

Propuesta de caso de negocio para escalar y comercializar tecnologías para el manejo
de aguas de producción de la industria oil & gas

Juliet Maria Toloza Quintero

Trabajo de Grado para Optar al Título de Magister en Gerencia de Negocios - MBA

Director

Franco Iván Santos Negrelli

Magister en Innovación y Magister en Administración

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Fisicomécanicas

Escuela de Estudios Industriales y Empresariales

Maestría en Gerencia de Negocios - MBA

Bucaramanga

2026

Dedicatoria

Dedico este trabajo, en primer lugar, a Dios, por darme la fortaleza, la entereza y la guía necesarias para alcanzar este objetivo, incluso en los momentos más desafiantes.

A mis padres, Hernán y Elsa, por ser el pilar fundamental de mi vida, por su amor incondicional, su confianza permanente y por haber sembrado en mí el valor del esfuerzo, la disciplina y la perseverancia. En ellos encuentro la inspiración que ha guiado cada uno de mis pasos.

A mi esposo, Diego Mauricio, por ser mi compañero incondicional, por su apoyo firme en cada desafío y por creer en este propósito incluso en los momentos más exigentes, impulsándome a seguir adelante.

A mi abuelita, Socorrito, por su ejemplo de vida, fortaleza y resiliencia, que han dejado una huella profunda en mi forma de enfrentar cada reto.

A todas aquellas personas que, de una u otra manera, hicieron posible la culminación de este logro.

Agradecimientos

Expreso mi más sincero agradecimiento a la Universidad Industrial de Santander, en especial a la Escuela de Estudios Industriales y Empresariales, por brindarme una formación integral que fortaleció mis capacidades analíticas, estratégicas y profesionales, y por propiciar un entorno académico de excelencia que hizo posible el desarrollo de este trabajo de grado.

A los docentes que hicieron parte de este proceso, por su orientación, compromiso y valiosos aportes para el fortalecimiento de mi criterio profesional. Asimismo, a mis compañeros de estudio, por el intercambio de conocimientos, las discusiones académicas y el trabajo colaborativo, que ayudaron a enriquecer de manera importante la experiencia formativa.

Expreso un reconocimiento a mi director de trabajo de grado, quien a su vez se desempeña como mi jefe, por su guía estratégica y confianza. Su doble rol, tanto académico como profesional, permitió una articulación efectiva entre el rigor académico y la aplicación práctica en el contexto real del sector.

De igual forma, agradezco al equipo de trabajo, por su disposición para compartir información relevante para el desarrollo de este estudio, lo que permitió sustentar el análisis en condiciones reales laborales y fortalecer la aplicabilidad de los resultados obtenidos.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción.....	13
1. Planteamiento y Justificación del Problema.....	15
2. Objetivos.....	22
2.1 Objetivo General	22
2.2 Objetivos Específicos	22
3. Marco Teórico	24
3.1 Industria de Hidrocarburos y Aguas de Producción	24
3.1.1 Generación de aguas de producción.....	24
3.1.2 Características generales de las aguas de producción	26
3.1.3 Tendencias en gestión de aguas de producción	28
3.2 Tecnologías de Tratamiento de Aguas de Producción.....	32
3.2.1 Tecnologías para tratamiento de aguas de producción.....	33
3.2.2 Enfoque adecuación al propósito (fit-for-purpose) en el tratamiento del agua de producción.....	38
3.3 Modelos de Negocio Tecnológicos.....	39
3.3.1 Modelos de negocio basados en activos, servicios y alianzas.....	40
3.3.2 Modelos de negocio para tecnologías ambientales.....	42
3.3.3 Modelo de negocio Business Model Navigator (BMN)	43
3.4 Análisis Estratégico de Tecnologías en Industrias Reguladas	46
3.4.1 Innovación y escalamiento tecnológico	47
3.4.2 Niveles de madurez tecnológica (TRL)	52
4. Metodología	54
4.1 Diseño Metodológico.....	54
4.2 Fuentes de Información.....	55
4.3 Herramientas de Análisis	56
4.4 Limitaciones Metodológicas	56
5. Análisis y Desarrollo de la Propuesta.....	58

5.1 Identificación del Potencial del Agua de Producción	58
5.1.1 Volúmenes de agua de producción disponibles	58
5.1.1.1 TAM – Mercado Total Direccional (potencial mundial)	58
5.1.1.2 SAM – Mercado Disponible Servible (potencial en América Latina).....	61
5.1.1.3 SOM – Mercado Objetivo Alcanzable (potencial en Colombia)	63
5.1.2 Costos asociados manejo de aguas de producción	65
5.1.2.1 Costos de tratamiento	65
5.1.2.2 Costos de reinyección y disposición.....	66
5.1.2.3 Costos de reúso	67
5.1.2.4 Costos de descarga	67
5.1.2.5 Impulsores estructurales del costo	68
5.1.3 Sectores de mayor demanda de recursos hídricos	73
5.1.3.1 Sector agrícola	74
5.1.3.2 Sector industrial.....	74
5.1.3.3 Sector energético	75
5.1.3.4 Sector de infraestructura y obras civiles.....	75
5.1.4 Priorización de sectores mediante matriz multicriterio	77
5.2 Evaluación y Priorización de Tecnologías.....	81
5.2.1 Marco de evaluación de escalabilidad.....	82
5.2.2 Clasificación de tecnologías según escalabilidad.....	84
5.3 Aspectos Normativos, Estratégicos y PESTEL	87
5.3.1 Marco regulatorio colombiano y brechas en el reúso del agua de producción	88
5.3.1.1 Brechas regulatorias para el reúso del agua de producción	91
5.3.2 Estrategias para viabilizar modelos de negocio para reúso agua	92
5.3.3 Análisis PESTEL	95
5.4 Factores Críticos de Éxito - FCE	97
5.5 Esquematización Modelo de Negocio	100
5.5.1. Espacio de viabilidad.....	101
5.5.2. Identificación palancas de valor	101
5.5.3. Mecanismos de monetización	103

5.5.4 Estructura de costos.....	105
5.5.5. Diseño estructural del modelo de negocio	105
5.5.6 Estrategias de comercialización	109
5.5.7. Esquematización modelo de negocio.....	110
5.5.8 Validación cuantitativa del caso de estudio	119
5.5.8.1 Premisas del modelo.....	119
5.5.9. Validación madurez para la escalabilidad	122
6. Conclusiones	129
7. Recomendaciones	133
8. Referencias Bibliográficas.....	135

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. <i>Estimación estrés hídrico global al 2050</i>	16
Figura 2. <i>Tendencia de almacenamiento de agua subterránea</i>	17
Figura 3. <i>Estimación del agua producida en yacimientos petrolíferos por la Produced Water Society 2020</i>	18
Figura 4. <i>Desafíos de la reutilización del agua de producción</i>	19
Figura 5. <i>Reutilización de agua en Ecopetrol</i>	20
Figura 6. <i>Volúmenes absolutos de petróleo, gas y agua por etapa</i>	25
Figura 7. <i>Perfil de producción típico para un yacimiento petrolífero</i>	25
Figura 8. <i>Evolución del BSW (Basic Sediment and Water) o corte de agua</i>	26
Figura 9. <i>Acciones clave para el cambio de paradigma en la gestión de aguas</i>	29
Figura 10. <i>Principales tecnologías por etapas de tratamiento</i>	34
Figura 11. <i>Business model navigator - BMN</i>	44
Figura 12. <i>Países productores de petróleo - 2026</i>	59
Figura 13. <i>Mercado mundial de tratamiento de aguas residuales de producción</i>	61
Figura 14. <i>Mercado Latam de tratamiento de aguas residuales de producción</i>	63
Figura 15. <i>Curva Costo vs Corte de agua para el manejo de aguas de producción</i>	70
Figura 16. <i>Estructura de costos del manejo de agua producida por alternativa de gestión</i>	71
Figura 17. <i>Costo total vs Corte de agua por alternativa de gestión</i>	72
Figura 18. <i>Perfil de madurez del modelo</i>	126

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Componentes presentes en aguas de producción de petróleo y gas</i>	27
Tabla 2. <i>Usos y tendencias para el reúso del agua de producción en la industria petrolera y sectores emergentes</i>	31
Tabla 3. <i>Principales tecnologías tratamiento de aguas de producción</i>	36
Tabla 4. <i>Tipologías de modelos de negocio en el manejo de aguas de producción</i>	41
Tabla 5. <i>Tipo de escalamiento y su ventajas y desventajas</i>	51
Tabla 6. <i>Otros niveles de maduración</i>	53
Tabla 7. <i>Estimación volumen de agua - TAM</i>	60
Tabla 8. <i>Estimación volumen de agua - SAM</i>	61
Tabla 9. <i>Estimación volumen de agua (Colombia) - SOM</i>	63
Tabla 10. <i>Rangos de estimación por tipo de uso</i>	69
Tabla 11. <i>Distribución global de la demanda de agua por sector</i>	73
Tabla 12. <i>Consolidado demanda hídrica por sector para Colombia</i>	76
Tabla 13. <i>Criterios y pesos de la matriz multicriterio</i>	78
Tabla 14. <i>Matriz de calificación sectorial (caso Colombia)</i>	79
Tabla 15. <i>Ajuste Matriz de calificación sectorial (Caso Colombia)</i>	80
Tabla 16. <i>Análisis de variables para validación de escalamiento</i>	83
Tabla 17. <i>Tipos de tecnologías para tratamiento de agua</i>	84
Tabla 18. <i>Calificación de variables para priorización tecnológica</i>	85
Tabla 19. <i>Vías de habilitación del reúso</i>	88
Tabla 20. <i>Marco regulatorio vs brechas para el reúso de agua en Colombia</i>	89
Tabla 21. <i>Principales brechas regulatorias</i>	91
Tabla 22. <i>Brechas vs estrategias regulatorias</i>	93
Tabla 23. <i>Análisis PESTEL aplicado al reúso de aguas de producción en petróleo y gas</i>	96
Tabla 24. <i>Factores críticos de éxito derivados del análisis PESTEL</i>	98
Tabla 25. <i>Palancas de valor vs monetización</i>	102

Tabla 26. <i>Planteamiento mecanismos de monetización</i>	104
Tabla 27. <i>Criterios de selección patrones del modelo</i>	106
Tabla 28. <i>Combinaciones de patrones de mayor frecuencia</i>	108
Tabla 29. <i>Criterios para selección de estrategias de comercialización</i>	109
Tabla 30. <i>Propuesta flujo de ingresos</i>	113
Tabla 31. <i>Detalle componentes estructura de costos</i>	115
Tabla 32. <i>Análisis de las métricas utilizadas</i>	116
Tabla 33. <i>Principales variables del modelo</i>	120
Tabla 34. <i>Estructura de costos e ingresos</i>	121
Tabla 35. <i>Variables sensibilizadas</i>	121
Tabla 36. <i>Resultados análisis de escenarios</i>	121
Tabla 37. <i>Evaluación multidimensional del modelo bajo el marco KTH IRL</i>	123

Lista de Apéndices

Apéndice A. Matriz de decisión para escalamiento de tecnologías _ Banco Mundial

Apéndice B. Patrones de modelos de negocio

Apéndice C. Modelo canvas basado en servicio y riesgos

Apéndice D. Análisis financiero, bajo escenario conservador, probable y optimista

Apéndice E. Matriz de validación multidimensional de madurez para la innovación

Los apéndices están adjuntos y puede visualizarlos en la base de datos de la biblioteca UIS

Resumen

Título: Propuesta de caso de negocio para escalar y comercializar tecnologías para el manejo de aguas de producción de la industria oil & gas*

Autor: Juliet Maria Toloza Quintero**

Palabras Clave: Agua de Producción, Reúso, Modelo de Negocio.

En los últimos años, el agua de producción dejó de verse solo como un problema de disposición para convertirse en un recurso con valor real. La escasez de agua dulce, los costos crecientes de manejo, la escalabilidad de las tecnologías y las regulaciones ambientales cada vez más estrictas impulsan a las empresas a buscar alternativas y el reúso del agua de producción es una de las más viables ya que permite disminuir la explotación de fuentes de agua dulce.

Desde el punto de vista de oportunidad de negocio, esto va más allá de reducir costos operativos en la industria petróleo y gas (*Oil & Gas*). Tratar y reutilizar el agua de producción abre la puerta a modelos de negocio como la venta de agua tratada bajo contratos de largo plazo, esquemas de agua como servicio (*Water-as-a-service*) o acuerdos directos con sectores que consumen grandes volúmenes de agua, entre ellos: industrial, energético, infraestructura y, dependiendo del marco regulatorio, también el agrícola, siendo este acotado para no consumo humano.

Capturar este valor requiere la revisión de variables técnicas, económicas, normativas y estratégicas. Qué sectores tienen mayor potencial de reúso, qué tecnologías son escalables y bajo qué modelo de negocio tiene sentido operar, eso es lo que este proyecto busca revisar.

* Trabajo de grado

** Facultad Físico-Mecánicas. Escuela de Estudios Industriales y Empresariales. Director Franco Iván Santos Negrelli. Magister en Innovación – Magister en Administración.

Abstract

Title: Business case proposal for scaling and commercializing technologies for production water management in the oil & gas industry*

Author: Juliet Maria Toloza Quintero**

Key Words: Production Water, Reuse, Business Model

In recent years, produced water has shifted from being seen purely as a disposal problem to being recognized as a resource with real value. Freshwater scarcity, rising handling costs, scalable technologies, and increasingly strict environmental regulations are pushing companies to look for alternatives, and produced water reuse is one of the most viable, since it reduces dependence on freshwater sources.

From a business opportunity standpoint, this goes beyond cutting operational costs in the Oil & Gas industry. Treating and reusing produced water opens the door to business models such as selling treated water under long-term contracts, water-as-a-service arrangements, or direct agreements with sectors that consume large volumes of water, including industrial, energy, and infrastructure users, and depending on the regulatory framework, agriculture as well, restricted to uses that do not involve human consumption.

Capturing this value requires looking carefully at technical, economic, regulatory, and strategic variables. Which sectors have the greatest reuse potential, which technologies are scalable, and which business model actually makes sense to operate under: that is what this project sets out to examine.

* Bachelor Thesis

** Facultad Fisico-Mecanicas. Escuela de Estudios Industriales y Empresariales. Director Franco Iván Santos Negrelli. Magister en Innovación – Magister en Administración.

Introducción

La demanda de agua en Colombia, tiene una tendencia al alza cerca del 5% pasando de 35.5 millones de m³ en el 2014 a 37.3 millones de m³ de acuerdo a informe del Estudio Nacional de Agua (ENA), del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), generada principalmente por actividades agrícolas (43,1%), energéticas (24,3%), seguido por el consumo doméstico, adicionalmente, el país tiene 391 municipios susceptibles por desabastecimiento en temporada seca y los departamentos más afectados por la falta del recurso son: Santander, Cundinamarca, Boyacá, Tolima, Magdalena, Bolívar y Cesar.

Lo anterior, sumado a factores climáticos y de gestión, ha llevado a una situación de estrés hídrico en varias zonas del país, promoviendo la necesidad de buscar y adoptar soluciones sostenibles y eficientes en el uso de los recursos hídricos por parte de las diferentes industrias. Por ejemplo, la industria petrolera, uno de los principales sectores económicos del país, genera grandes volúmenes de aguas de producción que, si no son adecuadamente gestionadas, pueden generar un impacto negativo al ambiente y a sus operaciones. Hoy, la mayor parte se reinyecta o se dispone con costos crecientes y riesgos ambientales que no desaparecen. Paralelamente, la industria ha venido desarrollado diferentes tecnologías para el manejo y tratamiento de estas aguas, pero no han escalado a la velocidad que el mercado necesita. Esa brecha es, precisamente, la oportunidad que se vislumbra: aumentar su adopción dentro de la misma industria petrolera y abrir mercado hacia otros sectores que necesitan agua y tienen dificultades para conseguirla.

Ante este panorama, surge la oportunidad de traducir un tema técnico en decisiones ejecutables, que permitan identificar dónde está el valor, las restricciones reales, cómo monetizar, ya sea como producto, como servicio bajo esquemas de agua como servicio (*Water-as-a-service*), o mediante alianzas con usuarios finales para construir portafolios alineados a regulación, controlar riesgos operativos con criterios técnico-económicos, analizar el ciclo de vida para toma de decisiones, adaptar marcos de comercialización por

medio de modelos como producto/wáter as a service y/o esquemas de alianzas y cumplimiento normativo.

1. Planteamiento y Justificación del Problema

El agua dulce, es uno de los recursos naturales más importantes y a su vez críticos para el desarrollo humano y económico en el mundo. De acuerdo con el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS), el 71% de la superficie está cubierta por agua, el 96.5% es salada y tan solo el 2.5% es agua dulce, la cual se encuentra en glaciares o acuíferos profundos y de esta proporción tan solo el 0.5% se encuentra disponible para el uso y consumo humano, actividades industriales y productivos.

La demanda de este recurso, en las últimas décadas ha tenido un crecimiento cercano al 1% por año, esto en razón al crecimiento poblacional e industrial. En el informe de las Naciones Unidas sobre recursos hídricos de 2024, indica que, cerca de 2.200 millones de personas no tienen acceso garantizado a agua potable. Asimismo, a nivel mundial, la agricultura representa aproximadamente el 70% de la extracción de agua dulce, seguida de la industria (algo menos del 20%) y los usos domésticos (alrededor del 12%). Las aguas subterráneas abastecen aproximadamente el 25% de toda el agua utilizada para el riego y la mitad del agua dulce extraída para uso doméstico.

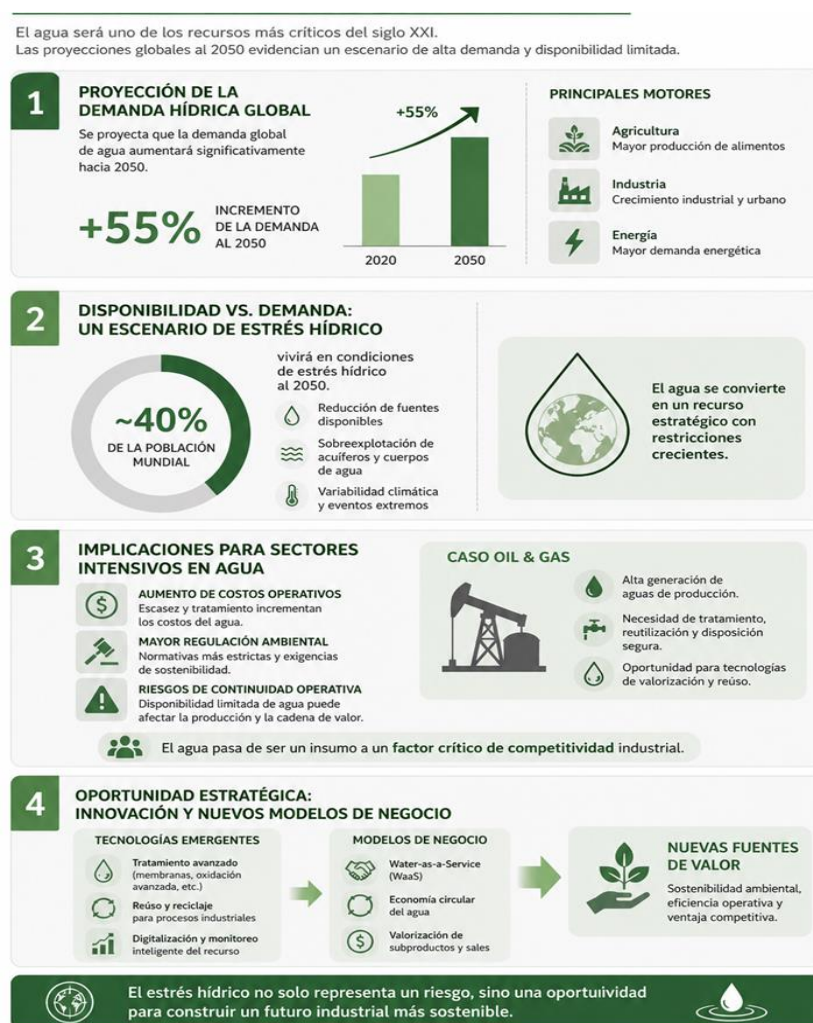
De acuerdo con la Fundación Aquae, del Grupo Veolia, estiman que para el 2050 la demanda de agua aumente hasta un 55%, siendo el sector “Industria” donde tendrá el mayor requerimiento, lo que impacta directamente en el estrés hídrico generado principalmente por sector de la industria, producción eléctrica y uso doméstico. Ver Figura 1. Estimación estrés hídrico global al 2050. Fundación Aquae, Veolia.

De igual manera, la creciente presión sobre los recursos hídricos subterráneos constituye un riesgo estructural para múltiples sectores productivos. Según el NASA Jet Propulsion Laboratory (2015), cerca de un tercio de los principales acuíferos a nivel mundial se encuentran en estado de estrés. Estudios científicos basados en datos satelitales GRACE, han evidenciado una explotación no sostenible de estos sistemas

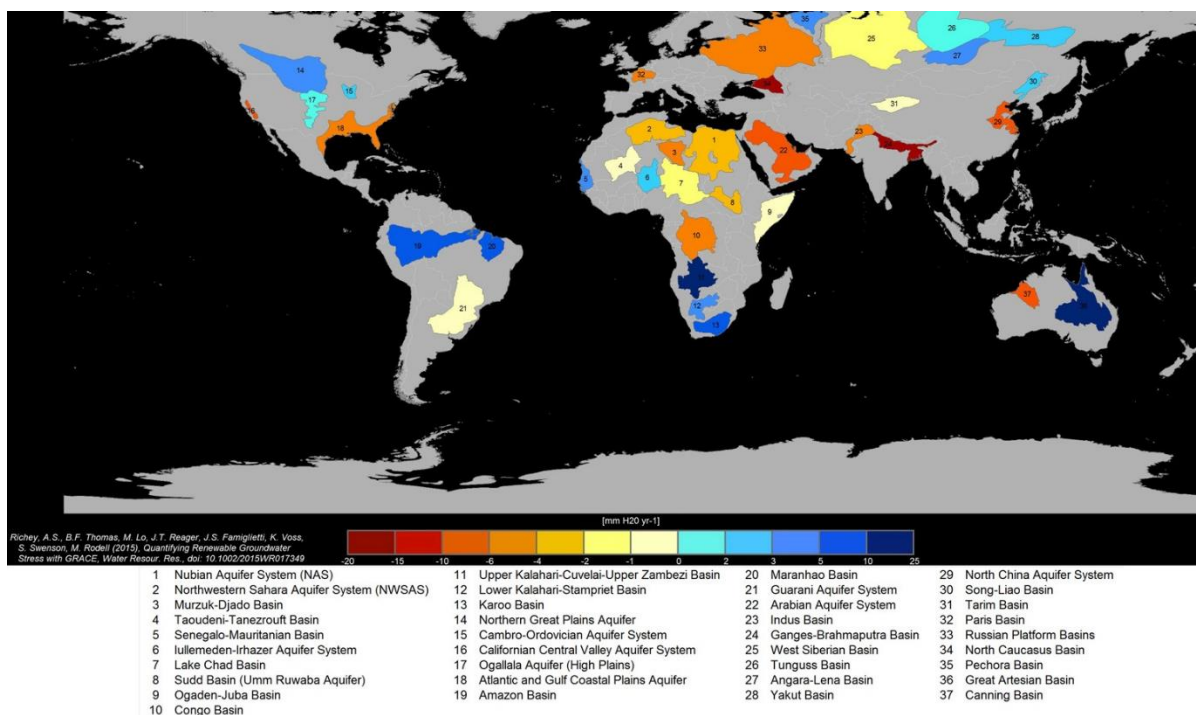
(Richey et al., 2015). Se han estudiado 37 acuíferos, de los cuales 21 están perdiendo agua, 1/3 está agotando sus reservas, 8 de ellos están estresados y 5 muy estresados. Ver Figura 2. Tendencia de almacenamiento de agua subterránea. En los cinturones de sequía que abarcan México, el oeste de América del Sur, el sur de Europa, China, Australia y Sudáfrica es probable que las precipitaciones disminuyan. En este contexto, la gestión eficiente del agua adquiere un carácter estratégico para industrias intensivas en su uso, como el sector petróleo y gas (Oil & Gas).

Figura 1.

Estimación estrés hídrico global al 2050



Nota: Adaptado de Fundación Aquae. Cuál será la situación del agua en 2050. Escasez en el futuro. Veolia

Figura 2.*Tendencia de almacenamiento de agua subterránea*

Nota: Tomado de Jet Propulsion Laboratory. <https://www.jpl.nasa.gov/news/study-third-of-big-groundwater-basins-in-distress/>

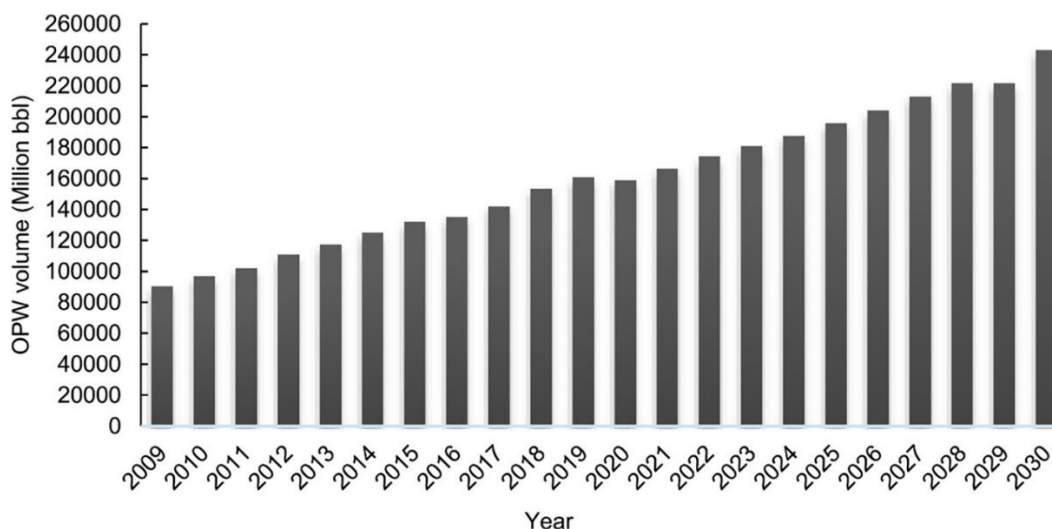
Adicionalmente, es de resaltar que la calidad del agua también está sufriendo un grave deterioro. Desde la década de 1990, la contaminación ha empeorado la calidad del agua de casi todos los ríos de África, Asia y América Latina. Asimismo, se espera que este deterioro empeore aún más en las próximas dos décadas, principalmente debido a las escorrentías agrícolas de fertilizantes y otros agroquímicos que cargan las fuentes de agua dulce.

Bajo este contexto, el agua dejó de ser solo un recurso ambiental y se convierte en un factor de competitividad y, en muchos casos, de supervivencia económica. Es por ello, que industrias como la de hidrocarburos, que genera grandes volúmenes de agua de producción. De acuerdo con las proyecciones Produced Water Society (2020), el volumen de agua producida en campos convencionales onshore y offshore se proyecta que se duplique en la próxima década, pasando de aproximadamente 158.900 millones

de barriles/día a 243.000 millones de barriles/día para 2030 (Ver Figura 3. Estimación del agua producida en yacimientos petrolíferos por la Produced Water Society 2020). Estos altos volúmenes potenciales, pueden ayudar a mitigar en un porcentaje considerable el uso de fuentes hídricas para sus operaciones, así como el posible reúso de estas aguas de producción en otras industrias y/o aliados.

Figura 3.

Estimación del agua producida en yacimientos petrolíferos por la Produced Water Society 2020



Nota: Oilfield produced water and constructed wetlands technology: a comprehensive review- 2024

El agua de producción está conformada por sales, metales y/o compuestos orgánicos, lo que exige enfoques de gestión eficientes y sostenibles. Es por ello, que se hace necesario ofrecer a la industria, tecnologías híbridas de tratamiento, es decir, combinación de procesos físicos, químicos y biológicos con el fin de cumplir estándares, normatividad, optimizar costos y consumo energético y disminuir el uso de fuentes hídricas de agua dulce para procesos industriales. La literatura sugiere que las tecnologías híbridas son el camino para cumplir estándares y optimizar costos y consumo energético.

Paralelamente, el sector ha evolucionado la concepción que las aguas de producción se pueden tratar como un recurso potencial para usos industriales y, en ciertos contextos, agrícolas, sujeto al logro de calidades objetivo. Esta transición, se da principalmente por la presión regulatoria, la escasez hídrica y los avances tecnológicos que habilitan esquemas de reúso con desempeño técnico-económico creciente.

Sin embargo, la reutilización del agua de producción presenta varias barreras desde el aspecto económico, social, comercial y regulatorio, como se muestra en la Figura 4. Desafíos para la reutilización del agua de producción, donde se evidencia que, a pesar de la importancia de dar un uso a este tipo de aguas, son más las restricciones y desafíos que tiene que superar para implementar su utilización.

Figura 4.

Desafíos de la reutilización del agua de producción



Nota: Tomado de Harkouss et al. (2024). *Energies*, 18(1), 63. <https://doi.org/10.13044/j.sdewes.d12.0527>

No obstante, en recientes estudios liderados por Lee et al. (2022), analizó la viabilidad de reutilizar el agua tratada de producción para aplicaciones secundarias, como sistemas de refrigeración y mecanismos de supresión de polvo, mostrando evidencia contundente de que el agua, tras someterse a protocolos de tratamiento avanzados, cumplió e incluso superó, en algunos casos, los rigurosos estándares de calidad exigidos para estos usos.

En Colombia, se aprecia un liderazgo por parte de Ecopetrol, quien reportó que durante el 2025 se reutilizaron 181,0 millones de m³ de agua, equivalentes al 82% del volumen total de agua requerida para operar, lo cual significa que Ecopetrol evitó la captación y el vertimiento de este volumen de agua, ver Figura 5. Reutilización de agua en Ecopetrol. Este valor significa un aumento del 10% con respecto al volumen reutilizado en 2024, esto evidencia la implementación de prácticas de circularidad hídrica que en regiones donde coexisten actividades extractivas con otros usos del agua —como el consumo humano, la agricultura o la industria—, la presión sobre el recurso intensifica los conflictos por su uso y refuerza la necesidad de adoptar enfoques más eficientes, circulares y estratégicos en su gestión.

Figura 5.

Reutilización de agua en Ecopetrol



Nota: Tomado de Ecopetrol S.A

Pese a los avances que han estado desarrollando, persiste una brecha entre la innovación tecnológica y su escalamiento comercialización en entornos petroleros regulados. Los operadores enfrentan variabilidad en la composición de las aguas de producción, costos energéticos, riesgos de ensuciamiento (fouling) y exigencias normativas heterogéneas, lo que restringe la adopción a gran escala. Esta realidad demanda modelos de negocio que distribuyan riesgos, viabilicen inversiones (CAPEX/OPEX) y moneticen de forma clara los beneficios del reúso (ahorro por disposición evitada, cumplimiento regulatorio, resiliencia hídrica).

2. Objetivos

2.1 Objetivo General

Diseñar un modelo de negocios para acelerar y escalar la implementación de innovaciones tecnológicas asociadas al manejo de aguas de producción de la industria de hidrocarburos.

2.2 Objetivos Específicos

- Identificar el potencial de aguas provenientes de las actividades de producción, así como las industrias más demandantes de este recurso para seleccionar los sectores de mayor potencial de uso de tecnologías enfocadas al tratamiento de estas aguas.
- Caracterizar las principales tecnologías existentes relacionadas con el manejo de aguas de producción en la industria de hidrocarburos identificando niveles de madurez y potencial de escalabilidad con el fin de estructurar un portafolio de soluciones tecnológicas, así como los modelos de negocio mediante el cual estas tecnologías llegan al mercado.
- Establecer aspectos estratégicos, normativos, operacionales y factores clave para viabilizar modelos de negocio basados en el reúso del agua de producción en las industrias identificadas.
- Determinar y valorar las principales palancas de valor, mecanismo de monetización, así como la estructura de costos e inversiones para los modelos de negocios basados en el reúso de agua de producción.

- Ilustrar la aplicación de un caso de estudio que integre el modelo de negocio diseñado.

3. Marco Teórico

El correcto entendimiento de la importancia del recurso hídrico, tal como su origen, características, tendencias y tecnologías para su tratamiento permiten evaluar modelos de negocio viables y diseñar estrategias de valorización bajo los principios de economía circular y sostenibilidad.

3.1 Industria de Hidrocarburos y Aguas de Producción

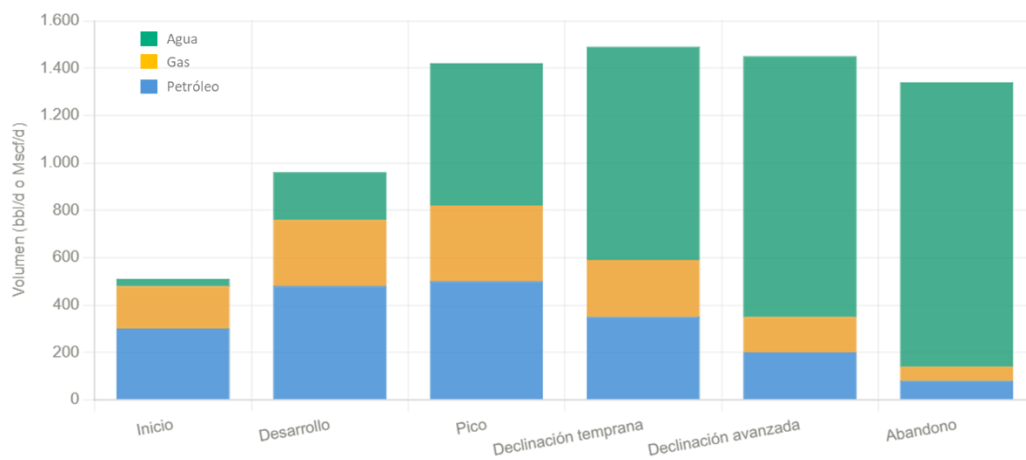
3.1.1 Generación de aguas de producción

El ciclo productivo del petróleo y el gas comprende las etapas de exploración, desarrollo, producción y abandono, siendo la fase de producción aquella en la que se generan de forma continua las mayores interacciones con el recurso hídrico. Durante esta etapa, los fluidos extraídos desde el yacimiento: petróleo, gas y agua (Ver Figura 6. Volúmenes absolutos de petróleo, gas y agua por etapa) son conducidos a superficie, donde se separan en función de sus propiedades físicas, dando origen a la denominada agua de producción.

La literatura describe que para campos jóvenes la relación agua-aceite, conocido como corte de agua (BSW) puede ser relativamente baja, esta se incrementa progresivamente con la madurez del campo (Ver Figura 7. Perfil de producción típico para un yacimiento petrolífero.) lo cual supera considerablemente la producción de hidrocarburos en términos volumétricos.

Figura 6.

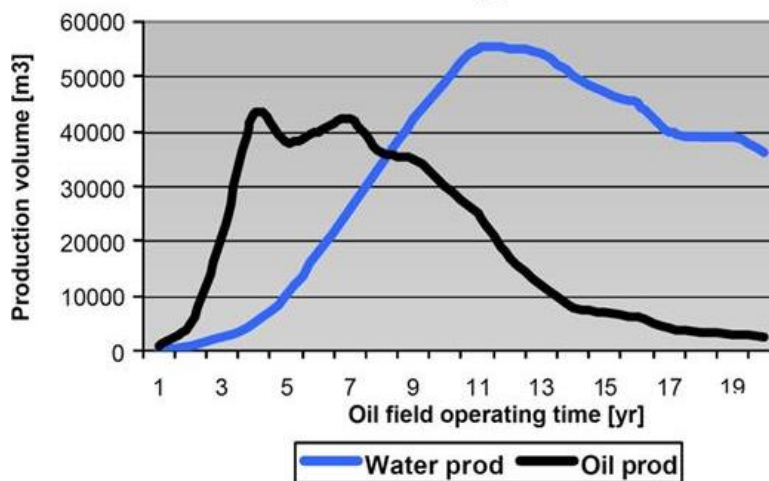
Volúmenes absolutos de petróleo, gas y agua por etapa



Nota: Adaptado de Ahmed, T. (2019). Reservoir engineering handbook (5.ª ed.). Gulf Professional Publishing

Figura 7.

Perfil de producción típico para un yacimiento petrolífero



Nota: Revista Internacional de Tecnologías Bajas en Carbono, Volumen 9, Número 3, septiembre de 2014

A nivel global se producen entre 2 y 5 barriles de agua por cada barril de petróleo (Veil et al., 2004; Fakhru'l-Razi et al., 2009), proporción que aumenta a medida que el yacimiento madura: el agua producida desplaza progresivamente al petróleo y al gas hasta superar el 80–90% del volumen total extraído (expresado como BSW) en las

etapas finales de producción, como se muestra en la Figura 8. Evolución del BSW (Basic Sediment and Water) o corte de agua

Figura 8.

Evolución del BSW (Basic Sediment and Water) o corte de agua



Nota: Adaptado de Ahmed, T. (2019). Reservoir engineering handbook (5.ª ed.). Gulf Professional Publishing.

Lo anterior, permite inferir que la generación de aguas de producción es un fenómeno permanente en la industria y con mayor presencia en Colombia, debido principalmente a tres (3) factores: madurez de los campos, como en el valle medio magdalena, mecanismos de recobro secundario, que permite mantener la presión y las características geológicas.

3.1.2 Características generales de las aguas de producción

Las aguas de producción se caracterizan por una alta complejidad físico-química y una marcada variabilidad en su composición, la cual depende de factores como la geología del yacimiento, el tipo de hidrocarburo producido, la edad del campo y las prácticas operativas implementadas. En términos generales, este efluente puede contener elevadas concentraciones de sales disueltas totales (TDS), hidrocarburos disueltos y dispersos, sólidos suspendidos, metales pesados y compuestos orgánicos,

entre otros constituyentes (Fakhru'l-Razi et al., 2009). Ver Tabla 1. Componentes presentes en aguas de producción de petróleo y gas.

Uno de los rasgos distintivos del agua de producción es su salinidad, que puede variar desde valores cercanos a los del agua de mar hasta concentraciones varias veces superiores, especialmente en yacimientos continentales profundos. Asimismo, la presencia de compuestos orgánicos como Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xilenos (BTEX), así como trazas de compuestos fenólicos y ácidos orgánicos, incrementa la complejidad de su manejo y tratamiento (Neff, Lee & DeBlois, 2011). En ciertos contextos, el agua de producción puede contener materiales radiactivos de origen natural (NORM), asociados principalmente a la presencia de radionúclidos como el radio-226 y radio-228, lo que introduce consideraciones adicionales desde el punto de vista ambiental, regulatorio y de salud ocupacional (International Atomic Energy Agency – IAEA, 2003).

Tabla 1.

Componentes presentes en aguas de producción de petróleo y gas

Categoría	Componente	Rango típico	Observaciones
Parámetros físicos	Temperatura	20 – 150 °C	Depende de la profundidad del yacimiento
	Turbidez	Variable	Asociada a sólidos en suspensión
	Color	Amarillo a marrón	Indicador de materia orgánica e hidrocarburos
Sales y minerales	Cloruros (Cl^-)	80 – 200 000 mg/L	Componente iónico dominante
	Sodio (Na^+)	100 – 100 000 mg/L	Principal catión disuelto
	Calcio (Ca^{2+})	10 – 40 000 mg/L	Asociado a incrustaciones
	Magnesio (Mg^{2+})	1 – 6 000 mg/L	Forma parte de sales precipitables
	Bario (Ba^{2+})	0 – 850 mg/L	Precursor de sulfato de bario (barita)
	Estroncio (Sr^{2+})	0 – 5 000 mg/L	Asociado a incrustaciones carbonatadas
Metales pesados	Sulfatos (SO_4^{2-})	0 – 1 500 mg/L	Bajo en yacimientos reductores
	Bicarbonatos (HCO_3^-)	50 – 5 000 mg/L	Regula el pH del agua
	Hierro (Fe)	0 – 100 mg/L	Indicador de corrosión
	Manganeso (Mn)	0 – 50 mg/L	Precipita en condiciones oxidantes
	Plomo (Pb)	0 – 8 mg/L	Tóxico; asociado a yacimientos profundos
	Zinc (Zn)	0 – 35 mg/L	Puede ser de origen corrosivo
	Arsénico (As)	0 – 0,3 mg/L	Alta toxicidad a bajas concentraciones

Categoría	Componente	Rango típico	Observaciones
Hidrocarburos	Petróleo y grasas totales (TPH)	2 – 565 mg/L	Fracción más visible; afecta ecosistemas
	Hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP)	Trazas – 3 mg/L	Compuestos cancerígenos prioritarios
	BTEX (benceno, tolueno, etilbenceno, xileno)	0,39 – 35 mg/L	Alta solubilidad; contaminantes frecuentes
Compuestos orgánicos	Ácidos orgánicos (acetato, propionato)	10 – 4 000 mg/L	Favorecen corrosión microbiana
	Fenoles totales	0,009 – 23 mg/L	Tóxicos para organismos acuáticos
	Compuestos orgánicos volátiles (COV)	Variable	Representan riesgo en la superficie
Gases disueltos	CO ₂	Variable	Causa corrosión y acidificación
	H ₂ S	0 – 200 mg/L	Altamente tóxico y corrosivo
	Metano (CH ₄)	Trazas – saturación	Gas de efecto invernadero
Materiales radiactivos	Radio-226 (²²⁶ Ra)	0,1 – 15 000 Bq/L	TENORM; riesgo radiológico significativo
	Radio-228 (²²⁸ Ra)	0,1 – 1 500 Bq/L	Serie del torio; vida media larga
Aditivos químicos	Inhibidores de corrosión	Trazas	Biocidas, aminoácidos, surfactantes
	Biocidas	Trazas	Tóxicos para microorganismos y fauna
	Antiespumantes	Trazas	Compuestos de silicona u orgánicos

Nota: Adaptado de Neff et al. (2011); Fakhru'l-Razi et al. (2009); IAEA (2003).

La combinación de altos volúmenes, variabilidad composicional y presencia de contaminantes convierte al agua de producción en uno de los efluentes industriales más desafiantes de gestionar, especialmente cuando se consideran alternativas distintas a su disposición final.

3.1.3 Tendencias en gestión de aguas de producción

La gestión de las aguas de producción ha estado dominada por esquemas de disposición, principalmente mediante reinyección en formaciones profundas o eliminación en pozos dedicados, con el objetivo de aislar el efluente de fuentes de agua dulce. Esta práctica ha sido ampliamente adoptada por su viabilidad técnica y por la existencia de marcos regulatorios consolidados en países productores (U.S. EPA, 2012). No obstante, en las últimas décadas se han identificado limitaciones y riesgos asociados a la dependencia casi exclusiva de la disposición subterránea, incluyendo el aumento de costos operativos, restricciones geológicas, conflictos por el uso del subsuelo y, en algunos casos, la asociación con fenómenos de sismicidad inducida. Estas

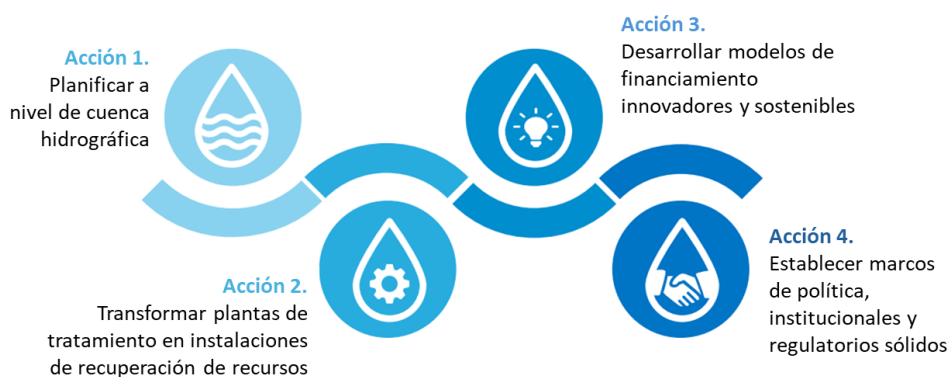
preocupaciones han impulsado a reguladores, operadores y centros de investigación a explorar alternativas de manejo más sostenibles (National Research Council, 2013).

En paralelo, la presión global sobre los recursos hídricos y la necesidad de avanzar hacia modelos de economía circular han favorecido el desarrollo de enfoques orientados al tratamiento, reúso y valorización de las aguas de producción. Organismos internacionales y agencias técnicas han documentado un creciente interés en el reúso del agua de producción para aplicaciones industriales, energéticas e incluso agrícolas, siempre bajo esquemas de tratamiento adecuados y enfoques de uso específico de adecuación al propósito (fit-for-purpose) (UNESCO, 2017; World Bank, 2020).

Estas tendencias reflejan un cambio progresivo en la percepción del agua de producción: de un residuo a gestionar un recurso potencial cuya adecuada integración en estrategias de negocio puede contribuir a la sostenibilidad operativa del sector de hidrocarburos y a la mitigación de los desafíos asociados a la escasez hídrica global. Rodríguez et al. (2020) identifica cuatro (4) acciones clave para superar los desafíos y lograr el cambio de paradigma, tal como se muestra en la Figura 9. Acciones clave para el cambio de paradigma en la gestión de aguas.

Figura 9.

Acciones clave para el cambio de paradigma en la gestión de aguas



Nota: Adaptado de From waste to resource: Shifting paradigms for smarter wastewater interventions in Latin America and the Caribbean (p. 18), por Rodríguez et al., 2020, World Bank.

Acción 1. Planificación a nivel de cuenca hidrográfica: Pasar de soluciones aisladas a enfoques integrados de planificación por cuenca. Esto permite optimizar la ubicación y la secuencia de la infraestructura de tratamiento, establecer estándares de efluentes adaptados a cada contexto específico, y planificar el reúso del agua de manera controlada, evitando el reúso incidental con consecuencias negativas para la salud y el medio ambiente.

Acción 2. Transformar las plantas de tratamiento en instalaciones de recuperación de recursos: Dejar de ver las plantas de tratamiento como simples unidades de remoción de contaminantes y reconocerlas como instalaciones que recuperan agua, nutrientes (nitrógeno y fósforo) y energía. Estos subproductos generan ingresos para las operadoras, con el potencial de transformar el sector saneamiento de uno altamente subsidiado a uno autosostenible financieramente.

Acción 3. Desarrollar modelos de financiamiento innovadores y sostenibles: Explorar esquemas de financiamiento combinado (blended finance), alianzas público-privadas (APP) y modelos de negocio basados en la recuperación de recursos. Dado que muchas empresas de servicios públicos no recuperan sus costos operativos, se requieren nuevos mecanismos que atraigan inversión privada y reduzcan la dependencia de subsidios.

Acción 4. Establecer marcos de política, institucionales y regulatorios sólidos: Implementar políticas claras que reconozcan el valor del agua residual, arreglos institucionales que creen incentivos para la recuperación de recursos, y marcos regulatorios robustos que faciliten el reúso del agua tratada en agricultura, industria y otros sectores.

De acuerdo con IPIECA (2020), los usos y tendencias más favorables para el reúso de las aguas de producción es factible cuando: 1) Hay proximidad geográfica entre la fuente de agua producida y el usuario final, reduciendo costos de transporte. 2) La calidad

del agua permite un tratamiento técnica y económicamente viable. 3) Hay escasez hídrica regional, lo que aumenta el valor del agua tratada y justifica la inversión. 4) El reúso dentro de las mismas operaciones petroleras, porque los requisitos de calidad son menos estrictos. 5) Existen marcos regulatorios claros que permiten y facilitan el reúso fuera del perímetro del campo. Esto se resume en Tabla 2. Usos y tendencias para el reúso del agua de producción en la industria petrolera y sectores emergentes.

Tabla 2.

Usos y tendencias para el reúso del agua de producción en la industria petrolera y sectores emergentes

Uso	Descripción	Nivel de tratamiento	Ejemplo destacado
Industria petrolera			
Recuperación mejorada de petróleo (<i>water flooding</i>)	Reinyección del agua producida para mantener presión del yacimiento y prolongar la vida productiva del campo	Bajo	Práctica estándar en campos maduros a nivel mundial
Perforación y completamiento de pozos	Reutilización directa en operaciones de perforación tras remover sólidos e hidrocarburos, reduciendo costos operativos	Bajo a moderado	Apache Corporation recicló el 90% del agua producida en el Permian Basin, EE. UU.
Fracturamiento hidráulico	Reúso del agua de retorno (<i>flowback</i>) tratada para nuevas operaciones de fracturamiento	Moderado	Tourmaline Oil Corp. (Canadá) recicla más del 95% del agua de retorno de sus operaciones de gas
Extracción de arenas bituminosas (<i>oil sands</i>)	Uso del agua para generación de vapor mediante tecnología SAGD, que ablanda el bitumen y facilita su extracción	Moderado a alto	Operadores miembros de COSIA (Canadá) reciclan hasta el 90% del agua en generación de vapor
Usos emergentes			
Irrigación agrícola	Agua tratada por ósmosis inversa utilizada en plantaciones forestales y cultivos agrícolas	Alto	Operaciones de gas en capas de carbón en la cuenca de Bowen, Queensland, Australia
Agricultura biosalina y humedales construidos	Tratamiento mediante plantas de humedales con vegetación nativa para reúso agrícola en zonas áridas	Moderado a alto	Proyecto Nimr de BAUER Nimr LLC en Omán; elimina la necesidad de inyección profunda
Abrevadero de ganado y vida silvestre	Descarga de agua tratada en cuerpos de agua superficiales para uso por fauna y ganado	Moderado	Wyoming (EE. UU.) permite el reúso con TDS < 5.000 mg/L y Cl < 2.000 mg/L

Uso	Descripción	Nivel de tratamiento	Ejemplo destacado
Industria eléctrica	Agua tratada utilizada para enfriamiento y generación de vapor en plantas termoeléctricas	Alto	Cuenca Surat, Australia; planta termoeléctrica cercana a Chinchilla
Usos industriales y comerciales	Lavado de vehículos, control de polvo en vías, lucha contra incendios y limpieza de carbón en minería	Bajo a moderado	Arrow Energy (Australia) suministra agua a la mina de carbón Wilkie Creek

Nota: Adaptado de Reuse of produced water from the onshore oil and gas industry: Evaluating opportunities and challenges (pp. 4–5), por IPIECA, 2020.

3.2 Tecnologías de Tratamiento de Aguas de Producción

El tratamiento de aguas industriales se fundamenta en la remoción o reducción de contaminantes físicos, químicos y biológicos hasta niveles compatibles con un uso final específico o con requisitos de disposición ambiental. En el caso del agua de producción, estos principios adquieren mayor complejidad debido a la elevada carga contaminante, la variabilidad de los componentes y los grandes volúmenes involucrados, una única tecnología no puede abordar todas las características del agua de producción, haciendo que el tratamiento se base en la integración de múltiples procesos unitarios organizados en trenes de tratamiento (Fakhru'l-Razi et al., 2009).

Los tratamientos a los que pueden estar sometida el agua de producción incluyen: separación de hidrocarburos libres y dispersos, remoción de sólidos suspendidos, reducción de compuestos orgánicos disueltos, disminución de salinidad y, en algunos casos, eliminación de compuestos específicos como metales y la configuración de los mecanismos del tratamiento depende principalmente, de su uso final que puede ser: disposición, reúso interno en operaciones de petróleo y gas (Oil & Gas) o reúso en otros sectores industriales (Neff et al., 2011).

Organismos técnicos del sector energético como la Society of Petroleum Engineers (SPE), señalan que el diseño de sistemas de tratamiento debe considerar criterios de confiabilidad operativa, robustez frente a variaciones de caudal y calidad, costos de

inversión y operación, así como compatibilidad con las condiciones del campo (SPE, 2011). En este sentido, el tratamiento del agua de producción se aborda como un problema de ingeniería de sistemas, más que como la aplicación aislada de una tecnología.

3.2.1 Tecnologías para tratamiento de aguas de producción

Las tecnologías de tratamiento de aguas de producción pueden clasificarse, de manera general, en procesos físicos, químicos y biológicos, los cuales suelen combinarse en función de los contaminantes presentes y del nivel de tratamiento requerido. Esta clasificación es ampliamente utilizada en la literatura académica y técnica para estructurar el análisis comparativo de soluciones (Fakhru'l-Razi et al., 2009).

Los procesos físicos constituyen normalmente la primera etapa del tratamiento e incluyen tecnologías como separadores API, hidrociclones, flotación por gas inducido (IGF) o disuelto (DAF), y filtración. Estas tecnologías están orientadas principalmente a la remoción de hidrocarburos libres y sólidos suspendidos, y se caracterizan por su alta confiabilidad y relativa simplicidad operativa (Veil et al., 2004). Ver Figura 10. Principales tecnologías por etapas de tratamiento.

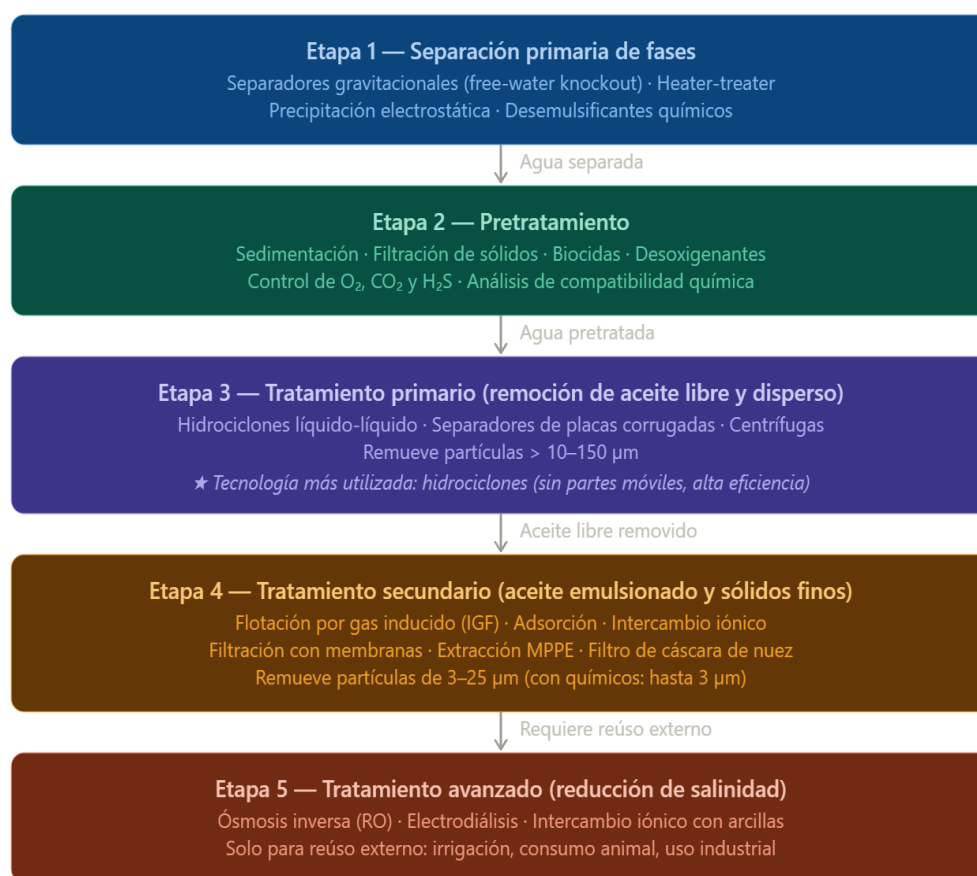
Los procesos químicos se emplean para mejorar la eficiencia de remoción de contaminantes disueltos o emulsionados. Entre ellos se encuentran la coagulación-floculación, oxidación química, intercambio iónico y procesos de desinfección. En el contexto del agua de producción, estos métodos son particularmente relevantes para la remoción de aceites emulsionados, metales y ciertos compuestos orgánicos (Fakhru'l-Razi et al., 2009; Veil et al., 2004).

Por su parte, los procesos biológicos han tenido escasa aplicación en el tratamiento de aguas de producción: la alta salinidad y la toxicidad de estos efluentes dificultan la supervivencia microbiana y reducen significativamente la biodegradabilidad. A pesar de

ello, Lusinier et al. (2019) revisó 59 estudios sobre el tema y encontró resultados positivos con lodos activados adaptados, biorreactores de membrana (MBR) y sistemas anaerobios, siempre que la calidad del agua lo permita. Los autores señalan que históricamente los procesos fisicoquímicos son más utilizados por su menor espacio requerido y simplicidad operativa; no obstante, el endurecimiento de la regulación ambiental y el creciente interés en el reúso del agua están impulsando el desarrollo de estos.

Figura 10.

Principales tecnologías por etapas de tratamiento



Nota: Adaptado de Veil, J. A., Puder, M. G., Elcock, D., & Redweik, R. J. (2004)

Adicionalmente, tecnologías avanzadas de separación por membranas — ultrafiltración (UF), nanofiltración (NF) y ósmosis inversa (RO)— junto con procesos

térmicos como la evaporación y la destilación por membranas, han ganado relevancia para escenarios de reúso más exigentes. Su implementación enfrenta retos importantes relacionados con el ensuciamiento de membranas (fouling), los altos costos energéticos y la variabilidad en la composición del agua de producción, factores que condicionan su viabilidad técnica y económica en cada caso (Alzahrani & Mohammad, 2014). En la Tabla 3, se resume las principales tecnologías con sus ventajas y limitaciones.

Tabla 3.

Principales tecnologías tratamiento de aguas de producción

Tipo de proceso	Tecnología	Nivel de tratamiento	Mecanismo / principio	Contaminantes que remueve	Ventajas	Limitaciones
Físico	Separación gravitacional (<i>free-water knockout</i>)	Primario	Diferencia de densidad entre agua, aceite y gas	Aceite libre, gas disuelto, sólidos gruesos	Simple; bajo costo operativo; no requiere químicos	Ineficiente para partículas pequeñas y aceite emulsificado
Físico	Hidrociclón	Primario	Fuerza centrífuga; separa fluidos por densidad sin partes móviles	Aceite disperso, sólidos suspendidos (>10–15 μm)	Sin partes móviles; compacto; bajo mantenimiento	No remueve partículas finas ni aceite disuelto
Físico	Separador de placas corrugadas	Primario	Coalescencia de gotas sobre superficies inclinadas	Aceite disperso, sólidos (>40 μm)	Mayor eficiencia que separador gravitacional simple	Susceptible a obstrucción por sólidos
Físico	Flotación por gas inducido (IGF)	Secundario	Burbujas de gas arrastran partículas de aceite a la superficie	Aceite emulsificado, sólidos finos (3–25 μm)	Efectiva para aceite emulsificado; adaptable con químicos	Requiere espacio; con químicos aumenta costo operativo
Físico	Centrífuga	Secundario	Separación por fuerza centrífuga de alta velocidad	Sólidos finos, aceite disperso (>2 μm)	Alta eficiencia de separación; compacta	Costo energético alto; mantenimiento frecuente
Químico	Coagulación-floculación	Primario / Secundario	Desestabilización de partículas coloidales mediante agentes químicos	Aceite emulsificado, coloides, metales, sólidos en suspensión	Mejora significativamente la claridad del agua	Genera lodos que requieren disposición; costo de reactivos
Químico	Oxidación química	Secundario / Terciario	Reacción oxidante (ozono, H_2O_2 , cloro) degrada compuestos orgánicos	BTEX, fenoles, compuestos orgánicos disueltos	Eficaz para contaminantes refractarios; desinfecta	Alto costo energético; puede generar subproductos tóxicos
Químico	Intercambio iónico	Terciario	Resinas intercambian iones no deseados por iones inocuos	Iones metálicos, dureza, radionúclidos	Alta selectividad; agua de alta calidad	Requiere regeneración frecuente de resinas; costo elevado

Tipo de proceso	Tecnología	Nivel de tratamiento	Mecanismo / principio	Contaminantes que remueve	Ventajas	Limitaciones
Químico	Desemulsificantes y biocidas	Primario / Pretratamiento	Rompen emulsiones agua-aceite; eliminan bacterias mediante agentes químicos	Aceite emulsificado, bacterias, incrustaciones	Mejora eficiencia de separación posterior	Pueden ser tóxicos; generan residuos químicos
Biológico	Lodos activados adaptados	Terciario	Degradación aerobia de materia orgánica por microorganismos en suspensión	Compuestos orgánicos disueltos, DBO, fenoles	Efectivo para agua con baja salinidad; bajo costo	Inhibido por alta salinidad y toxicidad del agua de producción
Biológico	Biorreactor de membrana (MBR)	Terciario	MF/UF integrada con tratamiento biológico de lodos activos	Contaminantes orgánicos, bacterias, partículas finas	Alta purificación; compacto; efluente de alta calidad	Alta tendencia al fouling; operación compleja; costo elevado
Biológico	Humedales construidos	Terciario	Degradación natural por plantas y microorganismos en condiciones controladas	Materia orgánica, metales, hidrocarburos residuales	Bajo costo; ambientalmente sostenible	Solo viable para aguas de baja salinidad (CBM); requiere gran superficie
Avanzado — membrana	Microfiltración (MF)	Primario / Pretratamiento	Tamizado por tamaño de poro (0,1–0,2 µm)	Gotas de aceite, partículas gruesas, sólidos suspendidos	Pretratamiento ideal para NF y RO; bajo costo energético	No remueve iones ni partículas muy pequeñas sola
Avanzado — membrana	Ultrafiltración (UF)	Secundario	Retención por masa molecular (>300 kDa); poros 5–100 nm	Aceite emulsificado, metales tóxicos, coloides	Tecnología más usada para separación aceite-agua; alta eficiencia	Alta tendencia al ensuciamiento; no remueve sales disueltas
Avanzado — membrana	Nanofiltración (NF)	Terciario	Tamizado + carga superficial; poros 1–10 nm	Iones cargados, aceite, orgánicos, contaminantes específicos	Menor consumo que RO; mayor rechazo que UF	No tolera temperaturas >45 °C; fouling por surfactantes
Avanzado — membrana	Ósmosis inversa (RO)	Terciario	Presión superior a la osmótica; poros <2 nm (TFC)	Sólidos disueltos, iones, orgánicos, bacterias	Remoción de aceite >99%; amplio espectro de contaminantes	Genera salmuera; alta presión operativa; susceptible a fouling
Avanzado — membrana	Destilación por membranas (MD)	Terciario	Gradiente de temperatura a través de membrana hidrófoba; transporte de vapor	Sales, iones, compuestos orgánicos volátiles	Opera a baja presión; tolera agua de alta salinidad	Alto consumo energético térmico; fouling por hidrocarburos

Nota: Con base en Veil et al. (2004); Fakhru'l-Razi et al. (2009); Lusinier et al. (2019); Harkouss et al. (2024); Alzahrani & Mohammad (2014).

3.2.2 Enfoque adecuación al propósito (fit-for-purpose) en el tratamiento del agua de producción

El enfoque adecuación al propósito (fit-for-purpose) plantea que el nivel de tratamiento del agua debe definirse en función del uso final previsto, y no bajo un criterio único de máxima calidad. Este principio ha sido promovido por organismos multilaterales como el Banco Mundial como una estrategia clave para viabilizar el reúso del agua desde el punto de vista técnico y económico (World Bank, 2020). En el caso del agua de producción, este enfoque es relevante debido a altos costos asociados a tratamientos avanzados. Estudios del Banco Mundial y de UNESCO señalan que intentar llevar todas las corrientes residuales a estándares de agua potable suele ser innecesario y económicamente inviable, mientras que adaptar el tratamiento a usos específicos, como enfriamiento industrial, procesos productivos o reúso energético, permite reducir significativamente costos y barreras de implementación (UNESCO, 2017; World Bank, 2020).

Este enfoque no solo optimiza el diseño técnico del tratamiento del agua, sino que también habilita la estructuración de soluciones alineadas con condiciones de mercado y marcos regulatorios. En el contexto del reúso, organismos como el Banco Mundial han destacado la necesidad de articular factores técnicos, financieros y regulatorios para viabilizar esquemas de implementación a escala, así como la importancia de consolidar el business case del agua reutilizada como un recurso económico estratégico (World Bank, 2020).

En este sentido, la literatura señala que la adopción de tecnologías de tratamiento no depende exclusivamente del desempeño técnico, sino de la capacidad de integrarlas en modelos de negocio viables que definan propuestas de valor, mecanismos de entrega y esquemas de captura de ingresos, en un marco de economía circular, donde el agua tratada y los subproductos, se transforman en un activo que puede ser gestionado bajo esquemas de servicio, suministro o valorización de recursos (Skalny & Smol, 2026; Frijns

et al., 2024). De esta manera, el enfoque adecuación al propósito (fit-for-purpose) actúa como un puente entre el diseño tecnológico y la configuración de modelos de negocio, habilitando la evaluación de la viabilidad y escalabilidad de las soluciones de tratamiento.

3.3 Modelos de Negocio Tecnológicos

Los modelos de negocio tecnológicos se caracterizan por integrar la tecnología como elemento central en la lógica de creación, entrega y captura de valor, superando su concepción tradicional como un simple habilitador operativo. En este contexto, un modelo de negocio define la arquitectura mediante la cual una organización transforma capacidades tecnológicas en propuestas de valor económicamente viables, estableciendo los mecanismos para atraer clientes, generar ingresos y sostener ventajas competitivas (Teece, 2010).

En entornos dinámicos, el avance de tecnologías digitales y emergentes está impulsando la transformación de modelos tradicionales hacia esquemas intensivos en conocimiento, plataformas y soluciones integradas, donde la innovación no solo radica en el desarrollo tecnológico, sino en la configuración del modelo que permite su explotación en el mercado (García Galindo, 2024).

Asimismo, tendencias como la servitización evidencian esta evolución, al desplazar el foco desde la venta de productos hacia la provisión de servicios basados en tecnología, lo que implica redefinir la lógica de negocio para generar valor continuo y relaciones de largo plazo con los clientes (Martín-Peña & Bigdeli, 2016). De esta manera, los modelos de negocio tecnológicos constituyen un puente entre la innovación tecnológica y su materialización económica, permitiendo escalar soluciones, capturar valor y responder de forma efectiva a las dinámicas del mercado.

3.3.1 Modelos de negocio basados en activos, servicios y alianzas

La literatura sobre modelos de negocio identifica diferentes configuraciones según el rol que asume la empresa en la cadena de valor y la forma en que captura ingresos. En sectores industriales y de infraestructura, se destacan tres (3) enfoques predominantes: modelos basados en activos, modelos basados en servicios y modelos basados en alianzas estratégicas.

Los modelos basados en activos, se caracterizan por la propiedad y operación directa de infraestructura física, como plantas de tratamiento o sistemas de producción, donde la empresa asume inversiones significativas de capital (CAPEX) y captura valor mediante la venta de productos o servicios asociados al uso de dichos activos. Este tipo de modelos es predominante en sectores como energía, agua y utilities, donde los proyectos requieren estructuras financieras de largo plazo y esquemas de recuperación de inversión asociados al uso de infraestructura intensiva en capital. (Teece, 2010).

Por su parte, los modelos basados en servicios, trasladan el foco desde la propiedad de activos hacia la provisión de capacidades o resultados, apoyados en el uso intensivo de tecnología. En sectores como agua y energía, estos esquemas se materializan en conceptos como Water as a Service o contratos basados en desempeño, donde el cliente paga por el acceso al servicio (por ejemplo, el suministro de agua tratada) en lugar de adquirir la infraestructura subyacente. La literatura sobre servitización indica que este tipo de modelos transforma la lógica tradicional del negocio al integrar productos y servicios en soluciones completas, lo que permite generar valor continuo, fortalecer la relación con el cliente y redefinir los mecanismos de ingreso (Martín-Peña & Bigdeli, 2016; Bustinza et al., 2022)

Finalmente, los modelos basados en alianzas, surgen como una respuesta a la complejidad técnica, regulatoria y financiera de proyectos en industrias intensivas en capital y altamente reguladas. A través de esquemas como joint ventures, contratos

construir-operar-transferir (Build-Operate-Transfer, BOT) o asociaciones público-privadas, las organizaciones pueden compartir riesgos, complementar capacidades y facilitar el acceso a nuevos mercados. Desde la perspectiva estratégica, la generación y captura de valor en contextos de innovación requiere la articulación de múltiples actores dentro de sistemas de actividades interdependientes, lo que refuerza el papel de las alianzas como mecanismos clave para implementar modelos de negocio complejos y escalar soluciones tecnológicas (Teece, 2010).

En el caso del manejo de aguas de producción, estos tres enfoques no son excluyentes y pueden combinarse para estructurar modelos de negocio híbridos, adaptados a las condiciones del mercado, la regulación y a la viabilidad económica de las soluciones. A continuación, en la Tabla 4. Tipologías de modelos de negocio en el manejo de aguas de producción, se presenta una síntesis comparativa que facilita la comprensión de las principales tipologías de modelos de negocio y su aplicación en el manejo de aguas de producción, permitiendo identificar las condiciones en las cuales cada esquema resulta más adecuado y los riesgos asociados a su implementación.

Tabla 4.

Tipologías de modelos de negocio en el manejo de aguas de producción

Modelo de negocio	Tipo de modelo aplicado	Descripción	¿Cuándo se usa?	Riesgo principal
Basado en activos	EPC / Construir-poseer-operar (Build-Own-Operate, BOO)	La empresa invierte en infraestructura propia y captura valor mediante la venta directa de productos o servicios asociados al uso del activo	Proyectos con alta escala, estabilidad regulatoria y disponibilidad de capital	Alta inversión inicial (CAPEX) y riesgo financiero
Basado en servicios	Agua como servicio (Water-as-a-Service, WaaS) / contratos por desempeño	La empresa ofrece resultados (ej. agua tratada) sin transferir la propiedad del activo, cobrando por uso o desempeño	Clientes con restricciones de CAPEX o que buscan eficiencia operativa y externalización	Dependencia del desempeño técnico y operativo del proveedor

Modelo de negocio	Tipo de modelo aplicado	Descripción	¿Cuándo se usa?	Riesgo principal
Basado en alianzas	BOT (Construir, operar, transferir) / PPP (Asociaciones público-privadas) / Joint ventures	Múltiples actores colaboran compartiendo capacidades, inversiones y riesgos para desarrollar y operar soluciones	Proyectos complejos, regulados o de alto riesgo donde se requiere complementar capacidades	Riesgos de coordinación, gobernanza y alineación de intereses

Nota: Elaboración propia con base en Teece (2010), Martín-Peña y Bigdeli (2016) y Bustinza et al. (2022)

3.3.2 Modelos de negocio para tecnologías ambientales

Las tecnologías ambientales, incluyendo aquellas orientadas al tratamiento y reúso del agua, presentan particularidades que influyen de manera directa en el diseño de sus modelos de negocio. Estas tecnologías suelen estar asociadas a requerimientos significativos de inversión en infraestructura, así como a una fuerte dependencia de marcos regulatorios y políticas públicas que condicionan el desarrollo y adopción. En este sentido, organismos como la OECD destacan que la gestión de recursos hídricos y las tecnologías asociadas están estrechamente vinculadas a instrumentos de política, mecanismos de financiamiento y estructuras institucionales que determinan su viabilidad (OECD, 2011).

En este contexto, los modelos de negocio para tecnologías ambientales tienden a enfatizar la creación de valor más allá del beneficio económico directo, incorporando elementos como la reducción de riesgos regulatorios, el cumplimiento normativo, la mejora del desempeño ambiental y el fortalecimiento de la licencia social para operar. Porter y van der Linde (1995) argumentan que las regulaciones ambientales, cuando están adecuadamente diseñadas, pueden estimular procesos de innovación que incrementan la productividad de los recursos y generan ventajas competitivas, lo que refuerza la necesidad de integrar estas dimensiones en el diseño del modelo de negocio.

Organismos multilaterales como el Banco Mundial han documentado que la adopción de tecnologías ambientales en sectores como el agua requiere nuevos

enfoques de gestión, financiamiento e implementación, particularmente en contextos de infraestructura intensiva en capital. En este sentido, la promoción de modelos basados en economía circular ha permitido reconceptualizar las corrientes residuales como recursos valiosos, facilitando la generación de nuevos flujos de valor a partir de agua, energía y nutrientes recuperados de aguas residuales (World Bank– WICER, 2021). En consecuencia, la implementación de estas tecnologías suele apoyarse en esquemas de financiamiento innovadores, marcos contractuales de largo plazo y estrategias de gestión de riesgos que permitan viabilizar su adopción.

Aplicado al tratamiento de aguas de producción, foco principal de este proyecto, debe tener en cuenta al momento de diseñar el modelo de negocio que no solo capturen ingresos por la venta de agua tratada o servicios asociados, sino que también incorporen beneficios adicionales como la reducción de costos de disposición, el cumplimiento regulatorio y la mitigación de riesgos operativos, permitiendo una toma de decisiones basada no solo sustentada en criterios económicos directos, sino en una evaluación integral del valor generado por la solución.

3.3.3 Modelo de negocio Business Model Navigator (BMN)

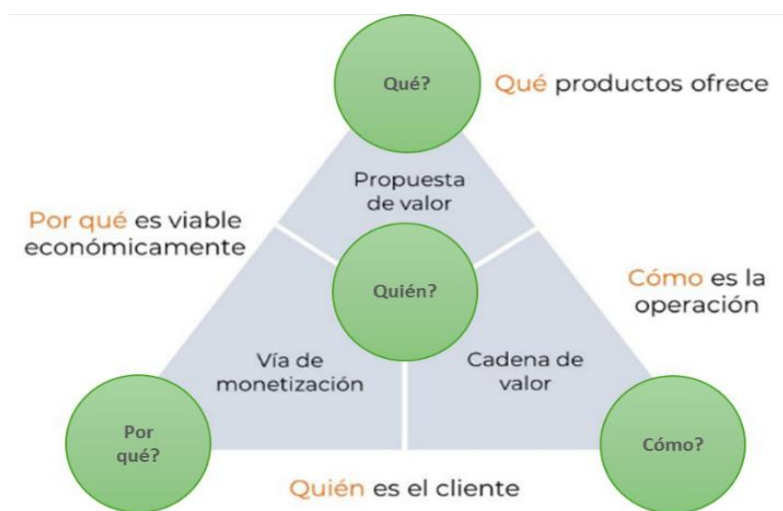
El Business Model Navigator (BMN) es un marco conceptual desarrollado por Oliver Gassmann, Karolin Frankenberger y Michaela Csik, investigadores de la Universidad de St. Gallen, una de las escuelas de referencia mundial en estrategia e innovación empresarial. El modelo surge a partir del análisis empírico de más de 250 modelos de negocio exitosos en distintos sectores industriales, con el objetivo de identificar patrones recurrentes de creación y captura de valor. Identificaron 55 patrones de modelos de negocio recurrentes, derivados del análisis empírico de empresas exitosas en múltiples industrias. Estos patrones representan configuraciones estables de creación y captura de valor que han demostrado ser económicamente viables y replicables en distintos contextos.

El BMN propone que la innovación en modelos de negocio no consiste en crear estructuras completamente nuevas, sino en recombinar patrones probados de forma creativa y adaptarlos a contextos específicos. Esta aproximación resulta especialmente relevante en industrias reguladas e intensivas en activos, donde la experimentación radical suele estar limitada por riesgos operativos, regulatorios y financieros.

Los 55 modelos se articulan conceptualmente alrededor de cuatro preguntas fundamentales, (como se muestra en la Figura 11. Business model navigator - BMN que permite describir de manera clara la lógica de cualquier modelo de negocio: ¿Quién es el cliente objetivo?, ¿Qué valor se le ofrece al cliente?, ¿Cómo se crea y entrega ese valor?, ¿Por qué el modelo es económicamente viable? Estas cuatro dimensiones permiten analizar el modelo de negocio desde una perspectiva estratégica e integradora, evitando el exceso de fragmentación y facilitando su aplicación en contextos empresariales reales.

Figura 11.

Business model navigator - BMN



Nota: Gassmann, O., Frankenberger, K., & Csik, M. (2014)

El Business Model Canvas (BMC) de Osterwalder y Pigneur es uno de los marcos más difundidos. Sin embargo, diversos autores señalan que su enfoque resulta más adecuado para mercados abiertos, startups o productos digitales, donde los canales, relaciones con clientes y estructuras de costos presentan alta variabilidad.

En contraste, el Business Model Navigator (BMN) ha demostrado una mayor capacidad explicativa en modelos B2B, industriales y basados en servicios, donde: los clientes son pocos y bien definidos, los canales son directos, las relaciones contractuales son de largo plazo, y la creación de valor está fuertemente ligada a la operación y a la gestión del riesgo. Una de las principales fortalezas del BMN es su capacidad para capturar la lógica de modelos de negocio en entornos regulados, donde la viabilidad no depende únicamente del cliente y el precio, sino también de: la alineación con marcos normativos, la capacidad de integración operativa, la gestión del riesgo ambiental y reputacional, la replicabilidad territorial.

Al centrar el análisis en las preguntas WHO–WHAT–HOW–WHY, el BMN permite evaluar si un modelo: responde a una necesidad real del sistema productivo, crea valor más allá del cumplimiento normativo, puede escalar sin incrementar desproporcionadamente la complejidad, y es económicamente sostenible. Por esta razón, el BMN resulta particularmente pertinente para analizar modelos como agua como servicio (*Water-as-a-service*), servicios de infraestructura, y soluciones de economía circular, donde el valor no se genera por transacción, sino por desempeño sostenido en el tiempo y la tecnología es solo un habilitador y no el núcleo del valor.

Adicionalmente, el BMN se puede complementar con el concepto de la arquitectura de valor (*Value Architecture*) el cual permite profundizar en la dimensión cómo del modelo de negocio. Este concepto no corresponde a una metodología, sino a una forma de analizar la lógica operativa del negocio a partir de las actividades que lo componen. En este sentido, la arquitectura de valor (*Value Architecture*) puede entenderse como la forma en que se organizan, conectan y distribuyen las actividades necesarias para crear

y entregar valor. De acuerdo con Zott y Amit (2010), el modelo de negocio puede concebirse como un sistema de actividades interdependientes cuya arquitectura depende de tres elementos clave: qué actividades se realizan (contenido), cómo se relacionan entre sí (estructura) y quién es responsable de ejecutarlas (gobernanza). Desde esta perspectiva, el diseño del modelo de negocio implica definir y articular coherentemente este sistema de actividades, permitiendo no solo entender cómo funciona el negocio en la práctica, sino también optimizar su desempeño a nivel integral, en lugar de enfocarse en actividades aisladas.

3.4 Análisis Estratégico de Tecnologías en Industrias Reguladas

Una industria regulada, es aquella en la que las decisiones de inversión, operación, precios, tecnologías y modelos de negocio están condicionadas de manera directa por normas, permisos y supervisión del Estado, debido al impacto sobre bienes públicos como la salud, el medio ambiente, la seguridad o los recursos naturales (OECD, 2011). En este tipo de industrias, la regulación actúa como una fuerza estructural que redefine las condiciones de competencia, las barreras de entrada y las opciones estratégicas disponibles para los actores del mercado (Porter, 2008). La literatura económica y estratégica identifica como industrias reguladas: energía, agua y saneamiento, hidrocarburos, infraestructura, residuos y medio ambiente; sectores en los que el Estado interviene activamente para garantizar el uso eficiente y sostenible de recursos escasos (OECD, 2011).

El reúso de agua de producción ocurre dentro de dos industrias reguladas simultáneamente: hidrocarburos y agua. En consecuencia, la viabilidad de la tecnología no depende únicamente del desempeño técnico, sino también de permisos, estándares de calidad, aceptación institucional y social (World Bank, 2017). Los modelos de negocio en industrias reguladas adoptan características particulares —contratos de largo plazo, concesiones y esquemas de prestación de servicios— que los diferencian sustancialmente de los modelos propios de mercados no regulados (Porter, 2008). Por

ende, el análisis de estas industrias no puede limitarse a la dimensión técnica, sino que debe incorporar una perspectiva estratégico-regulatoria que reconozca el papel determinante del marco normativo en la creación y captura de valor (OECD, 2011; World Bank, 2017).

3.4.1 Innovación y escalamiento tecnológico

La innovación tecnológica en industrias reguladas se enfrenta a desafíos particulares que difieren sustancialmente de aquellos presentes en mercados desregulados o de consumo masivo. La literatura estratégica señala que, en sectores como energía, agua, infraestructura y medio ambiente, el proceso de innovación no está determinado únicamente por el desempeño técnico de la tecnología, sino por la capacidad de integrarse en marcos normativos, operativos y de mercado altamente estructurados (Mazzucato & Perez, 2015).

El escalamiento tecnológico se define como la capacidad de una innovación para pasar de aplicaciones piloto o demostrativas a una adopción comercial amplia y sostenible. Estudios del Banco Mundial y de la Agencia Internacional de Energía destacan que, en industrias reguladas, el escalamiento suele verse limitado por barreras como la aversión al riesgo de los operadores, los altos costos de capital, la dependencia de permisos y licencias, y la necesidad de demostrar confiabilidad operativa en el largo plazo (World Bank, 2022; IEA, 2020).

En el contexto de industrias reguladas como la de hidrocarburos y la gestión del agua, el escalamiento tecnológico debe entenderse como un proceso multidimensional que integra, al menos, cuatro tipos complementarios: escalamiento técnico, escalamiento de mercado, escalamiento organizacional y escalamiento sistémico. Cada uno de estos tipos responde a objetivos distintos, involucra actores específicos y presenta ventajas y limitaciones particulares.

El escalamiento técnico hace referencia al proceso mediante el cual una tecnología incrementa la capacidad, confiabilidad y robustez operativa, pasando de pruebas de laboratorio o pilotos a una operación estable a escala industrial. Este tipo de escalamiento está estrechamente relacionado con los niveles de madurez tecnológica (TRL) y suele ocurrir en etapas intermedias del desarrollo, cuando la tecnología ha demostrado el funcionamiento básico, pero aún requiere validación en condiciones reales de operación. En industrias reguladas, el escalamiento técnico es un prerrequisito indispensable para reducir el riesgo percibido por los operadores y las autoridades regulatorias, aunque implica altos requerimientos de inversión y tiempos prolongados de validación (IEA, 2020; U.S. DOE, 2015).

El escalamiento de mercado —también denominado escalamiento comercial en parte de la literatura— se refiere a la expansión de la adopción de una tecnología hacia nuevos clientes, segmentos o regiones, manteniendo una solución técnica esencialmente similar. Este tipo de escalamiento se activa una vez que la tecnología ha alcanzado un nivel suficiente de madurez técnica y cuenta con un modelo de negocio viable. Organismos multilaterales destacan que el escalamiento de mercado es fundamental para capturar economías de escala, consolidar flujos de ingresos y asegurar la sostenibilidad financiera de la innovación; sin embargo, en industrias reguladas, este proceso se ve condicionado por la heterogeneidad normativa entre jurisdicciones, la aversión al riesgo de los clientes y la necesidad de adaptar contratos y esquemas de servicio a contextos locales (World Bank, 2022; OECD, 2015).

El escalamiento organizacional se relaciona con la capacidad de las organizaciones para desarrollar estructuras internas, procesos, talento y mecanismos de gobernanza que permitan sostener el crecimiento derivado del escalamiento técnico y de mercado. Desde la perspectiva de la teoría de capacidades dinámicas, el escalamiento organizacional implica que las empresas no solo adopten una tecnología, sino que transformen rutinas y capacidades para integrarla de manera efectiva en sus operaciones y estrategias de largo plazo (Teece, 2007). En el caso de tecnologías para el tratamiento

de aguas de producción, este tipo de escalamiento puede materializarse en la creación de unidades de negocio especializadas, alianzas estratégicas con operadores o utilities, y esquemas de gestión que permitan operar múltiples proyectos de manera simultánea.

Finalmente, el escalamiento sistémico representa la forma más avanzada y compleja de escalamiento tecnológico. Este ocurre cuando una tecnología se integra de manera estructural en marcos normativos, políticas públicas, estándares técnicos y prácticas habituales del sector, convirtiéndose en una solución de referencia. La literatura sobre políticas de innovación transformadora señala que el escalamiento sistémico es clave para generar impactos estructurales y duraderos, pero también es el más difícil de alcanzar, dado que depende de decisiones institucionales, procesos regulatorios y dinámicas políticas que están fuera del control directo de los proveedores tecnológicos (Mazzucato & Perez, 2015; World Bank, 2022).

En el tratamiento y reúso del agua de producción, los cuatro tipos de escalamiento coexisten y se condicionan mutuamente. Una tecnología puede madurar técnicamente sin encontrar mercado, o lograr contratos comerciales puntuales sin llegar a incorporarse en las prácticas estándar del sector. Esta desincronización es más frecuente de lo que la literatura suele reconocer, y explica por qué muchas tecnologías con desempeño técnico demostrado permanecen en adopciones marginales durante años. Entender en qué tipo de escalamiento se encuentra una tecnología, permite hacer un análisis más realista del potencial de negocio y de la contribución efectiva a la sostenibilidad del sector.

En este mismo sentido, en industrias reguladas, el escalamiento rara vez sigue una trayectoria lineal. Las dimensiones técnica, comercial, organizacional y sistémica avanzan a ritmos distintos y con frecuencia se bloquean entre sí: un operador puede tener la tecnología lista, pero carecer de los permisos; un regulador puede exigir referencias comerciales que aún no existen. En el caso específico del tratamiento de aguas de producción, el escalamiento técnico es el punto de partida inevitable, pero no

es suficiente: son el escalamiento comercial y el sistémico los que determinan si la tecnología genera valor de manera sostenida o queda confinada a proyectos aislados. La Tabla 5. Tipo de escalamiento y su ventajas y desventajas, sintetiza las características, actores y condiciones de cada tipo, con el propósito de facilitar su identificación en contextos reales de evaluación tecnológica y estratégica.

Tabla 5.

Tipo de escalamiento y su ventajas y desventajas

Tipo de escalamiento	¿En qué consiste?	¿A quién aplica principalmente?	¿Cuándo ocurre?	Ventajas estratégicas	Limitaciones y riesgos
Escalamiento técnico	Incrementar la capacidad, robustez y confiabilidad de la tecnología, pasando de pruebas piloto a operación a escala industrial. Incluye ajustes de diseño, estandarización y validación operativa.	Proveedores tecnológicos, desarrolladores, integradores de sistemas.	Fase post-piloto / pre-comercial (TRL 6–8).	Reduce riesgo técnico; aumenta confianza del operador; habilita adopción comercial.	Alto CAPEX; tiempos largos de validación; dependencia de condiciones reales de operación.
Escalamiento de mercado	Expansión de la adopción comercial de la tecnología hacia nuevos clientes, segmentos o regiones, manteniendo una solución técnicamente similar. Implica replicabilidad del modelo de negocio.	Empresas proveedoras de servicios, utilities privadas, operadores tecnológicos.	Cuando la tecnología alcanza TRL medio-alto (≥ 7) y existe un modelo de negocio probado.	Crecimiento de ingresos; economías de escala; aprendizaje comercial.	Dependencia de la demanda; riesgo regulatorio local; necesidad de adaptación contractual.
Escalamiento organizacional	Desarrollo de capacidades internas (procesos, talento, gobernanza, financiamiento) para sostener el crecimiento y la operación en múltiples proyectos o mercados.	Empresas en expansión, operadores industriales, alianzas estratégicas.	Paralelo o posterior al escalamiento de mercado.	Mayor control operativo; mejora de eficiencia; sostenibilidad del crecimiento.	Aumento de complejidad; costos indirectos; riesgos de gestión.
Escalamiento sistémico	Integración de la tecnología en normas, políticas públicas, estándares técnicos y prácticas habituales del sector, convirtiéndola en solución “de referencia”.	Sector industrial, reguladores, formuladores de política pública.	Largo plazo, tras validación técnica y comercial sostenida.	Alto impacto estructural; estabilidad de mercado; reducción de incertidumbre regulatoria.	Proceso lento; dependencia de decisiones institucionales; bajo control del proveedor.

Nota: Elaboración propia con base en World Bank (2022), IEA (2020), OECD (2015), Mazzucato & Perez (2015), Teece (2007).

3.4.2 Niveles de madurez tecnológica (TRL)

El concepto de Niveles de Madurez Tecnológica (Technology Readiness Levels – TRL) fue desarrollado originalmente por la NASA como una herramienta para evaluar el grado de desarrollo y confiabilidad de tecnologías emergentes, y posteriormente ha sido adoptado por múltiples sectores industriales y organismos internacionales. El marco TRL clasifica el desarrollo tecnológico en una escala de nueve niveles, desde la observación de principios básicos (TRL 1) hasta la operación comprobada en condiciones reales (TRL 9) (NASA, 2012).

En industrias reguladas, el TRL se ha convertido en un criterio estratégico para la toma de decisiones de inversión, adquisición y adopción tecnológica. Organismos como la Comisión Europea y el Departamento de Energía de Estados Unidos han documentado que tecnologías ubicadas en niveles TRL bajos o intermedios presentan mayores niveles de incertidumbre técnica y de implementación, lo que puede traducirse en riesgos financieros y regulatorios en etapas posteriores (European Commission, 2025).

Desde una perspectiva de negocio, el TRL no debe analizarse de manera aislada. Tecnologías con niveles altos de madurez técnica no garantizan éxito comercial si no están alineadas con las necesidades del mercado; inversamente, tecnologías en TRL intermedios pueden avanzar hacia el escalamiento cuando se combinan con estrategias de demostración, alianzas estratégicas y apoyo institucional adecuados (Héder, 2017). Por esta razón, el TRL debe complementarse con otros marcos que permitan evaluar la viabilidad comercial, la escalabilidad y la implementación operativa (GAO, 2020), los cuales se sintetizan en la Tabla 6. Otros niveles de maduración. Una tecnología puede alcanzar TRL 8–9 y aun así enfrentar barreras comerciales, regulatorias u organizacionales que limiten su adopción; es precisamente esta brecha entre madurez técnica y escalamiento real la que los marcos complementarios buscan identificar y gestionar.

Tabla 6.*Otros niveles de maduración*

Marco	¿Qué evalúa?	Uso principal
Technology Readiness Level - TRL	Nivel de madurez técnica de una tecnología (desde concepto hasta operación en campo)	Evaluar el grado de desarrollo tecnológico y el riesgo técnico
Commercial Readiness Level - CRL	Nivel de preparación comercial (modelo de negocio, mercado, clientes)	Evaluar la viabilidad comercial y la adopción en el mercado
Manufacturing Readiness Level - MRL	Capacidad de producir la tecnología a escala	Evaluar la factibilidad de escalamiento industrial
Integration Readiness Level - IRL	Preparación organizacional y modelo de negocio	Analizar la capacidad de la empresa para implementar la tecnología
System Readiness Level - SRL	Nivel de integración del sistema completo	Validar interoperabilidad y funcionamiento en conjunto
Value Architecture (Activity System)	Configuración del sistema de actividades (qué, cómo, quién)	Diseñar cómo se implementa, opera y entrega valor
Modelos de comercialización	Estructura de ingresos y relaciones comerciales	Definir cómo se monetiza la solución (CAPEX, WaaS, BOT, etc.)
Stage-Gate / procesos de innovación	Avance del proyecto en fases de decisión	Gestionar el desarrollo y reducir riesgos en el proceso de escalamiento

Nota: Elaboración propia con base en NASA (2012), U.S. Department of Energy (2018), European Commission (2014), Héder (2017), GAO, (2020).

4. Metodología

El presente trabajo se desarrolla bajo un enfoque aplicado, con orientación descriptiva y analítica, en línea con los objetivos propuestos para el trabajo de la Maestría en Administración (MBA). El estudio no busca probar hipótesis causales, sino analizar un problema empresarial complejo, integrar múltiples variables técnicas, estratégicas y económicas, y proponer un modelo de negocio viable para un contexto específico.

Desde el punto de vista metodológico, la investigación adopta un enfoque cualitativo–cuantitativo mixto. El componente cualitativo se utiliza para el análisis del entorno, la caracterización de tecnologías, la revisión normativa y la estructuración del modelo de negocio, mientras que el componente cuantitativo se emplea para el análisis de volúmenes, costos, priorización multicriterio y evaluación financiera preliminar del caso de negocio.

Este enfoque mixto aplica para estudios de innovación tecnológica y modelos de negocio, donde la comprensión del contexto y la toma de decisiones estratégicas requieren la combinación de análisis cualitativos y herramientas cuantitativas de apoyo (Creswell & Plano Clark, 2018; Yin, 2018).

4.1 Diseño Metodológico

El diseño metodológico del estudio se estructura por etapas secuenciales, alineadas directamente con los objetivos específicos de la investigación. Este diseño permite avanzar de manera progresiva desde el análisis del contexto y las variables clave hasta la formulación y validación de un caso de negocio. Las etapas metodológicas son:

- Análisis del potencial del agua de producción, mediante revisión documental y análisis de datos sectoriales.

- Caracterización tecnológica, evaluando tecnologías existentes, madurez (TRL) y escalabilidad.
- Análisis estratégico, normativo y operativo, identificando barreras y habilitadores.
- Esquematización de un caso de negocio probable, integrando propuesta de valor, costos y mecanismos de monetización.

Este tipo de diseño por etapas es consistente con metodologías utilizadas en estudios de innovación y escalamiento tecnológico, donde se requiere una integración progresiva de información técnica, estratégica y económica para soportar decisiones de inversión y adopción (OECD, 2015; World Bank, 2019).

4.2 Fuentes de Información

La investigación se fundamenta principalmente en fuentes secundarias de carácter académico, técnico e institucional, seleccionadas por la credibilidad, actualidad y relevancia para el problema de estudio. Entre las principales fuentes se incluyen:

- Artículos científicos indexados en revistas especializadas
- Reportes técnicos de organismos multilaterales (Banco Mundial, OCDE, IEA, UNESCO).
- Documentos sectoriales de asociaciones industriales
- Normativa y lineamientos oficiales aplicables al contexto colombiano.

El uso de fuentes secundarias es adecuado en estudios de alcance estratégico y exploratorio, especialmente cuando se busca analizar información existente y generar propuestas fundamentadas en evidencia disponible (Saunders et al., 2019).

4.3 Herramientas de Análisis

Para el desarrollo de la investigación se emplean diversas herramientas de análisis estratégico, tecnológico y financiero, seleccionadas en función de la pertinencia para estudios de modelo de negocio e innovación tecnológica. Entre las principales herramientas utilizadas se incluyen:

- Análisis de madurez tecnológica (TRL) para evaluar el estado de desarrollo de las tecnologías.
- Matriz de priorización multicriterio, aplicada a la selección de sectores con mayor potencial de reúso.
- Análisis PESTEL, para evaluar el entorno estratégico y regulatorio.
- Business Model Canvas, como herramienta de estructuración del modelo de negocio.
- Análisis financiero preliminar, mediante indicadores como VAN, TIR y período de recuperación.

Estas herramientas son ampliamente utilizadas en estudios de estrategia empresarial, innovación y evaluación de proyectos, y permiten integrar información técnica y económica en un marco coherente para la toma de decisiones (Osterwalder & Pigneur, 2010; Damodaran, 2012).

4.4 Limitaciones Metodológicas

El presente trabajo, esta acotado por unas restricciones metodológicas que fueron consideradas en la interpretación de los resultados. En primer lugar, el análisis se basa en información secundaria y datos públicos, lo que puede limitar el nivel de detalle técnico o financiero de algunas estimaciones. En segundo lugar, el caso de negocio esquematizado se construye a partir de supuestos razonables y escenarios de

referencia, por lo que los resultados no deben interpretarse como una evaluación de inversión definitiva, sino como un ejercicio de validación conceptual y estratégica.

Adicionalmente, el entorno regulatorio y de mercado es dinámico en el tiempo, lo que implica que las conclusiones del estudio deben entenderse dentro del contexto temporal en el que se realiza la investigación. No obstante, estas limitaciones no afectan la validez del enfoque metodológico, sino que refuerzan el carácter exploratorio y propositivo del presente trabajo.

5. Análisis y Desarrollo de la Propuesta

5.1 Identificación del Potencial del Agua de Producción

El dimensionamiento del mercado potencial asociado al reúso de aguas de producción requiere una aproximación cuantitativa que permita comprender la magnitud del recurso disponible y el posible aprovechamiento económico. Para este propósito, se adopta el enfoque TAM–SAM–SOM, es decir, mercado total direccionable (Total Addressable Market - TAM), mercado disponible servible (Serviceable Available Market – SAM) y mercado obtenible servible (Serviceable Obtainable Market - SOM), ampliamente utilizado en análisis de mercado y modelos de negocio para estimar oportunidades de escalamiento y captura de valor por medio de la estimación del tamaño máximo del mercado potencial, la porción accesible dadas las capacidades actuales de la solución y la participación que podría capturarse razonablemente bajo las condiciones de mercado existentes.

5.1.1 Volúmenes de agua de producción disponibles

5.1.1.1 TAM – Mercado Total Direccionable (potencial mundial)

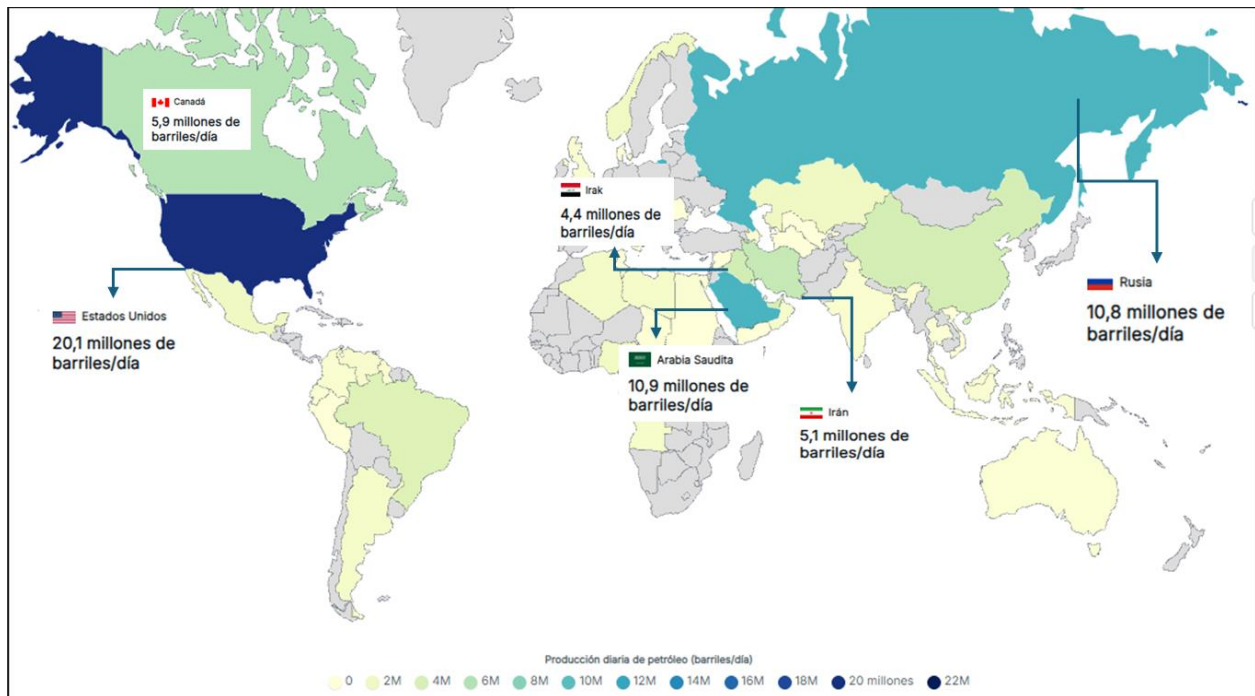
A nivel global, la producción de hidrocarburos se encuentra fuertemente concentrada en un número reducido de países, entre ellos, Estados Unidos, Arabia Saudita, Rusia, Canadá y Iraq como los principales productores, que en conjunto representan una proporción significativa del suministro mundial de petróleo (EIA, 2025). Ver Figura 12. Países productores de petróleo – 2026.

Diversos estudios han demostrado que la producción de agua es una función directa del volumen de hidrocarburos extraídos y de la madurez de los campos, lo que implica que los principales países productores concentran también los mayores

volúmenes de agua producida (Eyitayo et al., 2023; Nyieku et al., 2024). En consecuencia, estos mercados representan focos estratégicos para la implementación de tecnologías de tratamiento y reúso de agua en la industria petróleo y gas (Oil & Gas).

Figura 12.

Países productores de petróleo - 2026



Nota: Tomado de <https://worldpopulationreview.com/country-rankings/oil-producing-countries>

La relación agua-hidrocarburo (water cut) varía significativamente entre campos y regiones, pero a escala global se estima un promedio de 3 barriles de agua por cada barril de petróleo, con valores que pueden exceder 10:1 en campos maduros. En EE. UU., por ejemplo, la relación histórica supera los 7 barriles de agua por barril de crudo, llegando al 98% de agua en pozos al final de su vida productiva (Veil et al., 2004). Esta tendencia estructural implica que, aun en escenarios de estabilización o reducción de la producción de hidrocarburos, los volúmenes de agua de producción tienden a mantenerse elevados o incluso a incrementarse (Clark & Veil, 2021).

Con base en lo anterior, la perspectiva de TAM, bajo escenarios de alta madurez de los campos (WOR $\approx$ 7:1, equivalente a 87,5% corte de agua), la generación de agua producida en los principales países productores como se muestra en la Tabla 7. Estimación volumen de agua – TAM. Estos volúmenes representan un potencial teórico de agua susceptible de ser gestionada, tratada o valorizada mediante tecnologías de tratamiento y reúso. No obstante, este mercado total no es completamente accesible, debido a restricciones técnicas, regulatorias, económicas y geográficas.

Tabla 7.

Estimación volumen de agua - TAM

País	Petróleo (MMbbl/d)*	Agua producida (MMbbl/d)	Agua producida (Mm ³ /d)
Estados Unidos	20.1	140.7	22.4
Arabia Saudita	10.9	76.3	12.1
Rusia	10.8	75.6	12.0
Canadá	5.9	41.3	6.6
Irán	5.1	35.7	5.7
Irak	4.4	30.8	4.9

Nota: Elaboración del autor con base en <https://worldpopulationreview.com/country-rankings/oil-producing-countries>

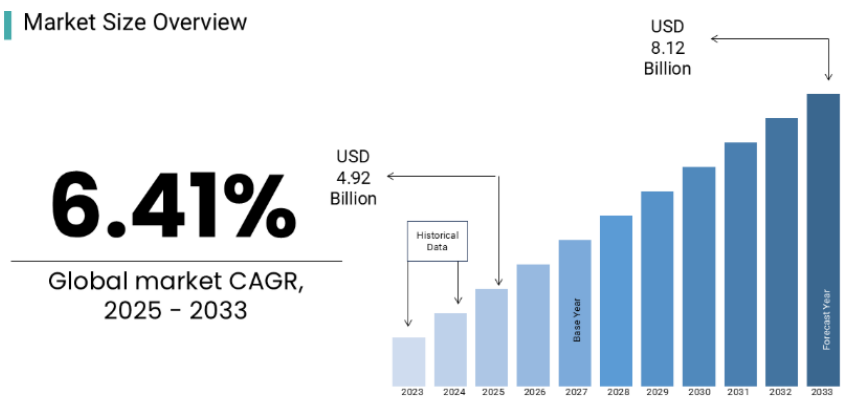
*millones de barriles por día

Estos seis países, con la mayor producción de crudo, están aportando aproximadamente 400 MMbbl /día de agua o su equivalente en m³ de 63.7 MMm³ /día, consolidando la gestión del agua como un componente crítico en la operación upstream.

Por otro lado, con relación al mercado global de tratamiento de agua residuales, está valorado en USD 4.92 billones en 2025 y se proyecta crecer a una tasa del 6.1% anual hasta alcanzar USD 8.12 billones en 2033 (Market Data Forecast, 2025).

Figura 13.

Mercado mundial de tratamiento de aguas residuales de producción



Nota: Tomado de <https://www.marketdataforecast.com/market-reports/produced-water-treatment-market>

5.1.1.2 SAM – Mercado Disponible Servible (potencial en América Latina)

En América Latina, la producción de petróleo se encuentra concentrada en un conjunto reducido de países, destacándose Brasil, México, Venezuela, Colombia, Argentina y Ecuador como los principales actores de la región. Estos países representan la mayor parte del suministro regional de crudo, con niveles de producción que oscilan entre más de 3 millones de barriles por día en Brasil y aproximadamente 480 mil barriles por día en Ecuador (TheGlobalEconomy, 2024). Ver Tabla 8. Estimación volumen de agua – SAM. En conjunto, América Latina aporta cerca del 8–10% de la producción mundial de petróleo, consolidándose como una región estratégica dentro del mercado energético global (Statista, 2025).

Tabla 8.

Estimación volumen de agua - SAM

País	Petróleo (MMbbl/d)*	Agua producida (MMbbl/d)	Agua producida (Mm³/d)
Brasil	3.35	23.45	3.73
México	1.84	12.88	2.05
Venezuela	0.86	6.02	0.96

País	Petróleo (MMbbl/d)*	Agua producida (MMbbl/d)	Agua producida (Mm³/d)
Colombia	0.77	5.39	0.86
Argentina	0.70	4.90	0.78
Ecuador	0.47	3.29	0.52

Nota: Elaboración del autor con base www.statista.com/statistics/961585/latin-america-crude-oil-production-country/
*millones de barriles por día

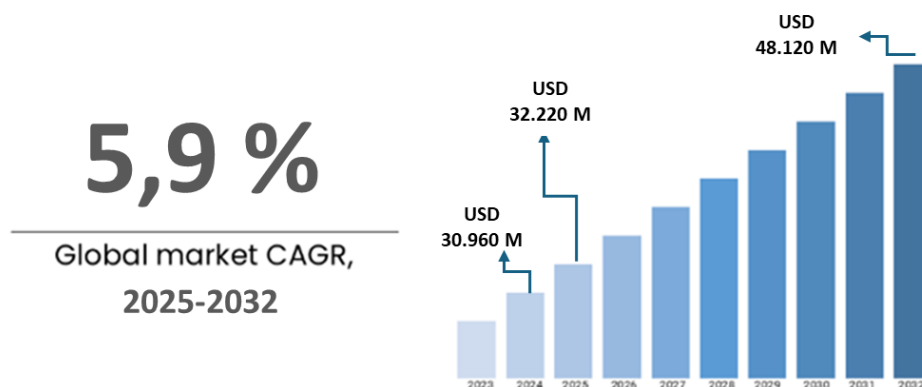
Bajo un escenario de alta madurez de los campos (relación agua–petróleo de 7:1), los volúmenes de agua producida pueden superar ampliamente los 50 MMbbl/d para una producción cercana a 8 MMbbl/d de petróleo, alcanzando valores del orden de 9 millones de m³/día, lo que refleja la magnitud del desafío asociado a su manejo y el potencial de mercado para soluciones de tratamiento.

Desde la óptica del SAM, no todo este volumen es susceptible de ser atendido por modelos de negocio basados en reúso. Factores como la ubicación remota de los campos, la infraestructura existente de reinyección, y las limitaciones regulatorias reducen el mercado efectivamente accesible. Sin embargo, el aumento del estrés hídrico en varias regiones de América Latina y la presión por reducir costos y huella ambiental amplían el espacio para soluciones de tratamiento y reutilización, especialmente para usos industriales y energéticos.

Por otro lado, con relación al mercado Latam de tratamiento de agua residuales, está valorado en USD 30.960 millones en 2024. Se estima crecer a una tasa del 5.9% anual hasta alcanzar USD 48.120 millones en 2032, frente a los USD 32.220 millones estimados en 2025. (Meticulous Research, 2024).

Figura 14.

Mercado Latam de tratamiento de aguas residuales de producción



Nota: Elaboración propia con base en marketdataforecast

5.1.1.3 SOM – Mercado Objetivo Alcanzable (potencial en Colombia)

En Colombia, la producción de hidrocarburos se caracteriza por una alta participación de campos maduros terrestres, lo que se traduce en relaciones agua-aceite elevadas. Información oficial de la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH) y de la Asociación Colombiana del Petróleo (ACP) indica que, en promedio, la industria produce entre 10 y 13 barriles de agua por cada barril de crudo, ubicando al país entre aquellos con mayores *water cuts* a nivel regional. Ver Tabla 9. Estimación volumen de agua (Colombia) SOM.

Tabla 9.

Estimación volumen de agua (Colombia) - SOM

Campo	Petróleo (Mbbl/d)*	Petróleo (MMbbl/d)	Agua producida (MMbbl/d)	Agua producida (Mm³/d)
Rubiales	5.53	0.00553	0.0553	0.009
Castilla	3.27	0.00327	0.0327	0.005
Caño sur este	3.09	0.00309	0.0309	0.005
Castilla norte	2.26	0.00226	0.0226	0.004
Chichimene	2.21	0.00221	0.0221	0.004

Campo	Petróleo (Mbbl/d)*	Petróleo (MMbbl/d)	Agua producida (MMbbl/d)	Agua producida (Mm³/d)
Akacias	1.74	0.00174	0.0174	0.003
Quifa	1.38	0.00138	0.0138	0.002
Chichimene sw	1.19	0.00119	0.0119	0.002
La Cira	1.11	0.00111	0.0111	0.002

Nota: Elaboración propia con base en <https://www.anh.gov.co/es/operaciones-y-regal%C3%ADas/datos-y-estadisticas/>

*millones de barriles por día

Bajo un escenario de campos maduros con relaciones agua–petróleo del orden de 10:1, lo que en corte de agua equivale aproximadamente >90%, los principales activos analizados generarían aproximadamente 0.22 millones de barriles diarios de agua producida (MMbbl/d), equivalentes a cerca de 0.035 millones de metros cúbicos por día (Mm³/d). Estas cifras evidencian que, a escala de campo, el sistema productivo está dominado por el manejo de agua más que por la producción de hidrocarburos. De igual manera, estos volúmenes se concentran principalmente en cuencas como los Llanos Orientales y el Magdalena Medio, regiones que presentan, además, crecientes presiones sobre el recurso hídrico y conflictos por el uso del agua.

Desde la perspectiva del SOM, el mercado efectivamente alcanzable está determinado por la proximidad a potenciales usuarios, la viabilidad regulatoria del reúso y los costos actuales de disposición. Diversos estudios sectoriales señalan que entre un 10% y un 30% de los volúmenes de agua de producción podrían ser técnicamente viables para esquemas de tratamiento y reúso en el corto y mediano plazo, lo que representa un mercado significativo para modelos de negocio basados en suministro de agua tratada o servicios asociados (Groundwater Protection Council, 2019; Clark & Veil, 2021). Se estima que entre el 80-90% del agua producida es usada para disposición e inyección. Entre el 50-60% puede utilizarse internamente (reuso oil&gas) y entre <20%-30%, es viable para reuso externo, el cual está limitado por tema de calidad, transporte y/o regulación.

Con relación a las estimaciones de mercado para tratamiento de aguas residuales, si bien no existen estimaciones con desagregación específica para Colombia en fuentes de acceso abierto, el mercado de tratamiento de agua en América Latina proyecta un CAGR del 5.9% entre 2024 y 2032 (Ver Ilustración 14), Colombia, ocupa una posición relevante como uno de los cinco mayores mercados de la región (Meticulous Research, 2025).

5.1.2 Costos asociados manejo de aguas de producción

El manejo de aguas de producción en la industria de hidrocarburos corresponde a un sistema complejo de costos distribuidos a lo largo de toda la cadena de valor, incluyendo etapas de tratamiento, transporte, disposición o reinyección, así como las actividades asociadas a la operación y mantenimiento del campo. En este contexto, múltiples estudios destacan la necesidad de abordar el análisis económico desde un enfoque de ciclo de vida, integrando tanto costos de capital (CAPEX) como costos operativos (OPEX) para cada componente del sistema (Maire et al., 2024).

Desde una perspectiva estructural, los principales impulsores de costos están asociados al consumo de energía, el uso de químicos, el mantenimiento de instalaciones, los costos de personal y los requerimientos de integridad de equipos e infraestructura. Estos costos tienden a incrementarse de manera significativa en campos maduros, particularmente como resultado del aumento en el volumen de agua producida y las necesidades de tratamiento asociadas (Maire et al., 2024).

5.1.2.1 Costos de tratamiento

El tratamiento de aguas de producción presenta alta variabilidad en función de la calidad requerida, la salinidad del agua y la complejidad del tren tecnológico implementado. De acuerdo con estudios del Departamento de Energía de los Estados Unidos (DOE), los costos pueden variar desde valores inferiores a 2 USD/bbl en sistemas

básicos de reciclaje, hasta rangos entre 2.93 y 16.03 USD/bbl en configuraciones avanzadas que incluyen procesos de desalación o tecnologías termoquímicas (Folio et al., 2018).

Dentro de estos rangos, tecnologías específicas presentan comportamientos diferenciados. Procesos de ablandamiento químico y remoción de metales, por ejemplo, se sitúan típicamente entre 1.41 y 3.7 USD/bbl, mientras que tecnologías de membrana como la electrodiálisis pueden alcanzar valores cercanos a 1 USD/bbl, dependiendo de las condiciones operativas y la composición del agua (Folio et al., 2018).

Adicionalmente, soluciones de bajo costo como humedales construidos o sistemas modulares han demostrado costos inferiores a 2 USD/bbl, lo que evidencia el potencial de optimización económica en condiciones de baja salinidad o requerimientos de tratamiento menos exigentes (Folio et al., 2018).

De otro lado, el consumo energético constituye un componente relevante del costo operativo, especialmente en procesos de separación avanzada y desalación. Esta relación explica en gran medida la variabilidad observada en los costos de tratamiento.

Aunque los documentos revisados no presentan un costo directo en USD/bbl, se evidencia que tecnologías intensivas como desalación requieren entre 2.58 y 8.5 kWh/m³, lo cual explica el incremento de costos en sistemas avanzados. (Dawoud et al., 2024).

5.1.2.2 Costos de reinyección y disposición

La reinyección de aguas de producción constituye la estrategia predominante dentro de la industria, debido a la viabilidad económica y los beneficios operacionales en términos de mantenimiento de presión y recuperación mejorada de hidrocarburos. En este sentido, los costos totales asociados al sistema de reinyección, incluyendo

tratamiento, transporte e inyección, se ubican típicamente en un rango de 0.70 a 4.00 USD/bbl (Dawoud et al., 2024).

Estos valores son consistentes con evaluaciones económicas que indican que la reinyección puede representar una alternativa más eficiente en el largo plazo en comparación con la disposición directa, particularmente en campos maduros con altos cortes de agua, donde la optimización del ciclo de manejo del agua permite reducir los costos operativos totales (Maire et al., 2024).

5.1.2.3 Costos de reúso

El reúso de aguas de producción ha emergido como una alternativa económicamente viable en contextos donde existe demanda interna o restricciones en el suministro de agua dulce. En estos escenarios, los costos de tratamiento para reúso se sitúan en un rango entre 0.25 y 2.00 USD/bbl, dependiendo del nivel de tratamiento requerido para la aplicación específica (Dawoud et al., 2024).

Asimismo, el valor económico del agua tratada puede oscilar entre 0.04 y 0.07 USD/bbl, lo cual evidencia que, aunque el reúso puede no generar ingresos directos significativos, sí permite reducir costos asociados a la adquisición de agua fresca y mejorar la eficiencia operativa del sistema (Dawoud et al., 2024).

5.1.2.4 Costos de descarga

Los costos de descarga hacen referencia al costo total asociado al vertimiento controlado de aguas tratadas a cuerpos receptores, incluyendo las etapas de tratamiento previo, cumplimiento normativo, monitoreo ambiental y operación del sistema de disposición. En este contexto, el término descarga es equivalente al concepto de vertimiento en el marco regulatorio colombiano.

En situaciones donde la regulación ambiental permite la descarga de aguas tratadas a cuerpos receptores, los costos asociados a esta alternativa son relativamente bajos, ubicándose entre 0.03 y 0.05 USD/bbl (Dawoud et al., 2024). No obstante, esta opción se encuentra limitada por estrictos requerimientos regulatorios y estándares de calidad ambiental, lo cual reduce la aplicabilidad en comparación con otras alternativas de manejo como la reinyección o el reúso (Dawoud et al., 2024).

5.1.2.5 Impulsores estructurales del costo

Más allá de los rangos de costos unitarios, el comportamiento económico del sistema de manejo de aguas de producción está determinado por una serie de factores:

En primer lugar, el consumo energético representa el principal componente del OPEX, especialmente en operaciones de bombeo, transporte y tratamiento (Maire et al., 2024).

En segundo lugar, el incremento del corte de agua (water cut) genera un aumento progresivo y, en muchos casos, exponencial de los costos, debido a mayores requerimientos de infraestructura, tratamiento, transporte e inyección. Este fenómeno es particularmente relevante en campos maduros, donde el volumen de agua producida puede superar significativamente la producción de hidrocarburos (Maire et al., 2024).

Finalmente, la selección de estrategias integradas de manejo, incluyendo la reinyección y el reúso, permite optimizar los costos totales del ciclo de vida del agua, reduciendo tanto los gastos operativos como los impactos ambientales asociados (Maire et al., 2024).

A partir de la integración de información técnica y económica proveniente de literatura especializada y estudios industriales, en la Tabla 10. Rangos de estimación por

tipo de uso, se consolida los intervalos representativos para el manejo de aguas de producción, de acuerdo con la literatura revisada.

Tabla 10.

Rangos de estimación por tipo de uso

Concepto	Rango de costos (USD/barril)
Tratamiento	0.25 – 16
Reinyección (tratamiento + transporte)	0.70 – 4.00
Reúso	0.25 – 2.00
Descarga (cumplimiento regulatorio)	0.03 – 0.05

Nota: Fuente: Elaboración propia con base en Folio et al. (2018); Dawoud et al. (2024); Maire et al. (2024).

Estos resultados evidencian que el costo del manejo de aguas de producción no depende exclusivamente de la tecnología de tratamiento empleada, sino que está fuertemente influenciado por el nivel de calidad requerido, las condiciones operativas del campo, el corte de agua y la estrategia de gestión implementada a lo largo del ciclo de vida del activo (Folio et al., 2018; Dawoud et al., 2024; Maire et al., 2024).

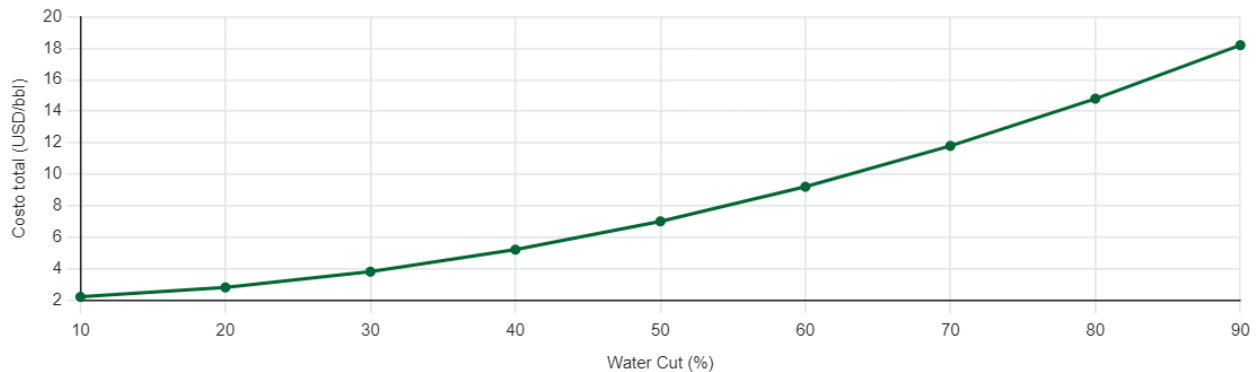
Como se mencionó anteriormente, el corte de agua (wáter cut), el cual representa la proporción de agua en la producción total de fluido, impacta los costos asociados al manejo de las aguas de producción. Como se muestra en la Figura 15. Curva Costo vs Corte de agua para el manejo de aguas de producción, el costo total presenta un crecimiento no lineal en función del water cut, evidenciando una tendencia acelerada a partir de valores superiores al 60%.

Este comportamiento se explica, por el incremento simultáneo en los requerimientos de tratamiento, transporte e inyección, así como por el mayor consumo energético asociado a mayores caudales de agua. En escenarios de alto corte de agua, el sistema productivo pasa de estar dominado por la extracción de hidrocarburos a ser

esencialmente un sistema de manejo de agua, lo cual impacta de manera significativa la estructura de costos del activo.

Figura 15.

Curva Costo vs Corte de agua para el manejo de aguas de producción



Nota: Elaboración propia con base en Maire et al. (2024); Dawoud et al. (2024).

Este resultado es consistente con estudios de gestión de agua en campos maduros, donde el aumento del corte de agua se identifica como uno de los principales impulsores del costo operativo total (Maire et al., 2024), aumentando los volúmenes a manejar, que impacta en costos operativos asociados a energía, tratamiento e infraestructura.

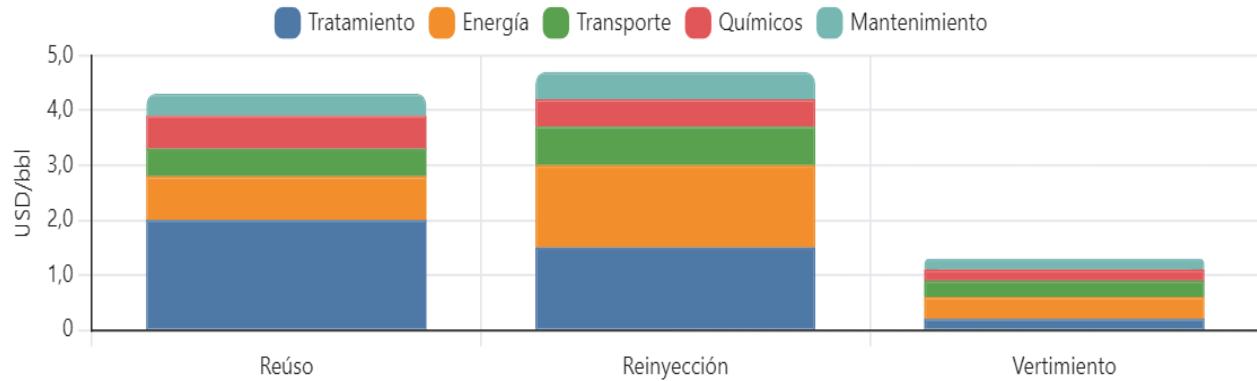
Por otro lado, la Figura 16. Estructura de costos del manejo de agua producida por alternativa de gestión, muestra que la estructura de costos del manejo de aguas de producción está altamente influenciada tanto por la alternativa de gestión seleccionada como por la composición interna de sus componentes. En todos los casos, el tratamiento representa una fracción significativa del costo total, particularmente en esquemas de reúso donde se requieren mayores niveles de calidad del agua.

Por su parte, la reinyección presenta una mayor participación del costo energético, asociado al bombeo e inyección a presión en el reservorio, lo que confirma la relevancia de la energía como principal impulsador del OPEX en sistemas integrados. En contraste,

el vertimiento regulado muestra los costos más bajos, aunque distribuidos en componentes asociados al cumplimiento ambiental, transporte y operación básica.

Figura 16.

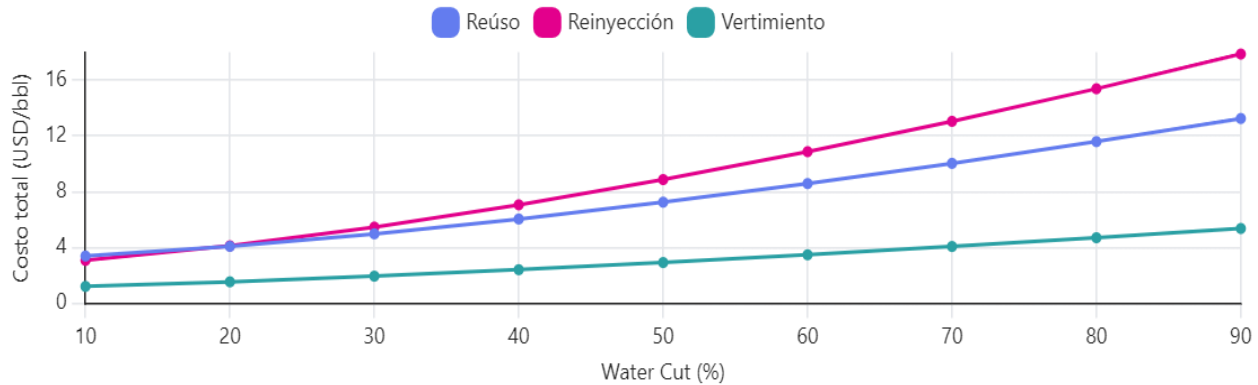
Estructura de costos del manejo de agua producida por alternativa de gestión



Nota: Elaboración propia con base en Folio et al. (2018); Dawoud et al. (2024); Maire et al. (2024).

De manera transversal, se observa que los costos no dependen de un único componente, sino de la interacción entre tratamiento, energía e infraestructura, lo que refuerza la necesidad de analizar el sistema desde un enfoque de ciclo de vida. Estos resultados son consistentes con lo reportado en la literatura, donde el incremento de complejidad tecnológica y requerimientos operativos traduce mayores costos unitarios (Folio et al., 2018; Dawoud et al., 2024; Maire et al., 2024).

La Figura 17. Costo total vs Corte de agua por alternativa de gestión, permite inferir que el costo total del manejo de aguas de producción presenta un comportamiento creciente y no lineal en función del corte de agua, independientemente de la estrategia de gestión implementada.

Figura 17.*Costo total vs Corte de agua por alternativa de gestión*

Nota: Elaboración propia con base en Folio et al. (2018); Dawoud et al. (2024); Maire et al. (2024).

A bajos valores de water cut (inferiores al 30%), las diferencias entre alternativas son menos significativas; sin embargo, a medida que el contenido de agua aumenta, se observa una divergencia progresiva entre escenarios, siendo la reinyección la opción con mayor crecimiento de costos, debido principalmente a los requerimientos energéticos asociados a la inyección a presión en el reservorio y al escalamiento de infraestructura.

El reúso, por su parte, presenta un comportamiento intermedio, reflejando el balance entre mayores costos de tratamiento y menores requerimientos de transporte e inyección. De otro lado, el vertimiento regulado mantiene los menores costos relativos, aunque su crecimiento sostenido responde al aumento en los volúmenes a tratar y al cumplimiento de estándares ambientales.

En conjunto, estos resultados demuestran que el corte de agua actúa como el principal impulsador estructural del costo total, transformando progresivamente el sistema productivo hacia un sistema intensivo en manejo de agua, lo cual tiene implicaciones directas en la viabilidad económica y en la selección de estrategias óptimas de gestión en campos maduros.

5.1.3 Sectores de mayor demanda de recursos hídricos

La identificación de sectores con alta demanda de agua constituye un paso crítico para evaluar la viabilidad de modelos de negocio basados en el tratamiento y reúso del agua de producción. Desde una perspectiva estratégica, no todos los sectores presentan el mismo nivel de compatibilidad técnica, económica y regulatoria con el uso de aguas no convencionales.

A nivel global, los sectores agrícola, industrial y energético concentran más del 85 % de las extracciones mundiales de agua dulce (FAO, 2021; UNESCO 2023). Estos sectores, son los principales candidatos para la implementación de estrategias de reúso y sustitución de fuentes convencionales. Ver Tabla 11. Distribución global de la demanda de agua por sector.

Tabla 11.

Distribución global de la demanda de agua por sector

Sector	Participación en demanda global de agua (%)	Uso principal
Agricultura	69–72 %	Riego
Industria	19–22 %	Procesos, enfriamiento
Energía (incl. generación)	8–10 %	Enfriamiento, vapor
Consumo doméstico	<10 %	Uso humano

Nota: Elaborado con base en FAO (2021); UNESCO (2023); UN-Water (2023).

Para el caso colombiano, la estructura de la demanda hídrica refleja un comportamiento similar al observado a nivel global, aunque con particularidades asociadas a la distribución espacial del recurso. Colombia presenta una alta disponibilidad hídrica promedio; sin embargo, esta es heterogénea entre cuencas, existiendo zonas con creciente presión sobre el recurso, especialmente en regiones con alta actividad productiva.

De acuerdo con el Estudio Nacional del Agua, los sectores agrícola, energético e industrial concentran la mayor parte de las captaciones en el país. En términos cuantitativos, el sector agrícola representa aproximadamente el 40–45 % de la demanda, seguido del sector energético con el 20–25 % y del sector industrial con valores cercanos al 15–20 % (IDEAM, 2022). Estos sectores constituyen los principales candidatos para estrategias de reúso, particularmente en aplicaciones donde no se requiere calidad potable.

5.1.3.1 Sector agrícola

El sector agrícola es el mayor consumidor de agua a nivel mundial y enfrenta crecientes restricciones asociadas a la escasez hídrica y a la competencia con otros usos. Organismos como la FAO y la UNESCO reconocen el reúso de aguas tratadas como una estrategia clave para la sostenibilidad del riego, particularmente en regiones áridas y semiáridas (FAO, 2021; UNESCO, 2023).

En Colombia, este sector también representa el mayor demandante de agua, con participaciones próximas al 40–45 % de las captaciones totales (IDEAM, 2022). No obstante, factores como la alta dispersión geográfica, la fuerte dependencia climática y los riesgos regulatorios y sociales asociados al uso de fuentes no convencionales limitan el potencial de reúso en aplicaciones agrícolas sensibles. En este contexto, las oportunidades se concentran en usos agrícolas no alimentarios, cultivos industriales, reforestación y agroindustria.

5.1.3.2 Sector industrial

El sector industrial representa uno de los segmentos más atractivos para el reúso de agua de producción. Múltiples industrias pueden operar con agua de calidad no potable para procesos como enfriamiento, lavado, generación de vapor y control de polvo (OECD, 2016; World Bank, 2020).

En Colombia, este sector representa aproximadamente 15–20 % de la demanda hídrica total, concentrada en actividades como alimentos y bebidas, química, papel, cementos, refinación y manufactura pesada. (IDEAM, 2022). Es uno de los más atractivos para el reúso de agua de producción, debido a: demanda relativamente estable, disposición a pagar por continuidad del suministro, y menor resistencia al uso de agua no potable en procesos internos. En este sentido, el reúso industrial se posiciona como una de las estrategias más costo-efectivas para reducir la presión sobre fuentes hídricas superficiales y subterráneas (World Bank, 2020).

5.1.3.3 Sector energético

La generación de energía es altamente intensiva en agua, especialmente para procesos de enfriamiento. La Agencia Internacional de Energía señala que el sector energético es responsable de aproximadamente el 10 % de las extracciones globales de agua, y que el reúso de aguas residuales es una de las principales estrategias para reducir la huella hídrica (IEA, 2020).

En Colombia, el sector energético, particularmente la generación termoeléctrica e hidroeléctrica, representa aproximadamente entre el 20 % y el 25 % de la demanda hídrica (IDEAM, 2022). Este sector presenta alta compatibilidad con el reúso debido a sus elevados requerimientos de volumen, su tolerancia a calidades no potables y la existencia de esquemas contractuales de largo plazo. Adicionalmente, la coincidencia geográfica entre zonas de producción de hidrocarburos y nodos energéticos mejora la viabilidad logística del reúso de agua de producción.

5.1.3.4 Sector de infraestructura y obras civiles

El sector de infraestructura incluye aplicaciones como el control de polvo en vías, compactación de suelos, construcción y obras civiles. Estos usos presentan baja exigencia de calidad del agua y alta tolerancia a fuentes no convencionales, lo cual

reduce los costos de tratamiento y las barreras regulatorias asociadas. Estudios desarrollados en Estados Unidos documentan el uso exitoso de aguas tratadas para estos fines (U.S. EPA, 2012).

Aunque su participación en la demanda total es menor ($\approx 5\text{--}10\%$), este sector presenta una alta compatibilidad con el reúso, siendo frecuentemente identificado como un caso de entrada temprana para la implementación de esquemas de reutilización de aguas no convencionales.

Finalmente, la revisión evidencia que, aunque el sector agrícola concentra el mayor volumen de uso de agua, los sectores: industrial, energético y de infraestructura presentan las condiciones más favorables para la implementación de esquemas de reúso de agua de producción. Ver Tabla 12. Consolidado demanda hídrica por sector para Colombia. Esto se debe a la combinación de una demanda significativa, menor sensibilidad a la calidad del agua y menores riesgos regulatorios, lo que los posiciona como los principales segmentos para el desarrollo de modelos de negocio basados en la reutilización de aguas no convencionales.

Tabla 12.

Consolidado demanda hídrica por sector para Colombia

Sector	Datos clave
Agrícola	Participación en demanda hídrica nacional: $\approx 45\%$ Uso principal: riego Sensibilidad a calidad del agua: alta
Energético	Participación en demanda hídrica nacional: $\approx 25\%$ Uso principal: enfriamiento, generación Sensibilidad a calidad del agua: media
Industrial	Participación en demanda hídrica nacional: $\approx 20\%$ Uso principal: procesos, enfriamiento, lavado Sensibilidad a calidad del agua: media
Infraestructura	Participación en demanda hídrica nacional: $\approx 10\%$ Sensibilidad a calidad del agua: baja

Nota: Elaboración propia con base en IDEAM (2022)

5.1.4 Priorización de sectores mediante matriz multicriterio

La priorización de sectores con mayor potencial para el reúso del agua de producción requiere un enfoque metodológico que permita integrar múltiples variables, tales como técnicas, económicas y regulatorias de manera objetiva y reproducible. Para este propósito, se emplea una matriz de decisión multicriterio (MCDM - Multi-Criteria Decision Making), herramienta ampliamente utilizada en estudios de gestión de recursos hídricos, evaluación de alternativas tecnológicas y análisis de modelos de negocio en industrias reguladas (OECD, 2016; World Bank, 2020).

Este método permite comparar sectores heterogéneos bajo un conjunto común de criterios, ponderar la importancia relativa de cada uno y obtener un ranking cuantitativo que soporte la toma de decisiones estratégicas. Para la definición de criterios de evaluación, se seleccionaron cuatro (4) criterios clave para la evaluación de los sectores demandantes de agua:

1. Demanda hídrica del sector: refleja la magnitud del consumo de agua y, por tanto, el tamaño potencial del mercado para soluciones de reúso.
2. Exigencia de calidad del agua: determina el nivel de tratamiento requerido e impacto en los costos.
3. Riesgo regulatorio: evalúa la complejidad normativa y la probabilidad de restricciones para el uso de aguas no convencionales.
4. Compatibilidad con el reúso: criterio integrador que considera aceptación técnica, operativa y social del uso de agua tratada.

Estos criterios han sido identificados por organismos como el Banco Mundial y la UNESCO como determinantes en la viabilidad de proyectos de reúso de agua residual y no convencional. Es de resaltar que, los aspectos sociales, sanitarios y reputacionales se consideraron implícitamente incorporados dentro del criterio "riesgo regulatorio", dado que en el caso del reúso de agua de producción las restricciones regulatorias suelen ser

una respuesta institucional a preocupaciones sanitarias, sociales y de aceptación pública.

Para establecer la escala de calificación y ponderación, para obtener resultados cuantitativos, se adoptó una escala ordinal de tres niveles, que permite una evaluación comparativa simplificada en ausencia de datos cuantitativos homogéneos entre sectores:

3 = Alto / Favorable	2 = Medio	1 = Bajo / Desfavorable
-----------------------------	------------------	--------------------------------

En el caso del criterio exigencia de calidad, un valor alto (3) indica menor exigencia de calidad, es decir, mayor facilidad para el reúso. Los pesos asignados se asignan con base en la experiencia del sector O&G, dada la naturaleza exploratoria del estudio, los cuales se detallan en la Tabla 13. Criterios y pesos de la matriz multicriterio. Los pesos asignados a cada criterio fueron definidos por el autor con base en la experiencia laboral.

Tabla 13.

Criterios y pesos de la matriz multicriterio

Criterio	Peso	Justificación
Demanda hídrica	0,35	Importante, pero no suficiente por sí sola
Exigencia de calidad	0,30	Impacta directamente el costo de tratamiento
Riesgo regulatorio	0,20	Determinante en sectores sensibles
Compatibilidad con reúso	0,15	Integra condiciones técnicas, operativas y sociales
Total	1,00	

Nota: Elaboración propia

Los puntajes se asignan con base a información sectorial de entidades como IDEAM, DANE, UPME, para sectores agrícola, industrial, energético y de infraestructura, como se detalla en la Tabla 14. Matriz de calificación sectorial (caso Colombia). Al momento de implementar el modelo, se recomienda previamente, realizar una validación de expertos.

Tabla 14.*Matriz de calificación sectorial (caso Colombia)*

Sector	Demanda hídrica (0,35)	Exigencia de calidad (0,30)	Riesgo regulatorio (0,20)	Compatibilidad con reúso (0,15)	Total
Agrícola	3	1	1	2	1,85
Industrial	3	2	2	3	2,50
Energético	3	2	2	3	2,50
Infraestructura	2	3	3	3	2,65

Nota: Elaboración propia

En el contexto colombiano, los sectores de infraestructura, energético e industrial arrojan la calificación con el mayor potencial para la implementación de modelos de negocio basados en el reúso del agua de producción. Estos sectores combinan una demanda significativa, menores exigencias de calidad, riesgos regulatorios manejables y alta compatibilidad operativa con el uso de aguas no convencionales.

Por el contrario, aunque el sector agrícola concentra el mayor volumen de uso de agua, la alta exigencia regulatoria y social limita la viabilidad como mercado inicial para el reúso del agua de producción, recomendando el abordaje en fases posteriores o en aplicaciones específicas no alimentarias. La priorización sectorial obtenida mediante la matriz multicriterio orienta el diseño del modelo de negocio hacia: aplicaciones industriales y energéticas de alto volumen, usos de infraestructura como mercados de entrada temprana, esquemas de tratamiento de adecuación al propósito (fit-for-purpose) que maximicen el ahorro por costo evitado de disposición.

Sin embargo, el sector agrícola debería tener mayor potencial, toda vez que los campos petroleros se encuentran en zonas rurales, pero se presenta un cuello de botella y no necesariamente es un tema técnico ni logístico sino regulatorio, sanitario, social e imagen reputacional. Mientras el sector agrícola general involucra productos destinados al consumo humano y, por tanto, presenta mayores exigencias sanitarias, trazabilidad y sensibilidad reputacional, la agricultura agroindustrial concentra aplicaciones orientadas

a procesos industriales o energéticos donde las barreras regulatorias y de percepción son significativamente menores.

Por lo anterior, se hace necesario que el sector agrícola, se subdivide en agricultura general (alimentaria tradicional) y en agricultura agroindustrial, no alimentaria cercana a campos O&G, como se plantea en la Tabla 15. Ajuste Matriz de calificación sectorial (Caso Colombia).

Tabla 15.

Ajuste Matriz de calificación sectorial (Caso Colombia)

Sector	Demanda hídrica (0,35)	Exigencia de calidad (0,30)	Riesgo regulatorio (0,20)	Compatibilidad con reúso (0,15)	Total
Agrícola general	3	1	1	2	1,85
Agrícola industrial	3	2	2	3	2,50
Industrial	2	2	2	3	2,15
Energético	2	2	2	3	2,15
Infraestructura	2	3	3	3	2,65

Nota: Elaboración propia

Si bien el sector agrícola presenta, en promedio, mayores restricciones para el reúso de agua de producción debido a exigencias regulatorias y de calidad, en contextos específicos como zonas agroindustriales cercanas a campos de hidrocarburos terrestre (onshore), la viabilidad mejora sustancialmente. La proximidad geográfica reduce costos logísticos y permite enfocar el reúso en aplicaciones agrícolas no alimentarias, con menores exigencias de calidad y riesgo regulatorio moderado. Por esta razón, el sector agrícola se analiza de manera diferenciada en escenarios generales y escenarios agroindustriales específicos.

De acuerdo con la revisión realizada, de identificar sectores con alta demanda hídrica para establecer el potencial de mercado para el reúso de aguas de producción,

la viabilidad real de estas oportunidades depende del comportamiento económico bajo diferentes condiciones operativas. Factores como el nivel de tratamiento requerido, localización de la demanda, la necesidad de transporte y los volúmenes manejados influyen directamente en la estructura de costos del sistema.

En este contexto, no todos los sectores con alta demanda de agua constituyen oportunidades viables desde el punto de vista económico. Aunque el sector agrícola representa el mayor volumen de demanda, sus restricciones en términos de calidad, dispersión geográfica y sensibilidad regulatoria pueden aumentar significativamente los costos asociados al tratamiento y distribución del agua. En contraste, sectores como el industrial, energético y de infraestructura presentan condiciones más favorables desde la perspectiva de costos, al requerir menores niveles de tratamiento o concentrar la demanda en puntos geográficos definidos.

Por lo tanto, el análisis de la demanda debe complementarse con una evaluación detallada de la estructura de costos y su evolución en función de variables operativas como el corte de agua (water cut). Este enfoque integrado permite identificar no solo dónde existe demanda, sino dónde dicha demanda puede ser atendida de manera económicamente sostenible.

5.2 Evaluación y Priorización de Tecnologías

Para la identificación y priorización de tecnologías con potencial de escalamiento en el contexto del manejo de aguas de producción, se propone enfoque metodológico que no solo tenga en cuenta una evaluación tradicional basada exclusivamente en desempeño técnico. Diversos organismos internacionales coinciden en que el escalamiento exitoso de una tecnología no depende únicamente de su eficiencia, sino de su capacidad para reducir incertidumbre operativa, financiera y de implementación en condiciones reales (World Bank, 2019; OECD, 2016).

En este contexto, la evaluación tecnológica que se aborda a continuación se fundamenta en un enfoque multicriterio orientado a analizar la interacción entre madurez técnica, escalabilidad operativa y viabilidad comercial. Este enfoque reconoce que variables como la complejidad operativa, la robustez frente a condiciones variables y la compatibilidad con modelos de negocio basados en servicios son determinantes para la implementación efectiva de las tecnologías.

Por lo general, el nivel de madurez tecnológica (Technology Readiness Level – TRL) constituye un indicador relevante, pero no captura de manera integral la capacidad de una tecnología para integrarse en sistemas operativos complejos. Por ello, se complementa con un conjunto de variables operativas y de negocio que permiten evaluar su viabilidad en escenarios reales, particularmente en campos maduros con alta variabilidad en las condiciones del agua producida.

5.2.1 Marco de evaluación de escalabilidad

El análisis propuesto corresponde a un marco de evaluación multicriterio, basado en prácticas utilizadas por organismos multilaterales y operadores industriales para la toma de decisiones en procesos de escalamiento tecnológico. Este enfoque permite evaluar tecnologías bajo condiciones de incertidumbre y en ausencia de información financiera detallada, mediante el uso de variables asociados al desempeño operativo y económico.

De acuerdo con el Banco Mundial, las decisiones de escalamiento tecnológico consideran variables como el riesgo técnico, la estructura de costos, la simplicidad operativa y la replicabilidad de las soluciones (World Bank, 2019). Estas variables se incorporan en el presente análisis mediante un conjunto de parámetros que permiten evaluar el impacto de cada tecnología sobre la continuidad operativa, la estructura de costos y la viabilidad comercial. Ver Tabla 16. Análisis de variables para validación de escalamiento.

Tabla 16.*Análisis de variables para validación de escalamiento*

Variable	Evalúa	Indicador clave	Resultado	Aplicación en negocio
Complejidad operativa	¿Cuánto conocimiento especializado requiere operar la tecnología? ¿Qué tan sensible es a errores humanos?	• ¿Puede operarse por personal técnico local? • ¿Requiere automatización compleja? • ¿Tiene historial de fallas operativas?	Alta complejidad = baja escalabilidad comercial	Riesgo de interrupción del servicio
Intensidad de CAPEX / OPEX	Barrera financiera para implementar y replicar.	• USD/m³ tratado vs. costo evitado de disposición • Dependencia energética • Consumo de reactivos importados	CAPEX/OPEX altos = Limita modelos WaaS	Barrera de adopción y escalamiento
Robustez frente a variabilidad	Capacidad de la tecnología para operar con cambios de caudal y calidad del agua.	• Tolerancia a picos de sólidos totales disueltos TDS, aceites, sólidos • Necesidad de recalibración frecuente	Campos maduros, la robustez es más importante que la eficiencia	Continuidad del servicio
Escalabilidad modular	¿Se puede replicar la solución por módulos estándar?	• ¿Existe en formato skid (sist compacto, modular y prefabricado)? • ¿Se puede instalar incrementalmente?	Sin modularidad no hay escalamiento	Capacidad de crecer sin rehacer el modelo
Riesgo tecnológico residual	Probabilidad de fallos que afecten continuidad del servicio.	• Historial de paradas no programadas • Sensibilidad al fouling (acumulación de material no deseado: sólidos, orgánicos, sales, microorganismos), incrustaciones, corrosión	Riesgo alto = no apto para contratos de desempeño	Probabilidad penalización contractual
Compatibilidad con modelos basados en servicios	¿Puede el proveedor asumir el riesgo técnico?	• Predictibilidad del desempeño • Costos operativos estables • Facilidad de medir output (m³ tratados)	Si no es compatible con WaaS, no es escalable comercialmente	Posibilidad de transferir riesgo al proveedor

Nota: Elaboración propia con base en World Bank (2019) y OECD (2016).

Las variables definidas permiten vincular directamente la evaluación tecnológica con la estructura de costos previamente analizada. En particular, factores como la intensidad energética, el consumo de químicos y la robustez operativa inciden de manera directa en los costos de tratamiento y operación, los cuales pueden incrementarse significativamente en condiciones de alto corte de agua.

En este contexto, tecnologías con alto desempeño técnico no necesariamente presentan el mejor comportamiento económico, especialmente cuando requieren condiciones de operación controladas o presentan alta sensibilidad a la variabilidad del agua. Por el contrario, tecnologías con menor eficiencia nominal pero mayor robustez pueden generar mejores resultados en términos de continuidad del servicio reducción de fallas y estabilidad de costos operativos.

5.2.2 Clasificación de tecnologías según escalabilidad

Con base en el marco de evaluación propuesto, las tecnologías de tratamiento de aguas de producción pueden clasificarse en función de su potencial de escalamiento, como se muestran en la Tabla 17. Tipos de tecnologías para tratamiento de agua.

Tabla 17.

Tipos de tecnologías para tratamiento de agua

Tipo de tecnología	Ejemplos	Nivel de escalabilidad	Justificación
Convencionales	Separación API, flotación, filtros multimedia	Alta	Baja complejidad, alta robustez
Intermedias	Coagulación avanzada, oxidación	Media	Balance entre costo y desempeño
Avanzadas	Membranas, ósmosis inversa, desalación térmica	Baja–media	Alta eficiencia, pero alto costo y complejidad

Nota: Elaboración propia a partir de revisión de literatura sobre tecnologías de tratamiento de agua de producción (Fakhru'l-Razi et al., 2009; Veil et al., 2004)

Con el fin de facilitar el análisis, se propone una matriz de priorización tecnológica basada en criterios de escalabilidad, permitiendo comparar diferentes alternativas bajo un esquema cuantitativo simplificado. Las variables utilizadas son las referenciados en el Cuadro 16. Análisis de variables para validación de escalamiento y se utiliza la siguiente escala y en la Tabla 18. Calificación de variables para priorización tecnológica, se describe la evaluación realizada.

3 = Alto / Favorable	2 = Medio	1 = Bajo / Desfavorable
-----------------------------	------------------	--------------------------------

Tabla 18.

Calificación de variables para priorización tecnológica

Tecnología	Complejidad	CAPEX/OPEX	Robustez	Modularidad	Riesgo	WaaS	Total
Separación convencional	3	3	3	3	3	3	18
Flotación / DAF	3	2	3	3	2	3	16
Coagulación avanzada	2	2	2	2	2	2	12
Membranas (UF/NF)	2	1	2	2	1	2	10
Ósmosis inversa	1	1	1	2	1	1	7
Desalación térmica	1	1	2	1	1	1	7

La matriz de priorización se pondera y califica con base en el conocimiento y experiencia laboral del autor, y cuyo resultado evidencia que las tecnologías convencionales y de separación primaria presentan el mayor potencial de escalamiento, debido a su bajo nivel de complejidad, alta robustez operativa y compatibilidad con modelos de negocio basados en servicios. Estas tecnologías permiten garantizar continuidad operativa en condiciones variables y facilitar la implementación de esquemas modulares, lo cual es fundamental en entornos de producción distribuidos.

Por su parte, tecnologías avanzadas como la ósmosis inversa y la desalación térmica, ofrecen altos niveles de remoción, pero presentan limitaciones en términos de costos, sensibilidad operativa y riesgo tecnológico, lo que restringe la aplicabilidad en

escenarios de escalamiento comercial masivo. Las tecnologías intermedias representan una opción de balance, particularmente en aplicaciones específicas donde se requiere mejorar la calidad del agua sin incurrir en los altos costos asociados a tecnologías avanzadas.

Los resultados obtenidos permiten establecer una relación directa entre la selección tecnológica y el modelo de negocio. Se evidencia que el escalamiento de soluciones en el contexto del reúso de agua de producción se fundamenta en tecnologías capaces de soportar esquemas operativos tipo agua como servicio (*Water-as-a-service*), donde el proveedor asume el riesgo técnico y garantiza la continuidad del servicio.

Es por ello por lo que, la escalabilidad tecnológica no depende únicamente de la eficiencia del proceso, sino de la capacidad para operar de manera estable, predecible y replicable, minimizando riesgos y costos asociados a la variabilidad del sistema. Este enfoque permite alinear la selección tecnológica con la estructura de costos, la dinámica del water cut y la demanda sectorial previamente analizada, consolidando un modelo integral de evaluación para la toma de decisiones estratégicas.

Al momento de realizar, una evaluación en ambiente real se propone, además, un enfoque de evaluación alineado con herramientas metodológicas desarrolladas por el Banco Mundial para la implementación de proyectos complejos bajo condiciones de incertidumbre. En particular, en el documento: *Eco-Industrial Park Practitioner's Handbook Toolbox* (World Bank, 2019) propone el uso de listas de chequeo estructurados y análisis tipo “snapshot” para evaluar variables técnicas, operativas y organizacionales en etapas tempranas de decisión. Estos instrumentos permiten integrar múltiples dimensiones en contextos donde no se dispone de información completa, lo cual resulta consistente con el enfoque adoptado en este trabajo para la priorización de tecnologías mediante variables proxy de desempeño operativo y económico. Ver Apéndice A. Matriz de decisión para escalamiento de tecnologías (Banco Mundial).

5.3 Aspectos Normativos, Estratégicos y PESTEL

Múltiples iniciativas técnicamente exitosas no logran desplegarse a gran escala debido a barreras estratégicas, normativas y operativas que condicionan la adopción en contextos reales. En industrias reguladas e intensivas en activos, como la de hidrocarburos y la gestión del agua, el escalamiento debe entenderse como un problema sistémico, donde la tecnología es solo uno de varios componentes necesarios para la creación de valor sostenible.

Diversos estudios internacionales sobre reúso de aguas coinciden en que la adopción a gran escala está determinada por la interacción entre regulación, costos, aceptación social y capacidades operativas, más que por el desempeño técnico aislado de las tecnologías (World Bank, 2020; UNESCO, 2023). En este sentido, las soluciones que incrementan la complejidad del sistema requieren infraestructuras costosas o demandan capacidades institucionales inexistentes tienden a fracasar, aun cuando su desempeño técnico sea adecuado.

Bajo este enfoque, el escalamiento efectivo no se asocia a la adopción de tecnologías altamente sofisticadas, sino a soluciones de adecuación al propósito (fit-for-purpose), es decir, alineadas con el uso final del agua, los costos evitados y las capacidades operativas locales (OECD, 2016; UNESCO, 2023). Este principio refuerza la necesidad de analizar el entorno normativo, operativo y estratégico como un determinante central de la viabilidad del modelo de negocio.

El presente capítulo analiza los aspectos normativos, estratégicos y operativos que condicionan la implementación y el escalamiento de modelos de negocio enfocados al reúso de agua de producción en Colombia y la escalabilidad de las tecnologías. Aun cuando el marco regulatorio colombiano establece condiciones para la gestión y disposición de este recurso, presenta vacíos significativos frente al reúso intersectorial (utilización del agua tratada proveniente de un sector productivo en actividades de un

sector diferente), lo que convierte la dimensión normativa en un factor estratégico que va más allá del simple cumplimiento. Entender estas brechas junto con las barreras, habilitadores y factores críticos de éxito que las rodean, es el punto de partida para evaluar el potencial real de escalamiento de las tecnologías y modelos de negocio basados en la valorización del agua de producción en el país.

5.3.1 Marco regulatorio colombiano y brechas en el reúso del agua de producción

El reúso del agua de producción en Colombia no se habilita mediante una única figura normativa, sino a través de la articulación de instrumentos ambientales, permisos y autorizaciones existentes. En este contexto, la viabilidad del reúso depende en gran medida de la correcta interpretación y combinación de estas herramientas regulatorias. En la Tabla 19. Vías de habilitación del reúso, se describe los principales mecanismos que pueden habilitar el reúso con una correcta selección y articulación de estas vías, más que de la existencia de una norma exclusiva para este propósito.

Tabla 19.

Vías de habilitación del reúso

Vía de habilitación	¿Qué es?	¿Cuándo aplica?	¿Cómo se usa en un proyecto?
1. PMA / Licencia ambiental	Instrumento de manejo ambiental del proyecto O&G (o su modificación)	Cuando el reúso ocurre dentro del mismo proyecto o como parte de su operación	Se incorpora el reúso como una medida de optimización ambiental dentro del Plan de Manejo Ambiental (PMA) o mediante modificación de licencia, evitando tratarlo como un nuevo impacto
2. Concesión de uso del agua	Autorización administrativa para el uso del recurso hídrico	Cuando el agua tratada se destina a un uso distinto al originalmente autorizado	Se ajusta o amplía la concesión para incluir el uso de agua tratada, justificando la sustitución de agua dulce
3. Permisos ambientales específicos	Autorizaciones complementarias para infraestructura y operación	Cuando el proyecto requiere construir u operar infraestructura asociada al reúso	Se gestionan permisos para plantas de tratamiento, almacenamiento, transporte (tanques, tuberías), y planes de contingencia asociados
4. Proyecto piloto regulado	Autorización temporal bajo condiciones controladas	Cuando no existe precedente o claridad normativa para el tipo de reúso propuesto	Se estructura un piloto con seguimiento conjunto con la autoridad ambiental para validar desempeño técnico, ambiental y

Vía de habilitación	¿Qué es?	¿Cuándo aplica?	¿Cómo se usa en un proyecto?
	acordadas con la autoridad		sanitario, generando evidencia para escalamiento
5. Reúso como insumo productivo (sin vertimiento)	Estrategia de estructuración operativa y jurídica del proyecto (no es un permiso formal)	Cuando el agua tratada se integra directamente como insumo en un proceso productivo o en un circuito cerrado	Se diseña el sistema de modo que el agua no sea descargada a un cuerpo de agua, evitando su clasificación como vertimiento y facilitando su aprobación regulatoria

Nota: Elaboración propia con base en marco normativo colombiano (Decreto 3930 de 2010; Decreto 1076 de 2015; Resolución 0631 de 2015, lineamientos de ANLA y prácticas operativas del sector petróleo y gas (Oil & Gas))

Las vías identificadas combinan instrumentos regulatorios formales (licencias, concesiones y permisos) y estrategias de estructuración operativa del proyecto, necesarias para habilitar el reúso de agua de producción en un contexto donde no existe un permiso único específico para este fin.

Así como las vías de habilitación están alineadas con disposiciones normativas que inciden en la viabilidad del reúso del agua de producción en Colombia, en la Tabla 20. Marco regulatorio vs brechas para el reúso de agua en Colombia, describe leyes, decretos, resoluciones, instrumentos sectoriales y documentos de política pública aplicables a este tipo de proyectos y brechas que condicionan el escalamiento de modelos de negocio basados en el reúso.

Tabla 20.

Marco regulatorio vs brechas para el reúso de agua en Colombia

Nivel (macro - micro)	Foco regulatorio	Norma / Documento	¿Qué regula?	Implicación para el reúso	Brecha identificada
1. Marco macro del recurso hídrico	Naturaleza jurídica del agua	Decreto 2811 de 1974 (Código Nacional de Recursos Naturales Renovables)	Define el agua como bien de uso público y establece su administración	Todo uso del agua requiere autorización mediante concesión	No diferencia entre agua convencional y agua residual tratada
	Organización institucional	Ley 99 de 1993	Crea el Sistema Nacional Ambiental (SINA) y define competencias de autoridades ambientales	Centraliza la regulación y control del recurso hídrico	No contempla incentivos ni mecanismos específicos para reúso
2. Marco ambiental general	Usos del agua y vertimientos	Decreto 3930 de 2010	Regula usos del agua y establece el régimen de vertimientos	El reúso es tratado indirectamente como vertimiento o descarga	No desarrolla un marco específico para reúso industrial

Nivel (macro - micro)	Foco regulatorio	Norma / Documento	¿Qué regula?	Implicación para el reúso	Brecha identificada
	Compilación normativa	Decreto 1076 de 2015 (Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible)	Integra la normativa ambiental vigente	Proporciona seguridad jurídica y coherencia normativa	No establece lineamientos operativos para reúso
	Límites de vertimiento	Resolución 0631 de 2015	Define los parámetros máximos permisibles para vertimientos a cuerpos de agua	Incentiva el cumplimiento mínimo para descarga, no la valorización del agua	No contempla estándares diferenciados por tipo de uso de adecuación al propósito (fit-for-purpose)
3. Marco sectorial hidrocarburos	Gestión ambiental del upstream	PMA (Plan de Manejo Ambiental) / Licencias ANLA (Autoridad Nacional de Licencias Ambientales)	Regula la gestión ambiental de proyectos petroleros	Permite manejo interno del agua de producción dentro del proyecto	No habilita explícitamente el intercambio entre sectores
	Lineamientos técnicos	Guías ANLA / ANH (Agencia Nacional de Hidrocarburos)	Establecen buenas prácticas operativas y ambientales en O&G	Favorecen gestión interna del recurso	No consideran modelos intersectoriales de reúso
4. Marco operativo y permisos	Uso del recurso hídrico	Concesión de agua (autoridades ambientales regionales)	Autoriza el uso del agua en actividades productivas	Permite legalizar el uso de agua tratada en nuevos procesos	No existe ruta clara para reutilización de aguas residuales tratadas
	Modificación de instrumentos ambientales	ANLA (Autoridad Nacional de Licencias Ambientales)	Regula cambios a proyectos previamente licenciados	Permite incorporar el reúso mediante modificaciones de licencia	Procesos largos, discrecionales y caso a caso
	Política pública	CONPES 3918 de 2018 (Consejo Nacional de Política Económica y Social) / ENA (Estrategia Nacional de Economía Circular)	Promueve uso eficiente del agua y circularidad de recursos	Reconoce el reúso como estrategia de sostenibilidad	No cuenta con instrumentos operativos ni regulatorios específicos para implementación

Nota: Elaboración propia con base en el marco normativo colombiano

El análisis del marco regulatorio colombiano evidencia que, aunque existen disposiciones claras para la gestión del recurso hídrico y el diseño normativo responde principalmente a una lógica de control de vertimientos y prevención de impactos, más que a una de valorización y economía circular del agua.

En Colombia, el agua es reconocida como bien de uso público, pero no distingue entre agua convencional y corrientes tratadas con potencial de reúso; a nivel ambiental general, la regulación se orienta al vertimiento y no al cierre de ciclos; a nivel sectorial, la gestión del agua de producción se limita al ámbito del proyecto de hidrocarburos; y a nivel operativo, la ausencia de rutas estandarizadas obliga a evaluar cada iniciativa caso a caso.

Lo anterior, genera brechas en el proceso, aunque no prohíben el reúso del agua de producción, sí hay incertidumbre, lo que genera reduce la opción de replicar un modelo y elevan el riesgo del escalamiento. Esto, refuerza la necesidad de diseñar estrategias específicas de viabilización para convertir el marco regulatorio en un habilitador y no en una barrera del modelo de negocio.

5.3.1.1 Brechas regulatorias para el reúso del agua de producción

Del análisis del marco normativo, se identifican algunas brechas que afectan el escalamiento de modelos de negocio basados en el reúso del agua de producción. Ver Tabla 21. Principales brechas regulatorias. Estas brechas no implican una prohibición del reúso, pero sí introducen incertidumbre, reducen la replicabilidad y elevan el riesgo del escalamiento, lo cual confirma que la dimensión regulatoria debe abordarse como un factor estratégico del modelo de negocio para mitigar impactos como sobre costos de tratamiento, restricciones en la monetización y/o baja replicabilidad de las tecnologías.

Tabla 21.

Principales brechas regulatorias

Ausencia de una regulación específica de reúso industrial	A diferencia de otros países, Colombia no cuenta con una norma integral que regule el reúso de aguas residuales industriales por tipo de uso (<i>adecuación al propósito - fit-for-purpose</i>), lo que obliga a interpretar normas diseñadas para vertimientos.
--	--

Enfoque en control y no en valorización	El marco actual prioriza la prevención de impactos y el control de descargas, pero no establece incentivos ni procedimientos claros para la reutilización de corrientes tratadas.
Alta discrecionalidad en la autoridad ambiental	La evaluación caso a caso introduce incertidumbre en tiempos, costos y requisitos, lo que dificulta la estructuración de modelos replicables y escalables.
Desarticulación intersectorial	No existen instrumentos normativos que faciliten el intercambio de agua tratada entre sectores productivos, aun cuando existan beneficios ambientales y económicos demostrables.

Desde la perspectiva del escalamiento tecnológico y del modelo de negocio, las brechas regulatorias identificadas hacen necesario el diseño de estrategias que permitan reducir la incertidumbre, focalizarse en usos no alimentarios, implementar esquemas piloto con autoridades ambientales y diseñar modelos contractuales que internalicen el riesgo regulatorio.

5.3.2 Estrategias para viabilizar modelos de negocio para reúso agua

Las brechas identificadas en el marco regulatorio colombiano no implican una prohibición explícita del reúso del agua de producción, sino la ausencia de instrumentos claros que facilitan la valorización y escalamiento. En este contexto, los modelos exitosos de reúso se apoyan en estrategias de viabilización que actúan sobre el sistema: regulación, operación y mercado, más que sobre la tecnología aislada.

A continuación, en la Tabla 22. Brechas vs estrategias regulatorias, se esquematiza alternativas para mitigar las brechas identificadas de acuerdo con buenas prácticas del sector energético e industrial.

Tabla 22.

Brechas vs estrategias regulatorias

Brecha	Estrategia	Descripción	¿Cómo se supera?	Aplicación
Ausencia de regulación específica de reúso industrial	Enfoque <i>adecuación al propósito (fit-for-purpose)</i> y uso no alimentario	Ante la ausencia de una norma específica de reúso industrial, una estrategia ampliamente documentada consiste en limitar el uso del agua tratada a aplicaciones no alimentarias, donde los requisitos de calidad son menores y el riesgo regulatorio es más manejable (industria, energía, infraestructura, agroindustria no alimentaria).	• Evita exigir estándares cercanos a agua potable. • Reduce incertidumbre regulatoria. • Facilita la aprobación caso a caso bajo el marco existente.	• Enfriamiento industrial • Control de polvo • Riego de cultivos no alimentarios • Servicios a generación energética
Enfoque regulatorio centrado en vertimientos	Reinterpretación del reúso como “no vertimiento” dentro del sistema productivo	En varios países, el reúso exitoso se ha habilitado mediante la reinterpretación jurídica del agua tratada como insumo productivo, y no como residuo sujeto a vertimiento, especialmente cuando el uso ocurre dentro de circuitos industriales cerrados o intersectoriales controlados.	• Reduce la aplicación directa de límites de vertimiento. • Simplifica la discusión normativa. • Facilita esquemas de economía circular.	• Circuitos cerrados industriales • Suministro directo a usuarios específicos • Integración en procesos existentes
Alta discrecionalidad y evaluación caso a caso	Proyectos piloto regulados y esquemas demostrativos	Una estrategia clave para reducir incertidumbre regulatoria es el desarrollo de proyectos piloto o demostrativos, acordados formalmente con la autoridad ambiental,	• Reduce la incertidumbre regulatoria. • Genera evidencia local. • Sienta precedentes para futuros proyectos.	• Pilotos de 6–12 meses • Monitoreo conjunto con la autoridad • Escalamiento progresivo tras validación

Brecha	Estrategia	Descripción	¿Cómo se supera?	Aplicación
		que permitan validar el desempeño ambiental, operativo y sanitario del reúso antes del escalamiento.		
Desarticulación intersectorial	Acuerdos intersectoriales y contratos de suministro de agua tratada	El escalamiento del reúso suele apoyarse en acuerdos contractuales de largo plazo entre el generador del agua, el operador del tratamiento y el usuario final, estructurados como contratos de suministro o de servicios agua como servicio (Water-as-a-service)	• Da trazabilidad legal al uso del agua. • Facilita inversiones privadas. • Reduce riesgo para el usuario final.	• Contratos por m³ tratado • SLA de calidad y disponibilidad • Transferencia de riesgo al operador del sistema
Falta de estandarización operativa	Estandarización tecnológica y modularidad	La adopción de tecnologías modulares y estandarizadas (skid-mounted, trenes replicables) reduce la dependencia de diseños ad-hoc y facilita la aprobación regulatoria y operativa en múltiples ubicaciones.	• Reduce tiempos de implementación. • Facilita la aprobación regulatoria. • Permite escalamiento territorial.	• Trenes tecnológicos repetibles • Diseños estándar por rango de caudal • OPEX predecible

Nota: Elaboración propia con base en análisis marco regulatorio colombiano y literatura asociada al reúso de aguas en el sector oil&gas

La experiencia internacional muestra que el escalamiento del reúso del agua de producción no depende de cambios regulatorios inmediatos, sino de la capacidad de los actores para diseñar estrategias que operen dentro del marco existente, generando evidencia, reduciendo riesgos y construyendo confianza institucional. Estas estrategias permiten transformar las brechas regulatorias en espacios de innovación, habilitando

modelos de negocio viables incluso en contextos normativos no plenamente desarrollados.

5.3.3 Análisis PESTEL

El escalamiento de modelos de negocio basados en el reúso del agua de producción en la industria petróleo y gas (Oil & Gas) no depende únicamente de la disponibilidad del recurso, de la madurez tecnológica o de la viabilidad económica del tratamiento.

La experiencia internacional en proyectos de reúso de aguas residuales industriales muestra que múltiples iniciativas técnicamente exitosas fracasan en el despliegue a gran escala debido a barreras asociadas al entorno institucional, a la complejidad de permisos, a restricciones logísticas o a la falta de aceptación social y sectorial. En este sentido, el análisis PESTEL (Político-Económico-Social-Tecnológico-Ecológico-Legal), se adopta como una herramienta estratégica para identificar de manera estructurada los factores externos que condicionan la viabilidad del modelo de negocio propuesto, permitiendo anticipar riesgos, definir estrategias de mitigación y alinear el diseño del modelo con las realidades del entorno colombiano.

Cada dimensión se analiza desde la perspectiva del impacto directo en el modelo de negocio, en particular en la replicabilidad, estructura de costos, gestión del riesgo y viabilidad regulatoria. Ver Tabla 23. Análisis PESTEL aplicado al reúso de aguas de producción en petróleo y gas.

Tabla 23.*Análisis PESTEL aplicado al reúso de aguas de producción en petróleo y gas*

Dimensión	Aspectos clave analizados	Implicación directa para el modelo de negocio
Política (P)	- Discurso institucional favorable a eficiencia hídrica y economía circular (ENA, CONPES 3918). - Ausencia de políticas públicas “específicas” para reúso de aguas industriales complejas. - Prioridad estatal en reducción de captaciones de agua dulce y pasivos ambientales.	- El modelo debe alinearse con objetivos de política pública existentes, aunque no existan incentivos formales. - El reúso se justifica como optimización ambiental, no como proyecto independiente. - Ventaja para modelos que sustituyen captación de agua convencional.
Económica (E)	- Altos costos estructurales de disposición (reinyección, transporte). - Presión creciente sobre OPEX en campos maduros. - Impacto fuerte de la logística y la distancia en la viabilidad económica.	- El valor del modelo surge del costo evitado de disposición. - Se favorecen modelos agua como servicio (Water-as-a-service) / Pay-per-Use. - La cercanía geográfica generador–usuario es crítica para escalar.
Social (S)	- Riesgo de percepción negativa frente a uso de aguas no convencionales. - Alta sensibilidad social y reputacional en usos agrícolas o cercanos al consumo humano. - Mayor aceptación en usos industriales, energéticos e infraestructura.	- El modelo debe segmentar claramente los usos finales del agua. - Priorizar aplicaciones sin contacto humano directo. - La trazabilidad, monitoreo y contratos claros reducen riesgo social.
Tecnológica (T)	- Necesidad de tecnologías robustas frente a variabilidad del agua de producción. - Importancia de modularidad, estandarización y facilidad operativa. - Valor del monitoreo en línea y control de calidad.	- Se favorecen tecnologías empaquetadas como servicio, no soluciones complejas ad-hoc (a la medida) - La tecnología actúa como habilitador del modelo, no como eje central. - Reduce fricción regulatoria y costos operativos.
Ambiental (E)	- El agua de producción es un efluente con potencial impacto ambiental. - El reúso reduce captaciones, vertimientos y huella hídrica neta. - Relevancia del enfoque adecuación al propósito (fit-for-purpose)	- El modelo debe diseñarse para evitar vertimientos y operar en circuitos cerrados. - El reúso se integra como medida ambiental positiva dentro de PMA. - Reduce riesgos ambientales y costos de tratamiento innecesarios.

Dimensión	Aspectos clave analizados	Implicación directa para el modelo de negocio
Legal / Regulatoria (L)	- No existe norma específica para reúso de agua de producción. - Necesidad de articular licencias, PMA, concesiones y permisos operativos. - Alta evaluación caso a caso por autoridades ambientales.	- La gestión de permisos es parte estructural del modelo de negocio. - Se requieren rutas regulatorias replicables, no soluciones únicas. - El modelo debe absorber y gestionar el riesgo regulatorio.

Nota: Elaboración propia con base en conocimiento del sector oil&gas, normatividad colombiana y literatura de organismos internacionales relacionados

El análisis PESTEL evidencia que, el reúso del agua de producción en la industria petróleo y gas (Oil & Gas) colombiana se encuentra en un entorno complejo y altamente condicionado por factores externos, por lo que la viabilidad del modelo de negocio depende de la capacidad para:

- Operar dentro del marco político y regulatorio existente
- Capturar valor derivado del costo evitado de disposición
- Seleccionar usos finales con mayor aceptación social
- Incorporar tecnologías robustas y modularizables
- Integrar la gestión ambiental y de permisos como parte del negocio

Este análisis constituye la base para la definición de los factores clave de éxito (FCE) y la del modelo de negocio, bajo las cuales las soluciones tecnológicas previamente evaluadas pueden ser implementadas de manera sostenible y escalable.

5.4 Factores Críticos de Éxito - FCE

Un factor crítico de éxito (FCE) es una condición que, si no se cumple, impide la viabilidad, replicabilidad o escalamiento del modelo de negocio, independientemente de la calidad técnica de la solución. Los FCE, se derivan directamente de las restricciones y habilitadores identificados en el análisis PESTEL, y se formulan desde una óptica gerencial, no técnica, dando un marco de referencia para el diseño del modelo de negocio, permitiendo comprender: Por qué el modelo se basa en servicios y no venta de

tecnología, Por qué se priorizan ciertos segmentos de clientes, Por qué la estructura de costos y monetización se apoya en contratos de largo plazo, Por qué las palancas de valor se centran en eficiencia, reducción de CAPEX y gestión del riesgo.

Para este ejercicio, los FCE se agrupan en dimensiones estratégicas que reflejan que el escalamiento del modelo de negocio no depende de un único factor, sino de la interacción entre mercado, tecnología, regulación, finanzas y gobernanza. Ver Tabla 24. Factores críticos de éxito derivados del análisis PESTEL.

Tabla 24.

Factores críticos de éxito derivados del análisis PESTEL

Segmento	Factor crítico de éxito	Variable PESTEL asociada	Descripción	Impacto en modelo de negocio
Mercado y aceptación	Segmentación estratégica y aceptación del mercado (adecuación al propósito (fit-for-purpose) + <i>ESG</i> + <i>licencia social</i>)	Social – Ambiental – Legal – Política	No todos los usos del agua tienen la misma aceptación regulatoria y social. Los usos con contacto humano presentan mayores restricciones y riesgos reputacionales.	El modelo debe priorizar aplicaciones industriales, energéticas y de infraestructura, minimizando riesgo social y regulatorio y facilitando su adopción.
Logística y localización	Localización óptima y eficiencia logística	Económica – Logística	La distancia entre el punto de generación y uso del agua impacta directamente los costos de transporte y la viabilidad del proyecto.	El modelo debe estructurarse en esquemas <i>on-site</i> o <i>near-site</i> , asegurando economías logísticas y escalabilidad territorial.
Operación y tecnología	Estandarización y escalabilidad operativa	Tecnológica – Económica	Soluciones altamente personalizadas reducen la replicabilidad y aumentan costos. La modularidad y estandarización permiten expansión del modelo.	El modelo debe apoyarse en sistemas modulares tipo skid y trenes tecnológicos replicables, reduciendo CAPEX/OPEX y permitiendo escalamiento progresivo.

Segmento	Factor crítico de éxito	Variable PESTEL asociada	Descripción	Impacto en modelo de negocio
Propuesta de valor y servicio	Encapsulamiento del servicio y propuesta de valor (WaaS)	Económica – Tecnológica – Estratégica	El cliente requiere soluciones que reduzcan inversión, riesgos y complejidad operativa. La adopción depende de una propuesta de valor clara y tangible.	El modelo debe estructurarse como agua como servicio (Water-as-a-service), donde se vende desempeño (m ³ tratados) y no activos, facilitando la adopción y transferencia de riesgo.
Regulación y cumplimiento	Gestión estructurada del riesgo regulatorio y cumplimiento	Legal – Política – Ambiental	La ausencia de una ruta normativa clara obliga a gestionar activamente permisos, vertimientos, monitoreo y trazabilidad.	El modelo debe integrar la gestión regulatoria como parte del core del negocio, diseñando operaciones sin vertimientos y con trazabilidad completa para facilitar aprobación.
Contratación y gobernanza	Estandarización contractual y gobernanza del modelo (SLA)	Legal – Operativa	Modelos contractuales complejos dificultan la replicabilidad. La interacción de múltiples actores requiere estructuras claras.	El modelo debe basarse en contratos tipo, SLA estandarizados y esquemas claros de roles y responsabilidades, reduciendo fricción comercial y legal.
Finanzas y sostenibilidad	Bancabilidad y sostenibilidad financiera	Económica – Legal – Política	El escalamiento depende de flujos de caja predecibles y capacidad de atraer inversión, lo cual exige contratos de largo plazo y riesgos controlados.	El modelo debe asegurar ingresos estables mediante contratos de desempeño y ser financieramente estructurable para habilitar inversión y crecimiento.
Escalabilidad comercial	Capacidad de expansión y replicabilidad comercial	Económica – Estratégica	No basta con replicar la tecnología; el modelo debe ser replicable en múltiples clientes, sectores y geografías.	Se requieren soluciones integradas (tecnología + contrato + operación) que permitan escalar a diferentes mercados sin rediseños estructurales.

Nota: Elaboración propia con base en análisis PESTEL, revisión de literatura internacional sobre reúso y la adaptación al contexto del sector petróleo y gas (Oil & Gas) colombiano.

El análisis realizado evidencia que el escalamiento del reúso de agua de producción no está limitado por la disponibilidad de tecnologías o por la ausencia de mercado, sino por la interacción de factores normativos, estratégicos y operativos que condicionan su

implementación. Estos resultados constituyen la base para el diseño del modelo de negocio, el cual debe incorporar explícitamente los factores críticos de éxito identificados, garantizando su viabilidad técnica, regulatoria, financiera y comercial en el contexto colombiano.

5.5 Esquematización Modelo de Negocio

En entornos caracterizados por alta competencia, restricciones regulatorias, avances tecnológicos, transformación de los mercados y escasez de recursos naturales, la innovación en modelos de negocio se posiciona como un mecanismo clave para la generación de valor sostenible. En este contexto, el modelo de negocio puede entenderse como un sistema que articula la proposición, creación y captura de valor, donde la creación de valor constituye su elemento central. En modelos asociados a sostenibilidad y economía circular, la creación de valor va más allá del componente económico e incluye dimensiones sociales y ambientales, lo que resulta relevante en el caso del reúso de agua de producción.

En el contexto del sector petróleo y gas (Oil & Gas), donde la gestión del agua de producción ha sido tradicionalmente abordada como un costo operativo, la innovación en el modelo de negocio permite transformar esta lógica, pasando de un enfoque de disposición a uno de valorización, donde el agua se convierte en un recurso potencial para otros usos productivos.

Para diseñar el modelo de negocio se aborda desde un proceso estructurado, el cual parte de las condiciones del entorno y las restricciones de viabilidad, para posteriormente definir la creación y captura de valor e integrar estos elementos en una configuración coherente y escalable.

Este enfoque es consistente con metodologías de innovación en modelos de negocio que integran análisis del entorno, ideación, estructuración y validación iterativa,

como el Business Model Navigator (BMN), herramienta de diseño que permite generar y evolucionar configuraciones de modelos a partir de patrones replicables y probados en la práctica. Asimismo, el proceso reconoce que el diseño del modelo no es aislado, sino que se construye en interacción con el ecosistema, incluyendo clientes, aliados y actores regulatorios, lo cual permite mejorar su pertinencia y viabilidad en contextos reales.

5.5.1. Espacio de viabilidad

A partir del análisis previo del mercado (TAM, SAM, SOM), las tecnologías disponibles, el análisis del entorno PESTEL, el marco normativo y los factores críticos de éxito (FCE), se define el espacio en el cual el modelo de negocio puede operar de manera viable. Este proceso debe responder a la pregunta: ¿Qué condiciones debe cumplir el modelo para ser técnica, regulatoria y económicamente viable?

Como resultado, el modelo se delimita bajo los siguientes lineamientos:

- Prioridad en usos industriales, energéticos y de infraestructura, excluyendo aplicaciones de consumo humano directo debido a restricciones regulatorias.
- Implementación en esquemas cercanos al punto de generación para minimizar costos logísticos.
- Uso de tecnologías modulares y de alta madurez tecnológica.
- Operación bajo esquemas contractuales de largo plazo.
- Integración del cumplimiento regulatorio dentro del modelo.

Este proceso permite establecer el marco de diseño dentro del cual se desarrollan las siguientes etapas.

5.5.2. Identificación palancas de valor

Con base en el contexto de viabilidad, se procede a identificar las palancas de valor, las cuales representan los mecanismos a través de los cuales el modelo genera

beneficios medibles para el cliente y el proveedor. En coherencia con la literatura sobre innovación en modelos de negocio, la creación de valor se articula en múltiples dimensiones, incluyendo aspectos económicos, operativos y ambientales, así como las condiciones operativas del sector y de los principales impulsores de decisión de los operadores petróleo y gas (Oil & Gas). Las principales palancas identificadas son:

- Reducción de costos de disposición (reinyección, transporte, vertimiento)
- Sustitución de agua dulce
- Reducción de inversión inicial (CAPEX) del cliente
- Cumplimiento ambiental y reducción de riesgos regulatorios
- Mejora del desempeño ESG
- Eficiencia operativa y continuidad de la producción

A partir de estas palancas, se agrupan en los siguientes tipos de valor, donde se indica que habilita y como se materializa. Ver Tabla 25. Palancas de valor vs monetización

Tabla 25.

Palancas de valor vs monetización

Palanca	Tipo de valor	Habilita	Materialización	Monetizable
Eficiencia operativa	Económico-operativo	• Reducir costos unitarios por m³ tratado. • Optimizar uso de energía e insumos. • Eliminar reprocesos asociados a mala calidad del agua. • Liberar capacidad operativa en facilidades existentes	• Menor OPEX total para el cliente, • Mayor margen operativo para el proveedor.	• A través del Pay-per-Use • Mediante ajustes por desempeño (Performance-Based) • Como base del pricing frente al costo evitado
Gestión de riesgos	Estratégico	• Transfiere el riesgo técnico y operativo al proveedor • Reduce la exposición del cliente a fallas de desempeño	• Reducción de incertidumbre • Protección de ingresos core,	• A través de tarifas por disponibilidad • Mediante bonos/penalidades por desempeño

Palanca	Tipo de valor	Habilita	Materialización	Monetizable
		• Disminuye contingencias por incumplimiento ambiental • Estabiliza la operación del campo.	• Mayor previsibilidad operativa.	• En contratos de largo plazo
Cumplimiento regulatorio	Estratégico-defensivo	• Integra el reúso dentro de los instrumentos existentes (PMA) • Reduce riesgos de sanción o suspensión operativa • Facilita la relación con autoridades ambientales • Permite demostrar trazabilidad y desempeño ambiental.	• Activos maduros • Zonas con presión social • Operadores con compromisos ESG.	• Tarifas por disponibilidad • Servicios especializados • Aceptación del pricing del servicio.
Reducción de CAPEX	Financiero-gerencial	• Elimina inversiones iniciales del cliente • Facilita aprobaciones internas • Reduce barreras de entrada • Permite escalar sin inmovilizar capital.	• Velocidad de adopción • Mayor número de proyectos viables • Expansión del mercado potencial.	• Permite contratos de largo plazo. • Aceptación de tarifas operativas más altas que OPEX puro. • Base para financiar el CAPEX del proveedor.

Nota: Elaboración propia con base en Business Model Navigator

Estas palancas no solo justifican la adopción del modelo, sino que constituyen la base para la definición de los mecanismos de monetización, para traducir beneficios operativos en flujos económicos.

5.5.3. Mecanismos de monetización

A partir de la identificación de las palancas, se puede definir los mecanismos de monetización, que se definen cómo se captura el valor generado por el modelo, transformándolo en ingresos. En este caso, la monetización se basa en esquemas propios de modelos de servicio (servitización), donde el cliente paga por el valor recibido (esto es uso, disponibilidad y desempeño) en lugar de adquirir activos. Para este ejercicio, se identificó que los principales mecanismos son:

- Pago por volumen de agua tratada (Pay per Use)
- Tarifas por disponibilidad del servicio (Availability Based)
- Contratos basados en desempeño (Performance Based)
- Servicios especializados complementarios
- Contratos EPC-O en fases iniciales

Estos mecanismos se estructuran bajo principios de: alineación con el costo evitado del cliente, transferencia del riesgo operativo al proveedor y generación de ingresos recurrentes y predecibles. Ver Tabla 26. Planteamiento mecanismos de monetización.

Tabla 26.

Planteamiento mecanismos de monetización

Mecanismo	Definición	Importancia	Alineación
Pago por volumen de agua tratada (Pay-per-Use) (USD/m³ o USD/bbl)	Este mecanismo monetiza el uso, no la infraestructura, reforzando la premisa de servicio.	• Flexibilizar el servicio, • Alinear ingresos con operación real, • Vincular directamente desempeño técnico con ingreso económico.	• Compatible con PESTEL económico y operativo. • Minimiza barreras de adopción. • Facilita contratos de largo plazo sin rigidez excesiva.
Tarifas por disponibilidad del servicio - Availability Based.	Complementa el Pay-per-Use y corrige una debilidad estructural de los ingresos variables. No sustituye al Pay-per-Use: lo complementa y lo hace viable.	• Estabiliza el flujo de caja del proveedor, • Permite amortizar CAPEX, • Refuerza la transferencia del riesgo operativo.	• Consistente con contratos industriales petróleo y gas (Oil & Gas). • Reconoce la criticidad del servicio. • Facilita la planificación financiera del proyecto.
Contratos EPC-O en fases específicas	Este mecanismo cumple un rol táctico y habilitador, no estructural. El EPC-O no debe convertirse en el core del modelo, ya que reduciría la escalabilidad y la recurrencia de ingresos.	• Reduce fricciones iniciales, • Acelera la implementación, • Aumenta la probabilidad de cerrar el contrato de servicio de largo plazo.	• Compatible con prácticas del sector. • Útil en fases tempranas o de transición. • No compromete el enfoque de servicio si se usa de forma controlada.
Servicios especializados	Son monetizables, pero no son el ingreso dominante. habilitan decisiones, profundiza la relación,		• Alta complejidad regulatoria y ambiental. • Diversos niveles de madurez del cliente.

Mecanismo	Definición	Importancia	Alineación
Bonos penalidades por desempeño – Performance-Based Contract.	captura valor del conocimiento acumulado.		• Necesidad de soporte técnico-gerencial en fases no estandarizadas.
	o No es una fuente de ingreso independiente, sino un mecanismo de desempeño transversal que modula los ingresos principales.	• Esquema contractual en el cual parte del ingreso del proveedor. • Condicionada al cumplimiento de indicadores previamente definidos • Se materializa mediante bonos por sobre-desempeño o penalidades por incumplimiento.	• Refuerza la transferencia de riesgo • Incentiva eficiencia y confiabilidad • Alinea proveedor y cliente • Típico en servicios críticos petróleo y gas (Oil & Gas)

Nota: Elaboración propia con base en Business Model Navigator

5.5.4 Estructura de costos

La estructura de costos del modelo es predominantemente operativa (OPEX-intensiva), coherente con su enfoque de servicio continuo. En este sentido, incluye rubros como:

- CAPEX: infraestructura modular, equipos, pilotos
- OPEX: operación, energía, insumos, mantenimiento
- Costos regulatorios: permisos, monitoreo, cumplimiento
- Costos de riesgo: seguros, redundancias, penalidades

Esta estructura permite trasladar la complejidad técnica al proveedor, mientras el cliente accede al servicio bajo esquemas de pago recurrente, lo cual favorece la adopción del modelo y su replicabilidad.

5.5.5. Diseño estructural del modelo de negocio

El modelo de negocio se construye a partir de la combinación de patrones del Business Model Navigator (BMN), el cual se compone por cuatro (4) dimensiones: Who, What, How, Value. Para realizar un proceso de innovación al modelo de negocio, es

necesario modificar al menos dos de estos parámetros junto con la eliminación de barreras como: creencias arraigadas, éxito basado en solo productos y no en un modelo de negocio e innovación sin herramientas sistemáticas.

En el Apéndice B. Patrones_Modelo_Negocio, se adaptó del BMN, una matriz la cual permite identificar cual es el objeto principal del patron, por ejemplo: Modelos de pricing y revenue, Estrategias de diferenciación, Modelos de pricing dinámico, Modelos alternativos de intercambio, Modelos financieros, Canales de comercialización, Canales digitales, Experiencia y marketing, entre otros; cual es la dimensión que afecta, cuando utilizarlo, como aplicarlo, el impacto de la modificación de la dimensión y preguntas clave que permiten validar si aplica o no el patron, así como a que tipo de estrategia está enfocado el modelo.

A continuación, en la Tabla 27. Criterios de selección patrones del modelo, se describe los criterios tomados en cuenta para seleccionar aquellos que respondan a la naturaleza del sector petróleo y gas (Oil & Gas), orientado a continuidad operativa y desempeño, con lógica circular y potencialmente escalables.

Tabla 27.

Criterios de selección patrones del modelo

Criterio clave	Cumplen con	Trash-to-Cash	Pay-per-Use	Solution Provider	Availability-Based	Performance-Based
Compatible con O&G	Funcionamiento bajo contratos formales, aceptados por operadores industriales, sin dependencia de mercados abiertos o consumidores finales	✓	✓	✓	✓	✓
Capacidad de Encapsular tecnología como servicio	Debe permitir: Mitigar la complejidad tecnológica al cliente, transferir el riesgo técnico al proveedor y facilitar la adopción sin capex inicial.	✓	✓	✓	✓	✓
Alineación con Economía circular	Modelo debe: Partir de un residuo, Convertirlo en recurso, generar valor económico y ambiental simultáneamente.	✓ ✓	✓	✓	⚠	⚠

Criterio clave	Cumplen con	Trash-to-Cash	Pay-per-Use	Solution Provider	Availability-Based	Performance-Based
Replicable y estandarizado	Patrones que: Puedan repetirse en múltiples campos, No dependan de personalización extrema y permitan portafolios de proyectos.	✓	✓✓	✓	✓	✓
Reducción CAPEX cliente	Priorizar patrones que: Minimizar inversión inicial del operador O&G, Facilitar aprobación interna de proyectos.	✓	✓✓	✓	✓	✓
Ingresos recurrentes	Patrones que: Permiten contratos de largo plazo, generan ingresos recurrentes y facilitan modelos financieros (van, tir).	✓	✓✓	✓	✓	✓
Transferencia de riesgo	Permitir que: El proveedor asuma fallos y el cliente pague solo por desempeño.	✓	✓	✓ ✓	✓	✓✓

Nota: Elaboración propia con base en Business Model Navigator

Los patrones seleccionados están alineados con las premisas iniciales que persigue el modelo de negocio. El patrón conversión de residuos en valor (*Trash to Cash*) permite transformar subproductos o corrientes residuales en nuevas fuentes de valor económico. Por su parte, el patrón pago por uso (*Pay per Use*) se fundamenta en el cobro asociado al uso real del producto o servicio. El patrón proveedor de soluciones (*Solution Provider*) consiste en ofrecer soluciones integrales al cliente en lugar de productos aislados. Asimismo, el patrón basado en disponibilidad (*Availability-Based*) establece compromisos contractuales relacionados con la disponibilidad continua del producto o servicio. Finalmente, el patrón basado en desempeño (*Performance-Based*) vincula la captura de ingresos al nivel de desempeño efectivamente entregado al cliente.

Estos modelos no son excluyentes si no que se complementan con el fin de estructurar el modelo de tal manera que permite identificar el valor, la captación del dinero y la forma de operar el modelo de negocio.

- Conversión de residuos en valor (Trash to Cash), define la lógica del negocio — el agua residual tiene valor.
- Proveedor de soluciones (Solution Provider), define el alcance del servicio — gestión integral.
- Pago por uso/ basado en disponibilidad/ basado en desempeño (Pay per Use / Availability Based / Performance Based), definen el mecanismo de cobro, que puede escalar según la madurez del cliente y el nivel de riesgo que cada parte está dispuesta a asumir.

En coherencia con lo anterior, ciertas combinaciones de patrones se repiten con mayor frecuencia debido a la capacidad para reducir barreras de adopción, encapsular la tecnología como servicio y facilitar contratos de largo plazo. La siguiente Tabla 28. Combinaciones de patrones de mayor frecuencia, resume las combinaciones típicas de patrones BMN identificadas como más relevantes para modelos de servicios industriales y de valorización de residuos, y explica la lógica estratégica.

Tabla 28.

Combinaciones de patrones de mayor frecuencia

Combinación de patrones BMN	Estratégica de la combinación	Problema que resuelve	Relevancia para petróleo y gas
Trash-to-Cash + Pay-per-Use	Convierte un residuo en fuente de ingresos y monetiza por uso real	Transformación de pasivos en ingresos sin CAPEX del cliente	Muy alta: agua de producción como residuo estructural
Solution Provider + Availability-Based	El cliente compra confiabilidad y disponibilidad, no tecnología	Externalización de complejidad operativa	Muy alta: operaciones críticas 24/7
Availability-Based + Performance-Based Contract	Garantiza continuidad y alinea incentivos por desempeño	Gestión del riesgo operativo y contractual	Alta: reducción de riesgo para el operador
Trash-to-Cash + Solution Provider	Valorización del residuo mediante solución integral	Simplificación de la decisión del cliente	Alta: enfoque ambiental + operativo

Pay-per-Use + Performance-Based Contract	Ingresos variables ligados a resultados medibles	Control de costos y desempeño	Alta: contratos por m ³ y calidad
---	--	----------------------------------	---

Nota: Elaboración propia con base en Business Model Navigator

5.5.6 Estrategias de comercialización

La comercialización del modelo se concibe como un proceso estructurado que busca facilitar su adopción en un entorno caracterizado por alta complejidad técnica, múltiples actores y elevada percepción de riesgo. En este sentido, las estrategias no se definen de manera general, sino que responden a un proceso de evaluación de alternativas frente a las condiciones específicas del sector. En la Tabla 29. Criterios para selección de estrategias de comercialización, se muestran las principales consideraciones:

Tabla 29.

Criterios para selección de estrategias de comercialización

Criterio	Descripción	Implicación en la estrategia
Complejidad del servicio	Requiere acompañamiento técnico	Requiere enfoque consultivo
Riesgo percibido	Necesidad de reducir incertidumbre	Necesidad de generar confianza
Intensidad de inversión	Requiere adopción progresiva (capex relevante)	Requiere esquemas progresivos
Número de actores	Modelo multi-stakeholder	Necesidad de coordinación
Horizonte contractual	Relación de largo plazo	Relación no transaccional
Regulación	Condiciona la implementación	Necesidad de sustentación técnica

Como resultado de esta evaluación, se definieron estrategias de comercialización basadas en enfoques relacionales, consultivos y progresivos, coherentes con la naturaleza del modelo, ellos son:

Una estrategia B2B relacional, en la cual la relación con el cliente se basa en contratos de largo plazo y en la integración operativa del servicio. Este enfoque se complementa con una estrategia de venta basada en valor, donde el énfasis se encuentra en los beneficios económicos y operativos generados, más que en la tecnología utilizada.

Adicionalmente, se incorpora un enfoque consultivo, en el cual la comercialización inicia con un proceso de diagnóstico que permite adaptar el modelo a las condiciones específicas de cada caso. Este proceso se complementa con la implementación de pilotos, los cuales permiten validar el modelo en condiciones reales y reducir la percepción de riesgo.

Finalmente, se reconoce la importancia de la articulación de alianzas entre los diferentes actores involucrados, lo cual resulta fundamental para garantizar la viabilidad del modelo en un contexto donde la oferta y la demanda del recurso se encuentran en agentes distintos.

5.5.7. Esquematización modelo de negocio

El presente trabajo apropia un modelo Canvas de doce bloques, resultado de una adaptación metodológica desarrollada a partir de las necesidades identificadas durante el ejercicio profesional de la autora. La estructura del Modelo Canvas original propuesto por Osterwalder y Pigneur (2010) y el Modelo Lean Canvas por Maurya (2012), fue el punto de partida; sin embargo, en el marco del desarrollo de las funciones laborales y en concertación con el director del proyecto, se identificó que dicha estructura no capturaba de manera suficiente elementos críticos para el análisis de oportunidades de negocio en contextos de alta complejidad técnica y regulatoria.

Como resultado de la revisión y análisis en ambiente real, se estructuró un lienzo que permite mostrar explícitamente la brecha que el modelo busca resolver y el contexto

competitivo en el que opera, elementos que el Canvas tradicional da por implícitos pero que resultan esenciales en sectores donde la oportunidad de negocio no es evidente para todos los actores del mercado. Asimismo, se puede identificar claramente, la ventaja no copiable, la cual permite capturar los atributos estructurales que hacen sostenible el modelo en el tiempo y que no pueden ser replicados fácilmente por competidores, un elemento crítico en mercados con alta intensidad tecnológica. Estas adaptaciones permiten una mejor caracterización en contextos de innovación y modelos de negocio en desarrollo en industrias de capital intensivo como la de hidrocarburos.

A continuación, se describe algunos de los principales ítems de la propuesta del Modelo Canvas, basado en el servicio y riesgo. El detalle completo del lienzo se encuentra en el Apéndice C. Modelo Canvas.

La propuesta de valor del modelo se construye desde una lógica diferenciada de los enfoques tradicionales de venta de tecnología. En lugar de ofrecer equipos, procesos o plantas de tratamiento, el modelo propone resolver un problema estructural del negocio petróleo y gas (Oil & Gas): el alto costo, riesgo y complejidad asociados al manejo del agua de producción.

La propuesta de valor se fundamenta en cuatro elementos centrales:

- Reducción de costos operativos, mediante la sustitución parcial o total de esquemas de disposición (reinyección, transporte y vertimiento).
- Disponibilidad confiable de agua tratada, adecuada para usos industriales, energéticos o de infraestructura (fit-for-purpose).
- Transferencia del riesgo técnico, operativo y regulatorio, desde el operador petróleo y gas (Oil & Gas) hacia el proveedor del servicio.
- Cumplimiento ambiental y mejora del desempeño ESG, sin exigir inversiones significativas de CAPEX al cliente.

Las alternativas o soluciones actuales en el mercado presentan limitaciones estructurales para el escalamiento. Estas alternativas resuelven un problema técnico, pero no el problema económico, operativo ni de riesgo por lo que este modelo ofrece un servicio gestionado y no un producto. Es por ello, que la propuesta ofrecería una garantía de calidad según uso final y no sobretratamiento, una portabilidad y rápida implementación con un enfoque en circularidad y neutralidad hídrica con una transferencia del riesgo técnico y regulatorio al proveedor del servicio.

El modelo distingue claramente entre el cliente generador del agua, el cual está interesado en: reducir Opex, mitigar riesgos y cumplir exigencias regulatorias y el usuario final del agua tratada (no potable) para usos como: Industria (enfriamiento, procesos, lavado), Sector energético (generación térmica, enfriamiento), Infraestructura y obras civiles (control de polvo, compactación)., lo cual constituye una diferencia estructural frente a modelos tradicionales de tratamiento interno. Esta segmentación obedece a criterios de selección como:

- Alta demanda hídrica
- Baja exigencia de calidad potable.
- Cercanía geográfica a los campos O&G.
- Menor sensibilidad social y regulatoria.

El modelo no prioriza consumo humano ni agricultura alimentaria, por razones estratégicas y regulatorias.

La relación a los clientes potenciales se define que está enfocado a usos agrícolas industriales. No esta priorizado para usos sensibles socialmente como consumo humano o riego alimentario toda vez que se encuentran aún muchas limitaciones legales y sociales. El tipo de relación con los clientes es por medio de un modelo relacional de largo plazo, no transaccional, buscando una relación continua y contractual, con horizonte de varios años y un enfoque en: desempeño, continuidad operativa, resultados,

alta integración con la operación del cliente y riesgos compartidos o transferidos al proveedor permitiendo así una solución que implica: Operar sistemas día tras día, ajustar calidad del agua dinámicamente, garantizar desempeño y responder a eventos operativos y regulatorios, lo cual se puede viabilizar con una relación de largo plazo.

En consecuencia, el modelo de negocio se soporta en un canal de relación directa B2B, estructurado bajo esquemas contractuales de largo plazo y no en modelos transaccionales basados en la venta puntual de equipos o insumos, generando relaciones operativas continuas, donde el proveedor asume responsabilidades técnicas, operativas y de desempeño a lo largo del tiempo. Esta lógica relacional resulta consistente con la naturaleza crítica del manejo del agua de producción en la industria petróleo y gas (Oil & Gas), así como con la necesidad de garantizar continuidad operativa, cumplimiento regulatorio y escalabilidad del modelo.

Otro aspecto de relevancia dentro del modelo es el flujo de ingresos, el cual define cómo, por qué y en qué condiciones se captura el valor económico, y además cómo se reparten riesgos e incentivos entre las partes. En la Tabla 30. Propuesta flujo de ingresos, se muestra, los aspectos más relevantes frente a la propuesta de los ingresos que se pueden capturar.

Tabla 30.

Propuesta flujo de ingresos

Ingreso	Definición	Uso contractual	Aplicación
Pago por volumen de agua tratada (Pay-per-Use).	Mecanismo de ingreso variable, en el que el cliente paga en función del volumen real de agua de producción tratada y puesta en condición de uso (<i>m³, barriles de agua, etc.</i>). No se paga por equipos, horas hombre ni capacidad instalada, sino por servicio efectivamente entregado.	Una unidad de cobro (USD/m ³ o USD/barril tratado). Condiciones mínimas de calidad (adecuación al propósito (fit-for-purpose) Rangos de operación (mínimos y máximos volumétricos). Esquemas de ajustes por eficiencia o incumplimiento. Puede incluir: tarifas escalonadas, descuentos	Campos con alta variabilidad de producción. Fases iniciales de implementación. Proyectos donde el operador quiere minimizar compromisos fijos.

Ingreso	Definición	Uso contractual	Aplicación
Tarifas por disponibilidad del servicio - Availability-Based Fees	Es un ingreso fijo o semi-fijo, asociado a la disponibilidad garantizada del sistema de tratamiento, independientemente del volumen usado en un período determinado. El cliente paga por tener la solución lista, operativa y confiable.	por mayor volumen, penalidades si no cumple calidad. Un fee mensual o anual. Definición clara de: uptime (% tiempo disponible), capacidad nominal, ventanas de mantenimiento. Penalidades por indisponibilidad no programada.	Campos críticos donde parar la producción no es aceptable. Sistemas que soportan reinyección o reúso estratégico. Fases maduras del contrato, cuando el sistema ya está estabilizado.
Contratos EPC-O en fases específicas	Fuente de ingresos puntual o por fase, asociada a: Ingeniería (E), Procura (P), Construcción (C), o/y eventualmente Operación inicial (O). No es el core del modelo, pero cumple un rol habilitador, porque facilita la entrada del modelo de servicio, reduce fricciones iniciales, no reemplaza el ingreso recurrente.	Alcance definido por hito o fase. Precio cerrado o por avance. En algunos casos, parte del CAPEX puede amortizarse vía el contrato de servicio posterior.	Fases piloto. Campos sin infraestructura existente. Proyectos donde el regulador exige pruebas o demostraciones.
Servicios especializados (cuando aplique).	Son los ingresos asociados a servicios de alto valor agregado, que no son el core continuo del modelo, pero lo refuerzan, entre ellos: Estudios de calidad del agua. Optimización de procesos. Soporte regulatorio y técnico. Auditorías de desempeño hídrico. Ajustes tecnológicos puntuales.	Tarifas por servicio. Contratos cortos o por resultados. En algunos casos, se integran al contrato principal.	Fase pre-implementación Fase piloto Campos nuevos o con alta incertidumbre técnica/regulatoria Contextos con alta complejidad regulatoria o ambiental Cuando se busca expandir el modelo sin alterar el contrato principal

El modelo no depende de una única fuente de ingresos, sino de un portafolio de mecanismos complementarios que combinan estabilidad financiera, flexibilidad operativa y transferencia de riesgo, alineados con la lógica de servicio permanente propia de la industria petróleo y gas (Oil & Gas).

La estructura de costos condiciona la viabilidad del modelo de servicio, habilita la transferencia de riesgo al proveedor, determina qué mecanismos de monetización son viables, y define la escalabilidad del modelo en el tiempo. La propuesta planteada, establece una estructura de costos predominantemente operativa (OPEX-intensiva), coherente con su enfoque en: servicios continuos, contratos de largo plazo y pago por desempeño.

Del modelo se estima este definida por costos operativos recurrentes, lo que refuerza la lógica de contratos de largo plazo y economías de escala. Los componentes principales son los que se muestran en la Tabla 31. Detalle componentes estructura de costos.

Tabla 31.

Detalle componentes estructura de costos

Rubro	Componentes	Impacto
CAPEX	- Fabricación o adquisición de unidades de tratamiento modulares. - Equipos de separación, filtración y medición. - Interconexiones, skids y accesorios. - Instrumentación y sistemas de control. - Pilotos y pruebas iniciales (cuando aplique). - Desarrollo y protección de propiedad intelectual (si aplica).	- Para el proveedor: necesidad de financiar activos productivos. - Para el cliente: reducción significativa de barreras de entrada. - Para el modelo: hace obligatorio el contrato de largo plazo.
OPEX	- Operación diaria del sistema. - Mantenimiento preventivo y correctivo. - Energía eléctrica. - Insumos y consumibles (material filtrante, reactivos). - Monitoreo de calidad del agua. - Personal técnico especializado. - Logística interna (bombeo, transferencia cercana).	- Incentiva la eficiencia operativa del proveedor. - Aplica para esquemas Pay-per-Use y Performance-Based. - Penaliza diseños altamente personalizados o ineficientes.
Costos regulatorios y administrativos	- Gestión de permisos y modificaciones de PMA. - Seguimiento ambiental. - Monitoreos exigidos por autoridad. - Reportes regulatorios. - Auditorías técnicas y ambientales.	- El valor del modelo no es solo técnico. - Justifican la ventaja no copiable basada en know-how regulatorio.

Rubro	Componentes	Impacto
Costos de aseguramiento y riesgo	- Seguros operativos. - Provisiones por fallos. - Redundancias técnicas. - Costos por indisponibilidad (penalizaciones contractuales).	- Explica por qué el modelo es relacional y no transaccional. - Son el “precio” de transferir riesgo al proveedor. - Afectan directamente las tarifas por disponibilidad. - Obligan a diseños robustos y confiables.

El modelo es intensivo en OPEX, pero controlable y predecible, lo que lo hace compatible con esquemas de pago por uso y financiamiento estructurado. Asimismo, redistribuye costos y riesgos: el cliente paga por certeza y desempeño; el proveedor asume complejidad a cambio de ingresos recurrentes. La estructura de costos del modelo es coherente con una lógica de servicio continuo, en la cual el proveedor internaliza CAPEX, OPEX y riesgos regulatorios para capturar valor a través de ingresos recurrentes, mientras el cliente transforma costos operativos inevitables en pagos previsibles asociados al desempeño.

Con relación a las métricas clave seleccionadas para este modelo basado en servicios, desempeño y contratos de largo plazo— requiere indicadores que reflejen valor creado, riesgo mitigado y desempeño sostenido en el tiempo a través de indicadores operativos, económicos y de desempeño ambiental y estratégico. Estas métricas seleccionadas tienen en cuenta criterios como: Capacidad de ser medidas de forma objetiva y recurrente, relevancia para la toma de decisiones del cliente de petróleo y gas (Oil & Gas), alineación con esquemas de pago por uso y desempeño y capacidad de evidenciar beneficios económicos y operativos frente a la línea base actual. Ver Tabla 32. Análisis de las métricas utilizadas.

Tabla 32.

Análisis de las métricas utilizadas

Métrica	Definición	Importancia	Alineación
Volumen de agua tratada y	La cantidad efectiva de agua de producción	Es la unidad base del modelo Pay-per-Use.	Propuesta de valor: uso productivo del agua

Métrica	Definición	Importancia	Alineación
reutilizada (barriles o m³)	tratada y puesta en condición de uso o reúso.	Refleja la capacidad real del sistema para transformar un pasivo en recurso. Conecta directamente la operación con los ingresos.	Monetización: pago por volumen Escalabilidad: mayor volumen = mayor captura de valor
Barriles de crudo habilitados o liberados por capacidad hídrica	Producción de crudo que puede mantenerse o incrementarse gracias a la disponibilidad de capacidad de manejo de agua.	Uno de los problemas estructurales del sector es la falta de capacidad hídrica, la cual limita la producción de crudo. Esta métrica demuestra que el modelo: no solo gestiona agua, protege y habilita ingresos core del negocio petrolero.	Propuesta de valor: continuidad operativa Palanca de valor: eficiencia operativa Argumento comercial: proteger producción es más valioso que tratar agua
Eficiencia del proceso de tratamiento	Mide la relación entre: agua alimentada al sistema y agua tratada que cumple especificaciones de calidad objetivo.	Impacta directamente el OPEX unitario. Define rentabilidad del esquema Pay-per-Use. Refleja robustez tecnológica y operativa.	Estructura de costos: OPEX dominante Transferencia de riesgo: proveedor optimiza la eficiencia Desempeño contractual
Ahorro en costos operativos frente a la línea base	Permite determinar Diferencia entre: costos actuales de disposición (reinyección, transporte, vertimiento) y costos bajo el modelo de reúso como servicio.	Principal argumento económico de adopción del modelo. Justifica el pago al proveedor sin incrementar el OPEX total del cliente.	Propuesta de valor: reducción de OPEX Monetización: precio $\leq$ costo evitado Decisión gerencial: neutral o positiva en la caja
Consumo energético por unidad de agua tratada	Mide la energía requerida para tratar cada m³ o barril de agua.	Impacta costos operativos. Se vuelve relevante en contextos ESG y de transición energética. Diferencia tecnologías viables de no viables a escala.	Palancas de valor: eficiencia operativa y sostenibilidad Riesgos futuros: costos energéticos
Estabilidad de la calidad del agua tratada	Capacidad del sistema para mantener parámetros objetivo dentro de rangos aceptables.	Permite reducir el riesgo regulatorio. Evita reprocesos y fallas operativas. Facilita aceptación por usuarios finales.	Gestión de riesgos Cumplimiento regulatorio Disponibilidad garantizada

Las métricas clave del modelo no solo permiten monitorear el desempeño operativo, sino que constituyen el lenguaje común entre proveedor y cliente, habilitando esquemas de pago por uso, transferencia de riesgo y generación de valor medible, lo cual es esencial para un modelo de negocio relacional y escalable en la industria petróleo y gas (Oil & Gas).

Aunque el Lean Canvas tradicional se centra en problema, solución, clientes, ingresos y costos, en el contexto de este trabajo —enfocada en la industria petróleo y gas (Oil & Gas) y en un entorno altamente regulado— resulta imprescindible complementar el análisis con elementos adicionales como la ventaja no copiable, las capacidades clave y los recursos estratégicos. Estos componentes permiten explicar no solo cómo funciona el modelo, sino por qué puede sostenerse y escalar en el tiempo frente a competidores y barreras de entrada.

La ventaja no copiable del modelo no se fundamenta exclusivamente en la tecnología empleada, sino en la combinación integrada de conocimiento operativo del negocio petróleo y gas (Oil & Gas), capacidad de orquestación técnica y regulatoria, experiencia acumulada en gestión de aguas industriales complejas y diseño de esquemas contractuales basados en desempeño. Esta integración genera barreras de imitación que van más allá de la adquisición de equipos o licencias, ya que requieren capacidades organizacionales, operativas y relacionales desarrolladas a lo largo del tiempo. En este sentido, las capacidades clave —como la adaptabilidad del modelo, la gestión activa del riesgo regulatorio y la estandarización operativa— y los recursos estratégicos —incluyendo el capital humano especializado, la infraestructura modular, el conocimiento de los procesos del cliente y las redes de aliados— actúan como habilitadores fundamentales del modelo de negocio, asegurando coherencia entre la propuesta de valor, la estructura de costos y los mecanismos de monetización previamente analizados.

La lógica de creación y captura de valor del modelo propuesto no es el desarrollo o venta de tecnología como fin en sí mismo, sino la transformación del agua de producción —tradicionalmente gestionada como un pasivo ambiental y operativo— en un servicio productivo, estructurado bajo esquemas contractuales de desempeño, uso y disponibilidad. Esta estructura visual, es base para el análisis financiero y la evaluación de madurez para el escalamiento que se desarrollan en los apartados siguientes.

5.5.8 Validación cuantitativa del caso de estudio

Con el fin de validar la viabilidad económica del modelo de negocio propuesto, con base en supuestos de alto nivel, se desarrolla un ejercicio de estudio representativo basado en condiciones típicas de operación del sector petróleo y gas (Oil & Gas) en Colombia. Este ejercicio permite evaluar la capacidad del modelo para generar valor y su competitividad frente a las prácticas actuales de gestión del agua de producción.

El ejercicio se construye a partir de supuestos de alto nivel fundamentados en rangos típicos de la industria, y busca validar la consistencia entre el diseño del modelo de negocio, las palancas de valor, los mecanismos de monetización y la estructura de costos definidos previamente. En este sentido, no sustituye un estudio de factibilidad específico, pero sí permite evaluar la lógica financiera del modelo bajo condiciones realistas.

5.5.8.1 Premisas del modelo

- Conversión de residuos en valor (Trash to cash): El residuo transformado como recurso. El agua de producción se valoriza como insumo/servicio.
- Tecnología como servicio: proveedor de soluciones (Solution Provider): el cliente paga por resultados, no por equipos, en otras palabras, el proveedor asume operación y cumplimiento.
- Ingresos principalmente por volumen tratado: pago por uso (Pay per use)
- Escenario de referencia: Campo maduro en tierra (Onshore) de hidrocarburos, bajo condiciones de: Producción de agua elevada y sostenida en el tiempo, costos recurrentes de disposición por reinyección y/o transporte, existencia de usuarios potenciales cercanos con demanda de agua no potable, marco regulatorio gestionable mediante Plan de Manejo Ambiental (PMA), permisos y esquemas piloto. De igual manera, este tipo de campos para la perspectiva de escalamiento, el

problema de generación de agua de producción se presenta de manera recurrente, lo que permite aplicar un modelo basado en servicios.

- El uso final seleccionado corresponde a agua para procesos industriales, caracterizado por, demanda continua y predecible, ausencia de contacto humano directo, requerimientos de calidad moderados. Este enfoque permite diseñar un tren de tratamiento estrictamente necesario, descartando tecnologías avanzadas de alto costo (osmosis inversa, evaporación), lo que reduce CAPEX, OPEX y riesgo operativo, condición crítica para el escalamiento.
- Se define un tren tecnológico modular compuesto por: Separación primaria de hidrocarburos, Tratamiento fisicoquímico. Filtración de pulido. Esta configuración presenta: TRL alto (≥ 6), operación probada en petróleo y gas, alta robustez frente a variabilidad, facilidad de estandarización y replicación.
- El caso de estudio se define considerando un campo petrolero ubicado en la región de los Llanos Orientales, el cual presenta condiciones típicas de producción de agua asociada a operaciones maduras con altos corte de agua. Las características principales del escenario se presentan a continuación:

Tabla 33.

Principales variables del modelo

Variable	Valor prototipado	Unidad	Justificación
Caudal tratado	25.000	Bbl/d	Campo onshore maduro
Días operación	365	Días/año	
Volumen anual tratado	9.125.000	Bbl/año	
Costo actual de disposición	\$ 1,5	USD/bbl	Reinyección/transporte
Tarifa variable Pay-per-Use	\$ 1,00	USD/Bbl	
Costo de tratamiento	\$ 0,6	USD/bbl	Tren físico–fisicoquímico
Tarifa servicio WaaS	\$ 1,0	USD/bbl	Costo evitado compartido
CAPEX inicial	\$ 4,5	MUSD	Planta modular estándar
Horizonte contractual	8	Años	Contrato largo plazo
Tasa de descuento	12%	%	
Impuesto	35%	%	
IPC	5.10%	%	

Nota: Estos valores no son cifras confidenciales, sino supuestos conservadores que permiten evaluar la lógica del modelo. La decisión final requeriría datos reales del operador y del usuario.

De igual manera se asume, que la tecnología no se vende, sino que se despliega y escala como servicio, reduciendo la barrera de adopción para el operador y el usuario final. La estructura de costos e ingresos estaría configurada de la siguiente manera:

Tabla 34.*Estructura de costos e ingresos*

Estructura de costos		Ingresos y monetización	
CAPEX (orden de magnitud)		Volumen anual tratado:	
Planta modular de 25.000 bpd: MUSD 4,5 M		25.000 bpd × 365 ≈ 9,1 MM bbl/año	
OPEX anual		Ingresos anuales:	
Tratamiento, operación y mantenimiento:		9,1 MM bbl × 1,0 USD/bbl ≈ USD 9,1 MM/año	
0,6 USD/bbl × 9,1 MM bbl/año ≈ USD 5,5 MM/año			

Se plantea, además, una revisión de escenarios, donde se sensibiliza tanto el costo de disposición, el costo de tratamiento y la tarifa pay per use.

Tabla 35. Variables sensibilizadas

Escenario	Costo disposición (USD/bbl)		Costo tratamiento (USD/bbl)		Tarifa Pay-per-Use (USD/bbl)
Conservador	\$	1,20	\$	0,70	\$ 0,80
Probable	\$	1,50	\$	0,60	\$ 1,00
Optimista	\$	2,00	\$	0,50	\$ 1,30

Al realizar los respectivos flujos de caja para cada escenario, (ver Apéndice D. Análisis financiero, bajo escenario conservador, probable y optimista), se obtiene los siguientes indicadores:

Tabla 36.*Resultados análisis de escenarios*

Escenario	VPN (USD)	EBITDA (prom)	TIR (%)	Payback
Conservador	\$ 4.712.696	\$ 5.655.599	40%	3 años
Probable	\$ 15.322.266	\$ 12.584.894	93%	2 años
Optimista	\$ 30.412.729	\$ 22.432.289	165%	1 años

La evaluación financiera del caso prototipado se realizó mediante un modelo de flujos de caja, incorporando escenarios conservador, probable y optimista. Los resultados muestran que el modelo presenta un VPN positivo y una TIR superior a la tasa de descuento en todos los escenarios analizados, lo que evidencia que el escalamiento de tecnologías de manejo de aguas de producción mediante esquemas de servicio es financieramente viable, incluso bajo supuestos conservadores. La mayor sensibilidad se encuentra en la tarifa del servicio. El OPEX afecta directamente el margen, pero no compromete la viabilidad estructural. Este comportamiento, se aprecia en modelos con alta utilización del activo, ingresos recurrentes y monetización basada en el costo evitado.

Estratégicamente, este tipo de modelo se fundamenta en la redistribución del valor generado, el cliente reduce su costo unitario, el proveedor captura un margen sostenible, se elimina CAPEX del cliente y se apalanca eficiencia operativa por lo que el análisis financiero desarrollado confirma que el modelo de negocio propuesto presenta una viabilidad económica sólida bajo condiciones representativas del sector petróleo y gas (Oil & Gas) en Colombia.

5.5.9. Validación madurez para la escalabilidad

Con el propósito de evaluar la capacidad real de escalamiento del modelo de negocio propuesto, se aplica el marco de Innovation Readiness Levels (IRL) desarrollado por KTH Royal Institute of Technology (KTH Innovation, s.f.). Este marco permite analizar la madurez de una innovación desde una perspectiva integral, considerando no solo su desarrollo tecnológico sino también su preparación comercial, organizacional, financiera y regulatoria (este último construido para complementar el modelo KTH) para su implementación en el mercado.

A diferencia de marcos centrados exclusivamente en la madurez tecnológica, el IRL reconoce que una innovación puede estar técnicamente lista y, al mismo tiempo, no estar

preparada para operar en un mercado real. En el caso de un modelo de negocio para la monetización del agua de producción, que combina componentes tecnológicos, contractuales y de mercado en un sector con alta complejidad regulatoria y esa distinción es especialmente relevante.

El marco KTH IRL, evalúa seis dimensiones interdependientes, cada una con una escala de madurez del 1 al 9: madurez de cliente (CRL), madurez tecnológica (TRL), madurez del modelo de negocio (BRL), madurez de propiedad intelectual (IPRL), madurez del equipo (TMRL) y madurez de financiación (FRL). Para efectos del presente análisis, se incorporó una dimensión adicional de madurez regulatoria, que no hace parte del marco estándar, pero resulta crítica en el contexto del sector petróleo y gas (Oil & Gas), dada la fragmentación normativa existente para el reúso del agua de producción en Colombia. Esta incorporación fue realizada por la autora siguiendo la misma estructura de niveles del marco original. Ver Apéndice E. Matriz de validación multidimensional de madurez para la innovación _IRL Model.

La evaluación se realizó con base en la esquematización del modelo desarrollado a lo largo de este trabajo, contrastando cada dimensión con los criterios de validación, herramientas y estrategias definidos en el Apéndice E. Los resultados se presentan en la Tabla 37. Evaluación multidimensional del modelo bajo el marco KTH IRL y se sintetizan en el esquema de Radar de la Figura 18. Perfil de madurez del modelo.

Tabla 37.

Evaluación multidimensional del modelo bajo el marco KTH IRL

Dimensión IRL	Nivel	Descripción	Evaluación
Madurez tecnológica - TRL	6	Para la implementación del modelo, se cuenta con tecnologías de tratamiento de agua (tren físico-químico con filtración) con TRL $\geq$ 6, demostradas en entornos relevantes del sector petróleo y gas (Oil & Gas). Presentan desempeño	ALTA: La solución está lista para operación comercial sin requerir desarrollos adicionales de I+D. Las tecnologías existentes en la organización, respaldadas por registros de propiedad intelectual,

Dimensión IRL	Nivel	Descripción	Evaluación
Madurez de cliente - CRL	4	robusto frente a la variabilidad del agua de producción, con posibilidad de estandarización y modularidad. El análisis TAM–SAM–SOM y la priorización sectorial evidencian existencia de demanda estructural de agua no potable, costos elevados de disposición que crean incentivos económicos, y usuarios potenciales identificables. La adopción depende de negociación contractual, confianza en el esquema de servicio y generación de referencias locales mediante pilotos.	constituyen el principal habilitador del modelo. MEDIA: El mercado existe y es accesible, pero el escalamiento requiere validación progresiva y construcción de confianza. La necesidad está confirmada desde múltiples fuentes sectoriales, pero aún no se cuenta con acuerdos formales con clientes.
Madurez del modelo de negocio - BRL	3	El modelo está estructurado en formato Canvas adaptado con doce bloques, con definición de mercados objetivo, análisis competitivo y estimaciones de TAM, SAM y SOM. Genera ingresos recurrentes y permite contratos de largo plazo. La principal limitación es la necesidad de estructurar capacidades comerciales especializadas y adaptar el modelo a las particularidades de cada cliente.	MEDIA: El modelo de negocio está conceptualmente estructurado y documentado, pero requiere avanzar hacia proyecciones financieras validadas externamente y casos de prueba en escenarios reales de negocio para alcanzar el siguiente nivel de madurez.
Madurez de propiedad intelectual - IPRL	5	Se tienen registros de propiedad intelectual asociados a las tecnologías que apalancan el modelo, incluyendo derechos de autor y secretos industriales. Existe una estrategia inicial de protección de activos intangibles relevantes para el modelo de negocio.	MEDIA-ALTA: La protección de activos intangibles está en proceso de consolidación. Los registros existentes constituyen una barrera de entrada para competidores y dan soporte a la propuesta de valor diferenciada del modelo.
Madurez organizacional - TMRL	4	El escalamiento del modelo requiere capacidades de operación 24/7, gestión de contratos basados en desempeño, relacionamiento con autoridades ambientales y coordinación entre múltiples actores (operador O&G, usuario, proveedor). Se cuenta con el equipo técnico base, pero se identifican brechas en perfiles comerciales y de estructuración financiera.	MEDIA: La organización debe evolucionar hacia un perfil de operador de servicios, posiblemente mediante alianzas estratégicas con actores especializados en operación, comercialización y financiamiento del modelo.

Dimensión IRL	Nivel	Descripción	Evaluación
Madurez de financiación - FRL	3	El análisis financiero preliminar muestra VAN positivo y TIR superior al costo de capital, payback corto bajo contratos de largo plazo y generación de flujos predecibles. La inversión inicial requiere estructuras de financiamiento adecuadas y se beneficia de contratos firmes antes del cierre financiero.	MEDIA: El caso es financiable bajo esquemas de project finance o contratos WaaS. Se requiere formalizar mecanismos de financiamiento y obtener validación externa de las proyecciones financieras para consolidar esta dimensión.
Madurez regulatoria* - RRL	4	El análisis regulatorio muestra que el reúso del agua de producción es viable dentro del marco normativo actual. No existe una norma específica que lo habilite de forma explícita, por lo que la implementación depende de PMA, permisos caso a caso y esquemas piloto. El modelo es legalmente viable, pero requiere gestión regulatoria activa y acompañamiento institucional.	MEDIA: La preparación regulatoria es suficiente para iniciar proyectos, pero no está completamente estandarizada para escalamiento masivo. Las restricciones aplican principalmente para consumo humano directo, fuera del alcance del modelo en su fase inicial.

Nota: Elaboración propia con base en KTH Innovation (s.f.) y Apéndice E.

* La dimensión de madurez regulatoria no hace parte del marco KTH IRL estándar. Fue incorporada por la autora en atención a las particularidades normativas del sector petróleo y gas (Oil & Gas), siguiendo la misma estructura de niveles del marco original.

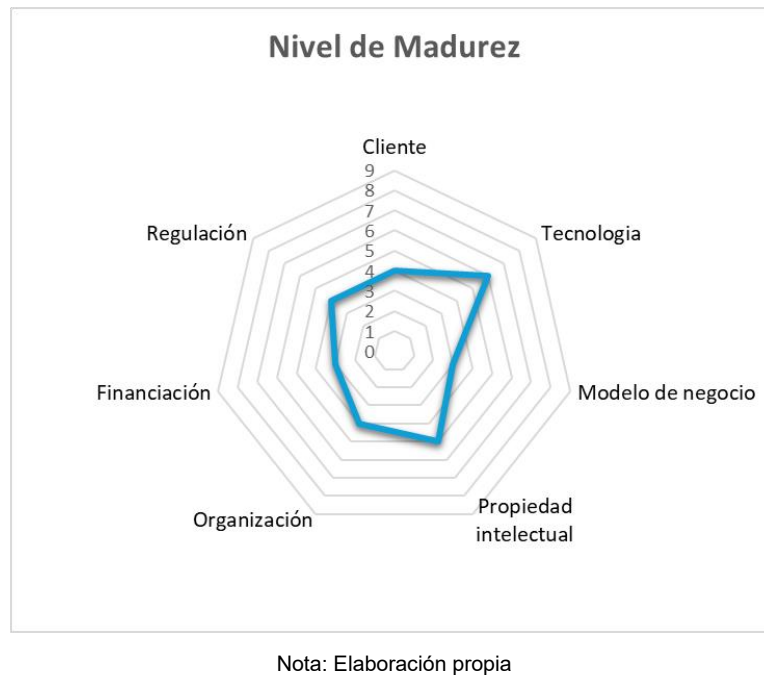
Como resultado de la evaluación realizada, el perfil de madurez resultante es heterogéneo entre dimensiones, lo cual es característico de modelos de negocio en fase de estructuración conceptual. Las dimensiones con mayor nivel de madurez son la tecnológica (TRL 6) y la de propiedad intelectual (IPRL 5), mientras que el modelo de negocio y la financiación (BRL 3 y FRL 3) constituyen los factores limitantes del escalamiento en esta fase.

La madurez tecnológica (TRL) es el activo más consolidado del modelo. Disponer de tecnologías propias con TRL ≥ 6 , demostradas en entornos relevantes del sector, elimina una de las principales barreras de entrada para este tipo de iniciativas y posiciona a la organización con una ventaja técnica concreta y difícil de replicar en el corto plazo. La propiedad intelectual (IPR) en nivel 5 refuerza esa ventaja. Los registros existentes, como derechos de autor, secretos industriales y otros activos de conocimiento,

constituyen una barrera de protección que soporta la propuesta de valor diferenciada y reduce el riesgo de imitación por parte de competidores.

Figura 18.

Perfil de madurez del modelo



La madurez de cliente (CRL), en nivel 4, indica que el modelo ha avanzado más allá de la hipótesis: la necesidad está documentada en múltiples fuentes sectoriales y los segmentos objetivo están identificados con perfiles básicos. El paso siguiente en esta dimensión es establecer relaciones formales con clientes potenciales que permitan validar la propuesta de valor en condiciones reales, idealmente a través de un proyecto piloto.

Las dimensiones de modelo de negocio (BRL 3) y financiación (FRL 3) son las que marcan el límite actual de madurez. En BRL, el modelo está estructurado y documentado, pero aún no cuenta con proyecciones financieras validadas con datos de mercado ni con escenarios de prueba reales. En FRL, la lógica de generación de ingresos está definida

y las métricas financieras preliminares son favorables, pero no se ha avanzado hacia la formalización de mecanismos de financiamiento ni hacia la validación externa de la rentabilidad proyectada.

La madurez organizacional (TMRL 4) y regulatoria (RRL 4) reflejan condiciones que son gestionables. La organización tiene las bases técnicas para implementar el modelo, pero requiere incorporar perfiles comerciales y de estructuración financiera, y desarrollar una estrategia de relacionamiento regulatorio que permita avanzar de la viabilidad caso a caso hacia esquemas más estandarizados.

En consecuencia, para determinar el nivel IRL global del modelo, se establece a partir de la integración de las siete dimensiones, ubicando el modelo en un nivel IRL 3, determinado por las dimensiones de menor madurez, esto es: modelo de negocio y financiación, que actúan como factores limitantes del escalamiento en esta fase.

Este nivel corresponde a una etapa en la que el modelo está conceptualmente estructurado, los mercados objetivo están definidos, las bases tecnológicas y de propiedad intelectual están consolidadas, y la viabilidad regulatoria está confirmada para los usos previstos; pero aún se requiere validación en condiciones reales de mercado para avanzar. Este resultado es coherente con el alcance del presente trabajo, cuyo objetivo es estructurar y validar conceptualmente el modelo de negocio, no ejecutar su implementación operativa. Un IRL 3, en este contexto no representa una limitación del modelo sino una descripción honesta de su estado actual y un punto de partida claro para su desarrollo posterior.

Como resultado de lo anterior, se pueden establecer las implicaciones que afectarían el escalamiento, puesto que el análisis de IRL no solo ubica el modelo en su nivel actual, si no que traza el camino para avanzar de IRL 3 a niveles superiores. Bajo este escenario descrito en el documento, las acciones prioritarias son tres:

La primera, es desarrollar proyecciones financieras detalladas con validación externa, que permitan demostrar la viabilidad económica del modelo con datos reales y no solo con estimaciones propias. Esto es condición necesaria para acceder a instrumentos de financiamiento como project finance o esquemas WaaS.

La segunda, es establecer al menos una relación formal con un cliente potencial que permita probar la propuesta de valor en un contexto real, aunque sea en formato de piloto o prueba de concepto. Un piloto bien diseñado permitirá validar simultáneamente las dimensiones de mercado, regulación y operación.

La tercera, es fortalecer las capacidades organizacionales mediante la incorporación de perfiles especializados o la formalización de alianzas estratégicas con actores que complementen las competencias técnicas ya existentes.

La solidez tecnológica y la propiedad intelectual existente son condiciones favorables que aceleran ese proceso. El modelo tiene bases reales para escalar, lo que falta es la validación en campo que convierta la estructura conceptual en evidencia de mercado.

6. Conclusiones

- El agua de producción representa un recurso hídrico de escala significativa con potencial de valorización real. El análisis TAM–SAM–SOM, confirma que existe un mercado global de gran magnitud, con una participación relevante en América Latina y una oportunidad concreta en Colombia, especialmente en campos maduros con alto corte de agua. Paralelamente, el modelo tradicional de disposición genera una presión económica que actúa como incentivo estructural para la transición hacia esquemas de reúso: los costos evitados de disposición, combinados con los ingresos potenciales por venta de agua tratada, configuran una lógica de negocio con fundamento económico sólido.
- No todos los sectores demandantes de agua representan oportunidades equivalentes. El análisis integrado de demanda hídrica, costos de suministro y condiciones regulatorias permite concluir que los sectores industriales, energético e infraestructura ofrecen las mejores condiciones iniciales para el reúso, por su combinación de alta demanda, tolerancia a calidades no potables y menor riesgo regulatorio. El sector agrícola, aunque concentra la mayor demanda global, enfrenta restricciones técnicas y normativas que limitan su viabilidad en el corto plazo. Esta distinción es crítica: la viabilidad del modelo no depende solo del volumen de mercado disponible, sino de la interacción entre demanda, costo de tratamiento y condiciones de entorno.
- La escalabilidad de las soluciones de tratamiento no está determinada por el nivel de sofisticación tecnológica, sino por la capacidad de operar de forma robusta, estable y replicable en condiciones reales. Las tecnologías convencionales, como separación primaria y flotación, demuestran el mayor potencial de escalamiento por su baja complejidad operativa, menores requerimientos de inversión y alta tolerancia a la variabilidad del agua de producción. Las tecnologías avanzadas como la ósmosis

inversa o la desalación térmica, aun con alto desempeño, presentan limitaciones de costo y sensibilidad operativa que restringen su uso en implementaciones a gran escala. Existe una relación inversa entre complejidad tecnológica y escalabilidad que debe orientar las decisiones de portafolio: el criterio relevante no es el máximo desempeño técnico, sino la robustez, modularidad y replicabilidad de la solución.

- Con relación al marco regulatorio colombiano, este no prohíbe el reúso del agua de producción, pero tampoco lo habilita explícitamente. Este vacío normativo no es un obstáculo insalvable, sino una condición que debe gestionarse activamente. El reúso puede habilitarse mediante la articulación de instrumentos ambientales existentes (modificación del Plan de manejo ambiental - PMA, ajuste de concesiones, permisos operativos específicos o proyectos piloto) dependiendo del alcance y uso final del proyecto. El principal riesgo del modelo no es técnico, sino institucional, logístico y regulatorio. La escalabilidad depende más de contratos, permisos y relacionamiento con autoridades que del desempeño de la tecnología seleccionada. Esta conclusión reorienta las prioridades de implementación: antes de optimizar el proceso de tratamiento, es necesario asegurar la ruta regulatoria y la estructura contractual.
- El modelo de negocio esquematizado se estructura a partir de la combinación deliberada de patrones probados del Business Model Navigator (Trash to Cash, Solution Provider, Pay per Use, Availability Based y Performance Based) seleccionados con base en criterios de compatibilidad sectorial, escalabilidad, transferencia de riesgo y viabilidad económica. Esta combinación responde a la lógica de que los modelos más robustos emergen de la recombinación de patrones existentes adaptados al contexto específico. La monetización se estructura principalmente sobre el costo evitado de disposición como palanca de valor central, complementada por ingresos por venta de agua tratada bajo contratos de largo plazo. Esta doble fuente de valor, reducción de costos para el operador de hidrocarburos e ingresos por suministro para sectores demandantes, es lo que hace al modelo financieramente viable y diferenciado.

- El ejercicio de validación cuantitativa, confirma que el modelo de negocio es financieramente viable bajo condiciones representativas del sector petróleo y gas (Oil & Gas) en Colombia, arrojando VPN positivo y una TIR superior a la tasa de descuento del 12% en todos los casos, con periodos de recuperación de entre uno y tres años, donde para un escenario conservador, con una tarifa de USD 0,80/bbl y un costo de tratamiento de USD 0,70/bbl, genera un VPN de USD 4,7 millones y una TIR del 40%, lo que demuestra que la viabilidad del modelo no depende de condiciones optimistas sino de la lógica estructural del negocio: ingresos recurrentes por volumen tratado, monetización basada en el costo evitado de disposición y eliminación del CAPEX para el cliente. El ejercicio no sustituye un estudio de factibilidad específico, pero sí demuestra que existe un margen económico estructural que justifica avanzar hacia proyectos piloto en condiciones reales.
- La evaluación bajo el marco KTH Innovation Readiness Level ubica el modelo en un nivel IRL 3, determinado por las dimensiones de modelo de negocio y financiación como factores limitantes actuales. Este resultado es coherente con el alcance del trabajo, puesto que el modelo está conceptualmente estructurado, con bases tecnológicas sólidas (TRL 6) y propiedad intelectual consolidada (IPRL 5), pero requiere validación en condiciones reales de mercado para avanzar. Los retos organizacionales y regulatorios identificados no comprometen la viabilidad del modelo; definen el camino de implementación progresiva. El desarrollo de al menos un proyecto piloto es el siguiente paso crítico para avanzar simultáneamente en las dimensiones de mercado, regulación y operación.
- El modelo de negocio diseñado demuestra que el agua de producción puede transitar de pasivo ambiental a activo económico mediante la integración coherente de componentes técnicos, regulatorios, económicos y operativos. El escalamiento de esta oportunidad no depende de esperar condiciones perfectas (regulación explícita, tecnología óptima o mercado maduro) sino de construir progresivamente las condiciones para la implementación, apoyándose en las fortalezas existentes:

tecnología probada, propiedad intelectual, conocimiento del sector y una propuesta de valor con fundamento económico real y visión de largo plazo.

7. Recomendaciones

- Desarrollar un proyecto piloto como prioridad inmediata, es la acción con mayor retorno sobre la inversión en esta etapa. Permite validar simultáneamente el desempeño tecnológico, la viabilidad comercial y la ruta regulatoria, convirtiendo el modelo conceptual en evidencia de mercado. Se recomienda seleccionar un campo maduro en los Llanos Orientales con un cliente industrial identificado en cercanía geográfica.
- Gestionar la ruta regulatoria antes de escalar, puesto que la incertidumbre regulatoria es un fuerte limitante del modelo. Se recomienda iniciar una consulta formal ante la autoridad ambiental competente para definir la vía de habilitación más expedita (modificación del Plan de manejo ambiental - PMA o esquema piloto) y construir un expediente técnico estándar replicable que reduzca los tiempos y costos de tramitación en proyectos futuros.
- Fortalecer las capacidades comerciales y de estructuración financiera, dado que se tiene una adecuada base tecnológica y el conocimiento sectorial. La brecha identificada está en los perfiles comerciales y de estructuración financiera necesarios para cerrar contratos de largo plazo y acceder a instrumentos de financiamiento como project finance o esquemas de agua como servicio (WaaS). Se recomienda incorporar estos perfiles o formalizar alianzas estratégicas con actores especializados.
- Estructurar el modelo financiero con validación externa, dado que las proyecciones financieras actuales se basan en estimaciones propias. Para acceder a financiamiento y generar confianza en clientes potenciales, se recomienda desarrollar un modelo financiero detallado con validación de un tercero independiente, que incluya análisis de sensibilidad bajo distintos escenarios de precio del agua y costos de disposición.

- Posicionarse en la construcción de política pública, puesto que la ausencia de regulación explícita es también una oportunidad. La organización, con el conocimiento acumulado en este trabajo, está en condiciones de participar activamente en mesas técnicas de Ministerio de Ambiente y Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH) para contribuir a la construcción de un marco normativo específico para el reúso del agua de producción. Esto no solo reduce la incertidumbre para el modelo propio, sino que genera valor sectorial y posicionamiento institucional.
- Aplicar la guía metodológica IRL como instrumento de seguimiento puesto que en el Apéndice E. Matriz de validación multidimensional de madurez, se lista los diferentes niveles y con ello se puede utilizar como instrumento de seguimiento periódico del avance del modelo. Se recomienda realizar una evaluación formal cada seis meses para identificar avances por dimensión y ajustar las prioridades de acción en consecuencia.

8. Referencias Bibliográficas

- Abdelhamid, C., Latrach, A., Rabiei, M., & Venugopal, K. (2025). Produced water treatment technologies: A review. *Energies*, 18(1), 63. <https://doi.org/10.3390/en18010063>
- Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH). (2019). Lineamientos ambientales para la exploración y producción de hidrocarburos. https://www.anh.gov.co/documents/ambiental/lineamientos_ambientales_e_p.pdf
- Agencia Nacional de Hidrocarburos. (2024). *Datos y estadísticas*. ANH. <https://www.anh.gov.co/es/operaciones-y-regal%C3%ADas/datos-y-estadisticas/>
- Alzahrani, S., & Mohammad, A. W. (2014). Challenges and trends in membrane technology implementation for produced water treatment: A review. *Journal of Water Process Engineering*, 4, 107–133. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2014.09.007>
- Amadi-Echendu, J. E., & Rasetlola, R. T. (2011). Technology commercialization factors, frameworks and models. First International Technology Management Conference, 144–148. <https://doi.org/10.1109/itmc.2011.5995939>
- Arley, Daymer & Garcia Galindo, Daymer. (2023). Technology-Driven Business Models: A Literature Review and Trends Analysis. DOI: [10.13140/RG.2.2.14816.49922](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.14816.49922)
- Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA). (2015). Guía para la gestión ambiental en proyectos de hidrocarburos. https://www.anla.gov.co/documentos/guia_gestion_ambiental_hidrocarburos.pdf
- Baghdadi S , Khamseh A , Madani SH (2024), "Un modelo independiente de comercialización de tecnología en la industria del petróleo y el gas: un enfoque de teoría fundamentada". *Revista de Gestión de Políticas Científicas y Tecnológicas*, vol. 15, n.º 6, págs. 1426-1454, doi: <https://doi.org/10.1108/JSTPM-07-2022-0109>
- Blind, K. (2012). The influence of regulations on innovation: A quantitative assessment for OECD countries. *Research Policy*, 41(2), 391–400. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2011.08.008>

- Bustinza, O. F., Opazo-Basaez, M., & Tarba, S. Y. (2022). Servitization innovation: A systematic review, integrative framework, and future research directions. *Technovation*. <https://doi.org/10.1016/j.technovation.2022.102641>
- Cao, J., Monroe, S., Sun, H., & Li, L. (2015). *Cost-efficient and improved treatment technology for produced water reuse*. (SPE-174792-MS). Society of Petroleum Engineers. <https://doi.org/10.2118/174792-MS>
- Clark, C. E., & Veil, J. A. (2021). *U.S. produced water volumes and management practices in 2021*. Groundwater Protection Council. https://www.gwpc.org/wp-content/uploads/2021/09/2021_Produced_Water_Volumes.pdf
- Congreso de la República de Colombia. (1993). Ley 99 de 1993. Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reorganiza el Sector Público encargado de la gestión del medio ambiente y se organiza el Sistema Nacional Ambiental (SINA). https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma_pdf.php?i=297
- Creswell, J. W., & Plano Clark, V. L. (2018). *Designing and conducting mixed methods research* (3rd ed.). SAGE Publications.
- Damodaran, A. (2012). *Investment valuation: Tools and techniques for determining the value of any asset* (3rd ed.). John Wiley & Sons
- DANE (2022). *Cuenta Ambiental y Económica de Flujos de Agua*. https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/pib/ambientales/cuentas_ambientales/cuenta-del-agua/Boletin-tecnico-cuenta-ambiental-y-economica-del-agua-2020p.pdf
- Dawoud, M. A., Sefelnasr, A., Ebraheem, A. A., Alnaimat, F., Mathew, B., Hamouda, M. A., Hassan, A. A., Zubari, W. K., & Sherif, M. (2024). *Produced water treatment and reuse options: Alternatives for sustainable water resources*. (SPE-218959-MS). Society of Petroleum Engineers. <https://doi.org/10.2118/218959-MS>
- Ebenezer T. Igunnu, George Z. Chen, *Tecnologías de tratamiento de aguas residuales de producción*, *International Journal of Low-Carbon Technologies*, Volumen 9, Número 3, septiembre de 2014, Páginas 157–177, <https://doi.org/10.1093/ijlct/cts049>

- Ebneyamini, S., & Bandarian, R. (2019). Explaining the role of technology in the dynamics of the players business models in the global oil playground. *International Journal of Energy Sector Management*, 13(3), 556–572. <https://doi.org/10.1108/ijesm-09-2018-0004>
- Ecopetrol. (s.f.). *Eficiencia operativa en el manejo del agua*. <https://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/Home/sostecnibilidad/ambiental/gestion-integral-del-agua/manejo-agua>
- European Commission. (2025). Expansion of ideas: Using technology readiness levels to assess technological progress in Horizon Europe. Publications Office of the European Union. <https://data.europa.eu/doi/10.2777/1580173>
- Fakhru'l-Razi, A., Pendashteh, A., Abdullah, L. C., Biak, D. R. A., Madaeni, S. S., & Abidin, Z. Z. (2009). Review of technologies for oil and gas produced water treatment. *Journal of Hazardous Materials*, 170(2–3), 530–551. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.05.044>
- Farsi, J. Y., & Kalatehaei, Z. (2013). Factors affecting selection of technology commercialisation strategies: the impact of agency theory. *International Journal of Technology, Policy and Management*, 13(2), 170. <https://doi.org/10.1504/ijtpm.2013.053096>
- Folio, E., Ogunsola, O., Melchert, E., & Frye, E. (2018). *Produced water treatment R&D: Developing advanced, cost-effective treatment technologies*. Unconventional Resources Technology Conference (URTeC) (URTeC 2886718). <https://doi.org/10.15530/urtec-2018-2886718>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2021). The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture: Systems at breaking point (SOLAW 2021). FAO. <https://www.fao.org/documents/card/en/c/cb7654en>
- Frijns, J., Smith, H. M., & Makropoulos, C. (2024). Enabling the uptake of circular water solutions. *Water Policy*, 26(1), 94–110. <https://doi.org/10.2166/wp.2024.167>
- Fundación Aquae. (s.f.). El agua en 2050: escasez en el futuro. <https://www.fundacionaquae.org/el-agua-en-2050/>
- Gangwar, A., Rawat, S., Rautela, A. *et al.* Avances actuales en tecnologías de tratamiento de aguas residuales: una perspectiva de análisis tecnoeconómico y

- evaluación del ciclo de vida. *Environ Dev Sustain* **27**, 15077–15111 (2025). <https://doi.org/10.1007/s10668-024-04558-w>
- Gassmann, O., Frankenberger, K., & Csik, M. (2014). *The Business Model Navigator: 55 Models That Will Revolutionise Your Business*. Pearson Education.
- Gassmann, O., Frankenberger, K., & Sauer, R. (2016). *Exploring the field of business model innovation*. Springer. <https://link-springer-com.bibliotecavirtual.uis.edu.co/book/10.1007/978-3-319-41144-6>
- Groundwater Protection Council. (2019). *Produced water report: Regulations, current practices, and research needs*. GWPC. [https://www.gwpc.org/wp-content/uploads/2019/06/Produced Water Full Report Digital Use.pdf](https://www.gwpc.org/wp-content/uploads/2019/06/Produced-Water-Full-Report-Digital-Use.pdf)
- Harkouss, R., Jaafar, A., & Ghannam, Z. (2024). Membrane-based technologies: A comprehensive review for efficient and environmentally friendly treatment of produced water in oil and gas industries. *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*, 12(4), 1120527. <https://doi.org/10.13044/j.sdewes.d12.0527>
- Harkouss, R., Jaafar, A., & Ghannam, Z. (2024). Membrane-based technologies: A comprehensive review for efficient and environmentally friendly treatment of produced water in oil and gas industries. *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*, 12(4), 1120527. <https://doi.org/10.13044/j.sdewes.d12.0527>
- Héder, M. (2017). From NASA to EU: The evolution of the TRL scale in public sector innovation. *The Innovation Journal*, 22(2), 1–23. https://eprints.sztaki.hu/9204/1/Heder_1_3269345_ny.pdf
- Huang, L., & Xu, Y. (2010). A approach to identify the commercialization potential of new technology. 2010 International Conference on Education and Management Technology, 329–333. <https://doi.org/10.1109/icemt.2010.5657645>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2022). Estudio Nacional del Agua. https://www.andi.com.co/Uploads/ENA%202022_compressed.pdf

International Atomic Energy Agency. (2003). *Radiation protection and the management of radioactive waste in the oil and gas industry* (Safety Reports Series No. 34, STI/PUB/1171). IAEA. https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1171_web.pdf

International Energy Agency (IEA). (2020). *Energy Technology Perspectives 2020*. IEA. <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2020>

IPIECA. (2020). *Reuse of produced water from the onshore oil and gas industry: Evaluating opportunities and challenges*. IPIECA. <https://www.ipieca.org/resources/good-practice/water-management-in-the-oil-and-gas-industry>

Khalil Zadeh, N., Khalilzadeh, M., Mozafari, M., Vasei, M., & Amoei Ojaki, A. (2017). Challenges and difficulties of technology commercialization – a mixed-methods study of an industrial development organization. *Management Research Review*, 40(7), 745–767. <https://doi.org/10.1108/mrr-08-2016-0192>

Khammo, M., Obedkov, A., Aljarwan, R., Alhebshi, M., Alnuaimi, H., Almri, M. y A. Hassan. «Gestión avanzada de aguas residuales de producción en la industria del petróleo y el gas: un análisis exhaustivo de tecnologías de tratamiento de vanguardia». Ponencia presentada en GOTECH, Dubái, Emiratos Árabes Unidos, mayo de 2024. doi: <https://doi.org/10.2118/219100-MS>

KTH Innovation. (2022). *KTH Innovation Readiness Level™ model: User guide*. KTH Royal Institute of Technology. https://kthinnovationreadinesslevel.com/wp-content/uploads/sites/9/2022/03/KTH-IRL-user-guide_A-1.pdf

KTH Innovation. (s.f.). *KTH Innovation Readiness Level™*. UIC Sweden. <https://uic.se/wp-content/uploads/2023/05/Bilaga-2-IRL-information.pdf>

Liao, B., Zeng, X., Ling, Z., Zhao, S., Li, B., & Han, X. (2025). Recent advances in zero discharge treatment technologies for desulfurization wastewater in coal-fired power plants: A mini-review. *Processes*, 13(4), 982. <https://doi.org/10.3390/pr13040982>

Lusinier, N., Seyssiecq, I., Sambusiti, C., Jacob, M., Lesage, N., & Roche, N. (2019). Biological treatments of oilfield produced water: A comprehensive review. *SPE Journal*, 24(5), 2135–2147. <https://doi.org/10.2118/195677-PA>

- Maire, F., Alblooshi, J. R., Ali, A. E., Littler, D., & De Plaa, P. J. C. (2024). *Integrating water management life cycle assessment in upstream oil and gas: A pathway to enhanced waterflood*. (SPE-218977-MS). Society of Petroleum Engineers. <https://doi.org/10.2118/218977-MS>
- Market Data Forecast. (2025). Produced water treatment market size, share, growth, and industry analysis (2025–2033). <https://www.marketdataforecast.com/market-reports/produced-water-treatment-market>
- Martín-Peña, M. L., & Bigdeli, A. (2016). Servitization: Academic research and business practice. *Universia Business Review*. <https://journals.ucjc.edu/ubr/article/download/1843/1813/5667>
- Maurya, A. (2012). *Running lean: Iterate from plan A to a plan that works* (2nd ed.). O'Reilly Media. <https://belinitiative.com/wp-content/uploads/2021/07/Ash-Maurya-Running-Lean-Iterate-from-Plan-A-to-a-Plan-That-Works.pdf>
- Mazzucato, M., & Pérez, C. (2015). *Innovation as growth policy: The challenge for Europe* (SWPS Working Paper No. 2014-13). University of Sussex. <https://scispace.com/pdf/innovation-as-growth-policy-the-challenge-for-europe-912tltja9g.pdf>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). Resolución 0631 de 2015. Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales y alcantarillado público. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/10/resolucion-0631-de-2015.pdf>
- NASA Jet Propulsion Laboratory (JPL). (2015, junio 16). *Study: Third of big groundwater basins in distress*. <https://www.jpl.nasa.gov/news/study-third-of-big-groundwater-basins-in-distress/>
- Nath, F., Chowdhury, M. O. S., & Rhaman, M. M. (2023). Navigating produced water sustainability in the oil and gas sector: A critical review of reuse challenges, treatment technologies, and prospects ahead. *Water*, 15(23), 4088. <https://doi.org/10.3390/w15234088>
- National Aeronautics and Space Administration (NASA). (2012). Technology readiness levels definitions. https://esto.nasa.gov/files/trl_definitions.pdf

- National Research Council. (2013). *Induced seismicity potential in energy technologies*. National Academies Press.
[https://yosemite.epa.gov/oa/eab_web_docket.nsf/Attachments%20By%20ParentFilingId/E928E3CEE612862D85257CD9006625A4/\\$FILE/Tab%20J1%20NAS%20Induced%20Seismicity%201%20of%205.pdf](https://yosemite.epa.gov/oa/eab_web_docket.nsf/Attachments%20By%20ParentFilingId/E928E3CEE612862D85257CD9006625A4/$FILE/Tab%20J1%20NAS%20Induced%20Seismicity%201%20of%205.pdf)
- Neff, J. M., Lee, K., & DeBlois, E. M. (2011). Produced water: Overview of composition, fates, and effects. En K. Lee & J. Neff (Eds.), *Produced water* (pp. 3–54). Springer.
https://doi.org/10.1007/978-1-4614-0046-2_1
- Ngamcachonkulkid, S., Chutima, P., & Chuaykoblap, S. (2020). Developing a commercialisation model for innovative products and processes in a petroleum firm. *International Journal of Process Management and Benchmarking*, 10(4), 439. <https://doi.org/10.1504/ijpmb.2020.110283>
- Nyiekue, F.E., Kabutey, F.T., Kyei, S.K., & Essandoh, H.M.K. (2024). *Oilfield produced water and constructed wetlands technology: a comprehensive review*. *Water Reuse*, Vol. 14, No. 4, pp. 481–xxx. IWA Publishing.
- OECD. (2011). *Financing water resources management: An OECD perspective*. Organisation for Economic Co-operation and Development.
<https://one.oecd.org/document/ENV/EPOC/WPWE%282011%294/FINAL/En/pdf>
- OECD. (2011). *Regulatory policy and governance: Supporting economic growth and serving the public interest*. OECD Publishing.
<https://doi.org/10.1787/9789264116573-en>
- OECD. (2011). *Towards green growth*. OECD Publishing.
https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2011/05/towards-green-growth_g1g1342a/9789264111318-en.pdf
- OECD. (2015). *Innovation policies for inclusive growth*. OECD Publishing.
https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2015/05/innovation-policies-for-inclusive-growth_g1g50514/9789264229488-en.pdf
- Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). (2016). *Water Governance in Cities*. OECD Publishing.
https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2016/02/water-governance-in-cities_g1g63c3e/9789264251090-en.pdf

- Organization for Economic Co-operation and Development (OECD). (2016). Water Governance in Cities. OECD Publishing. <https://www.oecd.org/water/governance/>
- Osterwalder, A., & Pigneur, Y. (2010). Business model generation: A handbook for visionaries, game changers, and challengers. John Wiley & Sons. [https://mymyeo.com/wp-content/uploads/2022/12/Business-model-generation- -a-handbook-for-visionaries-game-changers-and-challengers-PDFDrive-1.pdf](https://mymyeo.com/wp-content/uploads/2022/12/Business-model-generation--a-handbook-for-visionaries-game-changers-and-challengers-PDFDrive-1.pdf)
- Porter, M. E. (2008). The five competitive forces that shape strategy. Harvard Business Review, 86(1), 78–93. https://www.researchgate.net/publication/6149113_The_Five_Competitive_Forces_That_Shape_Strategy
- Porter, M. E., & van der Linde, C. (1995). Toward a new conception of the environment–competitiveness relationship. Journal of Economic Perspectives, 9(4), 97–118. <https://doi.org/10.1257/jep.9.4.97>
- República de Colombia. (1974). Decreto 2811 de 1974. Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente. https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma_pdf.php?i=1551
- República de Colombia. (2010). Decreto 3930 de 2010. Por el cual se reglamenta parcialmente el uso del recurso hídrico y los vertimientos. https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma_pdf.php?i=41465
- República de Colombia. (2015). Decreto 1076 de 2015. Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/10/Decreto-1076-de-2015.pdf>
- Richey, A. S., Thomas, B. F., Lo, M.-H., Reager, J. T., Famiglietti, J. S., Voss, K., Swenson, S., & Rodell, M. (2015). *Quantifying renewable groundwater stress with GRACE*. Water Resources Research, 51(7), 5217–5238. <https://doi.org/10.1002/2015WR017349>
- Rodríguez, D. J., Serrano, H. A., Delgado, A., Nolasco, D., & Saltiel, G. (2020). *From waste to resource: Shifting paradigms for smarter wastewater interventions in Latin America and the Caribbean*. World Bank. <https://openknowledge.worldbank.org/entities/publication/94fe625b-75ef-590c-8019-24116cddb2ce>

- Saaty, T. L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation*. McGraw-Hill.
- Saunders, M., Lewis, P., & Thornhill, A. (2019). *Research methods for business students* (8th ed.). Pearson Education.
- Skalny, M., & Smol, M. (2026). Circular economy business models for reclaimed water: Insights from the Baltic Sea Region. *Desalination and Water Treatment*. <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2025.101622>
- Statista. (2025). Oil industry in Latin America – statistics & facts. <https://www.statista.com/topics/5772/oil-industry-in-latin-america/>
- Teece, D. J. (2007). Explicating dynamic capabilities: The nature and microfoundations of (sustainable) enterprise performance. *Strategic Management Journal*, 28(13), 1319–1350. <https://doi.org/10.1002/smj.640>
- Teece, D. J. (2010). Business models, business strategy and innovation. *Long Range Planning*, 43(2–3), 172–194. <https://doi.org/10.1016/j.lrp.2009.07.003>
- The Global Economy. (2024). Oil production in South America. https://www.theglobaleconomy.com/rankings/oil_production/South-America/
- U.S. Department of Energy. (2015). *Technology readiness assessment guide* (DOE G 413.3-4A, Change 1). Office of Management. <https://www2.lbl.gov/dir/assets/docs/TRL%20guide.pdf>
- U.S. Energy Information Administration. (2024). *What countries are the top producers and consumers of oil?* EIA. <https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.php?id=709&t=6>
- U.S. Environmental Protection Agency (EPA). (2012). Guidelines for Water Reuse EPA. <https://www.epa.gov/waterreuse>
- U.S. Environmental Protection Agency. (2012). Class II oil and gas related injection wells. EPA. <https://www.epa.gov/uic/class-ii-oil-and-gas-related-injection-wells>
- U.S. Government Accountability Office (GAO). (2020). Technology readiness assessment guide: Best practices for evaluating the readiness of technology for use in acquisition programs and projects. <https://www.gao.gov/assets/gao-20-48g.pdf>

UNESCO. (2017). *Wastewater: The untapped resource. The United Nations World Water Development Report 2017*. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. <https://www.unesco.org/en/wwap/wwdr/2017>

United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO). (2023). The United Nations World Water Development Report 2023: Partnerships and cooperation for water. UNESCO. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000386807>

United Nations World Water Development Report 2023: Partnerships and cooperation for water. UNESCO. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000386807>

UPME (2024). Plan Energético Nacional. <https://www1.upme.gov.co/Paginas/Plan-Energetico-Nacional.aspx>

Veil, J. A., & Clark, C. E. (2011). Produced-water-volume estimates and management practices. *SPE Production & Operations*, 26(3), 234–239. <https://doi.org/10.2118/125999-PA>

Veil, J. A., Puder, M. G., Elcock, D., & Redweik, R. J. (2004). *A white paper describing produced water from production of crude oil, natural gas, and coal bed methane*. Argonne National Laboratory. <https://doi.org/10.2172/821715>

World Bank. (2019). *An international framework for eco-industrial parks: The practitioner's handbook toolbox*. World Bank Group. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/32695>

World Bank. (2020). Scaling up wastewater reuse: Opportunities, risks, and policy responses. World Bank. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/34469>

World Bank. (2020). *Scaling Up Wastewater Reuse in the Middle East and North Africa: From Waste to Resource*. World Bank Group. <https://documents1.worldbank.org/curated/en/099052025124041274/pdf/P506854-7d49fde0-2526-4bcc-8a85-2a7d1d294ee4.pdf>

World Bank. (2021). Water in circular economy and resilience (WICER). World Bank Group. <https://documents1.worldbank.org/curated/en/542201631540762485/pdf/Water-in-Circular-Economy-and-Resilience-WICER-Position-Paper-Final.pdf>

World Bank. (2022). *Scaling up to phase down: Financing energy transitions in the power sector*. World Bank Group. <https://openknowledge.worldbank.org/entities/publication/312f8cc5-272c-4ed3-95cb-7357f204deee>

WWAP (United Nations World Water Assessment Programme). (2017). *The United Nations world water development report 2017: Wastewater, the untapped resource*. UNESCO. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000247647>

Yazdimoghaddam, J., Owlia, M. S., & Bandarian, R. (2019). Development of a model for assessing technology commercialisation success. *International Journal of Business Innovation and Research*, 19(3), 324. <https://doi.org/10.1504/ijbir.2019.100326>

Yin, R. K. (2018). *Case study research and applications: Design and methods* (6th ed.). SAGE Publications.

Zott, C., & Amit, R. (2010). Business model design: An activity system perspective. *Long Range Planning*, 43(2–3), 216–226. <https://doi.org/10.1016/j.lrp.2009.07.004>