

GESTIÓN AGUAS RESIDUALES DE FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO

Desafíos de la gestión integral de las aguas residuales del Fracturamiento hidráulico en yacimientos no convencionales.

Mónica Alexandra Sedano Duarte- 2165556 y Brayan Camilo Vargas Pineda-2165562

Trabajo de Grado como requisito para optar al título de Ingeniería de Petróleos

Director

Harving Diaz Consuegra

Msc. (c) ingeniería de petróleo y gas con énfasis en gerencia

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingeniería Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería de Petróleos

Bucaramanga

2022

DEDICATORIA

A Dios por permitirme llegar a este punto de mi formación profesional, y darme sabiduría para afrontar cada una de las situaciones que se me presentaron durante este proceso al cual he llegado victoriosa y satisfecha por ver cumplido uno de mis sueños

A mi familia por acompañarme en cada momento y brindarme su apoyo tanto moral como económico, por estar siempre dándome ánimos para no desfallecer cuando las cosas no iban de la mejor manera, su apoyo y amor fue vital para cumplir este logro es cual es dedicado a ustedes, me siento orgullosa de haber sido bendecida con la presencia de cada uno de ustedes.

A Esneider Galeano quien ha estado presente en el transcurso de este camino demostrándome que los sueños se hacen realidad cuando día a día se trabaja en ellos con esfuerzo y dedicación, agradezco cada consejo que me ha dado con el fin de tomar la decisión más asertiva.

Mónica A. Sedano Duarte

DEDICATORIA

Primeramente, a Dios todo poderoso, por brindarme su sabiduría y orientación en la ejecución de cada uno de mis propósitos y proyectos.

A mis padres Emiro Vargas Marín y Maricela Pineda Gaitán por su entereza, compromiso, apoyo y dirección en cada una de las circunstancias de mi vida, porque han forjado en mí un espíritu resiliente, sabio y capaz para aportar en la construcción de una mejor sociedad.

A mis queridos hermanos Oscar Vargas Quíroga, Andrés Vargas Quíroga y Julián Felipe Vargas Pineda por su paciencia, confianza y constante amor, de igual manera a mis familiares y amigos quienes aportaron en gran medida a mi crecimiento personal y profesional.

Brayan C. Vargas Pineda

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Industrial de Santander por brindarme los mejores espacios y así desarrollar de manera efectiva muchas habilidades las cuáles serán de gran utilidad para la vida.

Al ingeniero Harvín Díaz Consuegra quien estuvo atento y con la disposición de atendernos en los momentos en que necesitamos de su colaboración y a quien le agradezco haber dirigido esta tesis y más cuando los tiempos dificultaban la comunicación de manera presencial.

A mí compañero de tesis Brayan Vargas Pineda que más que un compañero ha sido un gran amigo y agradezco al destino haberlo conocido ya que su amistad ha sido el mejor recuerdo que me llevo del paso por la universidad, también a cada profesor que compartió sus conocimientos con el fin de aportar a nuestra formación.

AGRADECIMIENTOS

A mí querida Universidad Industrial de Santander por permitirme crecer personal y profesionalmente, adoptando nuevos hábitos que me permitirán aportar e impactar de forma positiva a la sociedad.

A nuestro director del proyecto el ingeniero Harving Díaz Consuegra que con su experiencia, paciencia y sabiduría nos brindó el mejor acompañamiento para poder llevar a cabo este proyecto de manera exitosa

A mí compañera de proyecto y amiga incondicional Mónica Sedano Duarte que con su calidad humana y su capacidad intelectual y profesional ha aportado en gran medida en mi proyecto de vida.

GESTIÓN AGUAS RESIDUALES DE FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO

Tabla de Contenido

Introducción	15
Capítulo 1 Generalidades	16
1.1 Planteamiento del problema.....	16
1.2 Alcance	16
1.3 Objetivos	16
1.3.1 Objetivo General	16
1.3.2 Objetivos Específicos	16
1.4 Justificación	17
1.5 Metodología	17
1.6 Desarrollo Metodológico: Revisión Documental de la Gestión De Aguas Residuales del Fracturamiento Hidráulico en Yacimientos no Convencionales	18
1.6.1 Procedimiento de la Revisión y Recopilación de Muestra documental	18
1.6.2 Terminología Clave para la Revisión Sistemática	18
1.6.3 Ecuación de Búsqueda y Selección de Fuentes.....	19
1.6.4 Análisis de Artículos Mediante Criterios de Selección.....	19
Capítulo 2 Marcos de Referencia.....	21
2.1 Marco teórico	21
2.1.1 Yacimientos convencionales	21
2.1.2 Tipos de yacimientos no convencionales	22
2.2 Marco Legal	26
Capítulo 3 Ciclo del Agua para la Gestión de las Aguas Residuales.....	30
3.1 Hallazgos bibliográficos Sobre Gestión de las Aguas Residuales en Procedimientos de	

GESTIÓN AGUAS RESIDUALES DE FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO

Fracturamiento Hidráulico	30
3.1.1 Tendencias por Período de las Publicaciones	33
3.1.2 Tendencias por Países de Publicación.....	34
3.1.3 Tendencias por Revista o Sitio Web Publicación	35
3.2 Profundización acerca de la Gestión de Aguas Residuales en los Procesos de Fracturación Hidráulica en Yacimientos No Convencionales	36
3.3 Enfoque Sistémico del Ciclo para la Gestión de las Aguas Residuales.....	41
3.3.1 Captación de Agua Fresca y Uso del Agua en los procesos de Fracturamiento Hidráulico	43
3.3.2 Recolección, Almacenamiento y Aplicación Primer Tratamiento y/o pre tratamiento	45
3.3.3 Tratamiento de Aguas Residuales y Disposición del Agua	47
Capítulo 4 Identificación Casos de Éxito en la Gestión Efectiva de las Aguas Residuales	53
4.1 Revisión de Casos	53
4.2 Análisis Estadístico y de resultados Referente a las aguas residuales de los yacimientos No Convencionales de los tratamientos identificados	80
Capítulo 5 Propuestas de Gestión de las Aguas Residuales del Fracturamiento Hidráulico en Yacimientos No Convencionales para la Industria Petrolera Colombiana.....	82
5.1 Lineamientos Generales para la Gestión de las aguas residuales y Minimización De Impactos De Los Procesos De Fracturamiento Hidráulico No Convencional en la Industria Colombiana.....	83
5.2 Propuestas Puntuales Por Cada Lineamiento Para la Gestión De Las Aguas Residuales De Fracturamiento Hidráulico En Yacimientos No Convencionales Enfocados En La Industria Petrolera Colombiana.....	84

GESTIÓN AGUAS RESIDUALES DE FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO

5.2.1	Captación de Agua Fresca.....	84
5.2.2	Uso del Agua en el fracturamiento (agregado de sustancias químicas, inyección en pozos, aguas de retorno)	86
5.2.3	Recolección, Almacenamiento y Aplicación primer tratamiento de remoción de sólidos en Aguas Residuales	89
5.2.4	Tratamientos de Aguas residuales y Disposición del Agua.	90
5.3	Sectores Responsables Que Deben Involucrarse En El Direccionamiento Y Ejecución De Los Lineamientos Y Sus Propuestas Planteadas.....	92
	Conclusiones	94
	Recomendaciones	97
	Bibliografía	98

Listado de Tablas

Tabla 1. <i>Marco Regulatorio</i>	26
Tabla 2. <i>Datos de hallazgos bibliográficos</i>	31
Tabla 3. <i>Información Revistas de Publicación</i>	35
Tabla 4. Comparativo de resultados y/o Hallazgos de Tratamientos identificados	80
Tabla 5. <i>Lineamientos generales Gestión de las Aguas Residuales</i>	83
Tabla 6. <i>Sectores Responsables</i>	92

Listado de Figuras

Figura 1. <i>Diagrama de Flujo aplicación Criterios</i>	21
Figura 2. <i>Tendencia Publicaciones por Año</i>	34
Figura 3. <i>Publicaciones por País</i>	34
Figura 4. <i>Relación de Uso de Agua y Ubicación de Yacimientos de Lutitas a nivel global</i>	38
Figura 5. <i>Gasto Promedio de Agua Pozos E.E.U.U</i>	39
Figura 6. <i>Ciclo para la Gestión de Aguas Residuales</i>	42
Figura 7. <i>Impactos en el Agua en las Diferentes Etapas del Ciclo del Agua</i>	44
Figura 8. <i>Visión General de la Fracturación Hidráulica</i>	55
Figura 9. <i>Diagrama para reciclaje de aguas residuales por Dilución</i>	57
Figura 10. <i>Propuesta de diseño integral de cadena de suministro de gas de esquisto</i>	59
Figura 11. <i>Efectos del fracturamiento hidráulico</i>	63
Figura 12. <i>Proceso estándar de tratamiento de aguas residuales</i>	66
Figura 13. <i>Diversos procesos de tratamiento Biológico</i>	69
Figura 14. <i>Esquema de las tecnologías basadas en membranas para la reutilización de aguas residuales</i>	73

Glosario

Aguas de Reflujo o de Retorno: Hace referencia a los fluidos que se devuelven a la superficie dentro de las primeras 2 semanas después de la ejecución del fracturamiento , conteniendo tanto agua de la que fue inyectada como agua estancada dentro del pozo fracturado (Zhang & Hascakir, 2021).

Agua Producida: Se diferencian de las de reflujo por el tiempo que se pasa en el pozo. Esta es el agua que sale del pozo durante la vida útil de la producción del pozo, y contiene primordialmente agua de formación que tiene altos niveles de sólidos totales disueltos (TDS), compuestos orgánicos y materiales radiactivos (Zhang & Hascakir, 2021).

Aguas Residuales: Comprenden tanto las aguas de reflujo como las producidas, conteniendo químicos, lodos, trazas de lixiviados, sales, etc que pueden variar según tiempos y características propias de cada zona (Zhang & Hascakir, 2021).

Biocidas: Los biocidas son sustancias o mezclas que están compuestas por, o generan, una o más sustancias activas (incluidos los microorganismos) cuyo objetivo es destruir, contrarrestar, neutralizar, impedir la acción o ejercer un control de otro tipo sobre cualquier organismo nocivo por cualquier medio que no sea una mera acción física o mecánica (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2021).

Entrampamiento: Acumulación de hidrocarburos en ciertas rocas del subsuelo que por sus propiedades físicas y configuración les impiden continuar su desplazamiento hacia la superficie (Alicante, 2016).

Esquistos: Formaciones rocosas caracterizadas por su contenido de minerales laminares, cuyos tamaños de grano y poros son extremadamente pequeños haciéndolas relativamente

GESTIÓN AGUAS RESIDUALES DE FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO

impermeables (Zhang & Hascakir, 2021).

Floculación: Es un proceso de agregación de partículas en dos pasos en el que un gran número de partículas pequeñas forman una pequeña cantidad de grandes flóculos (Mettler Toledo, 2022). Los flóculos pueden presentarse de forma natural, pero por lo regular las generan a través de un sistema coloidal disperso al que le adicionan una sustancias químicas floculantes (Schlumberger, 2022).

Flotación: Es un proceso físico-químico trifásico (sólido-líquido-gaseoso) que tiene como objetivo la separación de especies minerales mediante la adhesión selectiva de partículas minerales a las burbujas de aire (win, 2022).

Foto-Fenton: Significa fotocatálisis heterogénea y consiste en un proceso avanzado de oxidación donde hacen reacción el peróxido de hidrógeno con sales ferrosas (Hincapié, Ocampo, Restrepo, & Marín, 2011),

Flowback: Flujo de retorno

Fracking: Técnica de fracturación hidráulica aplicado en rocas que contienen petróleo o gas atrapados en rocas en pozos no convencionales (Uniandes, 2021).

Lutitas: Roca de grano fino, impermeable y sedimentaria, compuesta de arcillas y otros minerales, que suele tener un alto porcentaje de cuarzo (Schlumberger, 2022).

Resumen

Título: Desafíos de la gestión integral de las aguas residuales del Fracturamiento hidráulico en yacimientos no convencionales.

Autor: Mónica Alexandra Sedano Duarte (1), Brayan Camilo Vargas Pineda (2)

Palabras Clave: Aguas Residuales, Yacimientos No convencionales, gestión, fracturamiento hidráulico

Descripción: El futuro de la industria petrolera colombiana está encaminada al aprovechamiento de los pozos no convencionales de gas y petróleo, siendo un tema controversial por los desafíos, retos y consecuencias que pueden surgir a nivel medioambiental para las zonas de extracción, sobre todo hablando de los recursos hídricos, tan escasos en algunas zonas del país y cuyo devenir se encuentra en peligro.

La Ejecución de la fracturación hidráulica de pozos no convencionales ha venido en aumento a nivel global, debido a las crecientes demandas energéticas y los descubrimientos de yacimientos de esquisto, pero en contraste, el recurso hídrico se ha visto afectado gravemente, pues la fracturación hidráulica utiliza millones de metros cúbicos de agua para la ejecución de sus procesos, por lo que la búsqueda de estrategias eficaces para la gestión de las aguas residuales resultantes de su actividad que contribuyan a la minimización del gasto, se hace urgente.

Atendiendo a ello, se ejecuta este estudio que consiste en realizar un análisis de los desafíos de la gestión integral de las aguas residuales de fracturamiento hidráulico en yacimientos no convencionales, a través de una revisión documental que devela estudios sobre la temática publicados en la última década, profundizando así, acerca de las aguas residuales, determinando con un enfoque sistémico un ciclo adecuado para su gestión, analizando las experiencias expuestas por autores de otros países, identificando aquellos casos de éxito y realizando proposición de lineamientos de gestión enfocados en la industria petrolera colombiana, donde se prioriza la gestión de los recursos hídricos como factor crítico, asumiendo que los operadores tienen la responsabilidad de ejecutar estudios previos y puntuales que les permitan determinar el mejor tratamiento de las aguas residuales teniendo en cuenta los factores ambientales, sociales y económicos, según las especificaciones puntuales de cada pozo.

Abstract

Title: Challenges of integrated management of wastewater from hydraulic fracturing in unconventional reservoirs.

Author(s): Mónica Alexandra Sedano Duarte (1), Brayan Camilo Vargas Pineda (2)

Key Words: Wastewater, Unconventional reservoirs, management, hydraulic fracturing, hydraulic fracturing

Description: The future of the Colombian oil industry is directed to the exploitation of unconventional oil and gas wells, being a controversial issue due to the challenges, challenges and consequences that may arise at an environmental level for the extraction areas, especially talking about water resources, so scarce in some areas of the country and whose future is in danger.

The execution of hydraulic fracturing of unconventional wells has been increasing globally, due to the growing energy demands and the discoveries of shale deposits, but in contrast, the water resource has been seriously affected, since hydraulic fracturing uses millions of cubic meters of water for the execution of its processes, so the search for effective strategies for the management of wastewater resulting from its activity that contribute to the minimization of expenditure, becomes urgent.

In view of this, this study is carried out to analyze the challenges of integrated management of wastewater from hydraulic fracturing in unconventional reservoirs, through a documentary review that reveals studies on the subject published in the last decade, thus deepening about wastewater, determining with a systemic approach an appropriate cycle for its management, analyzing the experiences presented by authors from other countries, identifying those cases of success and proposing management guidelines focused on the Colombian oil industry, where the management of water resources is prioritized as a critical factor, assuming that the operators have the responsibility of executing previous and specific studies that allow them to determine the best wastewater treatment taking into account environmental, social and economic factors, according to the specific specifications of each well.

Introducción

La industria de los hidrocarburos en los últimos años se ha visto en la necesidad de desarrollar lo concerniente a los yacimientos no convencionales, con el fin de satisfacer la demanda energética en el mundo.

Haciendo una breve descripción de los yacimientos no convencionales, los cuales son formaciones de roca muy poco permeables, en la cual los fluidos contenidos no han migrado y permanecen aún en la misma roca generadora debido al valor tan bajo de permeabilidad, o dado el caso tratándose de fluidos altamente viscosos que requieren fracturamiento hidráulico multietapas en pozos horizontales (FHPH). Una de las complicaciones con esos yacimientos es el manejo que se le debe dar a las aguas residuales generadas una vez efectuada la operación.

El buen manejo de las aguas residuales permite un equilibrio ambiental que favorece unas condiciones óptimas en la zona donde se llevará a cabo la implementación de la técnica.

Este trabajo de investigación se enfoca en un análisis de experiencias en países que han aplicado el FHPH, con el fin de establecer criterios que permitan orientar la gestión de las aguas residuales de los yacimientos no convencionales en países que están a puertas de una posible implementación, como lo es el caso de Colombia. Una de las limitaciones para el desarrollo de este trabajo es la falta de información acerca de este tema, debido a que muchas compañías o países se reservan la publicación de datos o comportamientos estadísticos que permiten realizar un análisis más detallado de los yacimientos no convencionales.

Capítulo 1 Generalidades

1.1 Planteamiento del problema

Existe una gran preocupación por el impacto ambiental del vertimiento y la disposición de las aguas residuales industriales del fracturamiento hidráulico multietapa en pozos horizontales, por tal razón se necesita conocimiento e información para plantear una gestión efectiva de las aguas residuales con el fin de mitigar el impacto ambiental asociado a su vertimiento y disposición.

1.2 Alcance

El propósito de este trabajo de investigación es llevar a cabo una revisión sistemática de la bibliografía disponible en los recursos electrónicos de la Universidad Industrial de Santander, que permita analizar y conocer las mejores prácticas y alternativas para una buena gestión de las aguas residuales en los proyectos de fracturamiento hidráulico. La bibliografía empleada está enfocada en los países que han implementado la técnica, principalmente en los Estados Unidos, con publicaciones realizadas en los últimos diez años.

1.3 Objetivos

1.3.1 *Objetivo General*

Analizar los desafíos de la gestión integral de las aguas residuales del fracturamiento hidráulico en yacimientos no convencionales.

1.3.2 *Objetivos Específicos*

- Determinar, con un enfoque sistémico, el ciclo del agua para la gestión de aguas residuales del fracturamiento hidráulico en yacimientos no convencionales.
- Analizar experiencias y prácticas documentadas en otros países, para identificar

GESTIÓN AGUAS RESIDUALES DE FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO

casos exitosos de gestión efectiva de las aguas residuales del fracturamiento hidráulico en yacimientos no convencionales.

- Proponer lineamientos de gestión de las aguas residuales del fracturamiento hidráulico en yacimientos no convencionales en la industria petrolera colombiana a partir de los casos exitosos analizados.

1.4 Justificación

Uno de los aspectos ambientales más importantes en los proyectos de los yacimientos no convencionales es la gestión del agua, enfocado hacia el manejo, disposición, control y tratamiento de la misma; con el fin de evaluar la viabilidad en países como Colombia.

Colombia está a puertas de iniciar los pilotos de fracking por lo cual es necesario desarrollar un amplio conocimiento en las aguas residuales, para proyectar un horizonte que permita realizar una gestión adecuada de manera que se eviten daños irreversibles al medio ambiente.

Con la realización de este proyecto se espera aportar de manera positiva a la ampliación de conocimientos en el área de la gestión de las aguas residuales en los proyectos de yacimientos no convencionales programados en Colombia, además de aportar a la preservación y cuidado del medio ambiente.

1.5 Metodología

Para la recopilación bibliográfica se utiliza el catálogo electrónico de la Universidad industrial de Santander con información técnica disponible en las bases de datos de Scopus, Web of science entre otras.

En la definición del enfoque sistemático es necesario contar con un esquema que permita establecer de manera puntual cual es el tratamiento adecuado de las aguas residuales generadas

GESTIÓN AGUAS RESIDUALES DE FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO

en los yacimientos no convencionales.

Para la identificación del manejo y disposición de las aguas residuales se tienen en cuenta los casos exitosos de gestión con los cuales se realiza el respectivo análisis.

En lo referente a la proyección sobre la gestión de las aguas residuales es lo concerniente a la presentación del trabajo de investigación donde se proponen los lineamientos y alternativas efectivas para la gestión de las aguas residuales del fracturamiento hidráulico en los yacimientos no convencionales.

1.6 Desarrollo Metodológico: Revisión Documental de la Gestión De Aguas Residuales del Fracturamiento Hidráulico en Yacimientos no Convencionales

Para dar inicio al desarrollo de este estudio, es necesaria la recopilación de información acerca de la gestión integral de las aguas residuales en yacimientos no convencionales, para la cual se lleva a cabo una consulta bibliográfica mediante revisión sistemática de literatura acerca de la temática.

1.6.1 Procedimiento de la Revisión y Recopilación de Muestra documental

Una revisión sistemática conlleva el uso de algoritmos explícitos que facilitan la búsqueda y evaluación de la literatura, calificándose como un procedimiento que impone mejoras en la calidad de la revisión y los resultados a obtener (Tranfield, Denyer, & Smart, 2003). Teniendo en cuenta esto, se define un protocolo de revisión, estableciendo terminología y criterios que delimitan la búsqueda, se crea una ecuación con un campo y periodo específicos (última década: años 2012 a 2021), aplicando esto, en las bases de datos SCOPUS, OnePetro y Web Of Science, siendo estas tomadas como fuentes principales de información.

1.6.2 Terminología Clave para la Revisión Sistemática

Los términos que se utilizan en la ecuación de búsqueda en las bases de datos señaladas

GESTIÓN AGUAS RESIDUALES DE FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO

son:

- Gestión o tratamiento Aguas Residuales: Wastewater management or treatment
- Fracturamiento hidráulico: hydraulic fracturing
- Yacimientos no convencionales: unconventional reservoirs

Teniendo en cuenta estos términos, se procede con la elaboración de la ecuación para ejecutar la búsqueda electrónica de los artículos necesarios.

1.6.3 Ecuación de Búsqueda y Selección de Fuentes

Al definir los términos claves, se procede a hacer uso de los operadores booleanos “AND” y “OR”, pretendiendo obtener todos los resultados posibles y/o términos asociados más acertados al tema de análisis y se delimita el periodo de publicación (2012-2021), consiguiendo como ecuaciones de búsqueda resultante: “(TITLE-ABS-KEY (wastewater) AND TITLE-ABS-KEY (management) AND TITLE-ABS-KEY (hydraulic) AND TITLE-ABS-KEY (fracturing) AND TITLE-ABS-KEY (unconventional AND reservoirs)) AND PUBYEAR > 2012” y “ Wastewater (All fields) and management (All fields) or treatment (All fields) and unconventional reservoirs (All fields) and hydraulic fracturing (All fields) Refined By : Publication Years: 2012-2021; All Open Access; Document Types: Review Articles. Con esta búsqueda, las bases de datos arrojaron resultados de 108 artículos en total, a los cuales se les aplican los criterios de selección, para su elegibilidad.

1.6.4 Análisis de Artículos Mediante Criterios de Selección

Mediante lectura y análisis de los artículos para su delimitación y selección en la revisión sistemática, se aplican los siguientes criterios de inclusión y exclusión definidos, teniendo en cuenta la relación con la temática de estudio, la delimitación del periodo referido y poder encontrar los datos más fidedignos.

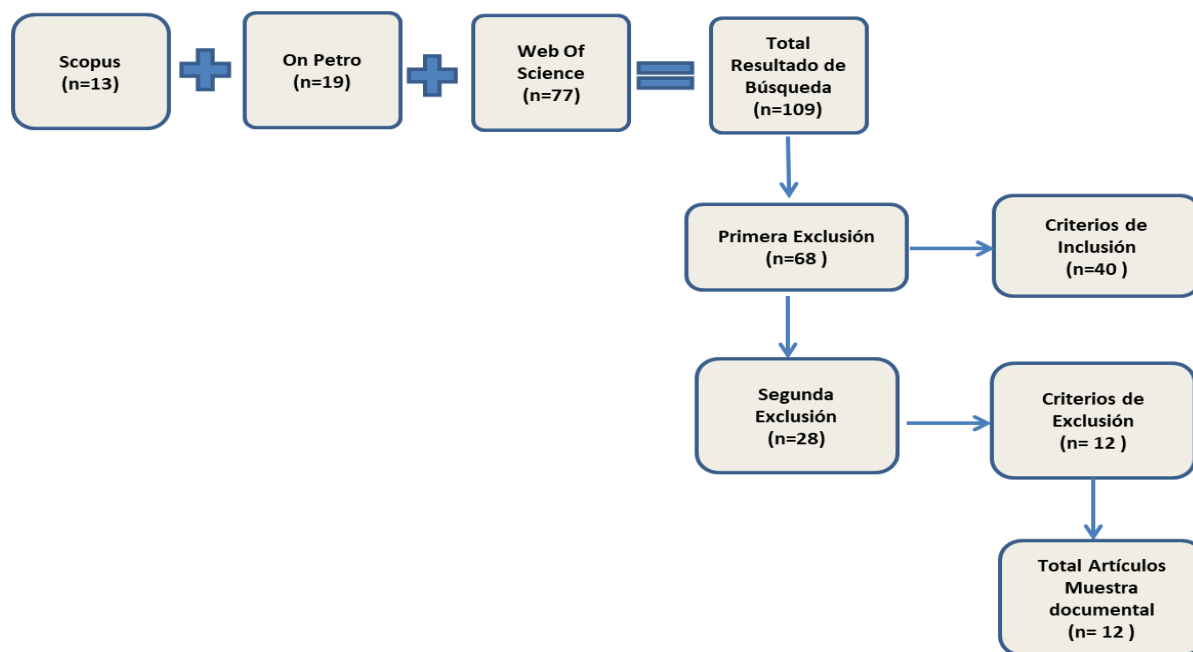
Los criterios de Inclusión son:

- Los documentos y/o artículos que en los campos de búsqueda (Título, resumen y palabras claves), hablen de gestión de aguas residuales en fracturamiento hidráulico.
- El Periodo de la revisión sistemática: Se tomaron todos los artículos de diez años atrás, es decir, desde el año 2012 hasta el año 2021.
- Idiomas: inglés.
- Tipos de documentos: Artículos.

Los criterios de Exclusión son:

- Aquellos artículos que en su título y/o palabras clave no hagan referencia al tema en cuestión.
- Artículos que al leer su Abstract no demuestren ninguna relación con la temática.
- Aquellos artículos que no hagan referencia a evidencias en los estudios realizados acerca del tema de análisis.
- Artículos repetidos
- Artículos con acceso restringido o que requieran compra para su descarga

Al realizar el filtro mediante la aplicación de estos criterios, se obtiene como muestra de literatura para la investigación, 12 artículos como se detalla en la Figura 1, con los cuales se procede a la extracción de la información relevante y necesaria, haciendo uso de una plantilla diseñada en el Software Excel, pretendiendo conseguir los datos de mayor interés de cada artículo seleccionado.

Figura 1.*Diagrama de Flujo aplicación Criterios*

Fuente: Adaptado del modelo Prisma (Urrútia & Bonfill, 2010)

Capítulo 2 Marcos de Referencia

2.1 Marco teórico

2.1.1 Yacimientos convencionales

Los yacimientos no convencionales son formaciones de roca muy poco permeables, en la cual los fluidos contenidos no han migrado y permanecen aún en la misma roca generadora debido al valor tan bajo de permeabilidad o tratándose de fluidos altamente viscosos.

Por ende, este tipo de yacimientos son desarrollados mediante técnicas como la perforación horizontal y la estimulación hidráulica, la cual permite realizar microfracturas en la roca para liberar los hidrocarburos contenidos en él.

GESTIÓN AGUAS RESIDUALES DE FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO

Los yacimientos convencionales, a diferencia de los no convencionales, comprenden una serie de elementos que se tienen que encontrar en una línea de tiempo, tales como la roca madre, roca reservorio o almacén, roca sello, la columna de la roca la cual ejerce presión sobre el sistema, una trampa geológica y procesos que comprenden la generación, migración, entrapamiento y acumulación local de hidrocarburos. Sin falta alguna de estos elementos debemos hablar de un yacimiento no convencional, el cual debe ser estudiado y explotado con técnicas diferentes a las utilizadas en los sistemas convencionales.

Por otra parte, al comparar los yacimientos convencionales con los yacimientos no convencionales, estos últimos requieren de la aplicación de métodos y mejoras tecnológicas, las cuales involucran mayores costos, pero a su vez los volúmenes de hidrocarburos explotados son mayores hacia la base de la pirámide debido a su gran extensión, aunque de menor calidad (Ramírez, López, & Santana, 2020) .

2.1.2 Tipos de yacimientos no convencionales

Existen diferentes tipos de yacimientos no convencionales dentro de los cuales se tienen: petróleo asociado a lutitas (shale oil), gas asociado a lutitas (shale gas), petróleo y gas de formaciones de baja permeabilidad (tight oil) (tight gas), y gas metano asociado a mantos de carbón.

2.1.2.1 Shale gas y shale oil. El shale es una roca sedimentaria de grano fina, rica en materia orgánica, más comúnmente conocida como lutita, capaz de producir hidrocarburos en forma comercial al ser estimulada mediante fracturas hidráulicas.

En estos yacimientos la roca generadora es de muy baja permeabilidad, contenedora de gas o petróleo, actúa a su vez como roca reservorio y sello. No se aplica en este caso los conceptos tradicionales de entrapamiento. Para el shale gas, el hidrocarburo se encuentra de

GESTIÓN AGUAS RESIDUALES DE FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO

tres maneras: como gas libre en los poros, como gas adsorbido (es decir, no está en los granos minerales y fundamentalmente en la materia orgánica (querógeno y/o bitumen) que contiene la roca y como gas disuelto en la materia orgánica contenida en la roca (Zafra, 2018).

2.1.2.2 Tight oil y Tight gas. Generalmente se conocen como formaciones apretadas. Son tipos de rocas tales como areniscas, limos o rocas carbonatadas, contenedoras de petróleo y gas, las cuales debido a su permeabilidad relativamente baja entre 0,1 y 1md y el hecho que los hidrocarburos están contenidos en estrechos espacios porosos mal interconectados, han requerido el uso de trabajos de fracturación hidráulica para facilitar el flujo de los hidrocarburos hacia el pozo.

2.1.2.3 Gas asociado a mantos de carbón (Coal Bed Methane). Representa el gas producido de los mantos de carbón. El gas generado por la maduración térmica del carbón es almacenado en la matriz de la roca (carbón) como gas absorbido.

Asimismo, el carbón cumple la función tanto de roca generadora como roca almacén; la presión hidráulica le permite estar en este estado. Se utilizan una gama de técnicas para extraer el metano de las capas de carbón, incluida la estimulación hidráulica. A continuación, se hablará acerca del fracturamiento hidráulico (Zafra, 2018).

GESTIÓN AGUAS RESIDUALES DE FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO

2.1.2.4 Fracturamiento hidráulico. Es una técnica originaria de Estados Unidos la cual ha sido implementada desde 1940 con el fin de inyectar volúmenes definidos de fluido de fracturamiento a altas tasas y presiones de bombeo en la zona prospectiva de hidrocarburos. Dicha técnica permite crear artificialmente microfracturas de un grosor menor a una hebra de cabello, aumentando la conectividad entre los espacios porosos y así mejorar la permeabilidad de la roca fracturada, permitiendo la liberación y aumento del flujo de crudo o gas a través de la formación.

Las fracturas pueden extenderse tanto vertical como horizontalmente hasta 2500 pies, o un poco menos de media milla. Para evitar el cierre de la fractura, se usan agentes de soporte como arenas o sólidos sintéticos de alta resistencia a la compresión denominada como material propante.

2.1.2.5 Sistema del fluido de fracturamiento. Este comienza desde la adquisición del fluido base en superficie (agua), continúa con la mezcla del material propante, los químicos y el agua. Seguidamente el proceso de inyección al pozo, luego el manejo del agua producida y por último el óptimo y adecuado manejo que tendrá el fluido de fracturamiento (flowback) el cual retorna una vez se haya efectuado la estimulación hidráulica (Zafra, 2018).

2.1.2.5.1 Proceso

- Adquisición del agua: 1,5 millones de galones es el volumen promedio de agua utilizada por pozo para fracturamiento hidráulico, esta obtención de los volúmenes de agua se realiza a partir de cuerpos de aguas subterráneas y superficiales (Zafra, 2018).
- Mezcla del fluido base (agua) con el material propante y químicos: El agua, el apuntalante y los aditivos químicos se mezclan entre sí y se bombean al clector múltiple,

GESTIÓN AGUAS RESIDUALES DE FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO

donde las bombas de alta presión transportan el fluido al cabezal de fractura. Los aditivos y el apuntalante se pueden mezclar con agua en diferentes momentos y en diferentes cantidades durante el fracturamiento hidráulico; por lo tanto, la composición de los fluidos puede variar durante el proceso de fracturamiento hidráulico (Mendoza, 2015).

- Proceso de inyección al pozo: La inyección y el movimiento de los fluidos de fracturamiento hidráulico se realiza a través del pozo productor de petróleo o gas y a través de la formación de roca objetivo (Zafra, 2018).
- Manejo del agua producida y fluidos de retorno (flowback): Recolección y manejo in situ de los fluidos que regresan a la superficie después de la fracturación hidráulica para su posterior transporte y disposición, ya sea desechándola o utilizándola (Zafra, 2018).
- Disposición y reutilización de las aguas residuales: Existe un amplio abanico de opciones para la gestión de las aguas residuales de la industria de los hidrocarburos no tradicionales disponible para los productores de oil/gas de esquisto. Sin embargo, sea la decisión por la que se opte, existen factores ineludibles de orden técnico, económico, político, legal, social, y ambiental que se tienen que evaluar para definir que opción resulta menos costosa en términos económicos (Zafra, 2018).

Inyección en pozos clase II (pozos utilizados para inyectar aguas residuales asociadas con la producción de petróleo y gas en subsuelo. Reutilización en otras operaciones de fracturamiento hidráulico.

Facilidades de tratamiento de aguas residuales para su posterior disposición o vertimiento en cuerpos de aguas superficiales. También estanques de evaporación y pozos de percolación.

Una vez que el pozo ha sido terminado y se ha aplicado la fracturación hidráulica de la roca de esquisto, la siguiente etapa consiste en la extracción de las aguas residuales empleadas en

GESTIÓN AGUAS RESIDUALES DE FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO

todo el sistema, con lo cual se empieza a despresurizar el sistema.

2.2 Marco Legal

En la temática de fracturamiento hidráulico en yacimientos no convencionales en Colombia, han surgido marcos regulatorios y normatividades legales, técnicas, sociales y ambientales de obligatorio cumplimiento, debido a los efectos e impactos que esta actividad económica puede acarrear para las zonas donde se lleven a cabo las exploraciones y en general para todo el territorio. Estas normativas han sido expedidas y son reguladas por entidades como la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH) y la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA), creadas por los ministerios de Minas y Energía (MinEnergía) y Ambiente (MinAmbiente), (MinEnergía, 2003), (MinAmbiente, 2011).

Las normas y legislaciones más relevantes en cuanto al ejercicio de fracturación hidráulica en yacimientos no convencionales se registran en la Tabla 1, señalando el objeto principal de su expedición.

Tabla 1.

Marco Regulatorio

Normatividad	Autoridad Regulatoria	Objeto de Expedición	Función Principal	Marco Aplicable
Decreto 1760 de 2003	Ministerio de Minas y Energía	Escisión de la Empresa Colombiana de Petróleos, Ecopetrol, modificación de su estructura orgánica y su estructura orgánica y creación de la Agencia Nacional de Hidrocarburos y la sociedad Promotora de	Regular la administración integral de reservas de hidrocarburo propiedad de la nación (MinEnergía, 2003).	Técnico

GESTIÓN AGUAS RESIDUALES DE FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO

			Energía de Colombia S. A. (MinEnergía, 2003)			
Decreto de 2011	3573	Min Ambiente	Creación de la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales ANLA y dictamen de otras disposiciones (MinAmbiente, 2011)	Velar por que los proyectos, obras o actividades dependientes de licenciamiento, permiso o trámite ambiental, den cumplimiento a la normativa ambiental, contribuyendo al desarrollo sostenible ambiental del País (MinEnergía, 2003).	Ambiental	
Resolución 0421 de 2014		Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS)	Adopción de términos de referencia para elaborar estudio de impacto ambiental (EIA) para los proyectos de perforación de hidrocarburos (MinAmbiente, 2014)	Adopción de dichos términos por los interesados en obtener licencias ambientales de proyectos de perforación exploratoria de hidrocarburos (MinAmbiente, 2014)	Ambiental	
Resolución 90341 de 2014		Ministerio de Minas y Energía (Min Energía)	Establecimiento de requerimientos técnicos y procedimientos para la exploración y explotación de hidrocarburos en yacimientos no convencionales (MinEnergía, 2014)	Propender porque cualquier tipo de persona (natural, jurídica, pública y/o privada) garantice el desarrollo sostenible de esta actividad industrial mediante el cumplimiento de dichos requerimientos técnicos y procedimentales (MinEnergía, 2014)	Técnico	
Resolución 0631 de 2015		Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MinAmbiente)	Establecimiento de parámetros y valores límites máximos permitidos para vertimientos a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público, además de	Lograr que las actividades comerciales, industriales y de servicios cumplan con los parámetros establecidos cuando realicen vertimientos puntuales	Ambiental	

GESTIÓN AGUAS RESIDUALES DE FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO

			otras disposiciones (MinAmbiente, 2015)		
Decreto de 2020	328	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MinAmbiente)	Establecimiento de lineamientos para adelantar Proyectos Piloto de Investigación Integral -PPII sobre Yacimientos No Convencionales - YNC de hidrocarburos con la utilización de la técnica de Fracturamiento Hidráulico Multietapa con Perforación Horizontal (MinAmbiente, 2020)	Establecer los lineamientos y términos de referencia para quienes lleven a cabo proyectos piloto de investigación integral en yacimientos no convencionales que utilicen la técnica de fracturamiento hidráulico (MinAmbiente, 2020)	Ambiental Y Social
Resolución 40185 de 2020		Ministerio de Minas y Energía (Min Energía)	Establecimiento de lineamientos técnicos para el desarrollo de proyectos piloto de Investigación Integral -PPII sobre Yacimientos No Convencionales - YNC de hidrocarburos con la utilización de la técnica de Fracturamiento Hidráulico Multietapa con Perforación Horizontal (MinEnergía, 2020)	Establecer los lineamientos y requerimientos técnicos para quienes desarrollen o adelanten proyectos piloto de investigación integral en yacimientos no convencionales que utilicen la técnica de fracturamiento hidráulico (MinEnergía, 2020)	Técnico
Resolución 40011 de 2021		Ministerio de Minas y Energía (Min Energía)	Modificación de la Resolución 40185 de 2020	Actualizar algunos artículos, párrafos y anexos	Técnico

GESTIÓN AGUAS RESIDUALES DE FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO

Entre las normativas presentadas en la tabla anterior, se destaca la Resolución 0421 de 2014, pues el organismo que desee realizar piloto de fracking debe contar con un estudio de impacto ambiental si desea obtener su respectiva licencia ambiental, demostrando de esta manera que su gestión generará resultados positivos, debiendo verificar que dentro de la evaluación que lleven a cabo, no se excluyan factores contraproducentes y/o que generen graves degradaciones a los recursos renovables naturales y el contexto ambiental, o transformen notoriamente el entorno paisajístico donde pretendan ejecutar el proyecto, por lo cual el EIA deberá fundamentarse en los principios de desarrollo sostenible, las buenas prácticas ambientales y metodologías escrupulosas de análisis y recopilación de datos de carácter técnico científico (MinAmbiente, 2014).

De igual forma esta resolución contiene importantes requisitos a ser cumplidos por las empresas que deseen realizar dichos pilotos como la identificación, descripción y divulgación de la tecnología a implementar, describir puntualmente los procesos que ejecutaran, los impactos en los factores ambiental, social, de salud y sísmicos, formas de divulgación de información y participación cuando haya afectaciones a comunidades, mecanismos de veeduría y participación ciudadana, riesgos potenciales en materia de contaminación del recurso hídrico incluyendo su respectivo plan de mitigación y los resultados que pueden presentarse para las diferentes localidades y estado en materia económica, social y ambiental al desarrollar las actividades de extracción (MinAmbiente, 2014).

A partir del año 2020, los marcos más representativos serían el Decreto 328 de 2020 y la Resolución 40185 de 2020, que contienen normatividades estrictas y rigurosas acerca de los recursos naturales en proyectos de yacimientos no convencionales, estableciendo nuevos parámetros en los componentes que se desarrollan en un EIA y exigiendo metodologías de alto estándar en la medición de los impactos a los ecosistemas, caracterizaciones de faunas, monitoreos concienzudos de suelos, y caracterizaciones isotópicas del recurso hídrico, todo ello, avalado por entidades como el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), el Servicio Geológico Colombiano (SGC) y

GESTIÓN AGUAS RESIDUALES DE FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO

el Instituto Alexander Von Humboldt, fundamentado en una línea base de aguas superficiales y subterráneas, la información hidrogeológica y una línea base de ecosistemas y biodiversidad, que determinan cada uno de estos organismos respectivamente (López, 2020).

Capítulo 3 Ciclo del Agua para la Gestión de las Aguas Residuales

3.1 Hallazgos bibliográficos Sobre Gestión de las Aguas Residuales en Procedimientos de Fracturamiento Hidráulico

De la muestra documental obtenida, se extrajeron los datos de la revista y/o sitio de publicación, autores, título original, año de publicación, país o zona de publicación, el objetivo del estudio o documento, el tipo de yacimiento al cual hace referencia, el tratamiento aplicado, y los hallazgos o resultados reportados, siguiendo como guía las pautas presentadas en el manual Cochrane “Manual de revisiones sistemáticas de intervenciones” (Centro Cochrane Iberoamericano, 2012), cuyo objetivo es recopilar la evidencia requerida, fundamentada en criterios de selección previamente determinados, orientando así el tema investigado, consistiendo estas pautas, básicamente en: formular la temática de la investigación, determinar los criterios, realizar la búsqueda de artículos, seleccionar los documentos y recopilar y evaluar los datos.

Al realizar lectura y filtro de los artículos arrojados en las búsquedas en las bases de datos, se evidencia muy poca literatura sobre la temática específica, y algunos documentos de interés para el estudio, con acceso restringido o supeditados a pago.

En la Tabla 2 se presentan los datos generales de los estudios recopilados como fuentes y muestra documental.

GESTIÓN AGUAS RESIDUALES DE FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO

Tabla 2.*Datos de hallazgos bibliográficos*

País Publicación	Autor(es)	Título Artículo En español	Objetivo	Revista o Sitio Web Publicación
E.E.U.U	(Gregory, Vidic, & Dzombak, 2012)	Desafíos de la gestión del agua asociados con la producción de gas de esquisto por fracturación hidráulica	Realizar una validación de la gestión del agua como tema crítico en el desarrollo de los pozos de gas donde aplican fracturación hidráulica, teniendo en cuenta que se requieren nuevas estrategias de gestión y tecnologías de tratamiento que permitan la extracción del elemento de forma sostenible ambientalmente y viable económicamente	Elements vol 7 Página 181-186
E.E.U.U	(Gregory & Mohan, 2015)	Perspectiva actual sobre los desafíos de la gestión del agua producida durante la fracturación hidráulica para la recuperación de petróleo y gas	Realizar discusión sobre los desafíos de gestión ambiental de la industria petrolera frente a las oportunidades de innovación en infraestructura para tratar y eliminar las aguas residuales de alta concentración que se producen	Environmental Chemistry, Volumen 12, Páginas 261 - 266
E.E.U.U	(Guerra, Calderon, apageorgiou, Sirola, & Reklaitis, 2016)	Un marco de optimización para la integración de la gestión del agua y el diseño de la cadena de suministro de gas de esquisto.	Proponer un marco integral novedoso para el diseño de la cadena de suministro de gas de esquisto incluyendo las estrategias de gestión de aguas residuales	Ingeniería química y computadoras Volumen 92 Página 230-255
E.E.U.U	(Scanlon, Reedy, Hombre, & Walsh, 2017)	Problemas relacionados con el agua relacionados con la transición de la producción de petróleo convencional a la no convencional en la cuenca del Pérmico	Evaluar la producción y utilización de agua en pozos no convencionales y el potencial de reutilización como mecanismo de reducción de la problemática	CIENCIA Y TECNOLOGÍA AMBIENTAL
E.E.U.U	(Shrestha, Chilkoor, Wilder, Gadhamshetty, & Stone, 2017)	Impactos potenciales sobre los recursos hídricos de la fracturación hidráulica a partir de la producción de petróleo no convencional en el esquisto de Bakken	Presentar una revisión crítica de los posibles impactos en los recursos hídricos debido a eventos deterministas (extracción de agua dulce y gestión del agua producida) y probabilísticos (derrames debido a fugas en tuberías y accidentes de camiones)	Water Research Volume 108, 1 de enero de 2017 , páginas 1-24
Irán	(Afshin, 2018)	El análisis de viabilidad integrado de la gestión de la reutilización del	Realizar un estudio integral sobre la utilización del agua en los procesos de	Ciencia aplicada del agua

GESTIÓN AGUAS RESIDUALES DE FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO

			agua en las actuaciones de exploración de petróleo de yacimientos de esquisto no convencionales	fracturamiento hidráulico y sus tratamientos para optimizar los procedimientos mediante su reutilización y disminución del uso del agua dulce	
Francia	(Lusinier, otros, 2019)	y	Tratamientos biológicos del agua producida en campos petrolíferos: una revisión completa	Realizar una revisión integral de los procesos disponibles para el tratamiento biológico de las aguas residuales mediante la descripción de las diferentes tecnologías que se han utilizado hasta el momento, sus condiciones de operación y eficiencias de remoción, y las principales barreras técnicas a superar para incrementar sus eficiencias.	SPE J. Volumen 24. Páginas 2135–2147.
China E.E.U.U	y (Chang, y otros, 2019)		Tecnologías basadas en membranas potenciales e implementadas para el tratamiento y la reutilización del reflujo y el agua producida a partir de los yacimientos de petróleo y gas de esquisto: una revisión	Revisar las características y la gestión de las aguas residuales producidas en la fracturación hidráulica, a través de la aplicación de tecnologías de membranas como potencial de solución para la reutilización sostenible del agua	Desalination Vol 455, Páginas 34 - 57
Rusia	(Cherednichenko, 2020)		Claves para una mejor gestión del agua: en busca de la sostenibilidad en medio del caos	Presentar como solución más efectiva y eficiente el reciclado de agua residual de la fracturación hidráulica, como tratamiento clave para lograr la sostenibilidad económica y medioambiental que requiere la industria	Journal of Petroleum Technology
E.E.U.U	(Menefee Ellis, 2020)	&	Estrategias de gestión de aguas residuales para la producción sostenida de gas de esquisto	Evaluar las tendencias actuales en la gestión de aguas residuales de Marcellus y explorar las implicaciones económicas y ambientales de estrategias alternativas para satisfacer las crecientes demandas, pronosticando además los volúmenes de aguas residuales que se producirían en la zona al 2025	IOP Publishing Ltd Environmental Research Letters , Volumen 15 , Número 2
China	(Jin & Davarpanah, 2020)		Uso de Photo-Fenton y técnicas de flotación para la gestión sostenible de la reutilización de agua producida por reflujo en la exploración de yacimientos de esquisto	Realizar un análisis comparativo y consideración sobre la utilización de agua dulce y reutilización del agua residual de cada pozo, además de la aplicación del foto-Fenton y la flotación	Ater, Air, and Soil Pollution

E.E.U.U	(Zhang & Hascakir, 2021)	Una revisión de los problemas, las características y la gestión de las aguas residuales debido a la fracturación hidráulica en los EE. UU.	como metodología para la gestión de dicha agua, presentando así un considerable ahorro hídrico y económico Revisar los desafíos técnicos, económicos y ambientales de la fracturación hidráulica, entre ellos, el impacto de las aguas residuales, los factores contaminantes y algunas estrategias de gestión aptas para los fluidos de fracturación hidráulica y agua de retorno, proporcionando así, referencias sobre mejores soluciones y prácticas para los problemas actuales de las aguas residuales	Revista de ciencia e ingeniería del petróleo
---------	--------------------------	--	---	--

Nota: Información recopilada de datos de la Revisión Documental

De los 12 artículos identificados, se obtuvo acceso directo a través de la plataforma estudiantil solo de 8, con los restantes cuatro, se tuvo acceso al texto completo a través de su DOI en una plataforma externa gratuita denominada Scihub. Con respecto al idioma, todos los artículos se encontraron en idioma inglés.

3.1.1 Tendencias por Período de las Publicaciones

En la última década, la preocupación por encontrar soluciones para las problemáticas medioambientales ha venido en aumento y los estudios que se llevan a cabo así lo demuestran. En la Figura 2, se evidencia la tendencia en años respecto al número de publicaciones; como se muestra, existe un mayor interés en dicha problemática en los años 2019 y 2020 donde se concentran el 45% de los artículos del total de la muestra analizada. Esta tendencia indica, que la industria petrolera está tomando más conciencia sobre un buen manejo de los recursos hídricos y el importante papel que juega un buen suministro de agua, para que sus acciones de perforación y extracción de petróleo /gas obtengan un desempeño no solo óptimo, si no sustentable ambiental y económicamente.

Figura 2.
Tendencia Publicaciones por Año



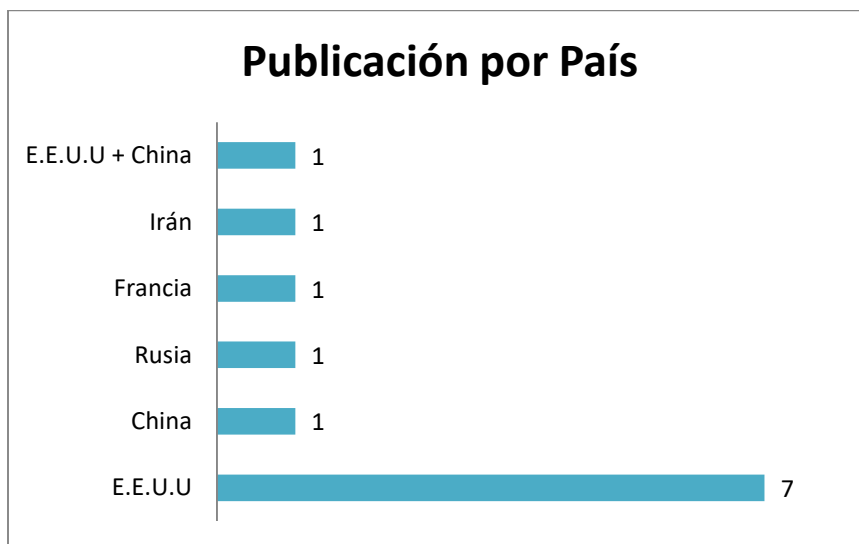
3.1.2 Tendencias por Países de Publicación

En la Figura 3, se presenta la distribución de los países que reportan estudios realizados en relación a la gestión y/o tratamiento de aguas residuales en el proceso de fracturamiento hidráulico en yacimientos no convencionales de la muestra documental, donde se resalta E.E.U.U. como la región con más estudios sobre el tema, debido esto, a que ocupa el segundo lugar dentro de los 10 primeros países con recursos de esquisto técnicamente recuperables y el cuarto con mayores recursos de gas de esquisto, convirtiéndolo en uno de los mayores productores de petróleo y gas natural del mundo desde el 2019 (Zhang & Hascakir, 2021). De igual forma, la problemática también ha sido evaluada por otros países con volúmenes altos de estos productos para extracción por medio de fracturación hidráulica, como son Rusia y China.

Figura 3.

GESTIÓN AGUAS RESIDUALES DE FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO

Publicaciones por País



3.1.3 Tendencias por Revista o Sitio Web Publicación

En la Tabla 3 se presentan las revistas o Sitios Web de Publicación de los artículos de la muestra documental, con los factores de impacto reportados por cada artículo, donde se resaltan la revista: Water Research, Environmental Science y Technology de la Universidad de Yale, como la de mayor impacto reportado.

Tabla 3.

Información Revistas de Publicación

Nombre de Revista y/o Sitio Publicación	Editorial	Factor de Impacto CiteScore (Promedio de citas recibidas por documento publicado en la serie)	Factor de Impacto(Citas ponderadas SJR 2020/2021)
Revista de ciencia e ingeniería del petróleo	Elsevier	7,6	0,975
Water, Air, and Soil Pollution	Springer Nature	3,4	0,557
Desalinización	Elsevier	14,3	1,794
Environmental Chemistry	CSIRO	3,5	0,616
Journal of Petroleum Technology	SPE International	-	-
SPE Journal	SPE International	3,478	-
Environmental Research	Iop Publishing Ltd	6,8	-

GESTIÓN AGUAS RESIDUALES DE FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO

Letters						
Enviromental	Science	y	Environ.	Sci.	13,8	9,028
Technology			Technol.			
Ciencias Aplicadas del Agua			Springer		-	3,874
			Heidelberg			
Elements			Mineralogical Soc		-	3,671
			Amer			
Computers & Engineering	Chemical		Pergamon-Elsevier Ltd	Science	-	3,845
Water Research			Iwa	The	15,6	11,2
			International			
			Water Asociation			

Nota: Información recopilada de datos de la Revisión Documental

3.2 Profundización acerca de la Gestión de Aguas Residuales en los Procesos de Fracturación Hidráulica en Yacimientos No Convencionales

El fracturamiento hidráulico y/o Fraking, se ha convertido en un tema de interés tanto social como ambiental, por las múltiples problemáticas que ocasiona en la fauna y flora de una zona y principalmente en la administración del recurso hídrico necesario para su ejecución, pues el aumento de la producción de pozos viene acompañado de preocupaciones crecientes sobre el impacto potencial resultante del uso excesivo de agua dulce y la generación de aguas residuales (Zhang & Hascakir, 2021).

Las aguas residuales que se producen en los procesos de fracturación hidráulica, contienen químicos, cuya toxicidad potencial es complicada de evaluar, pues en la mayoría de los casos, las compañías no divulgan los aditivos que utilizan por temas comerciales, pero en general, estas sustancias son referidas a “reductores de viscosidad, inhibidores de precipitación de escamas, viscosificantes, inhibidores de corrosión, estabilizadores de pH y fluidos pisotrópicos que permitan el flujo a través de las fracturas” (Velandia, 2020, pág. 15), aditivos que después de ser inyectados a presión, regresan a la superficie combinados con el agua en más del 70% (Velandia, 2020), lo que es llamado aguas residuales o aguas de reflujo, que requieren de un manejo o gestión específica para minimizar o eliminar los riesgos medioambientales.

GESTIÓN AGUAS RESIDUALES DE FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO

La perforación de pozos, tanto para la producción de gas como de petróleo en los yacimientos no convencionales, genera estos fluidos que contienen además, un alto contenido de sólidos disueltos totales, sales, químicos residuales de fracturamiento y metales trazas lixiviados, que deben ser separados, tratados y/o almacenados para su transporte, tratamiento en el lugar y/o eliminación (Menefee & Ellis, 2020).

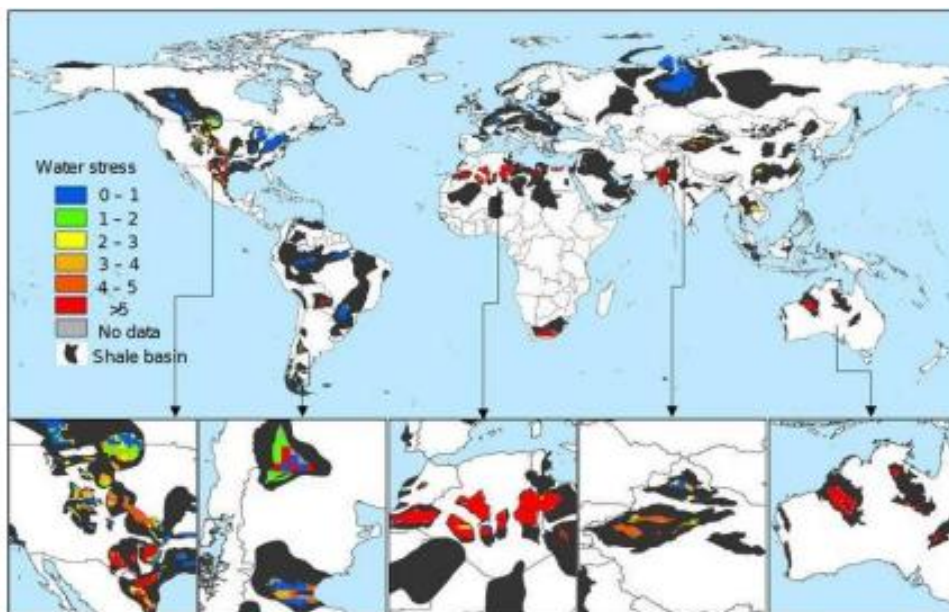
El procedimiento de fracturación hidráulica requiere del uso de millones de galones de agua, produciendo aguas residuales en proporción a petróleo de hasta 10 bbl por cada bbl de petróleo, presentando grandes desafíos tanto para los operadores como los proveedores de la industria, que se han volcado en los últimos años a la búsqueda e implementación de estrategias que les proporcionen disminución de inversiones, dando prioridad a los factores medioambientales y sociales, adoptando soluciones sostenibles y eficientes, entre las cuales se encuentra el mejoramiento de la gestión del agua (Cherednichenko, 2020).

Según el tamaño del pozo, será también el volumen de gasto de agua requerido y en un proceso de fracturación hidráulica no convencional puede generarse un gasto 10 veces mayor que en el modo convencional de extracciones, este impacto puede verse aumentado si se tiene en cuenta la disponibilidad local del recurso (teniendo en cuenta otras necesidades como la producción de alimentos, necesidades humanas, etc.), como se muestra en la Figura 4, donde se relaciona a nivel global los niveles de estrés hídrico en diferentes depósitos de lutitas; Según Francisco Martín, (2018) citado en (Velandia, 2020), esta imagen demuestra que las partes donde se presenta escasez de agua, es consumida a mayor ritmo que su reposición, ya que el mapa indica, según la coloración, (de verde a rojos) las áreas donde se presentan yacimientos de esquisto y donde el uso del agua dulce ha sobrepasado los límites.

GESTIÓN AGUAS RESIDUALES DE FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO

Figura 4.

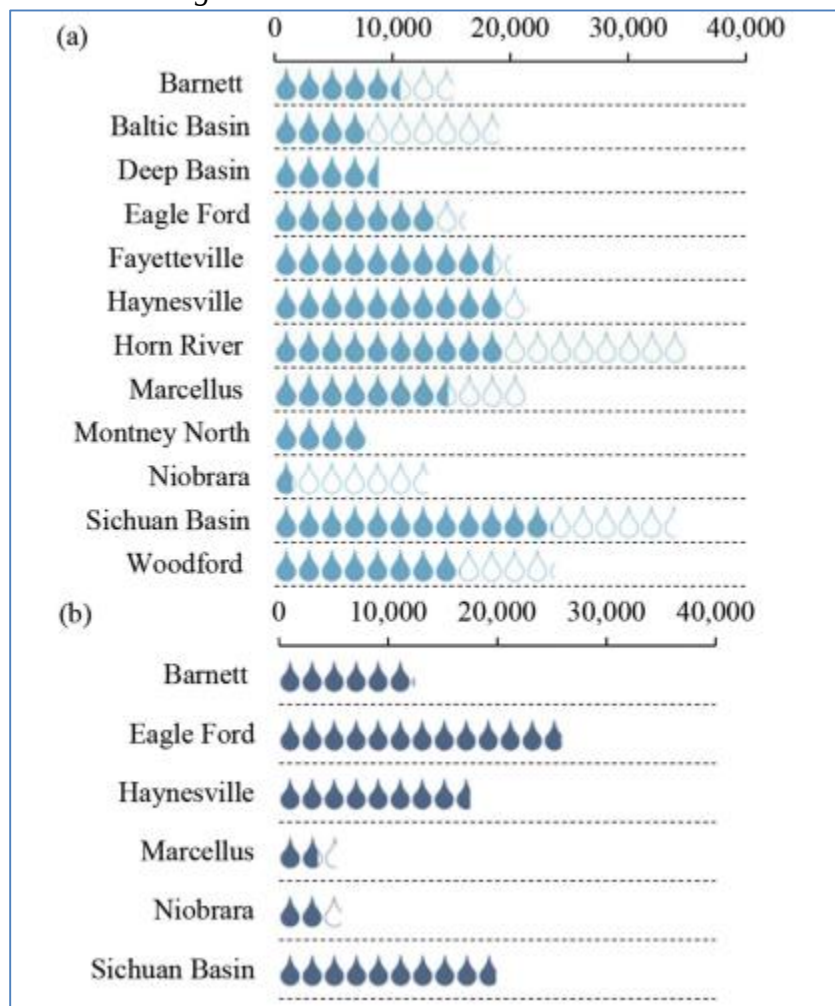
Relación de Uso de Agua y Ubicación de Yacimientos de Lutitas a nivel global



Fuente: Adaptado de (Velandia, 2020)

Este gasto hídrico, es uno de los mayores efectos ambientales de la ejecución de fracturamiento hidráulico a nivel mundial, por lo que varios países han establecido restricciones y prohibiciones de aplicación en sus territorios; solo tomando como referencia la región de Marcellus en Estados Unidos, las proyecciones indican que para el 2025, más de 12 millones de metros cúbicos (74 MMbbl) de aguas residuales se generarían cada año (Menefee & Ellis, 2020) y otros pozos, como se muestra en la Figura 5, actualmente presentan un uso medio de agua que oscila entre 7800 y 34.900 m³ para cada pozo horizontal (Chang, y otros, 2019).

GESTIÓN AGUAS RESIDUALES DE FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO

Figura 5.*Gasto Promedio de Agua Pozos E.E.U.U*

Fuente: Tomado de (Chang, y otros, 2019).

En Colombia, esta es una de las grandes preocupaciones al implementar el fracturamiento hidráulico: el nivel de consumo y contaminación del agua. A pesar de los recientes avances técnicos en este tipo de perforaciones, que reducen significativamente los riesgos potenciales y aumenta la eficiencia económica (Uniandes, 2021), sigue siendo una temática de mucha sensibilidad, pues algunos de los depósitos existentes en el país ubicados en el Magdalena medio, el Caguán(Putumayo), Ranchería(Cesar), los Llanos Orientales, Valle Inferior del Magdalena, Valle Superior del Magdalena, Amagá; y Vaupés – Amazonía (Portafolio, 2021), los recursos hídricos son limitados y/o son la fuente principal de abastecimiento de las comunidades que

GESTIÓN AGUAS RESIDUALES DE FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO

pueden verse afectadas si no se llevan a cabo gestionamientos adecuados de las aguas residuales que se produzcan.

Es por ello, que la gestión de aguas residuales de la fracturación hidráulica en yacimientos no convencionales, se ha convertido en uno de los mayores desafíos que debe superar la industria, involucrando elementos técnicos, económicos y ambientales, pues se ha de tener en cuenta, que cada zona puede manejar características y composiciones de aguas residuales particulares, debido a sus fuentes contaminantes, el entorno y las variaciones presentes a través del tiempo. Estas particularidades de las aguas residuales y los propósitos que quieran lograr los operadores, serán las bases fundamentales para el establecimiento de estrategias del manejo de estas aguas, comprendiendo cada una de las limitantes o ventajas que puedan proveer las variadas metodologías de tratamiento, con el fin de que su elección sea la más pertinente (Zhang & Hascakir, 2021).

Según Chang, y otros (2019), “el futuro de la industria del gas y el petróleo no convencional depende de la gestión eficaz de las aguas residuales” (pág. 34), por lo cual las estrategias o tecnologías para su gestión, deben enfocarse en brindar soluciones que permitan la sostenibilidad del recurso hídrico, sin incurrir en sobrecostos, pues además, se debe mapear la disponibilidad del agua de la localidad y los recursos de infraestructura disponibles, para que el factor económico de la fracturación hidráulica en estos yacimientos no convencionales, no se sobrepongan a los impactos ambientales negativos que su aplicación genera (Gregory & Mohan, 2015).

A medida que la industria y los procedimientos de fracturación hidráulica se expanden, también aumentan los obstáculos logísticos y económicos que deben ser superados, siendo uno de los más importantes los impactos asociados con el almacenamiento, transporte, reutilización

GESTIÓN AGUAS RESIDUALES DE FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO

y/o eliminación de las aguas residuales, cuya variabilidad tanto en cantidad como en calidad aportada por las características geoquímicas de cada yacimiento, juegan un papel crucial en la definición de la gestión que se lleve a cabo, pues su tratamiento estará supeditado a los niveles de concentraciones de sales, metales y componentes radiactivos; de igual forma, dentro de la gestión deben preverse riesgos asociados a derrames y/o fugas durante el transporte o en las instalaciones de almacenamiento, pues estos pueden afectar significativamente fuentes y recursos de agua dulce cercanos (Menefee & Ellis, 2020).

3.3 Enfoque Sistémico del Ciclo para la Gestión de las Aguas Residuales

A través de la investigación y revisión documental realizada, se ha establecido que el agua es quizá, el recurso fundamental en el proceso de fracturación en los yacimientos no convencionales, sin este insumo, las compañías no pueden llevar a cabo sus operaciones, jugando un papel crucial en la industria de los hidrocarburos, pero de igual forma, representa el mayor obstáculo para esta, pues los impactos de su utilización son considerados como cualquier alteración en la calidad o cantidad del fluido potable, siendo estas situaciones arduamente fiscalizadas y reguladas mundialmente, pues en la actualidad varias regiones del planeta registran una crisis extrema en el aprovisionamiento de este recurso, debido también al aumento desmedido de la producciones agrícolas, la aceleración industrial, el crecimiento poblacional, los cambios climáticos y altos consumos energéticos, influenciando negativamente los procesos industriales de extracción de pozos no convencionales, por lo cual, los actores de esta industria, deben encaminarse a idear formas y gestiones de utilización del agua de manera eficiente para no aumentar el estrés y los impactos potenciales en los recursos hídricos, sobre todo en zonas de mayor riesgo (Shrestha, Chilkoor, Wilder, Gadhamshetty, & Stone, 2017).

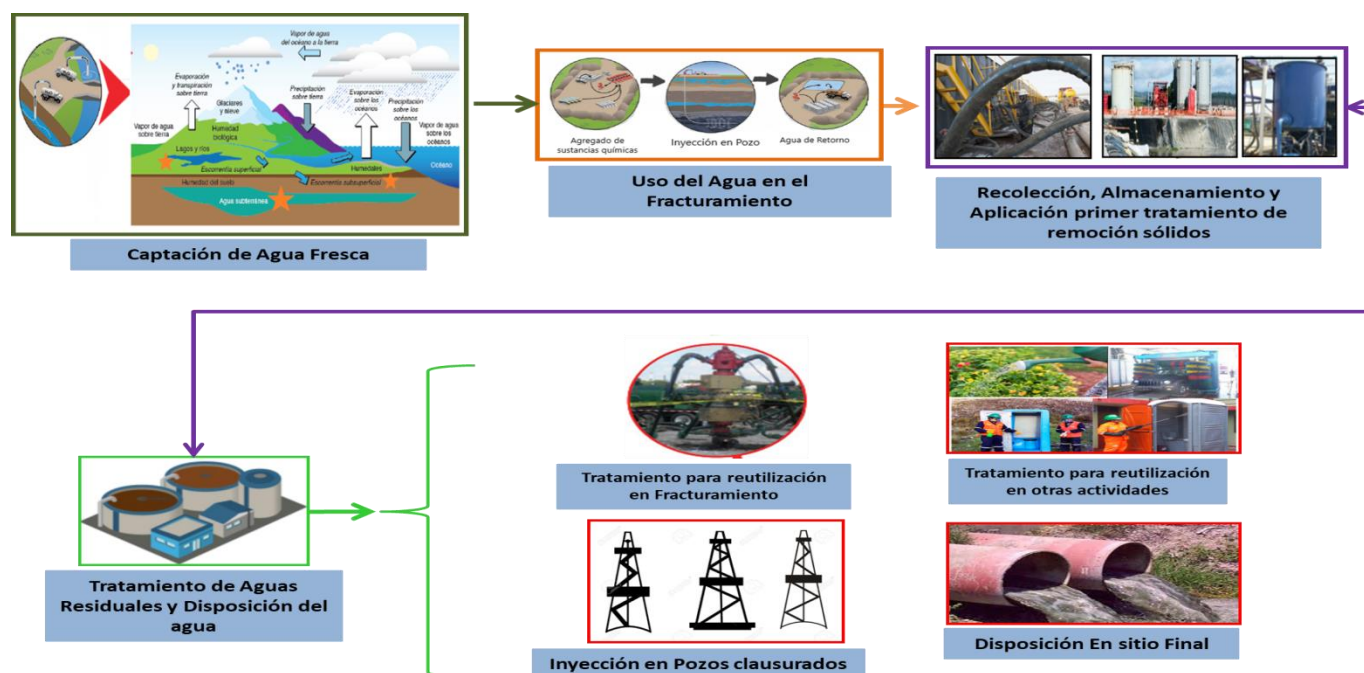
Es por ello, que de una adecuada gestión, tanto del agua potable como de las aguas

GESTIÓN AGUAS RESIDUALES DE FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO

residuales, dependerá que los procesos operaciones se lleven a cabo de manera exitosa. El establecer un ciclo adecuado y óptimo para su gestión, se traducirá en reducción del gasto hídrico y por ende en minimización de costos (de transporte y de operación en planta), además de contribuir al mejoramiento de la disponibilidad del agua en las zonas, generando así, no solo utilidades a las compañías, si no beneficios al medio ambiental de la región donde se estén llevando a cabo las operaciones.

Teniendo en cuenta lo anterior, el ciclo para una buena gestión de aguas residuales, no solo inicia desde su producción o retorno de los pozos, sino desde el proceso de captación de agua fresca, por tanto, el enfoque sistémico, convergería en cuatro etapas principales, como se muestra en la Figura 6.

Figura 6.
Ciclo para la Gestión de Aguas Residuales



Fuente: Adaptado a partir de información y elementos recolectados en la revisión de literatura (Shrestha, Chilkoor, Wilder, Gadhamshetty, & Stone, 2017), (Gregory & Mohan, 2015),

GESTIÓN AGUAS RESIDUALES DE FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO

(Guerra, Calderon, apageorgiou, Sirola, & Reklaitis, 2016), (Afshin, 2018) y (Menefee & Ellis, 2020) .

3.3.1 Captación de Agua Fresca y Uso del Agua en los procesos de Fracturamiento Hidráulico

El proceso de captación del agua fresca y/o potable es la etapa más crítica y que requiere la identificación de mecanismos responsables y estrategias que permitan disminuir la impresión o el estrés sobre el recurso agua de las zonas intervenidas, pues el ciclo del agua de las operaciones de los procesos de fracturamiento hidráulico convergen o están estrechamente relacionados con el ciclo del agua natural.

El agua necesaria para la operatividad de las actividades de fracturamiento hidráulico, es captada a través de diferentes fuentes, pudiendo ser de aguas superficiales, flujos de agua subterráneos, suministro de agua de la zona, ríos y/o humedales, pero dentro de las opciones más recientes que están siendo validadas por las empresas operadoras, está la recolección del agua que se produce en la misma acción de fracturamiento, como una fuente alterna e innovadora que promueve el reciclaje y la reutilización (Gómez, 2016).

Shrestha, Chilkoor, Wilder, Gadhamshetty, & Stone (2017), indican que la Agencia de Protección Ambiental (EPA), ha sugerido que la producción de petróleo no convencional afecta los recursos hídricos regionales durante cinco etapas del ciclo del agua: 1) adquisición y transporte desde las fuentes, 2) Mezcla con productos químicos del fracturamiento 3) Inyección de fluidos a alta presión para el fracturamiento de rocas, 4) Producción de aguas de retorno, 5) Disposición de aguas residuales (ver figura 7). Estas afectaciones son más intensas en la etapa I, ya que cuando se extrae agua fresca de manera descomunal en alguna zona, puede presentarse o derivar en estrés hídrico en periodos de sequía, restringiendo así el acceso del agua para otras actividades como las agrícolas, y en las etapas II y III, debido a que los derrames de productos

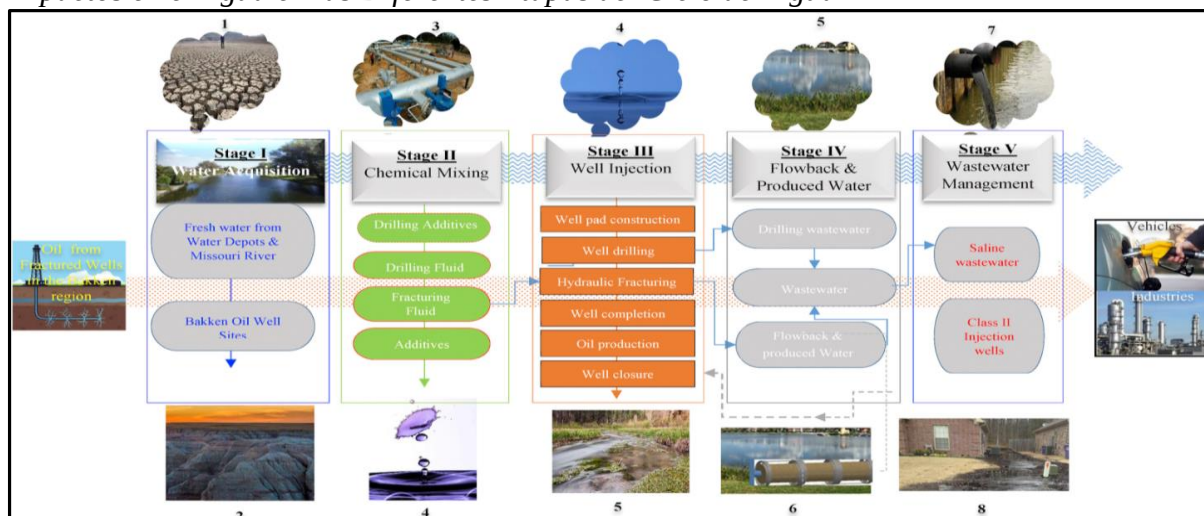
GESTIÓN AGUAS RESIDUALES DE FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO

químicos durante estas etapas pueden contaminar los recursos hídricos superficiales y subterráneos.

La etapa del uso del agua en los procesos de Fracturamiento Hidráulico, implica entonces el agregado de sustancias químicas, consistiendo en la preparación de los fluidos de fracturamiento utilizando como base el agua fresca, adicionándole apuntalantes y productos químicos de fracturamiento, la inyección en pozos, que se realiza mediante camiones de bombeo que inyectan los fluidos a altas presiones (0,75 Psi/pie), partiendo las rocas petrolíferas y transportando los apuntalantes que mantienen abiertas las fracturas y estimulan la producción de petróleo no convencional, y la producción de aguas de retorno y aguas residuales de perforación, que contienen los productos químicos contaminantes y fluidos de fracturación tóxicos que pueden migrar hacia los recursos hídricos potables si existen fallas de revestimiento de pozos o fracturas existentes en las formaciones geológicas objetivo y los acuíferos cercanos (Shrestha, Chilkoor, Wilder, Gadhamshetty, & Stone, 2017).

Figura 7.

Impactos en el Agua en las Diferentes Etapas del Ciclo del Agua



Fuente: Tomado de (Shrestha, Chilkoor, Wilder, Gadhamshetty, & Stone, 2017).

GESTIÓN AGUAS RESIDUALES DE FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO

3.3.2 *Recolección, Almacenamiento y Aplicación Primer Tratamiento y/o pre tratamiento*

Para gestionar el ciclo de las aguas residuales se presenta su recolección, en la cual, las empresas operadoras tienen en cuenta y ejecutan diferentes formas de recaudo haciendo diferencia entre las aguas de reflujo o de retorno y las aguas producidas, ya que las primeras presentan elevados caudales iniciales y por lo general las recolectan en embalses artificiales, y las segundas son recolectadas en tanques cerrados separándolas de la superficie del petróleo y/o gas.

Una vez realizada la logística de la recolección de las aguas, se debe disponer infraestructura y locaciones adecuadas para su almacenamiento, teniendo en cuenta marcos normativos y capacidad económica de los operadores, además de las tecnologías y técnicas de manejo de residuos que pretendan aplicar para el mejoramiento del agua, apuntando estas técnicas globalmente a la reducción, reciclaje, reutilización y recuperación. En este caso, para la gestión de las aguas ya residuales, aplicarían los enfoques de recuperación, reciclaje y reutilización, apuntando a lograr esto, después de la aplicación de procesos para la eliminación de residuos y tratamientos que empleen métodos debidamente autorizados y a favor del medio ambiente (Afshin, 2018).

Las dos formas de recolección de aguas residuales que están empleando (embalses artificiales y tanques cerrados) presentan diferencias como son los costos y los posibles riesgos ambientales, pues los almacenamientos abiertos son más económicos, pero pueden estar sujetos a fallas y vertimientos accidentales al medio ambiente, por causas como revestimientos o tanques con defectos, desbordamientos y/o escorrentías alimentadas por lluvias torrenciales e inundaciones. Estos riesgos ambientales que pueden presentarse, han incentivado el establecimiento de normatividades estrictas para el uso de embalses y logística de recolección de

GESTIÓN AGUAS RESIDUALES DE FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO

las aguas residuales en las zonas donde practican ampliamente el fracturamiento hidráulico, como es el caso de Pensilvania y Virginia Occidental, donde las empresas operadoras tienen limitaciones para construir embalses y tanques recolectores en zonas con antecedentes de inundaciones y llanuras aluviales, estando sujetas a constantes inspecciones para controlar los riesgos potenciales que puedan causar acciones atmosféricas fuera de lo común (Gregory & Mohan, 2015).

Adicionalmente a los riesgos ocasionados por efectos naturales, la elección del método de almacenamiento, conlleva un análisis previo de la composición de las aguas residuales generadas, influyendo esto, en la elección de equipos y productos químicos a aplicar para que el proceso sea llevado a cabo de manera más productiva, maximizando así la reutilización del agua y disminuyendo los impactos en el medio ambiente circundante; Así pues, se debe tener en cuenta la siguiente clasificación de las aguas residuales que realizan en la mayoría de los casos, (Afshin, 2018) :

- Materia Orgánica bastante disuelta (incluye compuestos volátiles e hidrocarburos)
- Altas concentraciones de Sal (Por lo regular $> 35 \text{ g / L}$)
- Metales (Hierro, Calcio, Bario, etc.)
- Gases disueltos
- Material Radioactivo natural
- Altas concentraciones de sólidos suspendidos, aceites, grasas

Los operadores y las compañías petroleras, deben anticipar los riesgos y peligros de toxicidad según la composición de las aguas residuales producidas, realizando estudios de dispersión de ocurrencia, tiempos de asentamiento en el medio ambiente, posibles efectos dañinos en las cadenas alimentarias, etc., siendo esto de suma importancia para establecer la

GESTIÓN AGUAS RESIDUALES DE FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO

aplicación de metodologías de tratamiento apropiadas según cada caso particular (Afshin, 2018).

La actividad de aplicación de primer tratamiento pretende eliminar y/o disminuir las altas concentraciones de sólidos y sales que contienen las aguas residuales, removiendo materiales más ligeros y más pesados que el agua, existiendo variabilidad de métodos estandarizados y adecuados para realizar esta primera limpieza, entre los cuales se pueden nombrar la micro filtración o la Ultrafiltración, que vienen siendo ampliamente aplicados desde los años 90, siendo combinados actualmente con procesos de ósmosis inversa, dando buenos resultados en proyectos locales avanzados, donde reinyectan el agua reciclada en acuíferos subterráneos, para aumentar el agua existente o han logrado la desmineralización del agua para ser aprovechada en los procesos de alimentación de calderas, (Afshin, 2018).

Según Al Dabaj 2018 y Oetjen et al. 2017, 2018 citados en (Afshin, 2018) también existen otros tipos de metodologías de separación de sólidos y otras partículas del agua, como son la dilución, filtración, centrifugación, extracción líquido-líquido (LLE), extracción en fase sólida y micro extracción en fase sólida (SPME), todas estas técnicas con la similitud de proveer reutilización del agua nuevamente en perforaciones y acciones operativas de los pozos, cumpliendo dos principios o propósitos importantes: disminución de la viscosidad y eliminación de los componentes particulados de las aguas residuales tratadas.

3.3.3 Tratamiento de Aguas Residuales y Disposición del Agua

La metodología, gestión y destino o disposición del agua, serán condicionados por factores económicos, logísticos y normativos a los que estén sometidos las compañías según la zona donde estén operando, por lo cual, según los diversos tratamientos que puedan ser aplicados serán los resultados de su reutilización, reciclaje y/o eliminación, pudiéndose destinar para: re uso en el mismo fracturamiento, reutilización en otras actividades o eliminación a través de

GESTIÓN AGUAS RESIDUALES DE FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO

inyección en pozos profundos o enviados a disposición final en vertederos debidamente autorizados (Guerra, Calderon, apageorgiou, Sirola, & Reklaitis, 2016).

3.3.3.1 Eliminación: Disposición Final o Inyección en Pozos Profundos

Para las aguas residuales que no pueden ser reutilizadas o recicladas por sus contenidos químicos o por factores como los elevados costos logísticos, se encuentran dos categorías principales que vienen siendo usadas, como son, el tratamiento y descarga en una instalación centralizada (vertederos de disposición final) o inyección de dicha agua en pozos profundos clausurados (Menefee & Ellis, 2020).

La implementación de técnicas que deriven en la reutilización de dichas aguas, implica mayores volúmenes económicos y responsabilidades empresariales, lo que ocasiona limitaciones en su implementación, teniendo en cuenta además, que la práctica de transferir las aguas residuales pre tratadas a instalaciones de tratamiento municipales, han sido prohibidas por entes reguladores internacionales (Menefee & Ellis, 2020), por sus altas implicaciones en la salud humana y en el medio ambiente, acrecentando así rigurosos estándares para que las aguas residuales puedan ser enviadas a sitios de descarga y ocasionando que en varios países, como por ejemplo Estados Unidos, la mayor parte de las aguas residuales que producen no aptas para reutilización o reciclaje, sean inyectadas en pozos clausurados y acondicionados para su eliminación, lo que denominan pozos de eliminación de clase II de Control de Inyección Subterránea (Gregory & Mohan, 2015).

La opción de inyección en pozos profundos, según Menefee & Ellis, (2020) es operativamente más competitiva y probablemente menos costosa, pues según este autor, el costo promedio para tratar aguas residuales duplica el de la inyección subterránea, aunque ello depende de cada pozo y zona en particular, incidiendo factores como distancias para el

GESTIÓN AGUAS RESIDUALES DE FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO

transporte, asegurando Gregory & Mohan, (2015) , que “el transporte del agua producida es costoso y en las regiones donde hay pocos puntos de inyección en pozos profundos (por ejemplo, Pensilvania, EE.UU.), los valores de gestión de esta agua son mayores que cuando los pozos de inyección están situados cerca del punto de generación” (pág. 264).

Sin embargo, la práctica de inyección de aguas residuales en pozos profundos, viene siendo ampliamente estudiada, analizada y debatida por expertos, pues la relacionan con aumento de riesgos y eventos sísmicos; es así, como varios autores citados en Gregory & Mohan, (2015), expresan que los casos de terremotos presentados en Ohio, Arkansas, Oklahoma y Texas, en Estados Unidos, pudieron estar relacionados con esta actividad, por lo que indican que se requieren estudios más profundos y específicos sobre las condiciones de tensión y presión en el subsuelo, estadísticas sobre volúmenes de inyección, presiones y vigilancia sísmica, para evitar mayores riesgos, previendo y/o mitigando ocurrencia de movimientos telúricos.

3.3.3.2 Aplicación de Tratamientos: Reutilización y/o Reciclaje. Teniendo en cuenta la

panorámica que se presenta con la opciones de eliminación de estas aguas residuales,

los cambios regulatorios ambientales de los últimos tiempos y los avances tecnológicos, las empresas operadoras, han venido acrecentando su interés por llevar a cabo procesos que les permitan la reutilización del agua producida por la fracturación hidráulica, sobre todo como mecanismo de reposición en futuras fracturaciones y para la operatividad en general de los pozos, sobre todo y particularmente en aquellas zonas que presentan limitaciones para la opción de inyección en pozos profundos, encontrando con estas estrategias no solo beneficios monetarios sino ambientales, pues a la vez que se disminuye el volumen de agua para ser eliminada, se reduce la cantidad de agua potable que se requiere captar (Gregory & Mohan, 2015).

GESTIÓN AGUAS RESIDUALES DE FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO

Para Afshin (2018), en las operaciones de perforación se están llevando a cabo dos técnicas o métodos de tratamiento, con los cuales las compañías logran el objetivo de mejorar la calidad del agua y afectar positivamente los parametros clave, para que las aguas residuales puedan ser reutilizadas, implicando estos tratamientos un método convencional o un método avanzado. El método convencional, según Afshin, se centra en procesos de floculación, coagulación, sedimentación, filtración y ablandamiento de cal, gastando menos energia que los tratamientos donde se separan las sales e influyendo ampliamente en residuos suspendidos, sólidos coloidales, aceite, grasa, etc, mientras que las metodologías con tratamientos avanzados aplican procesos de ósmosis inversa, destilación térmica, evaporación y cristalización, tratando con ello, solidos disueltos (cloruros, bario, radionucleidos, etc.)

Para Carter, Hammack y Bertrand citados en (Gómez, 2016), las compañías tienen varias opciones de tratamientos para aguas residuales, aplicando algunas empresas, la mezcla de las aguas residuales con más agua potable para reducir los efectos de los sólidos totales disueltos y los aditivos químicos empleados, otras empresas utilizan la floculación o filtración para remover suficientes sólidos y materiales orgánicos, otras compañías, elaboran embalses donde manejan la evaporación del agua y posteriormente pasan los residuos sólidos a rellenos municipales y otra gran mayoría, envían las aguas residuales a disposición final o inyección en pozos. La elección de cada compañía de su método de tratamiento, dependerá inicialmente de las acciones y disposición que quieran lograr del agua y posteriormente de las capacidades económicas y logísticas que posean (Gómez, 2016).

Entre algunos de los tratamientos de aguas residuales que pueden ser aplicados en yacimientos no convencionales se tienen:

GESTIÓN AGUAS RESIDUALES DE FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO

Dilución:

Este es el método más básico utilizado como reciclaje, siendo un proceso en el cual realizan mezcla de las aguas residuales con más agua potable. Este tratamiento, ha sido ampliamente utilizado en operaciones de fracturamiento en Estados Unidos, sobre todo en los yacimientos de Marcellus, donde para el año 2012 llegaron a reciclar hasta el 90% de las aguas residuales que produjeron (Gregory & Mohan, 2015).

Filtración:

Tratamiento consistente en remover físicamente las partículas, el cual puede ser de carácter pasivo, solo haciendo uso de la gravedad y los flujos volumétricos para realizar la separación, o de carácter activo, si se aplica energía como mecanismo de presión y encausamiento del agua a través de una membrana filtrante; Esta técnica puede realizar remoción de partículas ≥ 25 micrones, no pudiendo afectar los sólidos totales disueltos (Gómez, 2016).

Esta metodología de tratamiento, deriva en varias técnicas, que pueden ser seleccionadas dependiendo de las características del agua que se requiera tratar, técnicas que Afshin (2018) denomina “metodologías avanzadas de tratamiento de membranas” pudiendo clasificarse en 4 categorías:

- Microfiltración: Donde se filtran partículas < 1 micrón.
- Ultrafiltración: Esta forma de tratamiento, utiliza membranas con poros hasta de 1 nanómetro, pudiendo separar sólidos suspendidos y solutos con un peso > 1000 Dalton, removiendo virus y bacterias (Gómez, 2016).
- Nanofiltración: En este caso, los poros de las membranas utilizadas son de tamaño nanométrico, pudiendo desmineralizar, desalinizar, concentrar solutos orgánicos, sólidos suspendidos, y iones polivalentes (Gómez, 2016).

GESTIÓN AGUAS RESIDUALES DE FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO

- Ósmosis Inversa: denominada también hiperfiltración, es una de las técnicas que provee mejores resultados en la reducción y/o eliminación de sólidos suspendidos y disueltos y en la desalinización de agua.

Destilación

En este tipo de tratamiento utilizan membranas y vapores, consistiendo en que las aguas residuales son traspasadas a través de una membrana hidrófoba, con poros de tamaño nano, que solo permite pasar vapores de agua de manera condensada hacia un lado limpio (Gómez, 2016).

Floculación

Consiste en un proceso donde los residuos emulsionados se aíslan de la suspensión aglomerándose en forma de láminas o flocs.

Evaporación

Esta forma de tratamiento puede darse de forma natural, haciendo uso de embalses y artificiales y dependiendo de los factores ambientales, pero por lo general, las compañías emplean sistemas que les permiten acelerar el proceso, a través de la aplicación de energía con herramientas como compresores mecánicos y termo compresores, mejorando las capacidades y resultados eficientes de la condensación y evaporación (Gómez, 2016).

Tratamientos Químicos

Dentro de los tratamientos de separación química, se puede nombrar la cristalización, donde la masa del soluto hace transferencia de la solución líquida a fase sólida cristalina y la oxidación, que es un tratamiento químico donde utilizan, por lo regular, ozono y radiación ultravioleta para remover residuos orgánicos e inorgánicos de las aguas residuales (Gómez, 2016).

De todos los tratamientos posibles por ser aplicados, una de las mayores preocupaciones

GESTIÓN AGUAS RESIDUALES DE FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO

de los operadores a la hora de su implementación, es que los cationes divalentes del agua producida no sean compatibles con el medio ambiente y las características del yacimiento, pudiendo precipitarse en el siguiente pozo donde sea utilizada, o que las poblaciones bacterianas produzcan sulfuro de hidrogeno y provoquen corrosión en infraestructuras, afectando la productividad (Gregory & Mohan, 2015).

En conclusión, la gestión de aguas residuales del fracturamiento hidráulico en pozos no convencionales, está avanzando cada vez más hacia las metodologías de reutilización y reciclaje, (sobre todo en lugares donde es inviable costear el transporte para realizar inyección en pozos profundos), aunque la mayoría de los autores citados, coinciden en que puede presentar costos más elevados, esto se compensa con el mejoramiento de la economía en general de la operatividad de la fracturación hidráulica y los múltiples beneficios medioambientales para la zona donde estén establecidos los pozos, sin embargo, hasta el momento, las investigaciones no han podido llegar a establecer acuerdos sobre los parámetros de calidad del agua reciclada después de la aplicación de tratamientos, pues influyen múltiples factores como las características propias de cada pozo, la logística, tecnología aplicada y la disposición que destinen los operadores.

Capítulo 4 Identificación Casos de Éxito en la Gestión Efectiva de las Aguas Residuales

4.1 Revisión de Casos

Para realizar la identificación de los casos de éxito en la gestión efectiva de las aguas residuales en yacimientos no convencionales, se expone en primera instancia, cada una de las metodologías señaladas por los artículos revisados, identificando así, el manejo y disposición que los autores pretenden establecer para estas aguas, y de igual manera, realizando un análisis

GESTIÓN AGUAS RESIDUALES DE FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO

estadístico de sus posibles beneficios, para luego con estos resultados, visualizar cuales se presentan como casos de éxito.

De cada metodología de tratamiento, se presenta el tipo de yacimiento no convencional al que va dirigido, descripción del tratamiento aplicado y los hallazgos y/o resultados presentados por los respectivos exponentes.

1. Desafíos de la gestión del agua asociados con la producción de gas de esquisto por fracturación hidráulica (Gregory, Vidic, & Dzombak, 2012. E.E.U.U)

El desarrollo de recursos de gas natural terrestres no convencionales en esquistos profundos se está expandiendo rápidamente para satisfacer las necesidades energéticas mundiales. La gestión del agua se ha convertido en un tema clave en el desarrollo de estos depósitos de gas subterráneos, y la fracturación hidráulica se utiliza para liberar gas natural (ver figura 8). Después de la fracturación hidráulica, se devuelven a la superficie grandes cantidades de agua que contienen concentraciones muy altas de sólidos disueltos totales (TDS). La concentración de TDS en estas aguas residuales, también conocidas como "de retorno", puede llegar a cinco veces la del agua de mar. Las aguas residuales que contienen altas concentraciones de TDS son difíciles y costosas de tratar. La producción económica de los recursos de gas de esquisto requerirá una gestión creativa del flujo de retorno para garantizar la protección de los recursos de aguas superficiales y subterráneas.

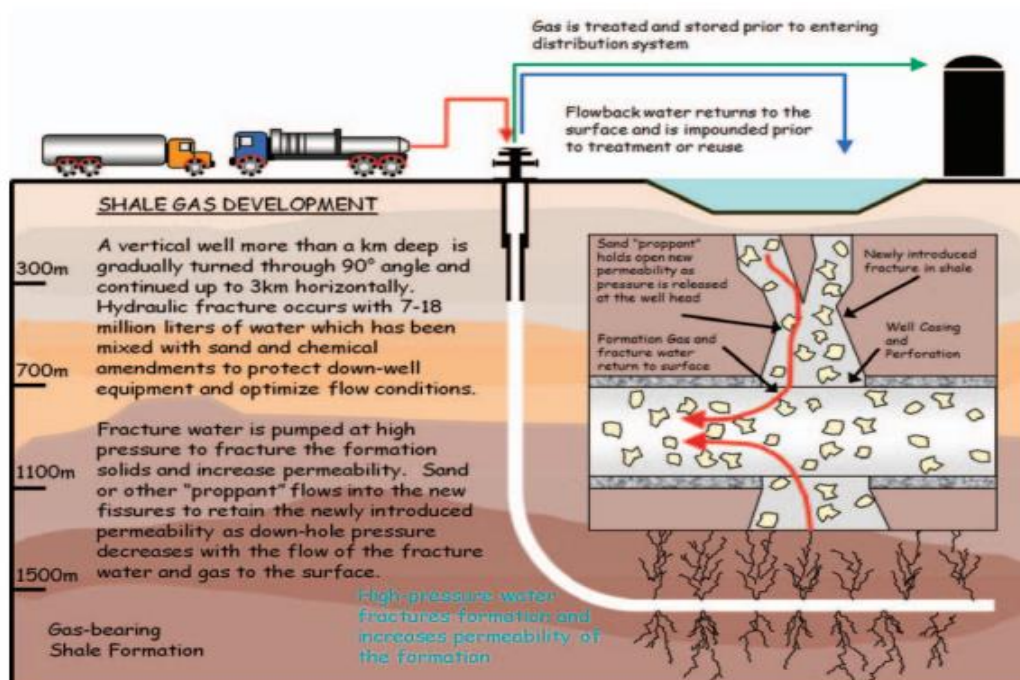
Actualmente, la inyección en pozos profundos es la principal herramienta de gestión. Sin embargo, en muchas regiones ricas en gas de esquisto, no hay puntos de inyección de pozos profundos. Con el enfoque global en la calidad y cantidad del agua dulce, las nuevas estrategias de gestión de los recursos hídricos y las tecnologías de tratamiento permitirán la extracción de gas ambientalmente sostenible y económicamente viable, que es fundamental para el desarrollo

GESTIÓN AGUAS RESIDUALES DE FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO

de esta importante fuente de energía.

Figura 8.

Visión General de la Fracturación Hidráulica



Fuente: Tomado de (Gregory, Vidic, & Dzombak, 2012)

- Tipo de Yacimiento No Convencional al que va Dirigido:

Sheil gas

- Descripción del tratamiento Aplicado:

Ósmosis Inversa: Tratamiento donde pasan el agua a través de membranas semipermeables bajo presión, separando así, partículas suspendidas, moléculas orgánicas e inclusive iones monovalentes, dando como resultado un agua con altos niveles de calidad y pureza.

Destilación térmica y cristalización: Tratamiento adecuado para aguas residuales con altas concentraciones de Sólidos disueltos, basándose en la evaporación, utiliza una corriente de vapor que pasa por un intercambiador de calor para condensar el gas, separando los componentes

GESTIÓN AGUAS RESIDUALES DE FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO

disueltos y produciendo agua purificada.

- Hallazgos y/o Resultados

Ósmosis Inversa:

El tratamiento es altamente efectivo para obtener agua de alta pureza, reduciendo hasta en un 20% el concentrado de materiales en las aguas de retorno según indica ALL Consulting, 2003 citado por estos autores, no siendo viable para aplicar en aguas residuales que contengan más de 40.000 mg/L de TDS.

Este tratamiento ha sido mejorado a través de la aplicación de cizallamiento vibratorio, colocando las membranas en forma de disco paralelos separados por juntas, levantando y despegando los sólidos incrustados en las superficies de las membranas, reduciendo aún más la suciedad coloidal, según lo afirman Jaffrin, 2008 y New Logic Research 2004, también citados en este artículo (Gregory, Vidic, & Dzombak, 2012).

Destilación térmica y cristalización:

Este tratamiento elimina hasta el 99,5% de los sólidos disueltos y se calcula que reduce los costes de tratamiento y eliminación hasta en un 75% en el caso de aguas de retorno en pozos de esquisto. (ALL Consulting, 2003) citado en este artículo.

Con la utilización de este tratamiento solo se pueden tratar aguas que contengan hasta 125.000 mg/L de TDS y tasas de flujo de 300 m³/d, además de producir un alto gasto energético (Gregory, Vidic, & Dzombak, 2012).

2. Perspectiva actual sobre los desafíos de la gestión del agua producida durante la fracturación hidráulica para la recuperación de petróleo y gas (Gregory & Mohan, 2015. E.E.U.U.).

En este artículo los autores discuten el enfoque global en la calidad y cantidad del agua

GESTIÓN AGUAS RESIDUALES DE FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO

dulce, las nuevas estrategias de gestión de los recursos hídricos y las tecnologías de tratamiento permitirán la extracción de gas ambientalmente sostenible y económicamente viable, que es fundamental para el desarrollo de esta importante fuente de energía. Y es que actualmente, la inyección en pozos profundos es la principal herramienta de gestión. Sin embargo, en muchas regiones ricas en gas de esquisto, no hay puntos de inyección de pozos profundos.

Aunque estos recursos se conocen desde hace mucho tiempo, la experiencia tecnológica y las fuerzas del mercado que impulsan la economía han sido constantes durante los últimos 15 años. La combinación de perforación horizontal y fracturación hidráulica ha generado una economía favorable para el desarrollo de energía fósil a partir de estos depósitos no convencionales, pero su posible aplicación generalizada ha suscitado preocupaciones sobre los impactos ambientales nocivos en los recursos hídricos vulnerables. Los desafíos de gestión ambiental que enfrenta la industria del petróleo y el gas se derivan de la disponibilidad de recursos hídricos locales y la infraestructura para tratar y eliminar las altas concentraciones de aguas residuales resultantes. Si bien existen desafíos significativos, crean oportunidades para la innovación de la industria (Gregory & Mohan, 2015).

- Tipo de Yacimiento No Convencional al que va Dirigido:

Shale gas y shale oil

- Descripción del tratamiento Aplicado:

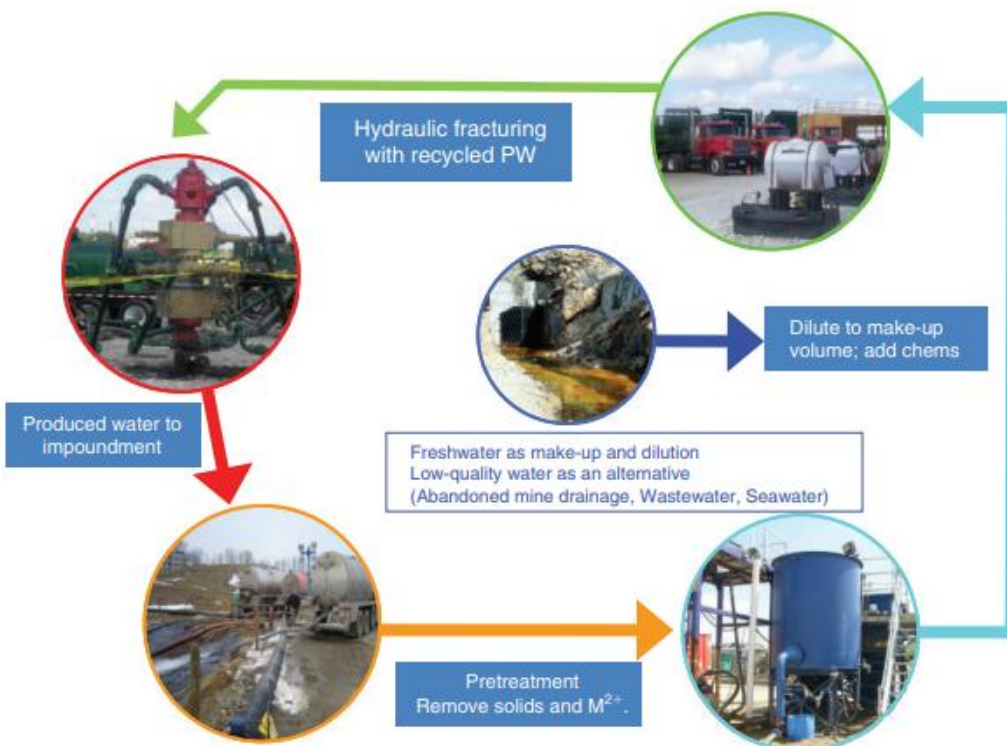
Destilación para reciclaje del agua residual en punto de generación: Pretratamiento con eliminación de sólidos y M2 y dilución mediante agregado de sustancias químicas.

En la figura 9, se presenta el esquema indicado por este estudio para llevar a cabo el reciclaje de aguas residuales en pozos.

Figura 9.

GESTIÓN AGUAS RESIDUALES DE FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO

Diagrama para reciclaje de aguas residuales por Dilución



Fuente: Tomado de (Gregory & Mohan, 2015)

- Hallazgos y/o Resultados

El agua producida, está siendo recolectada y separada en tanques cerrados, siendo esta una de las mejores prácticas de manejo que está utilizando la industria, aunque sigue siendo más costoso que el uso de embalses abiertos, por normatividad regulatoria va en aumento esta metodología.

En Estados Unidos la mayor parte del agua producida por fracturación hidráulica está siendo eliminada mediante reutilización en la inyección de pozos profundos, en pozos de disposición clase II de control de inyección subterránea, aunque esto, ha sido asociado con la ocurrencia de sucesos sísmicos por el aumento de presión en los poros, deslizamiento de fallas y

GESTIÓN AGUAS RESIDUALES DE FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO

liberación de energía, por lo cual para utilizar este tipo de métodos se deben controlar las tasas de inyección y la presión para gestionar mejor la eliminación subterránea de aguas residuales.

El agua resultante de este tratamiento, contiene bacterias bien adaptadas que pueden acelerar la acidificación del gas y reducir la eficacia de los biocidas.

Este tipo de tratamiento ha reportado hasta un 90% de reciclaje de agua (Gregory & Mohan, 2015).

3. Un marco de optimización para la integración de la gestión del agua y el diseño de la cadena de suministro de gas de esquisto (Guerra, Calderón, apageorgiou, Sirola, & Reklaitis, 2016. E.E.U.U)

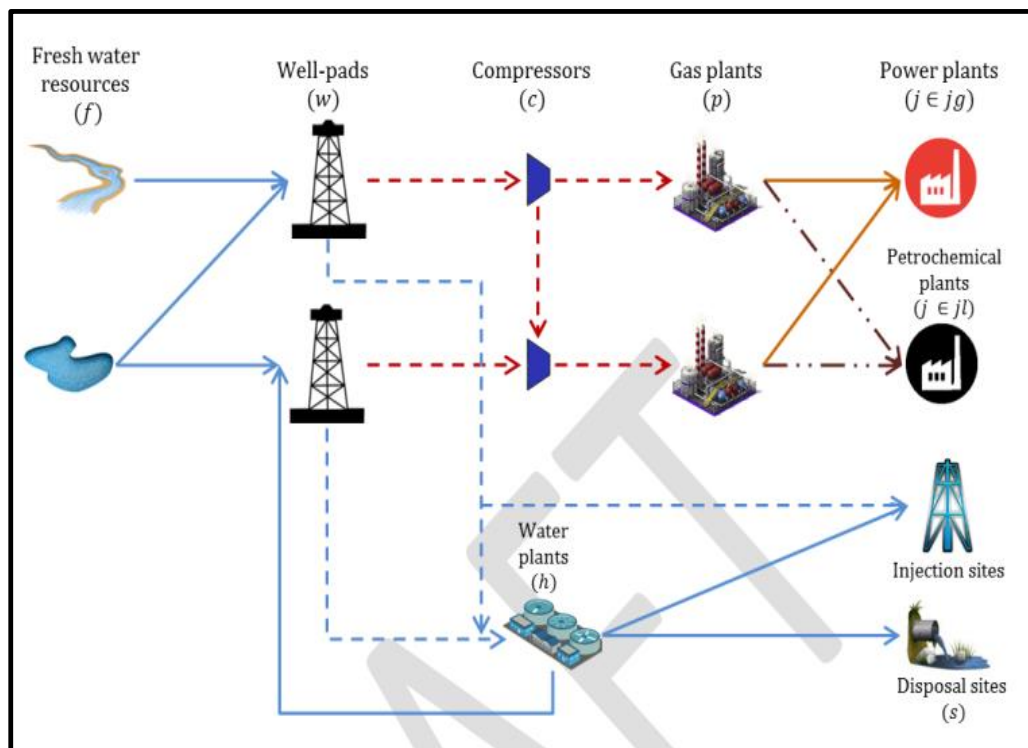
Lo autores proponen un nuevo marco de optimización del diseño de la cadena de suministro de gas de esquisto, que integra la gestión del agua, el diseño y la planificación de la cadena de suministro de gas de esquisto, tiene en cuenta el diseño de pozos y la calidad de las aguas residuales, y considera la variación de la composición del gas con la ubicación y el tiempo (ver figura 10).

El marco también aborda algunos de los problemas relacionados con la calidad de las aguas residuales, a saber, la concentración de sólidos disueltos totales (TDS) y las variaciones espaciales y temporales en la composición del gas, características que a menudo se observan en la producción de formaciones. Además, el marco propuesto también considera la integración de diferentes modelos, simulaciones y herramientas de optimización comúnmente utilizadas en el sector energético para evaluar la viabilidad técnica y económica de nuevas fuentes de energía.

Figura 10.

Propuesta de diseño integral de cadena de suministro de gas de esquisto

GESTIÓN AGUAS RESIDUALES DE FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO



Fuente: Tomado de (Guerra, Calderon, apageorgiou, Sirola, & Reklaitis, 2016)

Finalmente, las capacidades del marco propuesto se ilustran a través de dos estudios de casos (A y B) que involucran 5 plataformas de pozos que operan con composiciones de gas constantes y variables, respectivamente. El estudio de caso B también analiza los efectos de modelado de diferentes concentraciones de TDS en las aguas residuales de producción.

- Tipo de Yacimiento No Convencional al que va Dirigido:

Sheil gas

- Descripción del tratamiento Aplicado:

Reutilización y/o reciclaje mediante tratamiento en planta en tanques de almacenamiento donde realizan destilación

- Hallazgos y/o Resultados

El modelo de tratamiento presentado, en una sola planta puede manejar hasta 347,8 millones de galones de agua residual, representando como porcentaje de reutilización y reciclaje

GESTIÓN AGUAS RESIDUALES DE FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO

de un 62,8%.

Los resultados económicos de reducción de costos dependen de múltiples variables como los niveles de suciedad de las aguas y la infraestructura que dispongan (Guerra, Calderon, apageorgiou, Siirola, & Reklaitis, 2016).

4. Problemas relacionados con las aguas relacionadas con la transición de la producción de petróleo convencional a la no convencional en la cuenca del Pérmico (Scanlon, Reedy, Hombre, & Walsh, 2017. E.E.U.U)

En este documento se exploran los problemas en evolución relacionados con la gestión del agua producida (PW) y las demandas de agua de fracturamiento hidráulico en función de un análisis detallado pozo por pozo. Los resultados muestran que, aunque los pozos convencionales producen 13 veces más agua que petróleo (relación PW-petróleo, PWOR = 13), esta agua producida se inyecta principalmente en yacimientos productores de petróleo agotados por presión para mejorar la tasa de recuperación de petróleo.

Los pozos horizontales no convencionales utilizan grandes volúmenes de agua para la fracturación hidráulica, un aumento de alrededor de 10 a 16 veces por pozo, o alrededor de 7 a 10 veces cuando se normaliza por la longitud del pozo lateral (2008-2015).

Aunque los pozos no convencionales tienen un PWOR mucho más bajo de 3 que 13 para los pozos convencionales, este PW no se puede reinyectar en el yacimiento de esquisto, sino que se elimina en intervalos geológicos improductivos que pueden provocar sobrepresión y terremotos inducidos. Según datos de 2014, el potencial de reutilización de PW de pozos no convencionales es alto porque el volumen de PW puede soportar la demanda de agua para la fracturación hidráulica. Los problemas de fracking se pueden aliviar parcialmente reutilizando PW con un tratamiento mínimo (salmuera limpia). La inyección de PW también reduce la

GESTIÓN AGUAS RESIDUALES DE FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO

demanda de agua para la fracturación hidráulica (Scanlon, Reedy, Hombre, & Walsh, 2017).

- Tipo de Yacimiento No Convencional al que va Dirigido:

Sheil Oil

- Descripción del tratamiento Aplicado:

Reutilización mediante aplicación de una "salmuera limpia" consistente en la eliminación de sólidos suspendidos, aceites y adición de biocidas

- Hallazgos y/o Resultados

El potencial de reutilización de aguas residuales de pozos no convencionales es alto porque sus volúmenes pueden soportar la demanda de agua de fracturamiento hidráulico

La reutilización de aguas residuales con un tratamiento mínimo (salmuera limpia) puede mitigar parcialmente los problemas de inyección de dichas aguas al tiempo que reduce la demanda de agua para la fracturación hidráulica.

La mayor parte del agua (70%) es reciclada y reinyectada para perforaciones, mientras que el restante 30% es eliminada (Scanlon, Reedy, Hombre, & Walsh, 2017).

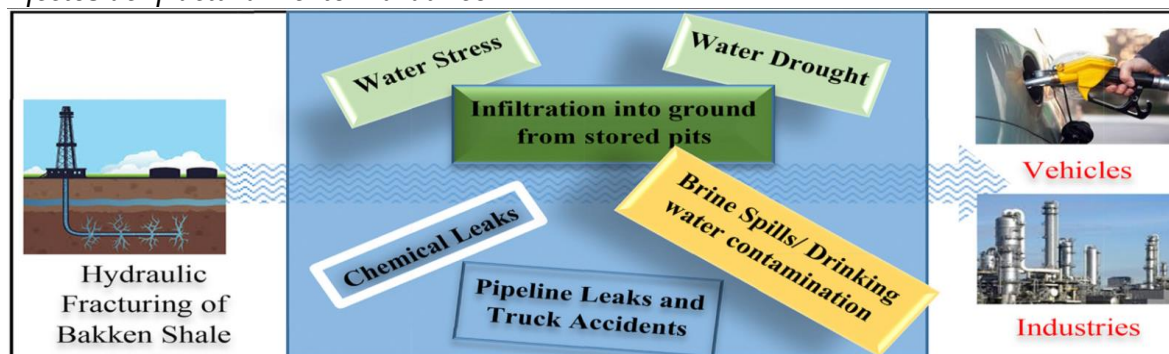
5. Impactos potenciales sobre los recursos hídricos de la fracturación hidráulica a partir de la producción de petróleo no convencional en el esquisto de Bakken (Shrestha, Chilkoor, Wilder, Gadhamshetty, & Stone, 2017)

Este estudio centra su atención en una revisión de manera crítica de las posibilidades que los procesos de fracturación hidráulica en pozos no convencionales presentan en la generación de impactos en el recurso agua, ya sea por la extracción de agua dulce y gestión del agua producida (eventos deterministas) y/o por derrames debido a fugas en tuberías y accidentes de camiones (eventos probabilísticos) relacionados con la producción de petróleo no convencional del esquisto Bakken en ND.

GESTIÓN AGUAS RESIDUALES DE FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO

Según estos autores, la perforación horizontal en particular, como técnica moderna de perforación ha hecho posibles y alcanzables nuevas producciones de petróleo, fortaleciendo la industria y el mercado laboral petrolífero e influenciando positivamente en el producto interno bruto de los países, pero en contra parte, estos procesos pueden tener efectos en los sistemas ambientales y la salud de los individuos, como se muestra en la figura 11 ya que por ejemplo, la producción de esquistos de ND Bakken deriva en la generación de un volumen elevado de aguas residuales salinas, que incluye aguas producidas y de reflujo, caracterizadas por altos niveles de sólidos disueltos totales (350 g/L) y niveles elevados de sustancias tóxicas y radiactivas. En la actualidad, el 95 % de las aguas residuales salinas son canalizadas y transportadas en camiones al sitio antes de su disposición final en pozos de inyección Clase II y no se descartan derrames de estas aguas que pueden ocurrir durante el transporte a los sitios de inyección resultando en una potencial contaminación de los recursos de agua potable (Shrestha, Chilkoor, Wilder, Gadhamshetty, & Stone, 2017)

Figura 11.
Efectos del fracturamiento hidráulico



Fuente: Tomado de (Shrestha, Chilkoor, Wilder, Gadhamshetty, & Stone, 2017)

Este estudio sugiere 5 opciones diferentes para gestionar las aguas residuales:

Evitar la producción de agua en la superficie: A través del uso de geles poliméricos pueden bloquearse aguas por fisuras o fracturas, separar el agua de las corrientes de petróleo

GESTIÓN AGUAS RESIDUALES DE FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO

crudo y gas en el fondo del pozo y reinyectar agua en formaciones adecuadas.

Inyectar las aguas residuales en el mismo u otro pozo: El agua residual puede inyectarse en el mismo pozo o en otro adecuado. Esta opción implicaría gastos de transporte para la movilización entre diferentes sitios.

Tratar y descargar el agua residual: Usar procesos físicos, químicos o biológicos, o una combinación de estos procesos, que permitan el tratamiento de las aguas, cumpliendo con normativas y estándares establecidos de eliminación de contaminantes, pudiendo ser descargadas en cuerpos de agua superficiales.

Reutilizar las aguas residuales en operaciones de petróleo y gas: Reutilizar el agua tratada para operaciones de estimulación, perforación y reacondicionamiento después del tratamiento adecuado. Además, se requieren opciones de tratamiento relevantes para reducir el ensuciamiento, la incrustación y el crecimiento biológico en las superficies metálicas de la infraestructura de perforación.

Consumir en uso benéfico: según Arthur et al., (2005), citado por los autores, se puede reutilizar el agua tratada, en riegos y consumo del ganado y otros animales

- Tipo de Yacimiento No Convencional al que va Dirigido:

Shale Gas

- Descripción del tratamiento Aplicado:

Dentro de las 5 opciones para realizar gestión de las aguas residuales, los autores sugieren la utilización de procesos físicos, químicos o biológicos, o una combinación de estos procesos, para tratar las aguas residuales, eliminando así contaminantes, reduciendo el ensuciamiento, la incrustación y el crecimiento biológico en las superficies metálicas de los elementos de perforación, con el objetivo de reutilizar estas aguas en operaciones de estimulación y

GESTIÓN AGUAS RESIDUALES DE FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO

perforación, descargar las aguas tratadas en cuerpos de aguas superficiales o darle uso benéfico como el riego y consumo de animales de pastoreo (Shrestha, Chilkoor, Wilder, Gadhamshetty, & Stone, 2017)

- Hallazgos y/o Resultados

Dentro de los impactos más relevantes que se presentan con la producción de hidrocarburos y sobre todo de gas de esquisto en pozos no convencionales están: demanda de agua debida a grandes volúmenes de agua de mantenimiento para evitar la acumulación de salinidad; consumo excesivo de agua doméstica debido a los trabajadores temporales del campo petrolero, altos niveles de salinidad que reducen las opciones de reciclaje, demanda alta de infraestructura (camiones y tuberías) para transportar el agua residual desde los pozos petroleros a los pozos profundos de inyección; grandes derrames de salmuera debido a accidentes de camiones y roturas de tuberías durante el transporte del agua producida y sobre todo, el estrés hídrico que se presenta debido a las extracciones excesivas de agua dulce de las regiones áridas, especialmente durante los períodos de sequía, por lo que el desarrollo de gestiones de aguas residuales alternativas es una buena opción para minimizar los impactos en los recursos de agua dulce (Shrestha, Chilkoor, Wilder, Gadhamshetty, & Stone, 2017).

6. El análisis de viabilidad integrado de la gestión de la reutilización del agua en las actuaciones de exploración de petróleo de yacimientos de esquisto no convencionales (Afshin, 2018. Irán)

En un contexto general, debido a su uso generalizado en varias funciones, la necesidad de agua en varias operaciones de perforación se informa ampliamente en la literatura y existe la necesidad de mantener estables estos procedimientos. El propósito de este estudio integral es investigar en el área estudiada y analizar la evaluación de la inyectabilidad del agua y el agua

GESTIÓN AGUAS RESIDUALES DE FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO

superficial proporcionada y el agua requerida para los procedimientos de reinyección en la fracturación hidráulica; en el proceso, la industria de la perforación deberá realizar grandes esfuerzos para encontrar fuentes de agua adecuadas a nivel local con el fin de lograr la prosperidad económica y eliminar virtualmente los costos adicionales.

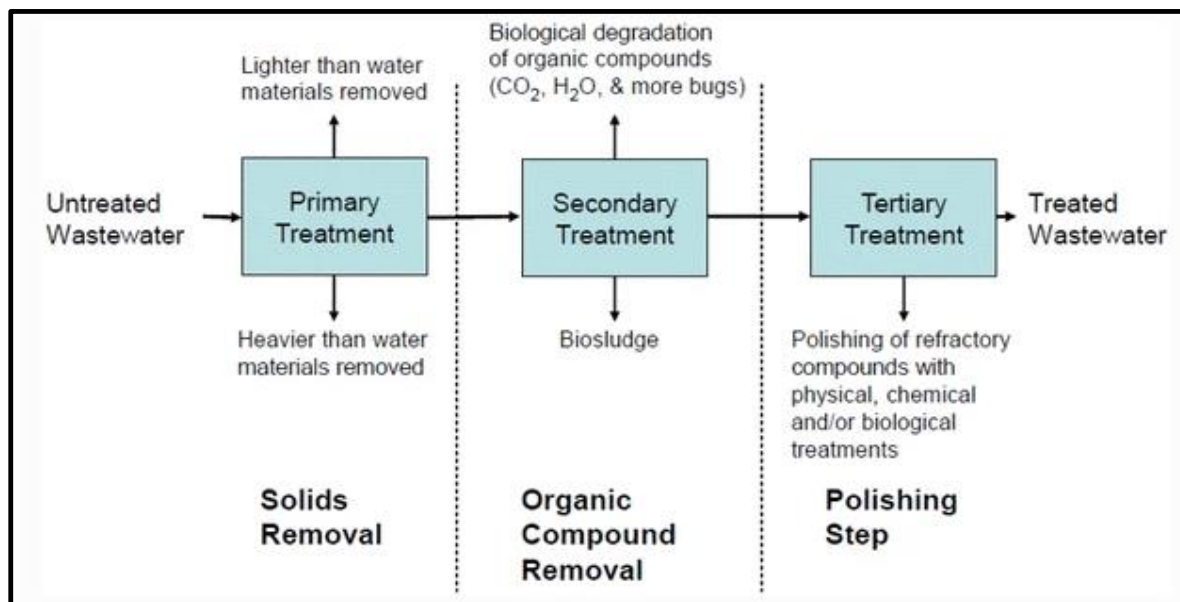
En comparación con otras industrias y consumidores, el desarrollo de petróleo y gas no consume mucha agua, y su demanda de agua tendrá un profundo impacto en los recursos hídricos locales, lo que plantea desafíos especiales para los usuarios del agua. Además, el agua se ha convertido en un bien cada vez más escaso y costoso en las últimas décadas, y los operadores están notando activamente que la conciencia del fenómeno de reciclaje y reutilización posterior al tratamiento es tanto rentable como socialmente responsable (Afshin, 2018).

Según este autor, la industria petrolera tiene diversas fuentes de agua, que incluyen aguas residuales, aguas residuales de refinería, agua de terminales de comercialización, agua subterránea, aguas pluviales, escorrentía de estacionamientos y muchos tratamientos listos para usar y suministro ilimitado de aplicaciones como se ilustra en la figura 12.

Figura 12.

Proceso estándar de tratamiento de aguas residuales

GESTIÓN AGUAS RESIDUALES DE FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO



Fuente: Tomado de (Afshin, 2018)

- Tipo de Yacimiento No Convencional al que va Dirigido:

Shale gas y shale oil

- Descripción del tratamiento Aplicado:

Reutilización de aguas residuales en la reinyección de los procesos de fracturación hidráulica aplicando tratamientos tradicionales (floculación, coagulación, sedimentación, filtración y ablandamiento con cal) o tratamientos avanzados (membranas de ósmosis inversa, procesos de destilación térmica, evaporación y cristalización)

- Hallazgos y/o Resultados

Los tratamientos tradicionales tienen impactos significativos en las impurezas del agua suspendidas y sólidos coloidales, aceite y grasa, compuestos de dureza y otros parámetros no disueltos, con menos consumo de energía.

Las técnicas con tratamientos avanzados, se utilizan para el tratamiento de sólidos disueltos, formados principalmente por cloruros y sales, contenidos de bario disuelto, estroncio y en algunas ocasiones algunos radionúclidos disueltos.

GESTIÓN AGUAS RESIDUALES DE FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO

Al aplicar tratamientos con membranas en un pozo con características de niveles más bajos de TDS, lograron que el volumen de agua reutilizada y tratada fuera relativa a un 8% del total de agua que se utiliza para operaciones de perforación y fracturación hidráulica y un 23% de reutilización en toda la operatividad del pozo (Afshin, 2018).

7. Tratamientos biológicos del agua producida en campos petrolíferos: una revisión completa (Lusinier, y otros, 2019. Francia)

El objetivo de este trabajo es proporcionar una revisión exhaustiva de los procesos disponibles para el tratamiento biológico de las aguas residuales o producidas, describiendo las diferentes tecnologías que se han utilizado hasta el momento, sus condiciones de funcionamiento y eficiencias de eliminación, así como las principales barreras técnicas a superar para aumentar sus eficiencias.

Teniendo en cuenta que la extracción de petróleo implica la producción de agua, conocida como agua producida (PW), El caudal de agua producida aumenta con el tiempo de operación y puede alcanzar más de 20 veces el caudal de crudo. El agua producida generalmente se considera tóxica debido a su composición compleja. Actualmente, solo los hidrocarburos dispersos están regulados por agua. Sin embargo, a medida que las regulaciones se vuelven más estrictas, también se enfocan en la toxicidad de los compuestos disueltos y/o el efluente general. Por lo tanto, el procesamiento de PW debe ser más eficiente, al mismo tiempo que permite una alta confiabilidad y una alta compacidad de la planta (proceso en alta mar). Generalmente se considera que el tratamiento biológico es el mejor compromiso entre el rendimiento del tratamiento y los costos operativos. Sin embargo, carece de compacidad y no es adecuado para aplicaciones en alta mar. Los procesos híbridos se definen aquí como la combinación de dos o más procesos que muestran un rendimiento prometedor que debe explorarse más a fondo para

GESTIÓN AGUAS RESIDUALES DE FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO

superar las deficiencias de otras tecnologías (Lusinier, y otros, 2019).

- Tipo de Yacimiento No Convencional al que va Dirigido:

Sheil Oil

- Descripción del tratamiento Aplicado:

Tratamientos biológicos:

CAS: Acción de microorganismos que se mueven libremente en un tanque de aireación, que pasan luego por una etapa de separación y luego de clarificación.

BAF: Indicado para efluentes con compuestos complejos y poco biodegradables, consistiendo en establecer una biopelícula o cama de microorganismos a través de la cual fluyen las aguas residuales, conteniendo material de empaque con soportes naturales como grava, madera, carbón o carbón activado

MBR: consiste en un tanque de aireación de lodos suspendidos junto con una separación física, generalmente sistemas de membrana de corte de microfiltración o ultrafiltración

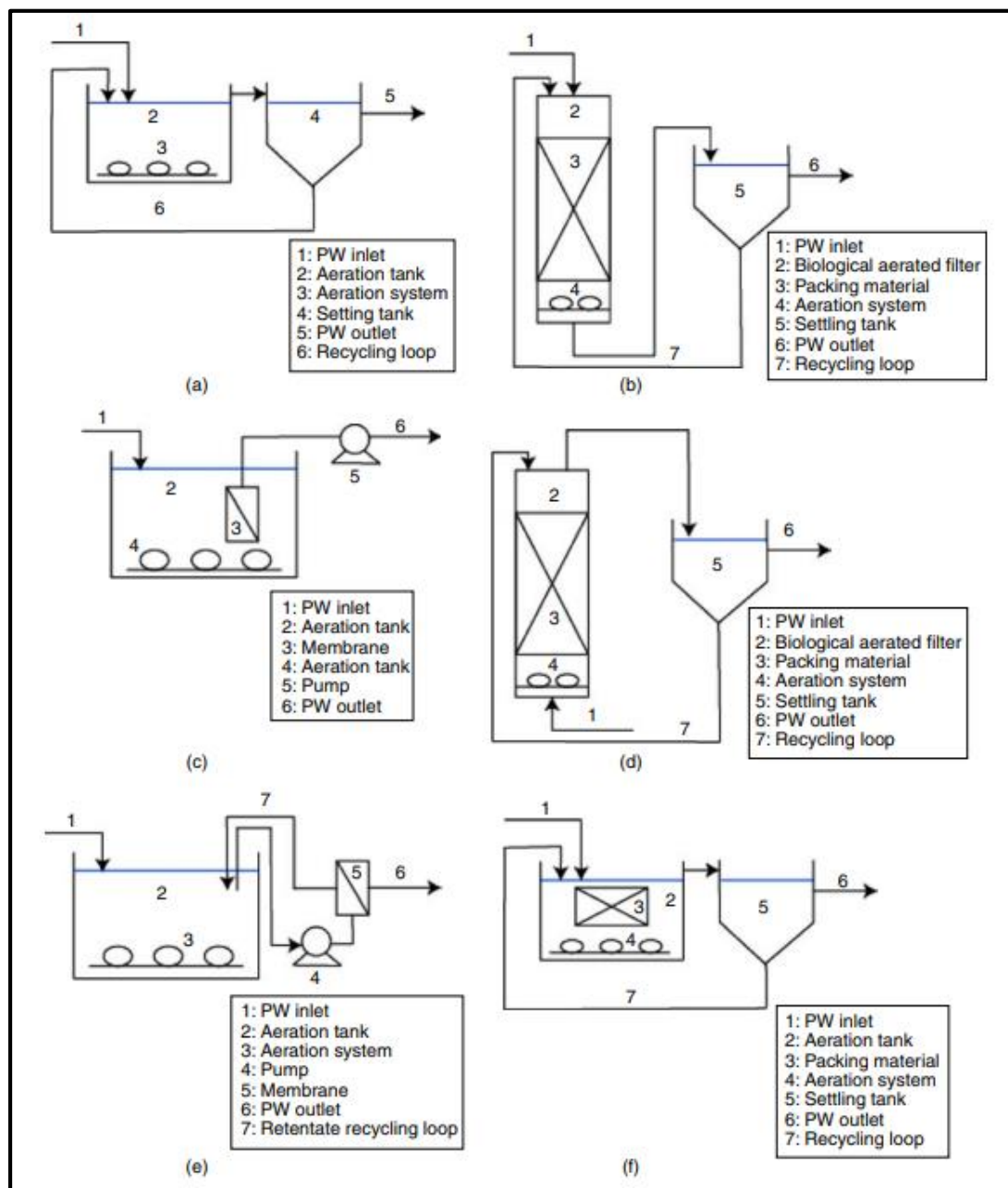
PROCESOS HÍBRIDOS: Combinación de los anteriores tratamientos según necesidades y costos.

En la figura 13 los autores presentan los diseños de varios procesos de tratamientos biológicos: a) CAS; b) BAF en Aguas subterráneas; c) MBR sumergido; d) BAF en Aguas superficiales; e) MBR externo; f) proceso biológico híbrido.

Figura 13.

Diversos procesos de tratamiento Biológico

GESTIÓN AGUAS RESIDUALES DE FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO



Fuente: Tomado de (Lusinier, y otros, 2019)

- Hallazgos y/o Resultados

El proceso CAS alcanza una eficiencia de eliminación del 97% si añaden nutrientes de nitrógeno y fósforo al afluente, dependiendo también de los microorganismos del lugar contaminado y un periodo de aclimatación de 10 días, además puede presentar algunas

GESTIÓN AGUAS RESIDUALES DE FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO

limitaciones como baja resistencia de los microorganismos en suspensión, escasa resistencia a los picos de contaminantes, riesgo de una rápida degradación de la capacidad de sedimentación de los bioflóculos a medida que evoluciona su microestructura, entre otros (Lusinier, y otros, 2019).

Con el tratamiento BAF, reportaron una eficiencia de eliminación global de aceite y grasa (materia en suspensión) del 75 al 99% utilizando carbón activado, demostrando que los procesos de biomasa adherida pueden proporcionar buenas eficiencias de eliminación (Lusinier, y otros, 2019).

Al aplicar tratamiento MBR, reportaron una eliminación de residuos de hasta un 94.9%, adjudicando este resultado a la climatización de los lodos utilizados en los experimentos e indicando disminuciones de efectividad a medida que aumenta la salinidad de las aguas residuales, por lo que el tratamiento está supeditado a rangos de variaciones según contenidos salinos (Lusinier, y otros, 2019).

Los procesos biológicos híbridos que contienen tanto biomasa libre como fija mostraron resultados prometedores en el tratamiento de las aguas residuales de campo real con alta salinidad, reportando eficiencias de hasta 70% (Lusinier, y otros, 2019).

8. Tecnologías basadas en membranas potenciales e implementadas para el tratamiento y la reutilización del reflujo y el agua producida a partir de los yacimientos de petróleo y gas de esquisto: una revisión (Chang, y otros, 2019. China y E.E.U.U)

Esta revisión se centra en la caracterización y gestión de las aguas residuales de la extracción de petróleo y gas. Se discuten las características de las aguas residuales, incluyendo la cantidad y composición química. El futuro de la industria del petróleo y el gas no convencional depende de la gestión eficaz de las aguas residuales y de retorno. La tecnología de membranas

GESTIÓN AGUAS RESIDUALES DE FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO

tiene el potencial de proporcionar soluciones para la reutilización sostenible de los recursos hídricos. Se evalúa y compara el rendimiento de una serie de procesos de membrana. También se analizan las tecnologías de membranas emergentes para su uso en campos similares. El ensuciamiento de la membrana, la falta de experiencia a gran escala y a escala piloto y el alto consumo de energía son los principales desafíos para las aplicaciones de membrana en las aguas residuales.

Luego se abordan los desafíos y las necesidades, y los avances en materiales de membrana, el análisis sistemático de compuestos orgánicos y la generación de energía de gradiente de salinidad son enfoques prometedores para abordar estos problemas (Chang, y otros, 2019).

- Tipo de Yacimiento No Convencional al que va Dirigido:

Sheil Gas

- Descripción del tratamiento Aplicado:

Aplicación de membranas para eliminación de orgánicos y salinidad.

Estas membranas se clasifican y diferencian por aspectos como la fuerza motriz, la aplicación, el mecanismo de funcionamiento, el material de la membrana o la estructura de la misma, dividiéndose en membranas de baja presión que comprenden la ultrafiltración (UF) y la microfiltración (MF), membranas de alta presión, las cuales son la nanofiltración (NF) y la ósmosis inversa, membranas de accionamiento osmótico, como las ósmosis directa(FO) y la ósmosis retardada por presión (PRO), membranas de accionamiento térmico, que son la destilación por membrana (DM), membranas de accionamiento eléctrico, comprendiendo la electrodiálisis (ED), la electrodesionización (EDI), la desionización capacitiva de membrana (CDI) y la desalinización por polarización de iones (ICP) y las membranas biológicamente

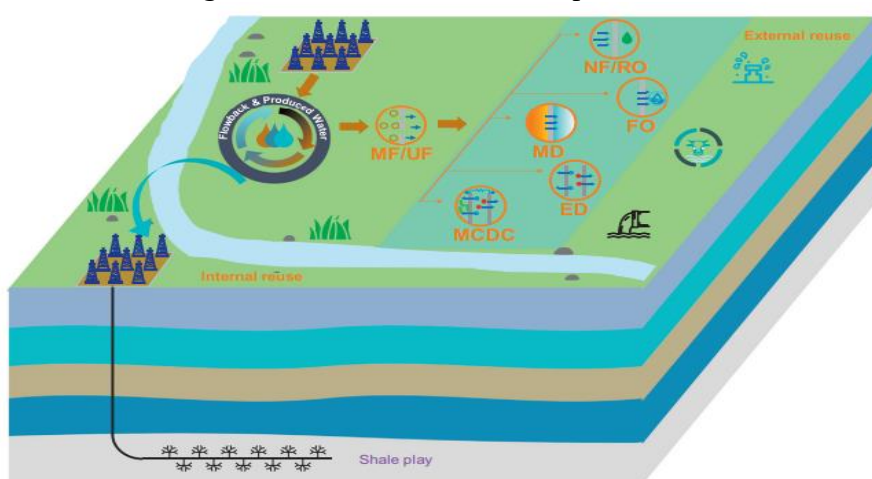
GESTIÓN AGUAS RESIDUALES DE FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO

activas que incluyen principalmente los biorreactores de membrana (MBR), las pilas de combustible microbianas (MFC) y las células de desalinización microbiana (MDC) (Chang, y otros, 2019).

En la figura 14 se presenta el esquema que estos autores exponen de las tecnologías basadas en estas membranas.

Figura 14.

Esquema de las tecnologías basadas en membranas para la reutilización de aguas residuales



Fuente: Tomado de (Chang, y otros, 2019)

Nota: MF/UF= Microfiltración/Ultrafiltración. NF/RO= Nanofiltración/Ósmosis Inversa. MD= Destilación por membrana. FO= Ósmosis directa. ED=Electrodiálisis. MCDC= Célula de desalinización/desionización capacitiva microbiana.

- Hallazgos y/o Resultados

En la aplicación de este tipo de tratamientos, la eficiencia de la eliminación de iones se ve influenciada por la presión de funcionamiento, ya que una mayor presión da lugar a una mayor eliminación.

Las aplicaciones de membranas están siendo utilizadas ampliamente para tratar aguas residuales con alta salinidad.

para que la desalinización con membranas de ósmosis inversa resulte económica, los TDS de los residuos líquidos no deben ser superiores a 30.000-45.000 mg/L.

GESTIÓN AGUAS RESIDUALES DE FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO

La eliminación de sólidos disueltos alcanza una eficiencia de hasta 99.1 % con este tipo de tratamientos (Chang, y otros, 2019).

9. Uso de Photo-Fenton y técnicas de flotación para la gestión sostenible de la reutilización de agua producida por reflujo en la exploración de yacimientos de esquisto (Jin & Davarpanah, 2020.China)

En este estudio, se seleccionaron 8 pozos de producción diferentes en la misma formación, y se comparó y analizó el agua dulce y el agua reutilizada requerida por cada pozo. De acuerdo con los resultados de este estudio, la tasa de ahorro de agua del agua de reflujo de la fracturación hidráulica es de alrededor del 85 %. Por lo tanto, solo necesita un 15 % de agua dulce por día para continuar con el proceso de fracturamiento, y el Fenton ligero y la flotación serían una forma excelente de eliminar los sólidos y los productos químicos del agua de retorno. Además, el proceso de inyección de agua y el método de recuperación de petróleo mejorado con productos químicos permiten un ahorro de agua de aproximadamente el 70 % y el 75 %, respectivamente. Por lo tanto, solo se requiere 30% y 25% de agua dulce por día para continuar con el proceso de inyección de agua y los métodos de recuperación de petróleo mejorada químicamente. Ahorro total de agua de aproximadamente 104 MM m³ por año, 1000 habitantes aún pueden vivir en ella y no necesitan usar mucha agua dulce para producir hidrocarburos (Jin & Davarpanah, 2020)

- Tipo de Yacimiento No Convencional al que va Dirigido:

Sheil Oil

- Descripción del tratamiento Aplicado:

Reutilización mediante la aplicación de flotación y Photo-Fenton: Realizan una separación primaria que consiste en la separación del petróleo, gas y agua en función de sus

GESTIÓN AGUAS RESIDUALES DE FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO

densidades, para luego conducir el agua mediante flotación adicionando agentes químicos para separar los sólidos en suspensión, el aceite y otras macromoléculas y de allí transferirla a filtros de arena eliminando de ella micro moléculas; A partir de esta última filtración el agua pasa a una separación secundaria para eliminar los aromáticos y pequeñas gotas de aceite en el proceso de flotación durante 10 min (Jin & Davarpanah, 2020).

- Hallazgos y/o Resultados

El porcentaje de agua que puede ser recuperada de las aguas residuales de la fracturación hidráulica es de aproximadamente 85% y según los autores la aplicación de esta técnica presenta una eficiencia de alrededor del 99%, siendo un método apropiado para la eliminación de sólidos y productos químicos de las aguas residuales.

Esta metodología garantiza una minimización de uso de agua dulce o potable para los procesos de fracturación diaria, presentando un volumen total aproximado de agua ahorrada anualmente de 104 MM m³ (Jin & Davarpanah, 2020)

10. Claves para una mejor gestión del agua: en busca de la sostenibilidad en medio del caos (Cherednichenko, 2020.Rusia)

Además de petróleo, la fracturación hidráulica produce millones de barriles de agua de embalse. El agua producida, así como cualquier agua de fracturación recuperada (flujo de retorno), contiene arena, sales y metales que son difíciles de reutilizar directamente en la fracturación o de otra manera. La solución más sostenible y eficiente es reciclar el agua de retorno y de producción. Incluye el desarenado, la filtración y el tratamiento del reflujo y el agua producida, mezclándolos según las especificaciones aplicables, almacenándolos de manera segura y, finalmente, entregando el agua en circulación al sitio del pozo para su uso como fluido de fracturamiento.

GESTIÓN AGUAS RESIDUALES DE FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO

Un sistema de gestión de agua de circuito cerrado automatizado, integrado y completo convierte el agua de retorno y la producida en fluidos bases adecuados para la fracturación. Dichos sistemas no solo aportan mayor sostenibilidad, precisión y eficiencia a la gestión del agua, sino que también son rentables, especialmente en este mercado volátil (Cherednichenko, 2020).

- Tipo de Yacimiento No Convencional al que va Dirigido:

Sheil Gas y Sheil Oil

- Descripción del tratamiento Aplicado:

Sistema TETRA Swiftwater (SWAT): Sistema de gestión de agua de circuito cerrado completo, integrado y automatizado: Mediante filtración y tratamientos al flujo de retorno y aguas producidas, aplicando especificaciones químicas puntuales, según las características propias del agua, almacenándolas y luego volviéndolas a transferir al sitio del pozo (Cherednichenko, 2020).

- Hallazgos y/o Resultados

Para lograr un reciclaje eficaz se requiere el análisis de la composición del agua de retorno y del agua producida para determinar el tratamiento químico y de filtración adecuado, pues el sistema utiliza productos químicos que oxidan los metales pesados, elimina bacterias, neutraliza partículas de carga negativa y favorece la filtración de micro partículas, necesitando alta precisión para regular el flujo de agua en el sistema de tratamiento y que corresponda con el volumen y la composición del agua.

Este sistema aplicado en una instalación de Texas, logró el reciclaje en el consumo de agua potable de un 50% reduciendo los costos operativos generales y reduciendo la necesidad de eliminación de aguas residuales pues son reutilizadas en las operaciones de fracturación

GESTIÓN AGUAS RESIDUALES DE FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO

(Cherednichenko, 2020).

Este sistema, puede validarse como el más adecuado para la fracturación, pues aporta sostenibilidad, precisión y eficiencia a la gestión del agua, además de rentabilidad (Cherednichenko, 2020).

11. Estrategias de gestión de aguas residuales para la producción sostenida de gas de esquisto

(Menefee & Ellis, 2020. E.E.U.U.)

En este artículo, se pronostica el crecimiento de los volúmenes de perforación, flujo de retorno y fluidos producidos hasta 2025 en función de los datos históricos, y consideramos las opciones de eliminación tradicionales y alternativas para satisfacer la demanda futura. Los resultados indican que para 2025 se producirán anualmente alrededor de 12 millones de metros cúbicos (74 millones de barriles por barril) de aguas residuales. Incluso suponiendo la recuperación de aguas residuales en la región, se podría satisfacer la mayor demanda de aguas residuales debido a la mala calidad o la no reciclabilidad. La logística requerirá una importante inversión de capital para expandir las vías de eliminación existentes, es decir, tratamiento y descarga a una instalación centralizada en Ohio o inyección de salmuera dedicada.

Aquí, se demuestran las ventajas logísticas y ambientales de una estrategia alternativa: reutilizar pozos de petróleo y gas agotados para la inyección dedicada de aguas residuales que no se pueden reutilizar ni recuperar. Los centros de pozos agotados pueden acomodar los aumentos proyectados en los volúmenes de aguas residuales de manera más eficiente que las opciones de eliminación existentes, principalmente porque la proximidad de los pozos agotados a los sitios de producción activos reducirá significativamente las distancias de transporte de aguas residuales y los costos asociados (Menefee & Ellis, 2020).

- Tipo de Yacimiento No Convencional al que va Dirigido:

GESTIÓN AGUAS RESIDUALES DE FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO

Shaile Gas

- Descripción del tratamiento Aplicado:

Eliminación: Inyección de aguas residuales en pozos de petróleo y gas agotados reutilizándolos, eliminación de aguas residuales en campos petrolíferos abandonados, solo con aplicación de una salmuera simple para diluir las aguas residuales.

- Hallazgos y/o Resultados

Esta opción de gestión de las aguas residuales, está determinada solo cuando existen pozos de petróleo agotados que pueden ser utilizados para la eliminación de aguas residuales, riesgos ambientales asociados con la expansión de la capacidad de tratamiento de aguas residuales aliviando costos y el aumento del transporte, pero requiriendo una planificación estratégica y financiamiento.

Las vías óptimas de eliminación de aguas residuales dependerán de varios factores específicos como ubicación de pozos, propiedades del subsuelo, capacidad de transporte, accesibilidad, la priorización de la conservación y el reciclaje sobre la economía y las normatividades vigentes (Menefee & Ellis, 2020).

12. Una revisión de los problemas, las características y la gestión de las aguas residuales debido a la fracturación hidráulica en los EE. UU. (Zhang & Hascakir, 2021. E.E.U.U.)

Este artículo revisa los desafíos técnicos, económicos y ambientales que se encuentran en la producción de energía, con un enfoque en los problemas de agua causados por el fracking en los Estados Unidos. Además, una discusión detallada de las características de las aguas residuales y las fuentes de contaminación muestra que las aguas residuales son complejas y cambian con el tiempo y el lugar. Comprender estos factores contribuye a los altos niveles de contaminación de las aguas residuales, lo cual es importante para aumentar la conciencia del

GESTIÓN AGUAS RESIDUALES DE FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO

público y del operador sobre el impacto de la fracturación hidráulica en la calidad del agua. Además, se destacan estrategias relevantes de gestión de aguas residuales para diferentes propósitos.

Si bien no existe una solución única para todos, comprender las fortalezas y limitaciones de los diferentes tratamientos es fundamental para que los formuladores de políticas desarrollen un sistema de gestión adecuado. El propósito de esta revisión es proporcionar una referencia para seleccionar soluciones óptimas y prácticas a los problemas actuales de aguas residuales e identificar temas clave para futuras investigaciones (Zhang & Hascakir, 2021).

- Tipo de Yacimiento No Convencional al que va Dirigido:

Shale gas y shale oil

- Descripción del tratamiento Aplicado:

Reutilización mediante aplicación de tratamiento avanzado como la ósmosis inversa:

Usando una membrana semipermeable y presión para eliminar la salinidad

- Hallazgos y/o Resultados

Los autores determinan que no existe una solución única para la gestión de las aguas residuales, realizando un recuento de las diferentes opciones, aclarando que para su elección se deben tener en cuenta los costos, especificaciones, limitaciones y beneficios de cada tecnología.

Dentro de los tratamientos relacionados, la ósmosis inversa la presentan con un costo estimado entre 0,5–1,5 de dólares por barril.

Debido a la complejidad de la constitución de las aguas residuales y la limitación de cada técnica, los autores recomiendan la combinación de diferentes metodologías. Además, entre las diferentes estrategias, la reutilización de aguas residuales es más anhelada, pues se puede lograr la sostenibilidad de los recursos de agua potable (Zhang & Hascakir, 2021).

GESTIÓN AGUAS RESIDUALES DE FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO

4.2 Análisis Estadístico y de resultados Referente a las aguas residuales de los yacimientos No Convencionales de los tratamientos identificados

En la tabla 4 se presentan los datos aportados por cada uno de los estudios, que indican los niveles de reducción de impurezas y sólidos, determinando el porcentaje de reciclaje que se puede alcanzar, el límite de concentración de los TDS en el que los tratamientos alcanzan resultados, el porcentaje de reducción de costos de tratamiento y eliminación (si lo relacionan los autores) y niveles de gasto energético que pueden presentar las metodologías aplicadas.

Tabla 4.

Comparativo de resultados y/o Hallazgos de Tratamientos identificados

Autores	Tratamiento para Gestión de Aguas Residuales	Nivel de Reducción Impurezas y Sólidos Disueltos (%)	Límite de concentración de Sólidos Totales Disueltos (TDS)	Reducción de costos de Tratamiento y Eliminación	Gasto Energético
(Gregory, Vidic, & Dzombak, 2012)	Ósmosis Inversa	20%	40.000 mg/L	-	Alto
	Destilación térmica y cristalización	99,5%	125.000 mg/L	75%	Alto
(Gregory & Mohan, 2015)	Destilación y dilución mediante agregado de sustancias químicas	90%	106 390 mg/L	-	Bajo
(Guerra, Calderon, apageorgiou, Sirola, & Reklaitis, 2016)	Reutilización y/o reciclaje mediante destilación	62.8%	106.775 mg/L	-	Bajo
(Scanlon, Reedy, Hombre, & Walsh, 2017)	Reutilización mediante aplicación de una "salmuera limpia"	70%	400 000 mg/L	50%	Bajo
(Afshin, 2018)	Membranas de Ósmosis inversa	23%	30.000 mg/L	-	Alto
(Lusinier, y otros, 2019)	CAS	97%	300 000 mg/L	-	Bajo
	BAF	75 al 99%			Bajo
	MBR	94.9%			Alto
(Chang, y otros, 2019)	HIBRIDO	70%	30.000-45.000 mg/L	-	Bajo
	Aplicación de membranas (osmóticas, térmicas, eléctricas)	99.1%			Alto

GESTIÓN AGUAS RESIDUALES DE FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO

(Jin & Davarpanah, 2020)	y biológicas) Reutilización mediante la aplicación de flotación y Photo- Fenton	85%	-	-	-
(Cherednichenko, 2020)	Sistema TETRA Swiftwater (SWAT)	50%	123.000 mg/L	-	Alto
(Menefee & Ellis, 2020)	Eliminación	-	-	-	-
(Zhang & Hascakir, 2021)	Osmosis inversa	50%	140.000 mg/L	-	Alto
(Shrestha, Chilkoor, Wilder, Gadhamshetty, & Stone, 2017)	Eliminación	-	-	-	-

Fuente: Estructurada a partir de datos de la revisión documental aplicada.

Según los datos presentados de cada uno de los tratamientos identificados y los resultados indicados por sus autores, los casos de éxito en la gestión efectiva de aguas residuales serían:

- Tratamiento de destilación térmica y cristalización presentado por Gregory, Vidic, & Dzombak, 2012
- Tratamiento de destilación y dilución mediante agregado de sustancias químicas presentado por Gregory & Mohan, 2015
- Los tratamientos presentados por Lusnier y otros, 2019: CAS, BAF y MBR
- Los tratamientos de aplicación de membranas (osmóticas, térmicas, eléctricas y biológicas) presentados por Chang, y otros, 2019

Dentro de estos cuatro casos que presentan resultados éxitos de la gestión de aguas residuales, se destacan los niveles de reducción de impurezas y sólidos disueltos de 99.5% y la reducción de costos de un 75% que según Gregory, Vidic, & Dzombak, 2012, reporta la gestión de aguas residuales a través del tratamiento con destilación térmica y cristalización, pudiendo convertirse en una de las mejores opciones a ser tenidas en cuenta para posibles usos en los

GESTIÓN AGUAS RESIDUALES DE FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO

procesos de fracturación que puedan llevarse a cabo a futuro en Colombia.

Capítulo 5 Propuestas de Gestión de las Aguas Residuales del Fracturamiento Hidráulico en Yacimientos No Convencionales para la Industria Petrolera Colombiana

Para la proposición de propuestas y lineamientos, se tiene en cuenta el potencial estimado por Arthur Little (2017) sobre este tipo de reservas en Colombia, quien indica que nada más con el reservorio de la Luna, ubicado en el Magdalena Medio, el país podría obtener las reservas actuales multiplicadas por tres, pues este yacimiento aportaría un aproximado de 350 mil barriles de petróleo por día, derivándose esto en múltiples ventajas para la nación, como las regalías, impuestos, dividendos, y beneficios para la población, como mejoramiento de educación, planes de salud y/o sociales y aumento de diversas inversiones que influyen directa o indirectamente en la sostenibilidad y competitividad de las zonas de explotación (Uniandes, 2021); Ahora bien, todo esto, puede verse aumentado si los análisis y estudios del real potencial de las otras siete cuencas con las que cuenta el territorio (ya nombradas anteriormente en este documento) llegan a dar resultados positivos para desarrollar y llevar a cabo la extracción de estos hidrocarburos, por lo que se presenta la inminente necesidad de establecer propuestas que contrarresten las desventajas y desafíos expuestos a lo largo del análisis llevado a cabo en este estudio y que muchos grupos ambientalistas y populistas utilizan para evitar que la industria lleve a cabo estos procesos.

Los procesos de fracturamiento hidráulico en yacimientos no convencionales en Colombia, podrían llevarse a cabo de manera exitosa, garantizando la protección de los recursos hídricos a través del establecimiento de un ciclo para la gestión de las aguas residuales con enfoque sistémico como el propuesto.

5.1 Lineamientos Generales para la Gestión de las aguas residuales y Minimización De Impactos De Los Procesos De Fracturamiento Hidráulico No Convencional en la Industria Colombiana.

A partir de los casos de éxito identificados, en la tabla 5, se exponen los lineamientos generales para la gestión de las aguas residuales y minimización de impactos de los procesos de fracturamiento hidráulico no convencional en la industria colombiana por cada etapa del ciclo del agua presentado en el enfoque sistémico, teniendo en cuenta el impacto potencial que se pudiera causar.

Tabla 5.

Lineamientos generales Gestión de las Aguas Residuales

Etapa del Ciclo Enfoque sistémico	Impacto Potencial	Caso de Éxito de Referencia	Lineamientos
Captación Agua	Aumento de la demanda de agua fresca que pueden estresar los recursos hídricos regionales y afectar a los sectores existentes, incluidos la agricultura, la energía hidroeléctrica y la recreación. Extracción excesiva de agua fresca por información limitada o errada sobre datos puntuales de utilización del recurso para los procesos	(Shrestha, Chilkoor, Wilder, Gadhamshetty, & Stone, 2017), (Gregory, Vidic, & Dzombak, 2012), (Guerra, Calderon, apageorgiou, Sirola, & Reklaitis, 2016), (Afshin, 2018)	• Desarrollar tecnologías y estrategias innovadoras que permitan reciclar y reutilizar aguas de diferentes fuentes alternativas • Aumento de investigación, estudios de Casos, estudios ambientales
Uso del Agua en el Fracturamiento (agregado de sustancias químicas, inyección en pozos, aguas de retorno)	Contaminación por sustancias químicas no permitidas ambiental y legislativamente pues los operadores limitan la información sobre propiedades fisicoquímicas y toxicidad de los productos químicos utilizados en la fracturación Afectación de fuentes de agua subterráneas por filtraciones en la inyección de pozos por propagación de fracturas, estallidos, altas presiones Afectación del recurso suelo por inadecuado manejo de aguas de retorno	(Velandia, 2020), (Menefee & Ellis, 2020), (Shrestha, Chilkoor, Wilder, Gadhamshetty, & Stone, 2017) (Gregory & Mohan, 2015), (Gregory, Vidic, & Dzombak, 2012), (Jin & Davarpanah, 2020), (Zhang & Hascakir, 2021)	• Aumento de investigación y Estudios de Casos • Validación y aseguramiento de adecuada infraestructura de los pozos • Estimación real de los riesgos • Validación y realización de mantenimiento de equipos • Ejecución de monitoreos de condiciones de suelos

GESTIÓN AGUAS RESIDUALES DE FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO

	Contaminación por Derrame de químicos Posibles eventos sísmicos como consecuencia de fallas geológicas no identificadas o errados volúmenes de inyección, presiones y vigilancia sísmica		y actividades sísmicas
Recolección, Almacenamiento y aplicación Primer Tratamiento	Derrames y/o fugas durante la recolección, el transporte o en las instalaciones de almacenamiento Contaminación por embalses y sistemas de recolección con diseños errados Aguas tratadas con niveles inadecuados de residuos, por no aplicar tratamientos según características puntuales de cada pozo	(Afshin, 2018), (Cherednichenko, 2020), (Gregory & Mohan, 2015), (Jin & Davarpanah, 2020)	• Evaluación de nuevas tecnologías, costos y beneficios • Diseño adecuado de infraestructura para la recolección, almacenamiento y aplicación de primer tratamiento • Ejecución de análisis previos
Tratamientos de Aguas residuales y Disposición del Agua	Contaminación de recursos hídricos por implementación inadecuada de tratamientos Acumulación de metales y elementos radiactivos en los recursos hídricos y suelos de uso agroindustrial Afectación de recursos hídricos superficiales y subterráneos durante varios años después de la contaminación con aguas residuales Alteraciones de formaciones geológicas por reinyección de aguas residuales en pozos clausurados	(Gregory & Mohan, 2015), (Gregory, Vidic, & Dzombak, 2012), (Lusinier, y otros, 2019), (Chang, y otros, 2019)	• Implementar tecnologías destinadas a separar altos contenidos de sólidos disueltos • Implementar estrategias de disposición del agua de acuerdo a las características y capacidades de cada zona de fracturamiento

5.2 Propuestas Puntuales Por Cada Lineamiento Para la Gestión De Las Aguas Residuales De Fracturamiento Hidráulico En Yacimientos No Convencionales Enfocados En La Industria Petrolera Colombiana.

De los lineamientos anteriormente presentados, se desprenden propuestas puntuales que deben ser validadas tanto por los operadores como por el sector privado y el estado. Las propuestas se especifican según las etapas del enfoque sistémico definido.

5.2.1 Captación de Agua Fresca

Lineamiento: Desarrollar tecnologías y estrategias innovadoras que permitan reciclar y reutilizar aguas de diferentes fuentes alternativas

GESTIÓN AGUAS RESIDUALES DE FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO

- Ubicar fuentes alternativas de agua, como por ejemplo aguas residuales domesticas pretratadas o aguas residuales de otros procesos industriales que sirvan para la preparación del fluido de fracturamiento y para el mantenimiento operativo del pozo (baños, lavado de herramientas, etc.)
- Prohibir la captación del recurso hídrico de los cuerpos de agua superficiales
- Ubicar fuentes de agua subterráneas que no sean aptas para el consumo humano (altos grados de salinidad).

Lineamiento: Aumento de investigación, Estudios de Casos, estudios ambientales

- Los operadores deberán realizar consideraciones ambientales, geográficas, geológicas, económicas, sociales y políticas, ya que estas determinarán en última instancia las soluciones de gestión del agua que permitirán la producción de los procesos de fracturación (Gregory, Vidic, & Dzombak, 2012).
- La producción de hidrocarburos y gas requiere nuevas e innovadoras estrategias de la gestión de las aguas residuales, que garanticen la protección de los recursos hídricos tanto subterráneos como superficiales, haciendo necesario que las compañías que pretendan ejercer este tipo de procesos, realicen estudios puntuales teniendo en cuenta las características propias de cada zona, que les permitan determinar el tratamiento adecuado tanto en términos económicos como ambientales.
- Dentro de los estudios ambientales que deben presentar los operadores, prestar especial atención en la identificación de las fuentes hídricas ubicadas en las zonas donde se pretenda realizar el fracturamiento, con el fin de llevar a cabo un seguimiento continuo de afluentes que sean de consumo humano y uso del agro.
- El sector privado deberá apoyarse en las instituciones académicas para llevar a cabo

GESTIÓN AGUAS RESIDUALES DE FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO

estudios sobre los recursos hidrogeológicos de las zonas donde se pretenda ejercer el fracturamiento no convencional, que sirvan de base para establecer las características propias del ciclo hidrogeológico, la disponibilidad y el consumo del recurso hídrico, con el fin de diagnosticar su estado y establecer los mecanismos de protección más adecuados.

5.2.2 *Uso del Agua en el fracturamiento (agregado de sustancias químicas, inyección en pozos, aguas de retorno)*

Lineamiento: Aumento de investigación y Estudios de Casos

Propuestas:

- Llevar a cabo estudios donde se apliquen métodos analíticos que permitan identificar los productos químicos y sustancias que son adecuadas según la particularidad de cada pozo
- Desarrollar estudios revisados por pares que permitan identificar puntualmente las sustancias y componentes contenidos en las aguas residuales.
- Las instituciones reguladoras deben exigir a los operadores la ejecución de metodologías de alto estándar con respecto a las mediciones de los impactos en los ecosistemas, sobre todo en las caracterizaciones isotópicas del recurso hídrico, apoyándose en entidades como el IDEAM y el Instituto Alexander Von Humbolt.
- Todos los sectores deben propender por impulsar estudios detallados, específicos y profundos del recurso suelo para validar condiciones de tensión y presión, determinar estadísticamente volúmenes de inyección, presiones y vigilancia sísmica, evitando así riesgos mayores y previendo y/o mitigando la ocurrencia de terremotos.

Lineamiento: Validación y aseguramiento de adecuada infraestructura de los pozos

- Los operadores deberán realizar evaluaciones y análisis sobre la calidad, durabilidad y

GESTIÓN AGUAS RESIDUALES DE FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO

vida útil de los revestimientos y elementos cementicios utilizados en la infraestructura interna de los pozos.

- Los operadores deberán validar la utilización de geles poliméricos que garanticen el bloqueo y la separación de los fluidos de fracturamiento con el crudo o el gas, en el caso de presentarse fracturas o fisuras, evitando así mayor presencia de contaminantes en las aguas residuales.

Lineamiento: Estimación real de los riesgos

- Los impactos ambientales que pueden ser ocasionados puntualmente en cada cuenca a intervenir, demandan investigaciones que conlleven modelos numéricos que permitan la estimación real de los riesgos y calcular las ventajas de la implementación de un modelo de gestión de aguas residuales, debiendo ser esto un requisito indispensable para la aprobación de procedimientos de fracturación.
- Las normativas reguladoras deben implementar exigencias sobre estudios previos enfocados en ubicar, identificar y evaluar fallas sísmicas existentes en las posibles zonas de fracturación no convencional.
- Tanto la empresa privada, como el estudio y la academia deberán trabajar mancomunadamente en garantizar que las pruebas piloto que se están llevando a cabo, realicen estimaciones reales de los riesgos y desplieguen las estrategias preventivas y correctivas a que haya lugar.
- Tanto el estado como la empresa privada deberán ejecutar monitoreos constantes y de largo plazo sobre las aguas subterráneas, donde apliquen sustancias con propiedades geoquímicas e isotópicas adecuadas para comprobar u objetar presencia de contaminación hídrica como consecuencia de procesos de fracturamiento hidráulico no

GESTIÓN AGUAS RESIDUALES DE FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO

convencional.

- Es adecuado proponer que los operadores de la industria petrolera divulguen a la comunidad en general los estudios e investigaciones que realicen a cerca de la gestión de las aguas residuales de cada zona particular como metodología de aseguramiento de los recursos hídricos y presenten sus modelos de tratamiento, señalando claramente los niveles de recuperación y reutilización de agua que podrían alcanzar y la disposición que pretenderán.

Lineamiento: Validación y realización de mantenimiento de equipos

- Los operadores deberán realizar procedimientos de planeación, validación y ejecución de mantenimiento de equipos, soportados en metodologías que garanticen la confiabilidad y calidad operativa, debiendo aplicar técnicas preventivas y proactivas mediante análisis de criticidad ejecutados por personal o equipos expertos en la materia.

Lineamiento: Ejecución de monitoreos de condiciones de suelos y actividades sísmicas

- Los operadores o empresas que deseen ejecutar la actividad del fracking deberán previamente georefenciar puntos críticos de actividades sísmicas.
- Toda área que sea objeto de procesos de fracturamiento no convencional, deberá contar con sistemas de monitoreo constante de actividades sísmicas, con el fin de identificar posibles alteraciones provocadas o inducidas por errados procesos de inyección de fluidos fracturantes (presiones y/o cantidades no adecuadas).
- La academia deberá realizar estudios detallados y revisión de casos a nivel global para identificar los niveles adecuados de presión y cantidades de inyección de fluidos fracturantes, proponiendo y diseñando mecanismos de medición confiables.

5.2.3 *Recolección, Almacenamiento y Aplicación primer tratamiento de remoción de sólidos en Aguas Residuales*

Lineamiento: Evaluación de nuevas tecnologías, costos y beneficios

- Las compañías deben realizar una profunda evaluación de los costos económicos y energéticos, siendo esto relevante para confirmar todos los beneficios que les puede aportar el proceso de gestión que seleccionen (Lusinier, y otros, 2019).
- Es importante que la industria petrolera trabaje en conjunto con áreas de estudio como la biología, la química y la ingeniería ambiental, pues estas áreas de conocimiento son consideradas y juegan un papel de gran importancia en el desarrollo y el despliegue de tecnologías de nueva generación que reducen la huella medioambiental, en este caso para el desarrollo de recursos no convencionales (Gregory & Mohan, 2015).
- La industria petrolera y minera que ejerza en territorio colombiano, puede enfocar estudios que les permitan desarrollar modificadores químicos naturales que logren rápidas biotransformaciones en el medio ambiente y así mismo diseñar biocidas dirigidos a los contaminantes perjudiciales específicos, para no afectar la calidad total del agua (Gregory & Mohan, 2015), esto teniendo en cuenta la biodiversidad y entorno paisajístico donde están ubicadas las cuencas petroleras con posibilidad de extracción.

Lineamiento: Diseño adecuado de infraestructura para la recolección, almacenamiento y aplicación de primer tratamiento

- Elaborar embalses donde manejan la evaporación del agua y posteriormente pasen los residuos sólidos a rellenos municipales.
- Los operadores deberán garantizar que los embalses o tanques recolectores de aguas residuales, cumplan con la normatividad y las condiciones requeridas para afrontar

GESTIÓN AGUAS RESIDUALES DE FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO

posibles afectaciones de eventos climáticos adversos e inesperados, pues revestimientos inadecuados y/o defectos en tanques, pueden ocasionar desbordamientos y escorrentías que derivan en vertimientos accidentales al ambiente.

- Los operadores deberán desarrollar sistemas de recolección y almacenamiento de aguas residuales que se ejecuten preferiblemente dentro de la zona de extracción, evitando así mayores riesgos en los traslados de estas hacia otras áreas.

Lineamiento: Ejecución de análisis previos

- Se deberán llevar a cabo análisis de la composición de las aguas residuales generadas, anticipando riesgos y peligros de toxicidad con el fin de seleccionar los equipos y materiales químicos más adecuados que permitan la maximización de la reutilización del agua y la minimización de impactos en el contexto ambiental circundante.
- Realizar caracterizaciones previas y detalladas de los suelos de las zonas circundantes que sean utilizados en el agro, con el fin de identificar posibles migraciones y derrames de aguas residuales.

5.2.4 *Tratamientos de Aguas residuales y Disposición del Agua.*

Lineamiento: Implementar tecnologías destinadas a separar altos contenidos de sólidos disueltos

- Evaluar la aplicación de tratamientos para reutilización del agua residual, los cuales de acuerdo a las características propias de la región colombiana, las más adecuadas para ser implementadas son la destilación térmica combinada con membranas de Nanofiltración.
- Los progresos y avances tecnológicos, se convierten en el mejor aliado para el establecimiento de nuevas estrategias de gestión de aguas residuales de estos yacimientos. Como ejemplo, (Chang, y otros, 2019) proponen validar el uso de nuevos

GESTIÓN AGUAS RESIDUALES DE FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO

materiales y tecnologías de membrana que han surgido, prometiendo ser más rentables, sencillas y eficientes en la minimización y /o eliminación de los residuos.

- Según los resultados y beneficios aportados por los procesos de tratamiento de destilación térmica, cristalización, la aplicación de membranas y procesos biológicos, es adecuado proponer que se evalúe la posibilidad de su aplicación de forma conjunta en el diseño de procesos híbridos que combinen 2 o más técnicas, buscando un mejor rendimiento y la superación de los inconvenientes que puedan presentar individualmente cada tratamiento.
- Los operadores deberán evaluar la posibilidad del uso de estas tecnologías novedosas que permiten reciclar y reutilizar el agua mediante la separación y eliminación de los sólidos disueltos, teniendo en cuenta que a largo plazo presentarían mayores y mejores beneficios tanto económicos como ambientales.

Lineamiento: Implementar estrategias de disposición del agua de acuerdo a las características y capacidades de cada zona de fracturamiento

- En los casos de estudio revisados, la gran mayoría de operadores envían las aguas residuales a disposición final (Gómez, 2016), por lo que se propone si llegan a implementar esta práctica, realizar evaluaciones previas de las composiciones de las aguas residuales tratadas con el fin de garantizar que los niveles de contaminantes no sobrepasen los límites permitidos.
- Las empresas operadoras podrían realizar evaluaciones detalladas de los pozos abandonados con el fin de ser reacondicionados para disposiciones finales de aguas residuales.
- Para la disposición del agua se propone hacer uso de la reutilización en el proceso de fracturación y en las actividades operativas del pozo que no requieran del consumo

GESTIÓN AGUAS RESIDUALES DE FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO

humano. Se encontró que estas estrategias no solo tienen beneficios monetarios, sino también ambientales, ya que mientras se reduce la cantidad de agua a eliminar, también se reduce la cantidad de agua potable que se necesita capturar (Gregory & Mohan, 2015).

- Las empresas operadoras deberán propender por aplicar métodos de reutilización y reciclaje del agua tratada, ya sea en uso de sus propias actividades operativas o en usos beneficios como riegos y consumo de animales, especialmente en zonas donde no hay posibilidades de ser inyectadas en pozos clausurados, enviadas a lugares de disposición final o en el caso de no poder pagar los costos de transporte para la inyección en pozos profundos.

5.3 Sectores Responsables Que Deben Involucrarse En El Direccionamiento Y Ejecución De Los Lineamientos Y Sus Propuestas Planteadas

En la Tabla 6, se relacionan los sectores que serían responsables de la ejecución y/o desarrollo de los lineamientos y las propuestas descritas anteriormente, teniendo en cuenta sus competencias.

Tabla 6.
Sectores Responsables

Lineamientos	Entidad/ Sector Responsable		
	Estado (ANLA, ANH, Ministerios)	Empresa Privada (operadores)	Academia
Desarrollar tecnologías y estrategias innovadoras que permitan reciclar y reutilizar aguas de diferentes fuentes alternativas			
Aumento de investigación, estudios de Casos, estudios ambientales			
Aumento de investigación y Estudios de Casos			

Validación y aseguramiento de adecuada infraestructura de los pozos			
Estimación real de los riesgos			
Validación y realización de mantenimiento de equipos			
Ejecución de monitoreos de condiciones de suelos y actividades sísmicas			
Evaluación de nuevas tecnologías, costos y beneficios			
Diseño adecuado de infraestructura para la recolección, almacenamiento y aplicación de primer tratamiento			
Ejecución de análisis previos			
Implementar tecnologías destinadas a separar altos contenidos de sólidos disueltos			
Implementar estrategias de disposición del agua de acuerdo a las características y capacidades de cada zona de fracturamiento			

Conclusiones

A través del desarrollo del presente estudio y la ejecución de las actividades y sub actividades propuestas, se logró llevar a cabo un análisis concienzudo de los desafíos y retos que deben ser superados por la industria petrolera en cuanto a la gestión integral de las aguas residuales del fracturamiento hidráulico en yacimientos no convencionales.

Este análisis se inició ejecutando una revisión sistemática de bibliografía que estuviera disponible en recursos electrónicos de la institución, como son la base de datos SCOPUS, OnePetro y Web Of Science, para lo cual se estableció el procedimiento estándar para revisiones de este tipo, determinando la terminología clave, diseñando las ecuaciones de búsqueda, seleccionando las posibles fuentes y aplicando los criterios de inclusión y exclusión acertados para la delimitación y hallazgo de información relevante y relacionada con la temática de estudio. De estas bases de datos, se logró extraer 109 artículos a los cuales se les realizó lectura y aplicación de los criterios relacionados, quedando como fuentes documentales para el desarrollo de los objetivos 12 documentos, publicados mayormente por E.E.U.U y otros países como Irán, Francia, Rusia y China, pues son lugares que presentan un historial preponderante de ejecución de procesos de fracturamiento hidráulico en pozos no convencionales, encontrándose además, que de este grupo de artículos, el 45% fue publicado entre los años 2019 y 2020, tendencia que refleja el aumento por la preocupación y concientización del cuidado y protección de los recursos hídricos, como mecanismo tanto de preservación del medio ambiente como de optimización de los resultados financieros de la actividad económica de perforación y extracción de hidrocarburos.

Una vez realizadas las consultas bibliográficas y obtenidas las fuentes documentales, se procedió a realizar una profundización sobre la gestión de las aguas residuales resultantes de los

GESTIÓN AGUAS RESIDUALES DE FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO

procesos de fracturación en pozos no convencionales, señalando las principales observaciones de los autores referidas a las problemáticas que presenta este tipo de procesos en cuanto a los factores ambientales, sociales y económicos, cifras del gasto hídrico en algunas zonas, generalidades de las aguas residuales y los desafíos y/o oportunidades futuras que pueden ser aprovechadas por los operadores logísticos en cuanto a manejo y tratamiento de dichas aguas.

De igual forma, al realizar lectura, análisis y extracción de datos de estos artículos, se pudo determinar un ciclo para la gestión de las aguas residuales, cuyo enfoque sistémico se formuló desde su captación y a partir de cuatro etapas: captación de agua fresca, uso del agua en el fracturamiento (agregado de sustancias químicas, inyección en pozos, aguas de retorno), recolección, almacenamiento y aplicación de primer tratamiento para remoción de residuos sólidos y finalmente el tratamiento de aguas residuales y disposición del agua, teniendo en cuenta que en esta última etapa, los operadores eligen el tipo de tratamiento más adecuado y conveniente, según la utilidad que deseen obtener, ya sea reutilización y reciclaje o eliminación definitiva.

Para la ejecución de las actividades planteadas para alcanzar el segundo objetivo, se expusieron cada una de las metodologías que señalaban los artículos revisados, como método de identificación del manejo y disposición dada a las aguas residuales y se realizó un análisis estadístico de sus beneficios, obteniendo así cuatro casos de éxito que fueron determinados por los resultados y/o hallazgos presentados por los autores, cuyos tratamientos para la gestión de aguas residuales estuvieron enfocados en la destilación térmica, cristalización, dilución mediante agregado de sustancias químicas, tratamientos con membranas y tratamientos con agentes biológicos, entre los cuales se destacaron resultados de niveles de reducción de impurezas y sólidos disueltos de hasta 99.5%.

GESTIÓN AGUAS RESIDUALES DE FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO

Finalmente, luego de presentar el análisis llevado a cabo durante todo el proceso, se establecieron lineamientos de gestión de las aguas residuales de las actividades de fracturamiento hidráulico en yacimientos no convencionales enfocados en la industria petrolera colombiana, teniendo en cuenta tanto los casos de éxito identificados, como el potencial estimado de las reservas de yacimientos que pueden ser aprovechados por las empresas minero energéticas en un futuro no lejano, señalando propuestas puntuales que deben ser desarrolladas o ejecutadas por el estado, el sector privado y/o la academia según les apliquen sus competencias y responsabilidades.

Respecto a los resultados obtenidos de este estudio, se hace evidente la inminente necesidad que se presenta para la industria de seguir en la búsqueda de estrategias innovadoras para la gestión de las aguas residuales, la validación de las diferentes opciones de tratamiento, sus aplicaciones y limitaciones puntuales, pues el hecho de que vaya en aumento la escasez del recurso hídrico en los próximos años, plantea que deben ser establecidos estándares y lineamientos de estricto cumplimiento que garanticen el equilibrio costo-beneficio, la calidad de la gestión de las aguas y la disminución de los volúmenes de agua que maneja la operatividad de los yacimientos no convencionales.

Recomendaciones

Respecto a los resultados obtenidos de este estudio, se hace evidente la inminente necesidad que se presenta para la industria la continua búsqueda de estrategias innovadoras para la gestión de las aguas residuales, la validación de las diferentes opciones de tratamiento, sus aplicaciones y limitaciones puntuales, pues el hecho de que vaya en aumento la escasez del recurso hídrico en los próximos años, plantea que deben ser establecidos estándares y lineamientos de estricto cumplimiento que garanticen el equilibrio costo-beneficio, la calidad de la gestión de las aguas y la disminución de los volúmenes de agua que maneja la operatividad de los yacimientos no convencionales.

Como recomendación puntual y teniendo en cuenta que cada zona a intervenir puede presentar características físicas, químicas y geo estructurales distintivas, los estudios ambientales deben ser llevados a cabo de manera específica y puntual, para determinar las metodologías que puedan ser más efectivas en el gestionamiento y aseguramiento de los recursos naturales, en especial del recurso hídrico.

Por otro lado, las instituciones académicas deben propender por incentivar al estudiantado de Ingeniería de Petróleos e Ingeniería ambiental y sus carreras afines, en el aumento de desarrollos investigativos enfocados en las temáticas referenciadas en los lineamientos y propuestas descritas, de esta manera se obtendrían fundamentos y bases concienzudas para que los entes involucrados, sobre todo el Estado y el Sector Privado, desarrollen estrategias, lineamientos y tecnologías sustentables y sostenibles en las potenciales acciones de fracking.

Bibliografía

- Afshin, D. (2018). *The integrated feasibility analysis of water reuse management in the petroleum exploration performances of unconventional shale reservoirs*. Retrieved from Ciencia aplicada del agua; Web Of Science: <https://bibliotecavirtual.uis.edu.co:2142/article/10.1007%2Fs13201-018-0717-7>
- Alicante. (2016, 02). *Entrapamiento*. Retrieved from Glosario Hidrocarburos : <https://glosarios.servidor-alicante.com/hidrocarburos/entrapamiento#:~:text=Acumulaci%C3%B3n%20de%20hidrocarburos%20en%20ciertas,su%20desplazamiento%20hacia%20la%20superficie.>
- Centro Cochrane Iberoamericano. (2012). *Manual Cochrane de Revisiones Sistemáticas de Intervenciones, versión 5.1.0 [actualizada en marzo de 2011]*. Retrieved from <http://www.cochrane.es/?q=es/node/269>
- Chang, H., Lie, T., Liu, B., Vidic, R., Elimelech, M., & Crittenden, J. (2019). *Potential and implemented membrane-based technologies for the treatment and reuse of flowback and produced water from shale gas and oil plays: A review*. Retrieved from Scopus: https://bibliotecavirtual.uis.edu.co:2150/record/display.uri?eid=2-s2.0-85059737953&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&st1=wastewater&st2=management&searchTerms=hydraulic%3f%21%22*%24fracturing%3f%21%22*%24unconventional+reservoirs%3f%21%22*%24&sid=efa43
- Cherednichenko, N. (2020). *Keys to Better Water Management: Seeking Sustainability Amid the Chaos*. Retrieved from On Petro: <https://bibliotecavirtual.uis.edu.co:3816/JPT/article-abstract/72/05/41/210011/Keys-to-Better-Water-Management-Seeking?redirectedFrom=fulltext>

GESTIÓN AGUAS RESIDUALES DE FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO

- Gómez, C. (2016). *Alternativas para la minimización del Uso del Agua en las Operaciones de Fracturamiento Hidráulico en la Explotación de Yacimientos No Convencionales*. Retrieved from Repositorio Fundación Universidad de América: <http://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/639/1/5101422-2016-2-GA.pdf>
- Gregory, K., & Mohan, A. (2015). *Current perspective on produced water management challenges during hydraulic fracturing for oil and gas recovery*. Retrieved from Scopus: https://bibliotecavirtual.uis.edu.co:2150/record/display.uri?eid=2-s2.0-84929616884&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&st1=wastewater&st2=management&searchTerms=hydraulic%3f%21%22*%24fracturing%3f%21%22*%24unconventional+reservoirs%3f%21%22*%24&sid=efa43
- Gregory, K., Vidic, R., & Dzombak, D. (2012). *Water Management Challenges Associated with the Production of Shale Gas by Hydraulic Fracturing*. Retrieved from Elements vol 7 Página; Web Of Science: <https://bibliotecavirtual.uis.edu.co:4066/wos/woscc/full-record/WOS:000291629700009>
- Guerra, O., Calderon, A., apageorgiou, L., Sirola, J., & Reklaitis, G. (2016). *An optimization framework for the integration of water management and shale gas supply chain design*. Retrieved from Ingeniería Química y computadoras; Web Of Science: <https://bibliotecavirtual.uis.edu.co:4066/wos/woscc/full-record/WOS:000380513500018>
- Hincapié, G., Ocampo, D., Restrepo, G., & Marín, J. (2011). *Fotocatálisis Heterogénea y Foto-Fenton Aplicadas al Tratamiento de Aguas de Lavado de la Producción de Biodiesel*. Retrieved from Información tecnológica. Scielo: [https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642011000200005#:~:text=Foto%2DFenton%20es%20una%20TAO,et%20al.%2C%20](https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642011000200005#:~:text=Foto%2DFenton%20es%20una%20TAO,et%20al.%2C%207642011000200005#:~:text=Foto%2DFenton%20es%20una%20TAO,et%20al.%2C%20)

GESTIÓN AGUAS RESIDUALES DE FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO

02009).

Jin, Y., & Davarpanah, A. (2020). *Using Photo-Fenton and Flootation Techniques for the Sustainable Management of Flow-Back Produced Water Reuse in Shale Reservoirs Exploration*. Retrieved from Scopus:

<https://bibliotecavirtual.uis.edu.co:2150/record/display.uri?eid=2-s2.0->

[85089380080&origin=resultslist&sort=plf-](https://bibliotecavirtual.uis.edu.co:2150/record/display.uri?eid=2-s2.0-85089380080&origin=resultslist&sort=plf-)

[f&src=s&st1=wastewater&st2=management&searchTerms=hydraulic%3f%21%22*%24](https://bibliotecavirtual.uis.edu.co:2150/record/display.uri?eid=2-s2.0-85089380080&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&st1=wastewater&st2=management&searchTerms=hydraulic%3f%21%22*%24)

[fracturing%3f%21%22*%24unconventional+reservoirs%3f%21%22*%24&sid=efa43](https://bibliotecavirtual.uis.edu.co:2150/record/display.uri?eid=2-s2.0-85089380080&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&st1=wastewater&st2=management&searchTerms=hydraulic%3f%21%22*%24fracturing%3f%21%22*%24unconventional+reservoirs%3f%21%22*%24&sid=efa43)

López, A. (2020, 09 22). *Listo reglamento ambiental para los pilotos de 'fracking'*. Retrieved from Portafolio: <https://www.portafolio.co/economia/listo-reglamento-ambiental-para-los-pilotos-de-fracking-544897>

Lusinier, N., Seyssiecq, I., Sambusiti, C., Jacob, M., Lesage, N., & Roche, N. (2019). *Biological Treatments of Oilfield Produced Water: A Comprehensive Review*. Retrieved from On Petro SPE J. 24 (05): 2135–2147.:

<https://bibliotecavirtual.uis.edu.co:3816/SJ/article/24/05/2135/207171/Biological->

[Treatments-of-Oilfield-Produced-Water-A?searchresult=1](https://bibliotecavirtual.uis.edu.co:3816/SJ/article/24/05/2135/207171/Biological-Treatments-of-Oilfield-Produced-Water-A?searchresult=1)

Mendoza, M. (2015). *Gestión de las Aguas Reiduales Producidas por la Industria de los Hidrocarburos No Convencionales*. Retrieved from Revista Internacional de Investigación e Innovación:

https://riiit.com.mx/apps/site/files/gestin_de_las_aguas_residuales_producidas_por_la_industria_de_los_hidrocarburos_no_convencionales.pdf

Menefee, A. H., & Ellis, B. R. (2020). *Wastewater management strategies for sustained shale gas production*. Retrieved from IOP Publishing Ltd Environmental Research Letters ,

GESTIÓN AGUAS RESIDUALES DE FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO

- Volumen 15 , Número 2; Web Of Science:
["https://bibliotecavirtual.uis.edu.co:4066/wos/woscc/full-record/WOS:000520981400001](https://bibliotecavirtual.uis.edu.co:4066/wos/woscc/full-record/WOS:000520981400001)
- Mettler Toledo. (2022). *¿En qué consiste la floculación?* Retrieved from Floculación:
https://www.mt.com/mx/es/home/applications/L1_AutoChem_Applications/L2_ParticleProcessing/Formulation_Flocculation.html
- MinAmbiente. (2011, 09 27). *Decreto 3573 de 2011*. Retrieved from Función Pública. EVA.
 Gestor Normativo. GOV.Co:
<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=64920>
- MinAmbiente. (2014, 03 20). *Resolución 0421 20 Marzo 2014*. Retrieved from Ministerio de
 Ambiente y Desarrollo Sostenible/ Anla:
https://www.anla.gov.co/documentos/normativa/terminos_referencia/RES.%200421%20del%2020%20de%20marzo%20de%202014.pdf
- MinAmbiente. (2015, 03 17). *Resolución 0631 17 de Marzo de 2015* . Retrieved from Ministerio
 de ambiente y Desarrollo sostenible/ :
<https://www.emcali.com.co/documents/107516/136322/Resolucion+0631+-+2015.pdf>
- MinAmbiente. (2020, 02 28). *Decreto 328 de 2020*. Retrieved from EVA Gestor Normativo
 GOV.CO :
<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=107874>
- MinEnergía. (2003, 06 26). *Decreto 1760 DE 2003 Ministerio de Minas y Energía*. Retrieved
 from Secretaria del Senado:
http://www.secretariasenado.gov.co/senado/basedoc/decreto_1760_2003.html
- MinEnergía. (2014, 03 27). *Resolución 9 0341 27 Marzo 2014*. Retrieved from Ministerio de
 Minas y Energía /minenergia.goc:

GESTIÓN AGUAS RESIDUALES DE FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO

<https://www.minenergia.gov.co/documents/10180/23517/22632-11325.pdf>

MinEnergia. (2020, 07 7). *Resolución 40185 del 07 Julio de 2015*. Retrieved from Ministerio de

Minas y Energía : https://www.minenergia.gov.co/documents/10180/23517/48604-Res_40185_Reglamento+Te%CC%81cnico+PPI+%281%29.pdf

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2021). *¿QUÉ ES UN*

BIOCIDA? Retrieved from Gobierno de España: [https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/productos-](https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/productos-quimicos/biocidas/#:~:text=Los%20biocidas%20son%20sustancias%20o,que%20no%20sea%20una%20mera)

[quimicos/biocidas/#:~:text=Los%20biocidas%20son%20sustancias%20o,que%20no%20sea%20una%20mera](https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/productos-quimicos/biocidas/#:~:text=Los%20biocidas%20son%20sustancias%20o,que%20no%20sea%20una%20mera)

Portafolio. (2021). *El país puede hacer 'fracking' en otras 7 cuencas petroleras*. Retrieved from

Portafolio: <https://www.portafolio.co/economia/infraestructura/el-pais-puede-hacer-fracking-en-otras-7-cuencas-petroleras-555590>

Ramírez, L., López, O., & Santana, J. (2020). *Yacimientos no convencionales en la cuenca del valle Medio del Magdalena: su impacto*. Retrieved from Universidad de los Andes:

<https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/49404/u837684.pdf?sequence=1>

Scanlon, B., Reedy, R., Hombre, F., & Walsh, M. (2017). *Water Issues Related to Transitioning from Conventional to Unconventional Oil Production in the Permian Basin*. Retrieved

from CIENCIA Y TECNOLOGÍA AMBIENTAL;Web Of Scieencie: <https://bibliotecavirtual.uis.edu.co:2277/doi/10.1021/acs.est.7b02185>

Schlumberger. (2022). *Lutita*. Retrieved from Oilfield Glossary en Español:

<https://glossary.oilfield.slb.com/es/terms/s/shale>

Schlumberger. (2022). *flóculo*. Retrieved from Oilfield Glossary en Español:

GESTIÓN AGUAS RESIDUALES DE FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO

<https://glossary.oilfield.slb.com/es/terms/f/floc>

Shrestha, N., Chilkoor, G., Wilder, J., Gadhamshetty, V., & Stone, J. (2017). Potential impacts on water resources of hydraulic fracturing from unconventional oil production in the Bakken Shale. *Water Research*, 1-24.

Tranfield, D., Denyer, D., & Smart, P. (2003). *Towards a Methodology for Developing Evidence-Informed Management Knowledge by Means of Systematic Review**. Retrieved from <https://www.cebma.org/wp-content/uploads/Tranfield-et-al-Towards-a-Methodology-for-Developing-Evidence-Informed-Management.pdf>

Uniandes. (2021). *El fracking en Colombia*. Retrieved from Universidad de los Andes. Maestría en Ingeniería de Petróleos: <https://masterpetroleos.uniandes.edu.co/index.php/es/noticias/90-el-fracking-en-colombia>

Urrútia, G., & Bonfill, X. (2010). Declaración PRISMA: una propuesta para mejorar la publicación de revisiones sistemáticas y metaanálisis. *Med Clin(Barc)*, 135-507.

Velandia, G. (2020). *Estudio dinámico sistémico de los efectos Ambientales del Fracking en Colombia*. Retrieved from Repositorio Universidad Autónoma de Bucaramanga: https://repository.unab.edu.co/bitstream/handle/20.500.12749/12067/2020_Tesis_Gabriel_Velandi_Higuera.pdf?sequence=1&isAllowed=y

win. (2022). *La Flotación*. Retrieved from MÉTODOS DE SEPARACIÓN DE MEZCLAS: <https://metodosdeseparaciondemezclas.win/flotacion/>

Zafra, D. (2018). Recopilación bibliográfica sobre yacimientos de hidrocarburos no convencionales en Colombia.

Zhang, L., & Hascakir, B. (2021). *A review of issues, characteristics, and management for wastewater due to hydraulic fracturing in the U.S*. Retrieved from Revista de ciencia e

GESTIÓN AGUAS RESIDUALES DE FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO

ingeniería del petróleo: https://bibliotecavirtual.uis.edu.co:2150/record/display.uri?eid=2-s2.0-85100907617&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&st1=wastewater&st2=management&searchTerms=hydraulic%3f%21%22*%24fracturing%3f%21%22*%24unconventional+reservoirs%3f%21%22*%24&sid=efa43