situ aún es limitado, y la gestión sigue siendo mayoritariamente reactiva, con una baja jerarquización orientada a la prevención, reutilización o economía de recursos.

El diagnóstico también evidencia debilidades en la trazabilidad digital, la recuperación de materiales reutilizables, y la implementación de indicadores específicos de circularidad, tanto en el uso de recursos como en la disposición de residuos. Adicionalmente, se identifica una brecha relevante en la articulación entre áreas internas y con actores externos, como proveedores, contratistas, recicladores o comunidades, lo cual limita la creación de circuitos colaborativos de economía circular.

No obstante, el análisis también deja en evidencia un importante potencial de transformación. La existencia de licencias actualizadas, infraestructura funcional, personal técnico calificado y condiciones ambientales conocidas, posiciona al campo Quifa como un escenario viable y estratégico para implementar una estrategia de economía circular aplicable, medible y replicable.

En resumen, este diagnóstico aporta los insumos necesarios para diseñar una propuesta de circularidad coherente con el contexto del campo, viable desde el punto de vista técnico y administrativo, y alineada con los compromisos globales de sostenibilidad del sector energético. A partir de estas conclusiones, se estructura en el siguiente capítulo una propuesta basada en ejes estratégicos, acciones priorizadas y mecanismos de implementación que permitirán a Frontera Energy avanzar hacia un modelo de operación más regenerativo, eficiente y resiliente.

8.6. Diseño de la estrategia de economía circular para el campo Quifa

8.6.1. Enfoque general de la estrategia

La estrategia de economía circular propuesta para Frontera Energy en el campo Quifa no se limita a un conjunto aislado de buenas prácticas ambientales, sino que constituye una hoja de ruta operativa para la transformación del modelo de gestión de recursos y residuos en campo, con un enfoque sistémico, preventivo y regenerativo.

Su diseño parte de tres elementos fundamentales:

- I.** Un diagnóstico riguroso y contextualizado, que identifica brechas reales en la gestión de materiales, agua, energía y residuos.
- II.** Una base normativa sólida, derivada de las licencias ambientales vigentes y del marco regulatorio colombiano.
- III.** Un potencial operativo evidente, dado por la infraestructura existente, la experiencia técnica de Frontera y los recursos humanos disponibles.

La propuesta busca superar el enfoque tradicional de cumplimiento normativo, proponiendo una visión estratégica integrada, en la que los recursos ya no se consideren como elementos desechables, sino como activos circulares con valor extendido a lo largo de su ciclo de vida.

Este cambio implica pasar:

- De una gestión lineal a una gestión circular de los recursos (insumo → uso → residuo → nuevo insumo).
- De una visión correctiva a una visión preventiva y de rediseño de procesos.
- De una lógica de residuos como pasivos, a una lógica de flujos materiales como oportunidades de valor.

La estrategia está concebida como una herramienta aplicable, medible, escalable y replicable, basada en la realidad operativa del campo Quifa, pero con posibilidades de expansión a otros bloques operados por Frontera Energy o por terceros en contextos similares.

8.6.2. Dimensiones clave del enfoque estratégico

Operativa: se orienta a transformar procesos cotidianos como la disposición de residuos, el uso de materiales o la generación de energía en circuitos circulares sin interferir con la eficiencia productiva ni la seguridad industrial.

Económica: busca reducir costos asociados a la compra de materiales, disposición externa, transporte de residuos, consumo de combustibles fósiles y captación de recursos naturales, promoviendo a la vez eficiencia en el uso de activos.

Ambiental: apunta a disminuir la huella ecológica de las operaciones, reduciendo emisiones, consumo de agua, generación de residuos y uso de recursos no renovables.

Reputacional: refuerza el posicionamiento de Frontera como empresa responsable, innovadora y alineada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), especialmente los ODS 6, 7, 9, 12 y 13.

Tecnológica y cultural: promueve la adopción de herramientas digitales, trazabilidad inteligente y la transformación de la cultura organizacional hacia una lógica colaborativa, circular e interdependiente.

En resumen, el enfoque general de esta estrategia se fundamenta en la reconfiguración del modelo operativo desde adentro, partiendo del conocimiento técnico y la capacidad instalada, pero orientándose hacia un nuevo paradigma en el que el valor ambiental, económico y social se crea a partir del uso responsable, eficiente y regenerativo de los recursos. Esta visión

le otorga a la estrategia no solo viabilidad técnica, sino también legitimidad institucional y un alto potencial transformador.

8.7. Principios rectores de la estrategia de economía circular

La estrategia planteada se fundamenta en un conjunto de principios que no solo orientan su diseño técnico, sino que también garantizan su coherencia con los marcos internacionales de sostenibilidad, los objetivos corporativos de Frontera Energy y las particularidades del sector hidrocarburos. Estos principios son transversales a todos los ejes estratégicos, y permiten asegurar que las acciones propuestas respondan no solo a necesidades operativas, sino también a compromisos éticos, sociales y ambientales de largo plazo.

a) Prevención en la fuente

La economía circular inicia con la prevención, entendida como la reducción del uso innecesario de recursos y la generación de residuos desde el diseño de los procesos y productos.

En el contexto de Quifa, esto implica:

- Evitar la sobrecompra o el uso excesivo de insumos industriales.
- Seleccionar materiales con mayor vida útil o posibilidad de reutilización.
- Identificar procesos que puedan rediseñarse para minimizar la pérdida de energía, agua o materiales.

Este principio permite anticiparse a los impactos y evitar costos posteriores en manejo, transporte o disposición.

b) Reutilización y extensión del ciclo de vida

La estrategia promueve que los materiales y equipos no se descarten después de un solo uso, sino que puedan ser reacondicionados, remanufacturados o reutilizados en el mismo campo o en otros proyectos de la compañía.

Ejemplos aplicables:

- Reutilización de tuberías plásticas y estructuras metálicas desmontables.
- Redistribución de módulos habitacionales o casetas operativas.
- Recuperación de partes funcionales de maquinaria para mantenimiento o stock interno.

Este principio incrementa la eficiencia del capital invertido y reduce la presión sobre proveedores y recursos naturales.

c) Valorización de residuos como recursos

Uno de los pilares de la estrategia es la valorización material y energética de los residuos, especialmente aquellos que tradicionalmente han sido tratados como desechos sin potencial de aprovechamiento.

Esto incluye:

- Compostaje y lombricultura de residuos orgánicos.
- Encapsulamiento y uso de subborras tratadas en infraestructura interna.
- Clasificación y reciclaje de envases, metales y madera.
- Tratamiento y reutilización de lodos aceitosos mediante tecnologías aprobadas.

Este principio contribuye directamente a reducir la disposición final, minimizar emisiones y generar ahorros operativos.

d) Simbiosis industrial y colaboración multiactor

La economía circular requiere alianzas. Este principio implica la búsqueda activa de sinergias entre Frontera Energy y actores externos o internos, para compartir recursos, optimizar rutas de gestión y generar valor compartido.

Ejemplos:

- Convenios con recicladores de Puerto Gaitán para el aprovechamiento de materiales segregados.
- Articulación con universidades para desarrollo y validación de pilotos tecnológicos circulares.
- Inclusión de contratistas y proveedores en cláusulas de devolución, trazabilidad y sostenibilidad.

La colaboración permite amplificar el impacto de las acciones y fortalecer la resiliencia territorial y sectorial.

e) Trazabilidad y digitalización del ciclo de vida

El principio de trazabilidad asegura que cada flujo de materiales, energía, agua y residuos pueda ser monitoreado, controlado y optimizado en tiempo real. La digitalización permite mayor transparencia, eficiencia y capacidad de respuesta.

Aplicaciones en Quifa:

- Etiquetado digital de materiales reutilizables.
- Seguimiento GPS de residuos hasta su disposición final.
- Monitoreo digital del balance hídrico y consumo energético por unidad operativa.
- Plataformas integradas para gestión ambiental y reportes a la ANLA.

Este principio habilita la toma de decisiones basada en datos y reduce el riesgo de pérdidas, ineficiencias o incumplimientos.

f) Formación, cultura y mejora continua

Una estrategia circular solo es sostenible si está acompañada de una transformación cultural. Por ello, la propuesta incorpora un principio centrado en la educación ambiental, la capacitación técnica y la retroalimentación constante del sistema.

Esto implica:

- Programas internos de formación para personal operativo y contratistas.
- Difusión de buenas prácticas y logros alcanzados.
- Integración del enfoque circular en los sistemas de gestión HSE.
- Revisión periódica de indicadores y mecanismos de mejora.

Este principio garantiza que la circularidad no sea un proyecto puntual, sino una línea permanente de trabajo e innovación dentro de la operación.

En conjunto, estos principios configuran una base ética, técnica y estratégica que asegura la coherencia, la legitimidad y la eficacia de la estrategia de economía circular propuesta para Frontera Energy en el campo Quifa.

8.8. Ejes estratégicos de la estrategia de economía circular

Los ejes estratégicos son las líneas de acción estructurantes de la estrategia, y responden directamente al diagnóstico técnico-contextual, a las oportunidades detectadas y a las brechas identificadas. Cada eje actúa sobre una dimensión crítica del sistema operativo, permitiendo articular cambios técnicos, organizacionales y culturales de manera coordinada y progresiva.

8.8.1. Eje 1: Circularidad en la gestión de residuos

Propósito: Reducir al mínimo la disposición final de residuos, incrementando su valorización y reincorporación al ciclo productivo, conforme a la jerarquía de gestión establecida por el modelo circular.

Líneas de acción:

- Ampliar la capacidad instalada para el tratamiento in situ de residuos industriales peligrosos (como lodos aceitosos y subborras).
- Escalar el piloto de encapsulamiento con nanotecnología de residuos estabilizados para uso en vías internas.
- Clasificar y segregar eficientemente los residuos reciclables desde la fuente (plásticos, madera, papel, metales), facilitando su aprovechamiento.
- Generar convenios formales con recicladores regionales certificados para crear rutas de valorización territorial.
- Implementar plataformas digitales de trazabilidad de residuos, desde su generación hasta su destino final.

Indicadores sugeridos:

- % de residuos valorizados sobre el total generado.
- Reducción anual del volumen enviado a disposición final.

- Número de residuos con rutas de valorización definidas.

8.8.2. Eje 2: Optimización hídrica con enfoque circular

Propósito: Aumentar el reúso del agua tratada dentro de los procesos operativos, reducir captaciones externas y fortalecer la eficiencia hídrica en el campo.

Líneas de acción:

- Reutilizar aguas tratadas (ZODAR y otras fuentes) en actividades como lavado de equipos, control de polvo y mantenimiento de vías.
- Implementar un balance hídrico digitalizado por plataforma o unidad operativa, para medir captación, consumo, reúso e inyección.
- Replicar el sistema ZODAR o tecnologías similares en locaciones satélite que aún no cuentan con plantas propias.
- Establecer indicadores internos de eficiencia hídrica e incluirlos en los reportes de sostenibilidad corporativa.
- Sensibilizar al personal sobre prácticas de ahorro y reúso de agua.

Indicadores sugeridos:

- % de agua tratada reutilizada vs. captada.
- Volumen de agua ahorrado por año mediante reúso.
- Número de plataformas con balance hídrico digitalizado.

8.8.3. Eje 3: Transición energética y eficiencia operativa

Propósito: Disminuir la dependencia de combustibles fósiles en la generación eléctrica del campo, promoviendo el uso de energías limpias y buenas prácticas de eficiencia.

Líneas de acción:

- Implementar gradualmente el Parque Fotovoltaico autorizado por la ANLA (90 MW) para cubrir una parte significativa de la demanda energética del campo.
- Instalar microgrids solares en plataformas remotas sin conexión al SIN.
- Incorporar tecnologías de almacenamiento de energía (baterías) para estabilizar el suministro en áreas no interconectadas.
- Medir el consumo energético por unidad funcional (ej. kWh por barril de petróleo equivalente) e incorporar esta métrica en los sistemas de gestión.
- Promover rutinas de eficiencia operativa: mantenimiento predictivo de equipos, apagado automático, gestión de cargas, etc.

Indicadores sugeridos:

- % de energía proveniente de fuentes renovables.
- Reducción de consumo de diésel/gas por año.
- kWh/boe producidos.

8.8.4. Eje 4: Gestión circular de materiales e insumos

Propósito: Promover la reutilización, reacondicionamiento y trazabilidad de los materiales utilizados en campo, reduciendo el consumo de recursos vírgenes y evitando descartes innecesarios.

Líneas de acción:

- Diseñar infraestructuras temporales (plataformas, casetas, cercas) bajo criterios de modularidad y reutilización.
- Recuperar, reacondicionar y clasificar materiales desmontados (geotextiles, tubos, estructuras metálicas) para futuras aplicaciones.

- Implementar logística inversa con proveedores para devolución de materiales posconsumo (envases, repuestos, herramientas).
- Crear un inventario digital de materiales reutilizables, actualizado por frente de trabajo.
- Incluir criterios de sostenibilidad en los procesos de compra: contenido reciclado, ciclo de vida, materiales biodegradables.

Indicadores sugeridos:

- % de materiales reutilizados vs. comprados.
- Cantidad de elementos recuperados por categoría (toneladas/año).
- Número de contratos con cláusulas de devolución o reacondicionamiento.

8.8.5. Eje 5: Cultura organizacional y articulación externa

Propósito: Fortalecer la cultura interna hacia la circularidad y promover alianzas que multipliquen el impacto ambiental, social y reputacional de la estrategia.

Líneas de acción:

- Diseñar e implementar un programa de capacitación ambiental interna sobre economía circular, dirigido a personal propio y contratistas.
- Incluir cláusulas de sostenibilidad circular en los contratos de bienes y servicios.
- Establecer alianzas con universidades, ONGs y centros tecnológicos para desarrollo de pilotos, estudios de impacto y soluciones innovadoras.
- Desarrollar un plan de comunicación y reporte de logros circulares, para stakeholders internos, comunidades y entes reguladores.
- Participar en redes sectoriales de sostenibilidad para difundir y aprender de experiencias similares.

Indicadores sugeridos:

- % de personal capacitado en circularidad.
- Número de alianzas estratégicas activas.
- Visibilidad de los logros en reportes e informes públicos.

Cada uno de estos ejes articula acciones concretas con resultados medibles y puede ser implementado de forma modular o escalonada, dependiendo de los recursos, prioridades y contexto de ejecución.

8.9. Criterios de priorización

La transición hacia un modelo de economía circular en una operación compleja como el campo Quifa debe abordarse de manera progresiva, estructurada y técnicamente viable. Para ello, resulta fundamental establecer criterios que permitan jerarquizar las acciones propuestas según su factibilidad, impacto y alineación con los objetivos del TFM y los lineamientos corporativos y regulatorios.

Estos criterios no solo orientan la toma de decisiones sobre qué acciones implementar primero, sino también permiten hacer un uso más eficiente de los recursos disponibles, disminuir los riesgos operativos y obtener resultados tempranos que sirvan de referencia para la réplica o escalamiento de la estrategia.

La incorporación de indicadores específicos puede apoyarse en marcos internacionales como los Circular Transition Indicators (WBCSD, 2022), que facilitan evaluar el grado de circularidad alcanzado y la trazabilidad de los recursos a lo largo del ciclo de vida.

A continuación, se describen los siete criterios fundamentales de priorización:

a) Viabilidad técnica y operativa

Se refiere a la facilidad de implementación de cada acción considerando las condiciones técnicas actuales del campo, la infraestructura disponible, la compatibilidad con los procesos existentes y la madurez tecnológica de la solución.

Ejemplos:

- Implementar segregación de residuos valorizables puede tener alta viabilidad.
- Instalar un sistema de impresión 3D para piezas operativas puede requerir estudios y pilotos previos.
- Priorizar lo que ya es factible reduce barreras de entrada y acelera los resultados.

b) Viabilidad normativa y compatibilidad con licencias ambientales

Toda acción debe estar alineada con los términos establecidos en las licencias ambientales vigentes, o al menos no contradecirlos. Las acciones con respaldo regulatorio explícito o que se encuentran dentro del marco de actuación ya autorizado deben ser priorizadas por su mayor facilidad de aprobación y control.

Ejemplos:

El reúso de agua tratada, el uso de subborras encapsuladas y la implementación del parque solar ya están autorizados por la ANLA, lo que les da prioridad natural.

c) Impacto ambiental esperado

Este criterio considera el potencial de reducción de impactos ambientales negativos como la generación de residuos, las emisiones de GEI, el consumo de agua o el uso de materiales vírgenes. Las acciones que generen beneficios ambientales cuantificables y directos deben tener un peso alto en la priorización.

Ejemplo:

Una acción que permita valorizar el 70 % de los residuos industriales tendrá mayor peso que una acción de mejora visual sin reducción de impacto ambiental directo.

d) Costo–eficiencia económica

Implica analizar la relación entre el costo de implementación y el beneficio esperado, incluyendo ahorro operativo, reducción de multas o gastos en disposición, menor compra de insumos, o extensión de la vida útil de equipos. No se trata de priorizar solo lo barato, sino lo que sea más rentable, sostenible y escalable.

Ejemplo:

La reutilización de módulos metálicos puede representar un ahorro directo frente a la compra de estructuras nuevas.

e) Escalabilidad dentro del bloque Quifa

Se evalúa la capacidad de replicar o ampliar la acción a otras plataformas, áreas del bloque o incluso a otros campos operados por la empresa. Las acciones altamente replicables fortalecen el efecto sistémico de la estrategia y permiten mayor retorno a largo plazo.

Ejemplo:

Un modelo de gestión circular de residuos implementado en una batería puede replicarse fácilmente en otras cinco.

f) Aceptación organizacional y facilidad de adopción cultural

Toda estrategia debe considerar el nivel de aceptación interna de las acciones propuestas, especialmente en campos con alta rotación de personal o con múltiples contratistas.

Acciones que no implican cambios bruscos de cultura o que cuentan con “champions” internos deben priorizarse para generar resultados tempranos y compromiso.

Ejemplo:

Un programa de formación modular con personal motivado puede ser más efectivo que imponer nuevas rutinas sin sensibilización previa.

g) Potencial de articulación con actores externos

Las acciones que puedan apalancarse mediante alianzas con proveedores, recicladores, universidades, comunidades o centros tecnológicos, tienen mayor potencial de impacto, cofinanciación, innovación y sostenibilidad a largo plazo.

Ejemplo:

Un acuerdo con una universidad para validar tecnológicamente un piloto de reutilización puede abrir acceso a conocimiento, estudiantes en prácticas e incluso financiación pública.

8.9.1. Aplicación de los criterios

Cada acción dentro de los ejes estratégicos puede ser valorada de forma cualitativa (alta, media, baja) o con una escala numérica simple (por ejemplo, del 1 al 5 por criterio). Esta ponderación puede realizarse en una matriz de priorización que oriente la hoja de ruta de implementación por fases.

8.10. Conexión con los objetivos del TFM

La estrategia de economía circular diseñada para el campo Quifa no es solo el producto final del trabajo, sino la expresión práctica, fundamentada y estructurada del objetivo general

y de los objetivos específicos propuestos al inicio de este TFM. Cada eje estratégico, cada línea de acción y cada principio rector responde directa o indirectamente a uno o más de estos objetivos, garantizando así la alineación metodológica y conceptual del proyecto.

Objetivo general del TFM:

“Diseñar una estrategia de economía circular para Frontera Energy en el campo Quifa (Colombia), orientada a optimizar el uso de recursos, valorizar residuos y alinear los procesos operativos con los principios de sostenibilidad ambiental.”

8.10.1. Conexión directa objetivo general:

El diseño de la estrategia responde de manera explícita a este objetivo al estructurar una propuesta con ejes estratégicos, criterios de priorización y acciones concretas aplicables al contexto real del campo Quifa. La estrategia considera el ciclo completo de los recursos (agua, materiales, energía y residuos), desde su entrada hasta su disposición, proponiendo alternativas de optimización, reutilización y regeneración, que van más allá del cumplimiento ambiental.

Los principios rectores, la estructuración por fases y la definición de indicadores permiten que esta estrategia no sea teórica, sino implementable y evaluable, aportando valor tanto a nivel técnico como de gestión.

Objetivo específico 1:

“Caracterizar los procesos actuales de gestión de recursos y residuos en el campo Quifa, con base en las licencias ambientales vigentes y la operación real del sitio.”

8.10.2. Conexión directa objetivo específico 1:

El diagnóstico técnico-contextual que sustenta la estrategia cumplió este objetivo a cabalidad, incluyendo la revisión profunda de las licencias ambientales (Resolución 2035 de

2010 y Resolución 1885 de 2023). Se describieron con precisión los procesos de manejo de materiales, agua, energía y residuos, señalando fortalezas y oportunidades de mejora.

Este diagnóstico permitió construir la base realista y contextual sobre la que se diseñó la estrategia, evitando planteamientos genéricos o desvinculados de la operación real.

Objetivo específico 2:

“Identificar las oportunidades de mejora en términos de circularidad y sostenibilidad operacional dentro del modelo actual de gestión del campo.”

8.10.3. Conexión directa objetivo específico 2:

La sección de oportunidades para la economía circular desglosa múltiples rutas de mejora realistas, técnicas y viables: desde el aprovechamiento de subborras y el reúso de agua, hasta la recuperación de materiales y la eficiencia energética.

Cada una de estas oportunidades se relaciona con áreas críticas de operación y está diseñada para integrarse progresivamente en los sistemas existentes, sin interrumpir la eficiencia productiva.

Estas oportunidades, posteriormente, se convirtieron en ejes estratégicos concretos, lo que demuestra una conexión directa entre el análisis diagnóstico y la propuesta estratégica.

Objetivo específico 3:

“Formular una propuesta estratégica adaptada al contexto técnico-operativo de Frontera Energy, basada en principios de economía circular y orientada a la valorización de recursos y residuos.”

8.10.4. Conexión directa objetivo específico 3:

La estrategia formulada parte del contexto específico del campo Quifa, considerando sus licencias, infraestructura, cultura organizacional y relaciones con terceros. Se definieron principios rectores alineados con la economía circular, pero aplicados específicamente al sector hidrocarburos y al funcionamiento particular del bloque Quifa.

Los ejes estratégicos responden a problemáticas y potencialidades reales, como la valorización de residuos industriales, la reutilización de aguas tratadas, la trazabilidad digital y la eficiencia energética, lo que refleja una propuesta completamente adaptada y aplicable.

Objetivo específico 4:

“Establecer criterios para la implementación gradual de la estrategia, permitiendo su evaluación y mejora continua en el tiempo.”

8.10.5. Conexión directa objetivo específico 4:

El apartado de criterios de priorización ofrece una guía clara para jerarquizar acciones, considerando viabilidad técnica, normativa, impacto ambiental, costo-eficiencia, escalabilidad y aceptación organizacional. Estos criterios no solo permiten implementar por fases la estrategia, sino también evaluar su efectividad, identificar cuellos de botella y retroalimentar el sistema, lo cual habilita un modelo de mejora continua.

Se proponen además indicadores sugeridos por eje estratégico, lo que facilita el monitoreo y la rendición de cuentas, fortaleciendo el enfoque de sostenibilidad a largo plazo.

Objetivo específico 5:

“Establecer indicadores que permitan evaluar el avance y el impacto de la estrategia circular en términos ambientales, económicos y sociales.”

8.10.6. Conexión directa objetivo específico 5:

La estrategia propuesta define un conjunto de indicadores ambientales, económicos y sociales vinculados a cada eje estratégico. Estos permiten medir de forma objetiva el grado de circularidad alcanzado.

El uso de indicadores garantiza la posibilidad de monitorear avances, identificar desviaciones y reportar resultados de manera transparente a autoridades, comunidades e inversionistas. Además, su diseño se alinea con referentes internacionales como los Circular Transition Indicators (WBCSD, 2022) y la ISO 14031 sobre evaluación del desempeño ambiental, asegurando que la estrategia no solo se implemente gradualmente, sino que también pueda ser evaluada y mejorada en el tiempo con base en evidencias cuantitativas y cualitativas.

En conjunto, la estrategia de economía circular formulada constituye la materialización lógica, estructurada y viable de los objetivos planteados en el TFM. Su desarrollo no solo cumple con el propósito académico del trabajo, sino que aporta una herramienta de alto valor aplicado para Frontera Energy, en un contexto donde la eficiencia operativa, la gestión ambiental y la reputación corporativa son más estratégicas que nunca.

8.11. Plan de implementación de la estrategia de economía circular para el campo Quifa

El diseño de la estrategia constituye el marco conceptual y operativo para avanzar hacia la circularidad en las operaciones de Frontera Energy en el campo Quifa. No obstante, para que esta propuesta se convierta en una realidad, es indispensable contar con un plan de

implementación que permita organizar las acciones, asignar responsabilidades y proyectar resultados de manera progresiva.

Este plan se ha estructurado en fases de corto, mediano y largo plazo, lo que facilita iniciar con medidas de alta viabilidad técnica y normativa, mientras se preparan las condiciones para transformaciones más profundas.

8.11.1. Fase de corto plazo (0 – 2 años)

Objetivo: iniciar con acciones de rápida implementación que generen resultados visibles y fortalezcan la confianza interna en la estrategia.

Principales acciones:

- Gestión de residuos: replicar el piloto de encapsulamiento de subborras en diferentes plataformas, ampliar la segregación en la fuente y fortalecer convenios con recicladores locales.
- Gestión hídrica: incrementar el reúso de aguas tratadas en lavado de equipos, control de polvo y riego de zonas verdes.
- Energía: instalar sistemas fotovoltaicos en áreas auxiliares y avanzar en la construcción del parque solar autorizado.
- Materiales: implementar inventarios digitales para registrar y reutilizar materiales recuperados en obra.
- Cultura organizacional: poner en marcha un programa de capacitación interna en economía circular, dirigido a empleados propios y contratistas.

Responsables: Áreas de HSE, Operaciones, Compras y Mantenimiento, con el acompañamiento de la Gerencia Ambiental y de Sostenibilidad.

Recursos necesarios: presupuesto operativo ya aprobado, contratación de gestores autorizados, apoyo técnico de universidades locales y asesoría de la ANLA para seguimiento normativo.

8.11.2. Fase de mediano plazo (3 – 5 años)

Objetivo: consolidar la circularidad como parte de la operación habitual y fortalecer la trazabilidad digital de los procesos.

Principales acciones:

- Digitalización: incorporar plataformas integradas de seguimiento en tiempo real de materiales, agua y energía.
- Residuos: ampliar la capacidad instalada para el tratamiento in situ de lodos y cortes de perforación, reduciendo la dependencia de gestores externos.
- Energía: diversificar con sistemas híbridos (solar + diésel) en pozos remotos e integrar baterías de almacenamiento.
- Materiales: establecer cláusulas de devolución y reacondicionamiento en contratos de proveedores estratégicos.
- Colaboración externa: formalizar convenios con universidades y centros tecnológicos para el desarrollo de pilotos circulares.

Responsables: Gerencia Ambiental y de Sostenibilidad en coordinación con Operaciones y Compras; alianzas con la academia y actores locales.

Recursos necesarios: inversión en plataformas digitales, equipos de valorización y formación continua de personal.

8.11.3. Fase de largo plazo (6 – 10 años)

Objetivo: alcanzar un modelo de circularidad plenamente integrado, escalable a otros campos y reconocido a nivel sectorial.

Principales acciones:

- **Gestión hídrica:** lograr que la mayoría de las operaciones utilicen sistemas de balance hídrico digitalizado y que el reúso de agua tratada supere el 70 % del consumo.
- **Residuos:** alcanzar la valorización de al menos el 80 % de los residuos industriales generados en campo.
- **Energía:** cubrir un porcentaje mayoritario de la demanda energética del campo con fuentes renovables (solar y almacenamiento).
- **Innovación:** incorporar tecnologías emergentes (impresión 3D, IoT, blockchain) para optimizar recursos.
- **Reputación y liderazgo sectorial:** posicionar a Frontera Energy como referente nacional en circularidad dentro del sector hidrocarburos, a través de la publicación de reportes, participación en redes de sostenibilidad y réplica de las prácticas exitosas en otros bloques.

Responsables: alta dirección de Frontera Energy, con articulación regional y nacional en materia de sostenibilidad energética y ambiental.

Recursos necesarios: inversiones de capital en infraestructura renovable, sistemas de innovación tecnológica y cooperación con aliados internacionales.

Este plan de implementación permite transformar la estrategia en una hoja de ruta clara y alcanzable. La combinación de acciones inmediatas con proyectos de mediano y largo plazo

asegura que los resultados sean visibles desde el inicio, al tiempo que se sientan las bases para cambios estructurales y sostenibles. Además, la participación activa de proveedores, contratistas, comunidades y centros de investigación refuerza la legitimidad de la propuesta y su capacidad de replicarse en otros contextos.

8.12. Resultados esperados

La implementación de la estrategia de economía circular en el campo Quifa busca generar resultados tangibles en el plano ambiental, económico y social. Estos resultados no se limitan únicamente a la reducción de impactos negativos, sino que apuntan también a la creación de valor compartido entre la empresa, sus contratistas, proveedores y las comunidades locales.

8.12.1. Resultados ambientales

Reducción de residuos enviados a disposición final: se espera alcanzar tasas de valorización superiores al 70 % de los residuos industriales en el mediano plazo, gracias a la ampliación de prácticas como el encapsulamiento de subborras, el reciclaje de materiales y la reutilización de componentes.

Optimización del uso del recurso hídrico: mediante el incremento del reúso de aguas tratadas, el objetivo es disminuir de manera progresiva las captaciones externas y lograr un ahorro significativo, con metas de reutilización que superen el 50 % en el corto plazo y el 70 % en el largo plazo.

Disminución de la huella de carbono: con la entrada en operación del parque fotovoltaico y los sistemas híbridos, se prevé sustituir una parte relevante de la energía proveniente de fuentes fósiles, reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero en al menos un 20 % en los primeros cinco años.

Prevención de la contaminación: la mejora en la segregación de residuos peligrosos, junto con la trazabilidad digital, reducirá riesgos de fugas, incidentes ambientales y afectaciones al suelo o cuerpos de agua.

8.12.2. Resultados económicos

Ahorro en costos operativos: al disminuir la dependencia de gestores externos para el manejo de residuos y al reutilizar materiales y componentes en sitio, la empresa reducirá gastos recurrentes en transporte, disposición y compra de insumos nuevos.

Eficiencia en el consumo de recursos: la reducción en el uso de agua, energía fósil y materias primas se traduce en una mayor eficiencia productiva, con un impacto positivo en los márgenes operativos.

Nuevas oportunidades de negocio: la valorización de subproductos y el desarrollo de alianzas con proveedores y recicladores locales pueden abrir líneas de negocio secundarias, generando ingresos adicionales y diversificando la cadena de valor.

Acceso a financiamiento verde: la alineación con principios de sostenibilidad y ODS aumenta la posibilidad de acceder a créditos o incentivos financieros vinculados a proyectos circulares y de bajas emisiones.

8.12.3. Resultados sociales

Fortalecimiento de capacidades internas: los programas de capacitación en economía circular incrementarán el conocimiento técnico del personal propio y contratista, fomentando una cultura de innovación y sostenibilidad.

Generación de empleo local: la creación de alianzas con cooperativas de reciclaje y con proveedores regionales generará oportunidades de trabajo en las comunidades cercanas al campo Quifa.

Mejora en la relación con comunidades: al reducir impactos ambientales y comunicar de manera transparente los logros alcanzados, la empresa fortalecerá la confianza y la licencia social para operar.

Reputación corporativa: Frontera Energy podrá posicionarse como una compañía pionera en la aplicación de la economía circular en el sector hidrocarburos colombiano, lo que le permitirá diferenciarse frente a competidores y aumentar su legitimidad ante autoridades, inversionistas y la sociedad civil.

9. Discusión y análisis

9.1. Coherencia de la estrategia con la literatura y las buenas prácticas

La propuesta para Quifa se alinea con los pilares que la literatura considera “no negociables” en economía circular: prevenir en la fuente, extender la vida útil de materiales/equipos, valorizar residuos y habilitar la trazabilidad para tomar decisiones con datos. En la práctica, esto se traduce en los ejes que definimos: más reúso de agua tratada, valorización in situ de residuos industriales, logística inversa de materiales, transición energética y cultura organizacional.

Lau et al. (2022) proponen un modelo conceptual de economía circular para la industria del petróleo y gas, centrado en procesos de re-refinación que permiten recuperar recursos valiosos, optimizar el uso de materiales y reducir los impactos ambientales, lo cual refuerza la pertinencia de aplicar criterios circulares en el campo Quifa.

Un punto fuerte es que la estrategia no se queda en conceptos: baja al terreno con criterios de priorización, indicadores y un plan por fases. Esta “bajada” es clave para que la circularidad compita con el día a día operativo sin frenar la producción.

9.2. Benchmarking sectorial: similitudes y diferencias

Las grandes petroleras que reportan avances en circularidad suelen moverse en cuatro frentes:

- Residuos a recursos: reciclaje y coprocesamiento, estabilización y uso de subproductos en obra.
- Agua: esquemas de tratamiento y reúso por calidad de uso final.

- Energía: despliegue fotovoltaico/híbrido para reducir diésel en operaciones remotas.
- Compras y contratos: cláusulas de devolución, reacondicionamiento y contenido reciclado.

Esta propuesta reproduce ese “núcleo duro” y lo adapta al contexto Quifa (licencias, distancias, logística en llanura, oferta local de gestores). La diferencia es el énfasis en valorización in situ (para acortar rutas y costos), digitalización de balances de agua/energía y un componente cultural explícito con contratistas, algo que a menudo queda implícito en otros casos y aquí se convierte en eje. A nivel global, asociaciones sectoriales como IPIECA (2024) han publicado guías que orientan la incorporación de la economía circular en operaciones petroleras.

9.3. Factores críticos de éxito (y cómo se abordan)

- Gobernanza interna: sin un “dueño” claro, la circularidad se diluye. La estrategia asigna roles (HSE, Operaciones, Compras, Mantenimiento) y fases con responsables.
- Datos y trazabilidad: lo que no se mide no mejora. Se proponen inventarios digitales, balance hídrico y seguimiento de residuos en tiempo real.
- Contratos y compras: si no cambia el contrato, no cambia el comportamiento. Se incluyen cláusulas de devolución, reacondicionamiento y criterios de sostenibilidad.
- Cultura y habilidades: la curva de aprendizaje es real. Programa de formación modular para personal propio y contratistas.

- Alineación regulatoria: cumplir y, a la vez, innovar. La priorización parte de lo ya autorizado y escala con pilotos documentados.

9.4. Riesgos principales y medidas de mitigación

- Normativo: interpretación restrictiva de usos/valorizaciones.
Mitigación: pilotos con protocolos, análisis y trazabilidad; diálogo temprano con autoridad.
- Técnico-operativo: variabilidad de calidad de residuos o efluentes.
Mitigación: especificaciones de calidad por uso final y control en sitio.
- Económico: CAPEX en digitalización o equipos de tratamiento.
Mitigación: fases, quick wins que generan ahorros, y búsqueda de financiación verde.
- Cadena de suministro: baja oferta local para ciertos aprovechamientos.
Mitigación: convenios con universidades/centros tecnológicos y desarrollo paulatino de proveedores.
- Social/reputacional: percepción de “experimentación” en territorio.
Mitigación: socialización temprana, reportes de resultados y transparencia.

9.5. Pertinencia para Colombia y para el Meta

La apuesta conversa con la Estrategia Nacional de Economía Circular y con los ODS, y aterriza en un territorio con oferta solar alta, rutas logísticas largas y comunidades que valoran la reducción de polvo, vertimientos y tráfico pesado. El énfasis en circuitos cortos (tratar y aprovechar cerca de donde se genera) es especialmente pertinente en Quifa.

9.6. Valor para Frontera Energy (caso de negocio cualitativo)

- Ahorro operativo: menos disposición externa y transporte, más reutilización de materiales.
- Reducción de riesgos: mejor segregación y trazabilidad = menos contingencias.
- Descarbonización gradual: solar + almacenamiento para plataformas remotas.
- Licencia social: menos impactos visibles y más rendición de cuentas.
- Diferenciación: posicionamiento como operador que “hace circularidad que funciona”, no solo que la declara.

9.7. Supuestos y limitaciones del estudio

- Información interna: se trabajó con fuentes públicas y conocimiento técnico; cuando se habilite data interna granular, el modelo ganará precisión.
- No intervención experimental: los beneficios cuantitativos finales dependen de pilotos y mediciones en sitio.
- Escalabilidad: algunas soluciones requieren madurez de proveedores locales y acuerdos contractuales progresivos.

Estas limitaciones no debilitan la propuesta; marcan la ruta de trabajo para la fase de pilotos con métricas (p. ej., % de residuos valorizados, % de agua reutilizada, kWh/boe, reducción de diésel).

9.8. Líneas de profundización futura

El presente trabajo constituye un punto de partida para la incorporación de la economía circular en las operaciones de Frontera Energy en el campo Quifa. No obstante, la naturaleza

dinámica del sector y la necesidad de contar con información más detallada abren oportunidades para seguir profundizando en diferentes dimensiones:

- **Evaluaciones con herramientas de ciclo de vida (ACV y huella de carbono):**

Aplicar metodologías de Análisis de Ciclo de Vida comparando rutas de gestión de residuos (ej. disposición externa vs. valorización in situ) permitiría cuantificar los beneficios reales en términos de emisiones, consumo energético y huella hídrica.

Estos estudios darían mayor respaldo técnico a las decisiones de inversión y servirían como evidencia ante entes reguladores y comunidades.

- **Valoración económico-financiera detallada de las iniciativas:**

Aunque este TFM proyecta beneficios cualitativos y operativos, sería valioso realizar un análisis financiero con indicadores como Valor Actual Neto (VAN), Tasa Interna de Retorno (TIR) y periodos de recuperación.

Este ejercicio facilitaría la priorización de proyectos, mostrando cuáles generan mayor retorno en términos de ahorro en disposición, sustitución de energía fósil o reducción de compras de insumos.

- **Pilotos tecnológicos de innovación circular:**

Ensayar nuevas soluciones en campo, como la impresión 3D para piezas de repuesto, sensores IoT para balance hídrico en tiempo real, o blockchain para trazabilidad de residuos peligrosos, abriría la posibilidad de posicionar a Frontera Energy como referente tecnológico en la región.

Estos pilotos también permitirían medir la madurez de las tecnologías antes de escalarlas al resto de la operación.

- **Modelos de simbiosis industrial y territorial:**

Explorar vínculos con agroindustrias cercanas, recicladores locales, universidades y comunidades permitiría crear ecosistemas de economía circular más amplios.

Por ejemplo, residuos orgánicos o estabilizados podrían servir como insumo para proyectos agrícolas, mientras que plásticos recuperados podrían reincorporarse a cadenas de reciclaje regionales.

Esta articulación fortalecería la licencia social para operar y contribuiría al desarrollo local del Meta.

- **Profundización en la dimensión social de la circularidad:**

Estudios futuros podrían evaluar el impacto de la estrategia en términos de generación de empleo local, inclusión de cooperativas de recicladores y fortalecimiento de capacidades comunitarias.

También sería pertinente medir la percepción de la comunidad sobre la circularidad y su efecto en la confianza hacia la compañía.

- **Escalabilidad a otros bloques operados por Frontera Energy:**

El campo Quifa puede convertirse en laboratorio y referencia para aplicar gradualmente la estrategia en otros bloques con condiciones logísticas o regulatorias diferentes.

Esta comparación permitiría identificar ajustes metodológicos y buenas prácticas transferibles, potenciando la eficiencia corporativa y el liderazgo en sostenibilidad.

La estrategia aquí diseñada constituye una propuesta integral y aplicable al campo Quifa; sin embargo, como todo modelo dinámico, puede evolucionar mediante estudios cuantitativos más precisos, pilotos tecnológicos, alianzas territoriales y análisis sociales complementarios. Estas proyecciones no restan valor al TFM, sino que lo potencian, permitiendo que se convierta en un referente de gestión circular replicable en otros bloques y adaptable a los retos futuros del sector hidrocarburos en Colombia.

10. Conclusiones y recomendaciones

La economía circular se confirma como un enfoque estratégico y factible para el sector hidrocarburos.

El estudio realizado en el campo Quifa demuestra que, aun en industrias de alta intensidad extractiva, es posible avanzar hacia modelos de gestión más sostenibles. Aunque Frontera Energy cuenta con un sólido sistema de cumplimiento normativo, la evaluación evidenció que su operación sigue respondiendo a una lógica lineal. Esto confirma que la economía circular no solo es deseable, sino necesaria para garantizar la resiliencia ambiental, económica y social de la compañía en el largo plazo.

La estrategia diseñada es integral, realista y adaptable.

Uno de los principales aportes de este trabajo radica en haber estructurado una propuesta que combina principios, ejes estratégicos, criterios de priorización y un plan de implementación gradual. Esta articulación le otorga a la estrategia un carácter práctico y aplicable, evitando que quede en el plano declarativo. Al mismo tiempo, su diseño modular permite ajustarla a diferentes condiciones operativas, lo que asegura su replicabilidad tanto en Quifa como en otros bloques de Frontera Energy.

La implementación progresiva es la clave del éxito.

El plan de implementación, dividido en fases de corto, mediano y largo plazo, constituye un mecanismo que facilita la adopción de acciones sin interrumpir la productividad. La inclusión de quick wins en la fase inicial permite obtener resultados tangibles desde el primer momento, fortaleciendo la credibilidad interna de la estrategia y abriendo camino a transformaciones más profundas, como la digitalización y la transición energética.

Los beneficios esperados trascienden lo ambiental y generan valor compartido.

La propuesta no se limita a reducir impactos negativos, sino que busca generar valor económico, social y reputacional. En lo ambiental, se proyecta una reducción significativa en la disposición de residuos, un aumento en el reúso del agua tratada y un avance en la descarbonización mediante energías limpias. En lo económico, se plantean ahorros operativos, eficiencia en el uso de insumos y la posibilidad de acceder a financiamiento verde. En lo social, se promueve la generación de empleo local, la participación de recicladores y el fortalecimiento de la licencia social para operar, consolidando una relación más sólida con las comunidades del Meta.

El campo Quifa se posiciona como un escenario idóneo para liderar la transición circular en Colombia.

Las condiciones técnicas, normativas y operativas identificadas hacen de Quifa un laboratorio natural para demostrar que la economía circular puede aplicarse en la industria petrolera colombiana de manera realista. La estrategia propuesta no solo ofrece soluciones al interior de la compañía, sino que también abre oportunidades de articulación con actores externos, potenciando la generación de valor compartido a nivel regional. De este modo, Frontera Energy puede consolidarse como pionera en la implementación de la circularidad en hidrocarburos, contribuyendo a los compromisos nacionales en materia de sostenibilidad y a los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

El valor académico y profesional del TFM radica en su carácter propositivo y contextualizado.

Más allá de la aplicación práctica, este trabajo contribuye a la discusión académica sobre la circularidad en industrias extractivas, un campo donde aún existen vacíos de

conocimiento. Al integrar teoría, marco normativo y diagnóstico técnico-operativo, el TFM ofrece un modelo aplicable que puede servir de referencia para futuras investigaciones y para otras empresas del sector.

Recomendaciones finales

Institucionalizar la estrategia de economía circular como parte de la gestión corporativa.

Es recomendable que Frontera Energy formalice un comité interno de economía circular que coordine la ejecución de la estrategia, integre a las áreas de HSE, Operaciones, Compras, Mantenimiento y Sostenibilidad, y defina mecanismos claros de seguimiento. Esta institucionalización garantiza continuidad en el tiempo y evita que la circularidad se perciba como un proyecto aislado.

Iniciar con acciones de alto impacto y rápida implementación.

En la fase inicial es estratégico priorizar medidas que puedan mostrar resultados visibles en el corto plazo, como el reúso de aguas tratadas en operaciones auxiliares, la ampliación de la segregación de residuos y la capacitación del personal. Estos “quick wins” refuerzan la credibilidad de la estrategia y demuestran que la circularidad no solo es viable, sino que también genera beneficios inmediatos.

Acelerar la transición energética en campo.

La puesta en marcha del parque fotovoltaico y la instalación de sistemas híbridos en plataformas remotas deben ser tratados como proyectos prioritarios, ya que representan una oportunidad clara para reducir la dependencia del diésel, disminuir emisiones de gases de efecto invernadero y reducir costos de operación en zonas de difícil acceso.

Integrar criterios de circularidad en la cadena de suministro.

La empresa debería incluir cláusulas de devolución, reacondicionamiento y trazabilidad en los contratos con proveedores y contratistas. Además, promover compras verdes con criterios de sostenibilidad permitirá fortalecer la economía local, reducir la presión sobre los recursos vírgenes y consolidar una cadena de valor más resiliente.

Invertir en sistemas de digitalización y trazabilidad.

La implementación de plataformas digitales que permitan monitorear en tiempo real los flujos de materiales, residuos, agua y energía es esencial para garantizar la eficiencia de la estrategia. Estos sistemas facilitarán la toma de decisiones basada en datos, mejorarán la transparencia de los reportes a autoridades y comunidades, y posicionarán a la compañía como líder en innovación tecnológica aplicada a la sostenibilidad.

Fortalecer la articulación con actores externos.

Se recomienda ampliar los convenios con universidades, centros de investigación, cooperativas de recicladores y autoridades locales, con el fin de potenciar los proyectos piloto, validar científicamente nuevas tecnologías y ampliar las oportunidades de aprovechamiento de recursos. Esta colaboración no solo multiplica el impacto ambiental y social, sino que también fortalece la legitimidad y reputación corporativa de Frontera Energy.

Desarrollar un sistema de indicadores claros y medibles.

Para evaluar la efectividad de la estrategia, es fundamental establecer indicadores cuantitativos y cualitativos que midan el desempeño en circularidad, como porcentaje de residuos valorizados, volumen de agua reutilizada, porcentaje de energía renovable en el mix

operativo, o número de materiales recuperados y reutilizados. Estos indicadores deben ser revisados periódicamente e incorporados a los informes de sostenibilidad corporativa.

Promover una cultura organizacional orientada a la circularidad.

Más allá de la infraestructura y los procesos, el éxito de la estrategia depende de la participación activa del personal. Se recomienda implementar programas de formación continua para empleados y contratistas, reforzando conceptos de circularidad, innovación y corresponsabilidad ambiental. Además, se sugiere reconocer y comunicar las buenas prácticas internas, con el fin de consolidar un sentido de pertenencia hacia la estrategia.

Comunicar de forma transparente los avances y logros alcanzados.

Una estrategia de circularidad no solo debe ejecutarse, también debe visibilizarse. Frontera Energy debería desarrollar un plan de comunicación que muestre resultados a las comunidades, autoridades e inversionistas, utilizando reportes claros, espacios de socialización y participación en redes sectoriales de sostenibilidad. Esta transparencia incrementa la confianza y refuerza la licencia social para operar.

Escalar progresivamente la estrategia a otros bloques operados por Frontera Energy.

Finalmente, se recomienda evaluar la posibilidad de replicar las prácticas más exitosas implementadas en Quifa en otros campos de la compañía, adaptándolas a sus particularidades. Esto permitiría estandarizar procesos, optimizar recursos y consolidar un liderazgo sectorial en economía circular dentro del país y la región.

Referencias

British Standards Institution. (2017). BS 8001:2017 - *Framework for implementing the principles of the circular economy in organizations – Guide*. <https://www.bsigroup.com/en-GB/products-and-services/standards/>

DNP. (2018a). *Política de Crecimiento Verde* (Documento CONPES 3934). <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Económicos/3934.pdf>

DNP. (2018b). *Estrategia para la implementación de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) en Colombia* (Documento CONPES 3918). <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Económicos/3918.pdf>

DNP. (2020). *Política Nacional de Economía Circular* (Documento CONPES 4011). <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Económicos/4011.pdf>

Ellen MacArthur Foundation. (2013). *Towards the circular economy: Economic and business rationale for an accelerated transition*. <https://ellenmacarthurfoundation.org/towards-the-circular-economy-vol-1-an-economic-and-business-rationale-for-an>

Ellen MacArthur Foundation & McKinsey & Company. (2015). *Growth within: A circular economy vision for a competitive Europe*. Ellen MacArthur Foundation. <https://ellenmacarthurfoundation.org/growth-within-a-circular-economy-vision-for-a-competitive-europe>

Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M. P., & Hultink, E. J. (2017). *The Circular Economy – A new sustainability paradigm?* *Journal of Cleaner Production*, 143, 757–768. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>

Ghisellini, P., Cialani, C., & Ulgiati, S. (2016). *A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems*. *Journal of Cleaner Production*, 114, 11–32. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.007>

Ground Water Protection Council (GWPC). (2019). *Produced Water White Paper*. GWPC. https://www.gwpc.org/wp-content/uploads/2019/06/Produced_Water_Full_Report_Digital_Use.pdf

Hernández-Sampieri, R., Fernández-Collado, C., & Baptista-Lucio, M. del P. (2018). *Metodología de la investigación* (7.^a ed.). McGraw-Hill Education.

International Organization for Standardization. (2013). *ISO 14031:2013 - Environmental management — Environmental performance evaluation — Guidelines*. <https://www.iso.org/obp/ui#iso:std:iso:14031:ed-2:v1:es>

International Organization for Standardization. (2015). ISO 14001:2015 - *Environmental management systems — Requirements with guidance for use*. <https://www.iso.org/standard/60857.html>

IPIECA. (2024). *Oil and gas and the circular economy: Driving change in upstream operations*. <https://www.ipieca.org/resources/good-practice/oil-and-gas-and-the-circular-economy/>

Kirchherr, J., Reike, D., & Hekkert, M. (2017). *Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions*. *Resources, Conservation and Recycling*, 127, 221–232. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>

Lau, P. J., Ng, W. P. Q., How, B. S., Lim, C. H., & Lam, H. L. (2022). *Paving a way toward circular economy for oil and gas industry: A conceptual modelling of re-refining process through solvent extraction and hydrofinishing pathway*. *Journal of Cleaner Production*, volumen 380, artículo 134839. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134839>

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2007). Resolución 1362 de 2007: *Por la cual se establece el procedimiento y los requisitos para la presentación del Plan de Gestión Integral de Residuos Peligrosos – PGIRP*. Diario Oficial No. 46.720. <https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=26053>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). Decreto 1076 de 2015: *Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible*. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/06/Decreto-1076-de-2015.pdf>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). Resolución 0631 de 2015: *Por la cual se establecen los parámetros y límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales y al alcantarillado público*. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/11/resolucion-631-de-2015.pdf>

Ministerio de Transporte. (2015). Decreto 1079 de 2015: *Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Transporte*. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=63445>

Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2016). Resolución 668 de 2016: *Por la cual se adopta el código de colores para la separación de residuos en la fuente y se dictan otras disposiciones*. <https://www.minvivienda.gov.co/normativa-y-regulacion/resolucion-668-de-2016>

Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2017). *Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS 2017*. <https://www.minvivienda.gov.co/normativa-y-regulacion/ras-2017>

Repsol. (2021). *Informe de sostenibilidad 2021*. Repsol.
<https://www.repsol.com/content/dam/repsol-corporate/es/sostenibilidad/sostenibilidad-2021.pdf>

Shell. (2020). *Sustainability Report 2020*. <https://reports.shell.com/sustainability-report/2020/>

TotalEnergies. (2022). *Sustainability & Climate – 2022 Progress Report*.
<https://totalenergies.com/sites/g/files/nytnzq121/files/documents/2023-03/totalenergies-2022-sustainability-climate-report.pdf>

United Nations. (2015). *Transforming our world: The 2030 Agenda for Sustainable Development* (A/RES/70/1).
<https://sustainabledevelopment.un.org/post2015/transformingourworld>

United Nations Environment Programme. (2019). *Guidelines for a life cycle assessment and circular economy approach*. <https://www.unep.org/resources/report/guidelines-life-cycle-assessment-and-circular-economy>

World Business Council for Sustainable Development. (2022). *Circular Transition Indicators (CTI) v3.0: Metrics for business, by business*.
<https://www.wbcsd.org/resources/circular-transition-indicators-v3-0>