

SELECCIÓN DE LAS TECNOLOGIAS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS DE
RETORNO (FLOWBACK) PARA VIABILIZAR SU USO EN LOS FLUIDOS DE
FRACTURA



FABIAN ALEXIS ARANGUREN CAMPOS

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERIA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA
2015

SELECCIÓN DE LAS TECNOLOGIAS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS DE
RETORNO (FLOWBACK) PARA VIABILIZAR SU USO EN LOS FLUIDOS DE
FRACTURA

FABIAN ALEXIS ARANGUREN CAMPOS

Trabajo de grado presentado para optar por el título de Ingeniero de Petróleos

DIRECTORA
Ph.D ZULY CALDERÓN CARRILLO
PROFESORA PLANTA ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS

CO – DIRECTOR
Qco. JOSE MANUEL USURIAGA TORRES
ECOPETROL - ICP

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERIA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA
2015



DEDICATORIA

Inicialmente a Dios por darme la sabiduría, la salud, la felicidad, la tranquilidad y la paciencia para desarrollar de la mejor manera este trabajo de investigación, a pesar de los diversos obstáculos que se presentaron.

A mi padre Rodrigo y a mi madre María porque gracias a su apoyo incondicional, a sus enseñanzas y consejos he logrado vivir feliz y lograr muchos éxitos.

A mis hermanos Elmer y Oscar, a mi hermana Diana, ya que gracias a sus regaños y consejos he tomado las decisiones pertinentes que me han llevado a salir airoso de muchas situaciones.

A toda mi familia por el apoyo incondicional durante esta etapa de mi vida.



AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Industrial de Santander por permitirme el placer de formarme como profesional en sus aulas de clase.

A la Escuela de Ingeniería de Petróleos y a sus docentes por compartir sus conocimientos y brindar apoyo en mi formación tanto académica como personal.

Al Grupo de Investigación en Estabilidad de Pozo por brindarme la oportunidad de desarrollar este proyecto y además por permitir mostrar mis capacidades investigativas.

A la Ingeniera Zuly Calderón por sus enseñanzas y conocimientos en la parte técnica y en la parte personal.

A mi asesor del Instituto Colombiano del Petróleo, José Manuel Usuriaga por su aporte y su acompañamiento durante el trabajo de investigación.

A mis amigos del alma y demás compañeros de clase de la Universidad que de alguna u otra forma, colaboraron a que este trabajo de investigación fuera una realidad.

Y finalmente y más importante, a mi familia, mi gran apoyo y mi motor para salir adelante en mi carrera profesional.



TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	16
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	18
2.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	18
2.2 JUSTIFICACIÓN	19
3. FUNDAMENTO TEÓRICO	21
3.1 GENERALIDADES FRACTURAMIENTO	21
3.1.1 Definición de fractura	21
3.1.2 Fluido de fractura	23
3.2 TECNOLOGÍAS PARA EL TRATAMIENTO DE FLOWBACK	24
3.2.1 Tecnologías para tratamientos físicos	26
3.2.1.1 Microfiltración (MF)	27
3.2.1.2 Nanofiltración (NF)	28
3.2.1.3 Ultrafiltración (UF)	30
3.2.1.4 Ósmosis Inversa (RO)	30
3.2.1.5 Ósmosis directa (FO)	35
3.2.1.6 Destilación por membranas (MD)	38
3.2.1.7 Bio-reactor de membranas (MBR)	41
3.2.1.8 Electrodiálisis (ED) / Electrodiálisis inversa (EDR)	42
3.2.2 Tecnología para tratamientos térmicos	45
3.2.2.1 Destilación Flash Multi Etapa (MSF)	46
3.2.2.2 Destilación Multi efecto (MED)	49
3.2.2.3 Dewvaporation (DV)	51
3.2.2.4 Destilación por compresión de vapor	54
3.2.2.5 Freeze Thaw Evaporation (FTE)	57
3.2.3 Tecnologías para tratamientos químicos	58
3.2.3.1 Adsorción	58
3.2.3.2 Intercambio iónico	61



3.2.3.3 Procesos de oxidación avanzada.....	63
3.2.4 Tecnologías para tratamientos biológicos.....	71
4. CARACTERIZACIÓN Y ANÁLISIS FISCOQUIMICO DEL FLOWBACK PARA LA SELECCIÓN DE LAS TECNOLOGIAS PARA TRATAMIENTO	82
4.1 IDENTIFICACION FORMACION EXTRANJERA	82
4.2 ANALISIS FISCOQUIMICO DEL FLOWBACK.....	86
4.3 SELECCIÓN DE LAS TECNOLOGIAS PARA TRATAR EL FLOWBACK EN COLOMBIA.....	93
4.4 FACTIBILIDAD ECONOMICA DE LAS TECNOLOGIAS SELECCIONADAS PARA EL TRATAMIENTO DE FLOWBACK	109
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS	116
6. CONCLUSIONES	119
7. RECOMENDACIONES.....	122
BIBLIOGRAFÍA	123
ANEXOS	138

LISTA DE TABLAS

	Pág
Tabla 1. Características del proceso de Nanofiltración	28
Tabla 2. Características propias del proceso de Ósmosis Inversa	33
Tabla 3. Características propias del proceso de Ósmosis directa	36
Tabla 4. Características propias del proceso de destilación por membranas.....	39
Tabla 5. Características propias del proceso de electrodiálisis.....	44
Tabla 6. Características propias del proceso de destilación Flash Multi etapa	47
Tabla 7. Características propias del proceso de destilación Multi efecto	50
Tabla 8. Características propias del proceso Dewvaporation	52
Tabla 9. Características propias de la destilación por compresión de vapor	55
Tabla 10. Características propias de la adsorción.....	60
Tabla 11. Características propias del intercambio iónico	61
Tabla 12. Procesos de oxidación avanzada	64
Tabla 13. Parámetros de operación típicos en procesos de fangos activados.....	73
Tabla 14. Condiciones de operación para distintos reactores anaerobios	74
Tabla 15. Tabla resumen tecnologías para tratamiento de flowback.....	75
Tabla 16. Características de yacimiento de shales Estados Unidos.....	83
Tabla 17. Analogía entre Eagle Ford y la formación La Luna	85
Tabla 18. Composición fisicoquímica del flowback en Eagle Ford y el Valle Medio del Magdalena.....	87
Tabla 19. Índices de estabilidad del agua	90
Tabla 20. Parámetros que influyen en el del índice de Langelier en los tres escenarios propuestos.....	94
Tabla 21. Valores obtenidos para el cálculo de pHs	94
Tabla 22. Valores obtenidos parámetros I y pfm	94
Tabla 23. Calculo de pHs	95
Tabla 24. Cálculo del índice de Langelier	95
Tabla 25. Cálculo del índice de Ryznar	97



Tabla 26. Cálculo del término pHeq	99
Tabla 27. Cálculo del índice de Puckorius	99
Tabla 28. Valores de los parámetros que inciden en el índice de agresividad	100
Tabla 29. Cálculo del índice de Agresividad	100
Tabla 30. Valores de los parámetros que incide en el índice de Larson & Skold	102
Tabla 31. Cálculo del índice Larson & Skold	102
Tabla 32. Parámetros que más afectan a los índices propuestos	103
Tabla 33. Resultados obtenidos de los índices de estabilidad del agua a diferentes condiciones de temperatura.....	104
Tabla 34. Composición teórica del afluente y del efluente	108
Tabla 35. Costos de implementación Osmosis inversa	112
Tabla 36. Costos de implementación Destilación por membranas	113
Tabla 37. Costos de implementación Dewvaporation	113
Tabla 38. Costos de implementación Destilación por compresión de vapor	114
Tabla 39. Costos de implementación Destilación flash multi etapa	115

LISTA DE FIGURAS

	Pág
Figura 1. Proceso de fracturamiento hidráulico	22
Figura 2. Composición del fluido de fractura utilizado en el Shale de Marcellus	23
Figura 3. Categorías de las tecnologías para el tratamiento de agua	26
Figura 4. Separación por filtración	27
Figura 5. Esquema general del tratamiento con Ósmosis Inversa	32
Figura 6. Esquema general del tratamiento con Ósmosis directa	35
Figura 7. Esquema general del tratamiento de destilación por membranas	38
Figura 8. Esquema general Destilación Flash Multi etapa	46
Figura 9. Esquema general Destilación Flash Multi efecto	49
Figura 10. Diagrama esquemático de la destilación por compresión de vapor mecánica	55
Figura 11. Adsorción y absorción	59
Figura 12. Planta piloto de Electroquímica catalítica	67
Figura 13. Reactores para electrocoagulación tipo bach: (a) Reactor con electrodos monopolares conectados en paralelo, (b) Reactor con electrodos monopolares conectados en serie	69
Figura 14. Diagrama de araña índice de Langelier	96
Figura 15. Diagrama de araña índice de Ryznar.....	98
Figura 16. Diagrama de araña índice de Puckorius	99
Figura 17. Diagrama de araña índice de agresividad	101
Figura 18. Diagrama de araña índice de Larson & Skold	103
Figura 19. Índice de Langelier a diferentes condiciones de temperatura	104
Figura 20. Índice de Ryznar a diferentes condiciones de temperatura.....	104
Figura 21. Índice de Puckorius a diferentes condiciones de temperatura	105
Figura 22. Escenarios de demanda de agua para fracturamiento hidráulico	109
Figura 23. Consumo de energía de las tecnologías preseleccionadas para el tratamiento	116
Figura 24. Costo de capital las tecnologías preseleccionadas para el tratamiento.....	117



Figura 25. Capacidad de las tecnologías preseleccionadas para el tratamiento117

Figura 26. Costos de operación de las tecnologías preseleccionadas para el tratamiento
.....118



LISTA DE ANEXOS

	Pág
Anexo A. Resumen tecnologías para tratamiento de flowback	138

RESUMEN

TITULO: SELECCIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS DE RETORNO (FLOWBACK) PARA VIABILIZAR SU USO EN LOS FLUIDOS DE FRACTURA.

AUTOR: Fabian Alexis Aranguren Campos.¹

PALABRAS CLAVE: Aguas de retorno, flowback, tratamiento, fracturamiento hidráulico.

DESCRIPCIÓN:

El fracturamiento hidráulico es una técnica de estimulación de pozos petroleros caracterizada por utilizar una gran cantidad de agua para su ejecución. Debido a la proliferación en el desarrollo de los yacimientos no convencionales tal como el caso del shale gas y las restricciones que se han implementado respecto al uso del agua en ciertas regiones del mundo, es inminente la utilización de tecnologías para tratamiento de flowback que permitan convertir esos volúmenes residuales en activos útiles para nuevas etapas de fracturamiento. En la industria existe un gran número de tecnologías que pueden ser aplicables al tratamiento de estos volúmenes de retorno, como también existen tecnologías emergentes que pueden tener gran incidencia y efectividad en el tratamiento.

El presente trabajo de investigación plantea las tecnologías que podrían ser óptimas para el tratamiento de flowback en los yacimientos no convencionales en Colombia con base en el análisis de sensibilidad de índices de estabilidad del agua, parámetros técnicos y experiencias a escala real de cada tecnología, la correlación de las características fisicoquímicas de aguas de retorno de una formación extranjera similar a una formación colombiana y el análisis económico de las tecnologías seleccionadas. La mejor opción surge de la más alta eficiencia operacional al menor costo posible.

¹ Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Directora: Zuly Calderón Carrillo. Co – director: Qco. Jose Manuel Usuriaga.



ABSTRACT

TITLE: SELECTION OF TECHNOLOGIES FOR FLOWBACK TREATMENT FOR VIABLE USE IN FRACTURING FLUIDS.

AUTHOR: Fabian Alexis Aranguren Campos.²

KEYWORDS: backflow water, flowback, treatment, hydraulic fracturing.

DESCRIPTION:

Hydraulic fracturing is an oil wells stimulation technique characterized by using a large amount of water for its execution. Due to the proliferation in the development of unconventional reservoirs such as shale gas and restrictions that have been implemented over the use of water in certain regions of the world, it is imminent use of flowback treatment technologies for converting these residual volumes in useful assets for new stages of fracking. In the industry, there are a number of technologies that may be applicable to the treatment of these flowback, as there are emerging technologies that can have significant impact and effectiveness in treatment.

This research sets the technologies that could be optimal for the treatment of flowback in unconventional reservoirs in Colombia based on the sensitivity analysis of water stability indices, technical parameters and experience in a real scale of each technology, the correlation of the flowback physicochemical characteristics of the foreign geological formation similar to Colombian geological formation and the economic analysis. The best option arises from the higher operational efficiency at the lowest possible cost.

² Facultad de Ingenieras Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Directora: Zuly Calderón Carrillo. Co – director: Qco. Jose Manuel Usuriaga.

INTRODUCCIÓN

El petróleo constituye una de las fuentes más importantes a nivel mundial que yace en subsuelo y su recuperación es de vital importancia para el sustento energético de la población mundial. Con el paso de los años, el petróleo convencional ha venido en constante disminución con lo cual, la industria petrolera ha enfocado su mirada hacia recursos que anteriormente eran ignorados.

Los yacimientos no convencionales (YNC) crean una nueva perspectiva energética que plantea, de alguna u otra manera, la MEGA de autoabastecimiento energético por medio de la optimización y masificación de la extracción de recursos no convencionales, tal es el caso del Shale Oil y el Shale Gas. Estos yacimientos presentan características particulares que los hacen prospectos difíciles de manejar. Las rocas que constituyen estos yacimientos son las lutitas, las cuales son sedimentos ricos en materia orgánica y presentan una permeabilidad baja a ultra baja. Para la obtención de estos recursos no convencionales se requieren de técnicas las cuales permitan “construir el yacimiento”. Una de esas técnicas es el Fracturamiento Hidráulico, también conocido como estimulación hidráulica que tiene por objetivo mejorar el flujo de hidrocarburos mediante la creación de fracturas en la formación, que conectan al yacimiento con el pozo³.

El fracturamiento hidráulico ha generado efectos positivos y negativos. Por una parte, ésta técnica ha logrado conseguir resultados óptimos que se evidencian en el desarrollo y puesta en producción de numerosos Shale Plays en el mundo como por ejemplo en los Estados Unidos. Sin embargo, la otra cara de la moneda muestra algunas falencias de este método la cual se evidencia en los efectos

³ NOLEN-HOEKSEMA. Elementos del fracturamiento hidráulico. En Oilfield Review. Volumen 25, no. 2, 2013.

negativos en el ambiente, llegando al punto de prohibición y suspensión de esta técnica en la industria petrolera en ciertas regiones del mundo.

El gran consumo de agua potable es una de las más grandes preocupaciones que genera el fracturamiento hidráulico debido a que en numerosas partes del mundo, este recurso no se encuentra en gran cantidad, por lo que su uso se restringe al consumo de la población. De este modo, se hace necesaria la implementación de metodologías que integren tecnologías, las cuales permitan el desarrollo del fracturamiento hidráulico y a su vez, generen un impacto ambiental negativo mínimo. El presente trabajo de investigación busca seleccionar las tecnologías apropiadas para el tratamiento de aguas de retorno (flowback), para viabilizar su uso en los fluidos de fractura aplicado a yacimientos no convencionales en Colombia basado en la experiencia internacional.

Inicialmente, se pretende realizar una revisión bibliográfica de las diversas tecnologías que han sido utilizadas para el tratamiento de aguas de retorno, identificando sus rangos operacionales; posteriormente se plantea correlacionar las características fisicoquímicas de un volumen de retorno proveniente de una formación extranjera, la cual tenga características geológicas similares a una formación colombiana. Finalmente, por medio de la caracterización anterior, se hará la selección de la tecnología adecuada para llevar a cabo el proceso de tratamiento; esta selección estará fundamentada en las características técnicas y la viabilidad económica.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Con la creciente demanda energética a nivel mundial, la industria petrolera ha centrado su interés en prospectos energéticos que en años pasados no eran tenidos en cuenta. Los yacimientos no convencionales han llevado a prácticas que permiten “crear el yacimiento”, para así poder extraer el hidrocarburo que se encuentra albergado allí. El fracturamiento hidráulico (fracking) es una técnica la cual se ha venido trabajando durante años; ésta consiste en inyectar grandes cantidades de agua a altas presiones en el yacimiento, acompañadas de pequeños granos de arena u otro material, denominados propanes, para así generar canales de flujo que permitan obtener el hidrocarburo que se encuentra atrapado en una roca de baja permeabilidad y baja porosidad. Esta práctica conlleva a utilizar grandes cantidades de agua, que en muchos casos, es escasa en algunas zonas, generando un malestar no solo social, sino también ambiental y legal, debido a que se genera un desequilibrio en los ecosistemas. A medida que se reinyecta más cantidad de agua al yacimiento, mayor será la cantidad de agua de retorno en superficie, la cual también está considerada como un problema para la industria del petróleo debido a que esta contiene algunos contaminantes disueltos (químicos, materiales radioactivos entre otros) que pueden llegar a ser potencialmente perjudiciales a la fauna, flora y cuerpos de agua en superficie, si no se les realiza el tratamiento pertinente.

Por lo tanto, se hace evidente la necesidad de tratar el flowback proveniente del desarrollo de pozos no convencionales para que pueda ser reutilizado en fluidos de fractura, teniendo en cuenta que este volumen tratado debe cumplir con las características fisicoquímicas adecuadas para lograr el desempeño reológico que se quiere en una nueva etapa de fracturamiento. Es importante tener en cuenta

que para el diseño de un tipo específico de fluido de fractura, el agua debe tener un contenido determinado de sólidos totales disueltos (TDS). Por ejemplo, para fluidos base Zirconio, se puede utilizar agua con alto contenido TDS para lograr el desempeño adecuado en la etapa de fracturamiento, lo cual indica que el tratamiento es mínimo o casi nulo. En otros casos, como por ejemplo para fluidos base boratos, el agua si requiere que por lo menos se le realice un tratamiento a nivel primario para obtener resultados deseados.

2.2 JUSTIFICACIÓN

El tratamiento de aguas de retorno constituye una gran alternativa para volver estos volúmenes residuales en “activos” de utilidad en los procesos de la industria del petróleo en Colombia. De acuerdo a la revisión bibliográfica, existen numerosas tecnologías a escala industrial, de las cuales solo un puñado de estas han sido aplicadas en la industria del petróleo, algunas como pilotos en campos donde se están desarrollando proyectos de Shale gas, y otras tantas, como es el caso de los evaporadores térmicos que a pesar de algunas dificultades que presentan, se han impulsado y aplicado.

Por medio de esta investigación se plantea definir las tecnologías apropiadas para el tratamiento de aguas de retorno en los yacimientos no convencionales en Colombia, con el objetivo de tratarla y reutilizarla obteniendo un volumen de agua tratado con cierta concentración de Sólidos Totales Disueltos (TDS) con el fin de viabilizar su uso en los fluidos de fractura. Para llegar a esto, se plantea una revisión bibliográfica a nivel global de las diversas tecnologías que están disponibles en la industria del petróleo, en pruebas piloto y las tecnologías que se denominan “emergentes” en el contexto del tratamiento de aguas.

Si bien es cierto que el Fracturamiento Hidráulico es una técnica que hasta ahora iniciara su accionar en la industria petrolera colombiana en lo que respecta a los

yacimientos no convencionales, es de vital importancia identificar los beneficios y los problemas que pueden estar asociados tanto a nivel operacional, como ambiental y social. El agua indiscutiblemente constituye uno de los recursos más importantes con los que cuenta Colombia, por esto, los grandes beneficiados con esta investigación será la población debido a que por medio de estas tecnologías, la captación de agua dulce de los cuerpos de agua superficiales disminuirá, mitigando así los impactos ambientales negativos en el ambiente.

3. FUNDAMENTO TEÓRICO

3.1 GENERALIDADES FRACTURAMIENTO

El fracturamiento hidráulico es una técnica de estimulación de pozos relativamente antigua, con sus primeros experimentos hechos en 1947, pero es en 1949 donde se realizó el primer uso industrial. Esta ha sido usada desde entonces para la estimulación de pozos como también para el recobro mejorado de hidrocarburos.⁴ El fracturamiento hidráulico se ha convertido en una técnica muy común y extendida, sobre todo en América del Norte, debido a los avances tecnológicos que han permitido la extracción de gas natural de los llamados yacimientos no convencionales (arenas compactas, mantos de carbón y formaciones de shale)⁵.

3.1.1 Definición de fractura

Es el proceso mediante el cual se inyecta un fluido al pozo, a una tasa y presión que supera la capacidad de admisión matricial de la formación expuesta, originando un incremento de presión y la posterior ruptura. La fractura de una roca se genera perpendicularmente al mínimo esfuerzo y por lo tanto en la mayoría de pozos, la fractura es vertical. Si la tasa de bombeo se mantiene mayor a la tasa de pérdida de fluido en la fractura, entonces la fractura se propaga y crece como se ve en la figura 1.⁶

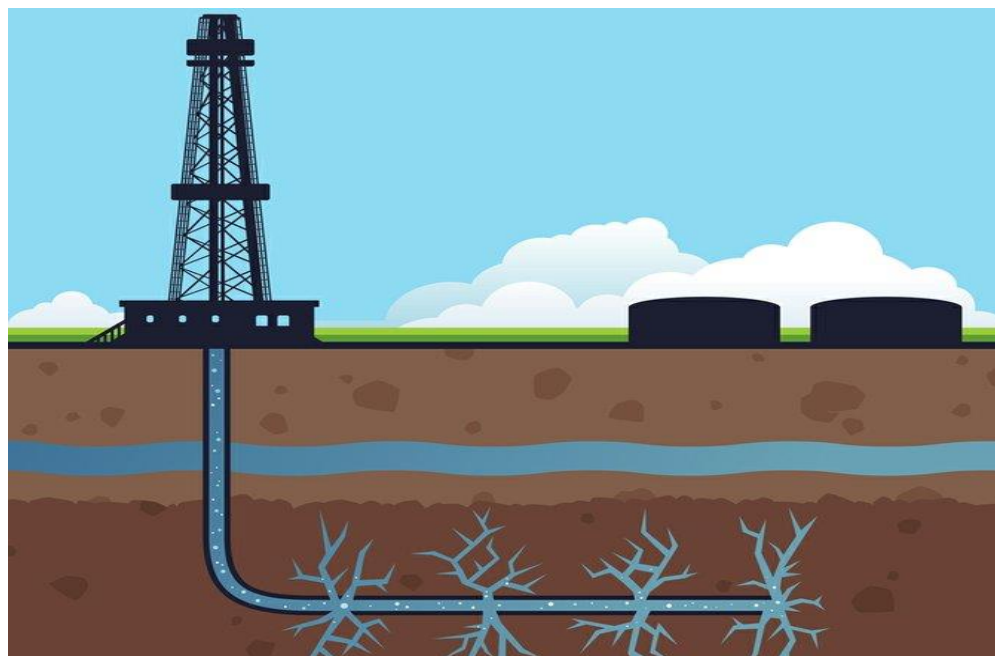
⁴ JOINT RESEARCH CENTER, COMISIÓN EUROPEA. An overview of hydraulic fracturing and other stimulation technologies for shale gas production. En Reporte EUR 26347, Luxemburgo, 2013.

⁵ JOINT RESEARCH CENTER, COMISIÓN EUROPEA. Op cit.

⁶ CARDENAS J. Desarrollo de un modelo analítico para predecir la geometría de fractura y el flujo de fluidos en operaciones de fracturamiento hidráulico con fluidos visco elásticos. Bucaramanga, 2013, 25 p. Tesis de maestría (Ingeniería de Hidrocarburos). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos.

La pérdida de fluido en la fractura es el resultado de un balance volumétrico: una parte del volumen del fluido abre la fractura y otra invade las vecindades de la misma. Inicialmente se inyecta solamente fluido de fractura debido a que la mayor pérdida de fluido es en las vecindades del pozo, posteriormente comienza a abrirse la fractura y es necesario que el material soportante o propante comience a ingresar en ella.⁷

Figura 1. Proceso de fracturamiento hidráulico



Fuente: <http://www.theharlemvalleynews.net/?p=8678>

Al final de una etapa, la fractura se encuentra llena del material propante (de soporte, apuntalante) con una adecuada concentración, tal que no permita el cierre de la fractura. Finalmente, para concluir el proceso de tratamiento por fracturamiento en un pozo, se bombea un volumen de fluido con el objeto de realizar la limpieza del exceso del propante en el pozo.⁸

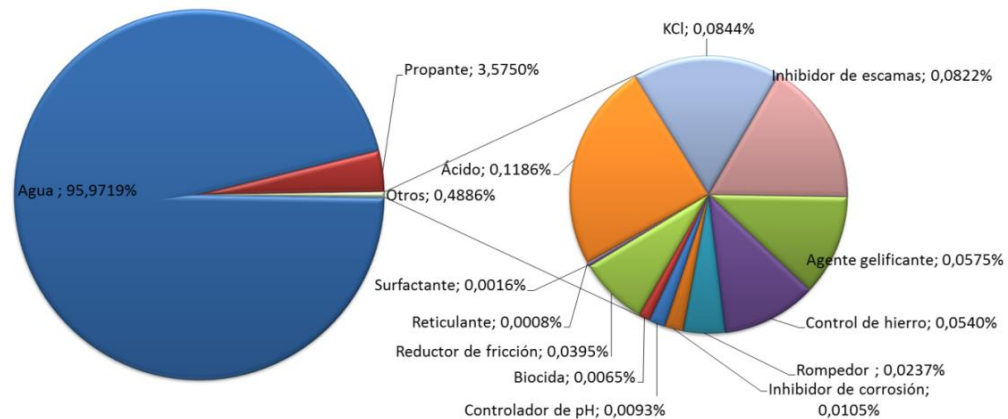
⁷ CARDENAS J. Op. Cit.

⁸ PAZMIÑO URQUIZO Jorge. Fundamentos de la teoría del fracturamiento hidráulico. 2005

3.1.2 Fluido de fractura

El agua es un elemento importante para la mayoría de los tratamientos por fracturamiento hidráulico, representa el 95% del total de componentes del fluido. La arena de fractura o agente sostén (propante) es el otro constituyente de importancia en volumen. Se trata de material granular, usualmente arena, que se mezcla con el fluido de fractura y su misión es mantener abierta o apuntalar la fractura producida al inyectar el fluido a alta presión y mantener la conductividad de fractura deseada.⁹ Hay diversos tipos de fluidos de fractura, entre los más comunes se encuentran los fluidos slick water y los fluidos reticulados.¹⁰

Figura 2. Composición del fluido de fractura utilizado en el Shale de Marcellus



Fuente: Modificada de VÁZQUEZ O., Post-frac Flowback Water Chemistry Matching in a Shale Development. En Society of Petroleum Engineers, SPE 169799, 2014.

También se pueden encontrar fluidos asistidos con gas y sistemas híbridos. A parte del fluido de gas asistido, el resto de los fluidos de fractura consisten principalmente de agua (aproximadamente un 95% en volumen), propante (arena)

⁹ TROMBETTA J. El agua en la explotación de los yacimientos no convencionales. En Petrotecnia: Agosto, 2012, p. 52-64. Disponible en: http://www.petrotecnia.com.ar/agosto12/sin_publicidad/EIAgua.pdf

¹⁰ KUIJVENHOVEN C. et. al. Water management approach for shale operations in North America. En Society of Petroleum Engineers, SPE 167057, 2013.

(aproximadamente 4%) y el 1% restante de volumen lo componen un número de aditivos. Un ejemplo de fluido de fractura se puede observar en la figura 2, el cual fue el fluido característico utilizado en el shale de Marcellus.¹¹

3.2 TECNOLOGIAS PARA EL TRATAMIENTO

Con el desarrollo de los nuevos prospectos energéticos, se han implementado técnicas como el fracturamiento hidráulico, el cual requiere de la utilización de agua potable para el diseño de los fluidos de fractura. Estas captaciones de agua han generado algunos riesgos para el medio ambiente, entre los más relevantes se pueden mencionar: el uso de alta cantidad de agua dulce, la infiltración de metano en los acuíferos, la contaminación de acuíferos, entre otros.¹² Es por eso que la industria petrolera debe implementar técnicas y tecnologías que permitan un nuevo accionar dentro de las prácticas de explotación de hidrocarburos no convencionales. Una buena alternativa es la reutilización de aguas de retorno para procesos tanto internos, como es el caso de nuevas etapas de fracturamiento hidráulico, métodos EOR, perforación de pozos, entre otros; como también para procesos externos como es el caso de riego en la agricultura, vertimiento del efluente a cuerpos de aguas superficiales, entre otros usos.

El agua de retorno representa el flujo de residuos de más alto volumen para la industria del petróleo. Los costos de gestión del agua que retorna a superficie es un factor significativo en la rentabilidad de los pozos y la producción excesiva de este recurso es una de las principales razones para abandonar un pozo de petróleo o gas. Las cifras publicadas en 2007 muestran que a nivel mundial, entre 70 y 100 millones de barriles de agua producida se generaron en este año.¹³ Además, para el año 2009, alrededor de 21 billones de barriles de agua de retorno

¹¹ VAZQUEZ O. et al. Post-frac flowback water chemistry matching in a shale development. En Society of Petroleum Engineers, SPE 169799, 2014.

¹² JOINT RESEARCH CENTER, COMISIÓN EUROPEA. Op cit.

¹³ DORES R et al. Using advanced Water treatment technologies to treat produced water from the petroleum industry. En Society of Petroleum Engineers, 157108, 2012.

se produjeron en Estados Unidos y más de 50 millones de barriles se produjeron en miles de pozos en otros países del mundo.¹⁴

Existe una combinación de factores económicos, ambientales y sociales que están cambiando la percepción de la industria petrolera hacia las aguas de retorno, con el objetivo de convertirla en un activo de gran utilidad en nuevas etapas de fracturamiento y así reducir la captación de agua proveniente de ríos y lagos. La escasez local de agua en ciertas regiones, la legislación cada vez más estricta respecto a utilización y disposición de agua, como también la creciente demanda de agua en las operaciones de producción¹⁵ se erigen como los factores más trascendentales en la reutilización de aguas de retorno en las operaciones petroleras.

En la actualidad, la mayoría de las aguas de retorno que se generaron en todo el mundo en las instalaciones en tierra, se reinyectaron en el subsuelo en los denominados pozos de disposición (pozos disposal), sin embargo, esta práctica ya no tiene la misma factibilidad de antes, por lo que la industria petrolera durante ya hace algunos años ha aunado esfuerzos para lograr desarrollar y adaptar tecnologías avanzadas que sean capaces de tratar más volúmenes de flowback, dando lugar a importantes beneficios como los siguientes:¹⁶

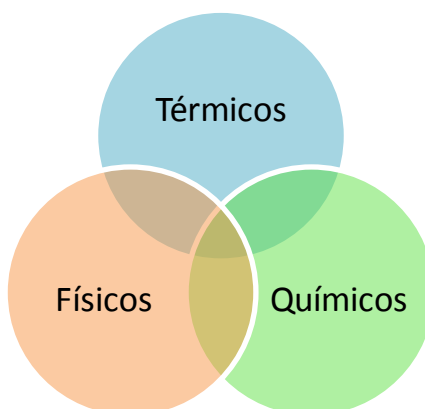
- Los volúmenes de inyección de aguas de retorno a pozos disposal se reducirán, disminuyendo los impactos ambientales.
- Si las aguas de retorno generadas en las operaciones donde se requieren considerables volúmenes de agua son tratadas y reutilizadas, se reducirá drásticamente los volúmenes de agua dulce requerida.

¹⁴ NETL. Introduction for produced Water. Disponible en: <http://www.netl.doe.gov/research/coal/crosscutting/pwemis/intro>

¹⁵ DORES R et al. Op cit.

¹⁶ HUSSAIN A et al. Op cit.

Figura 3. Categorías de las tecnologías para el tratamiento de agua



Fuente: Modificada de ELY, J., Game changing technology for treating and recycling frac water. En Society of Petroleum Engineers, 145454, 2011.

En la literatura existe un gran número de tecnologías para el tratamiento de aguas de retorno, las cuales pueden clasificarse de varias formas, encontrando que la clasificación más común está asociada a la ciencia como se conduce o trabaja el tratamiento. Para este tipo de clasificación hay tres grupos importantes. La figura 3 ilustra este tipo de clasificación, donde hay que tener en cuenta que algunas tecnologías caen en un grupo específico y otras coinciden en la superposición de dos o más tipos de tratamiento.¹⁷

3.2.1 Tecnologías para tratamientos físicos

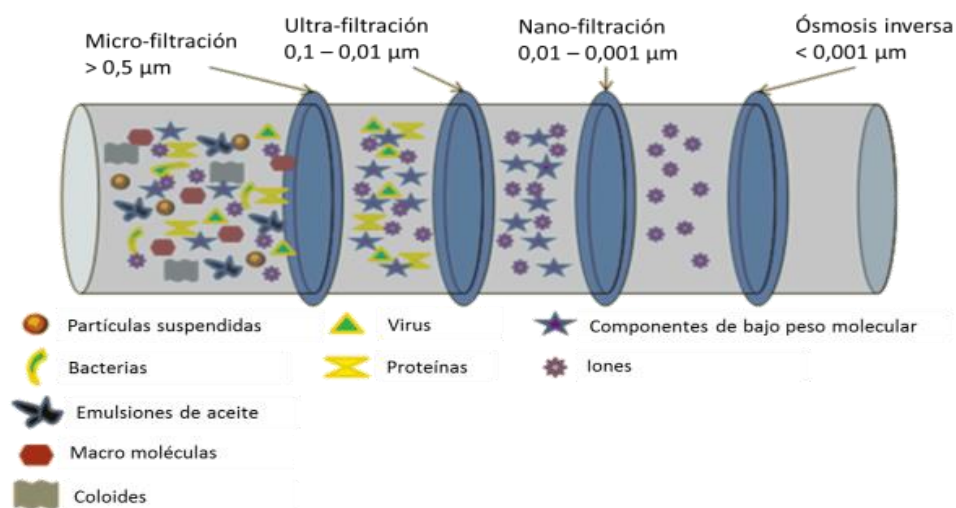
La filtración es la remoción física de partículas por tamaño¹⁸ la cual se puede observar en la figura 4. La separación puede ser *pasiva* (dejando que la gravedad y/o el flujo volumétrico haga el trabajo) o *activa* (energía es usada para ejercer

¹⁷ ELY J et al. Game changing technology for treating and recycling frac water. En Society of Petroleum Engineers, 145454, 2011.

¹⁸ PIERCE D. Water recycling helps with sustainability. En Society of Petroleum Engineers, SPE 134137, 2010.

presión y fuerza al agua a través del filtro o membrana para retener los contaminantes en esta).¹⁹ Las limitaciones de este proceso de tratamiento se asocian a los costos de fabricación de las membranas, componentes asociados al sistema (repuestos) y los requerimientos energéticos para generar la presión adecuada para la retención de los contaminantes en la membrana. De este modo, este proceso se utiliza típicamente con corrientes de alimentación con concentraciones de TDS entre 500 y 50.000 mg/L.

Figura 4. Separación por filtración



Fuente: Modificada de PIERCE D. Water Recycling Helps with Sustainability. En Society of Petroleum Engineers, SPE 134137, 2010.

3.2.1.1 Microfiltración (MF)

La microfiltración es generalmente referida a la filtración de menos de 1 micrón. La microfiltración industrial es un proceso de separación para sólidos suspendidos o aceites emulsionados en líquidos como el agua o solventes orgánicos (figura 4); también posee la capacidad de remover todas las bacterias y retiene cierto

¹⁹ PIERCE D Op. Cit.

porcentaje de virus a pesar que estos tienen un tamaño menor a los poros de la membrana. La separación toma lugar basado en la exclusión por tamaño solamente. Este proceso es independiente de la temperatura y el peso específico de los componentes, además, es un proceso que trabaja a baja presión con alto volumen procesado.²⁰

3.2.1.2 Nanofiltración (NF)

Este proceso puede desempeñarse en aplicaciones de desmineralización y desalación, concentración de solutos orgánicos, sólidos suspendidos e iones polivalentes como el hierro, calcio y bario.^{21, 22} También, esta tecnología puede remover metales (> 99% de $MgSO_4$) y radio nucleídos.²³ En la tabla 1 se puede evidenciar las características propias de operación de la Nanofiltración.

Tabla 1. Características del proceso de Nanofiltración

Criterio	Descripción
Estado de la tecnología	Tecnología robusta y madura para ablandamiento de aguas y remoción de metales en varios sectores del tratamiento de aguas. Ha sido empleado en el tratamiento de aguas residuales.
Calidad del agua de alimentación	Rango de aplicación del TDS es altamente dependiente de la composición de la corriente de alimentación. El rango oscila entre 500 y 25.000 mg/L. Es más útil para el tratamiento de agua con electrolitos divalentes (Mg, Ca, Ba, SO_4), metales multivalentes (Fe, Mn) y radio nucleídos. También aplicable para algunos componentes orgánicos.
Recuperación de agua	75% - 90%
Uso de energía	Requiere menos energía que los sistemas de ósmosis inversa

²⁰ PIERCE D Op. cit.

²¹ PIERCE D. Op. cit.

²² ELY J et al. Op. cit.

²³ COLORADO SCHOOL OF MINES. An Integrated Framework for Treatment and Management of Produced Water. RPSEA Proyecto 07122-12, Primera edición. Noviembre, 2009.

	para una corriente de alimentación similar. Aproximadamente 2 kWh/kgal (0.08 kWh/bbl) de energía es requerida.
Uso de químicos	Inhibidores de incrustaciones y soda caustica serian requeridos para prevenir incrustaciones y ensuciamiento. Las tasas de limpieza dependen de la calidad del agua de alimentación. La limpieza de estas membranas ocurre después de cierto tiempo y podrían requerirse el uso de NaOH, Na ₄ EDTA, HCl, Na ₂ S ₂ O ₄ y H ₂ O ₂ .
Vida útil	Dependiendo de las condiciones de operación, las membranas de NF requerirían un reemplazo dentro de 3 a 7 años.
Consideraciones de operación y mantenimiento	<ul style="list-style-type: none"> - Alta sensibilidad a constituyentes orgánicos e inorgánicos en el agua de alimentación. - Monitoreo y control del pH requerido en la corriente de alimentación. - Operan semi-continuamente con lavados químicos automatizados de corta duración. - Tipo de energía requerida: eléctrica. - Auto tolerancia al pH alto, pero no puede ser expuesto a temperaturas superiores a 113 °F (45 °C).
Costos de capital	El costo capital varia de US\$ 0,8 a US\$ 4/gpd (o US\$ 35 a US\$ 170/bpd) dependiendo de varios factores incluyendo el tamaño, los materiales de construcción y el sitio de localización. Los costos de operación están aproximadamente en US\$ 0,70/kgal (o US\$ 0,03/bbl).
Pretratamiento del agua de alimentación	Todas las tecnologías de membranas de alta presión requieren de un extensivo pretratamiento para mitigar los constituyentes nocivos del agua de alimentación
Post tratamiento del agua tratada	El agua tratada requeriría re-mineralización para restaurar valores de SAR.

Fuente: Modificada de COLORADO SCHOOL OF MINES. An Integrated Framework for Treatment and Management of Produced Water. RPSEA Proyecto 07122-12, Primera edición. Noviembre, 2009.

3.2.1.3 Ultrafiltración (UF)

Las membranas de Ultrafiltración se han utilizado industrialmente en aplicaciones de aguas residuales aceitosas desde principios de 1980, los cuales presentaron cierto grado de éxito generando un efluente apto para la descarga de alcantarillado en ese entonces.²⁴ La Ultrafiltración por membranas es un proceso de separación selectivo el cual trabaja con una presión de hasta 145 psi (10 bar o mayor). Esta se caracteriza por tener un tamaño de poro en el rango de 100 nanómetros a 1 nanómetro.²⁵ Este proceso puede reducir los sólidos suspendidos y los solutos con pesos moleculares por encima de 1000 Dalton (Figura 4). Esta no es capaz de remover orgánicos de bajo peso molecular ni sales. Este método puede ayudar en la remoción de bacterias y virus del afluente.²⁶

3.2.1.4 Ósmosis Inversa (RO)

El uso de la osmosis inversa (RO) para remover sales e impurezas del agua ha sido una tecnología reconocida para mejorar la calidad del agua. El diseño de los sistemas de osmosis inversa es dependiente de los sólidos disueltos, orgánicos y el contenido de sólidos suspendidos. El diseño del sistema de osmosis inversa debe tener en consideración la cantidad de TDS o la fuerza iónica y la calidad del producto de agua deseado. Esta tecnología se utilizar para producir volúmenes de agua de alta pureza, incluyendo la alimentación para calderas industriales, aguas farmacéuticas, suministro para la industria electrónica y otras industrias de procesos.²⁷ El desarrollo del sistema está ampliamente controlado por la composición del agua de alimentación. La calidad del agua de alimentación

²⁴ DORES R et al. Op. cit.

²⁵ PIERCE D. Op. Cit.

²⁶ PLATT F.M. Pre-Treatment options for frac flow brines: laboratory and pilot plant testing of oil removal materials. En Society of Petroleum Engineers, CSUG/SPE 147417, 2011.

²⁷ ZIBRIDA J. et al. Advances in reverse osmosis application in water reuse. NACE International. En CORROSION 2000, 26-31 Marzo, Orlando, Florida, 2000. Disponible en Society of Petroleum Engineers.

determinará la cantidad y el tipo del pre-tratamiento necesario para hacer de la osmosis inversa un proceso económico. El balance es el factor limitante primario de la mayoría de los sistemas de osmosis inversa actualmente.²⁸

La mayor causa de falla del sistema de Osmosis Inversa es el ensuciamiento de la membrana, el cual resulta de la acumulación de incrustantes en la superficie de las membranas. El ensuciamiento de una membrana RO es un fenómeno complejo que envuelve la depositación de diferentes tipos de incrustantes en la superficie de la membrana; entre las suciedades más comunes se pueden encontrar el ensuciamiento inorgánico (escamas, como por ejemplo carbonato de calcio, sulfato de calcio, sílice y otras especies que exceden el índice de saturación²⁹), el ensuciamiento coloidal (el cual se controla típicamente por filtración mecánica), la contaminación biológica y el ensuciamiento orgánico.³⁰

Los costos de operación se incrementan cuando surgen problemas de rendimiento. Estos costos se encuentran asociados con la limpieza de la membrana, reemplazo y el tiempo de inactividad del sistema. El éxito de un sistema de Ósmosis Inversa depende en gran medida de tres factores: el diseño del sistema, el pre-tratamiento (incluyendo acondicionamiento químico), y la operación y mantenimiento del sistema.

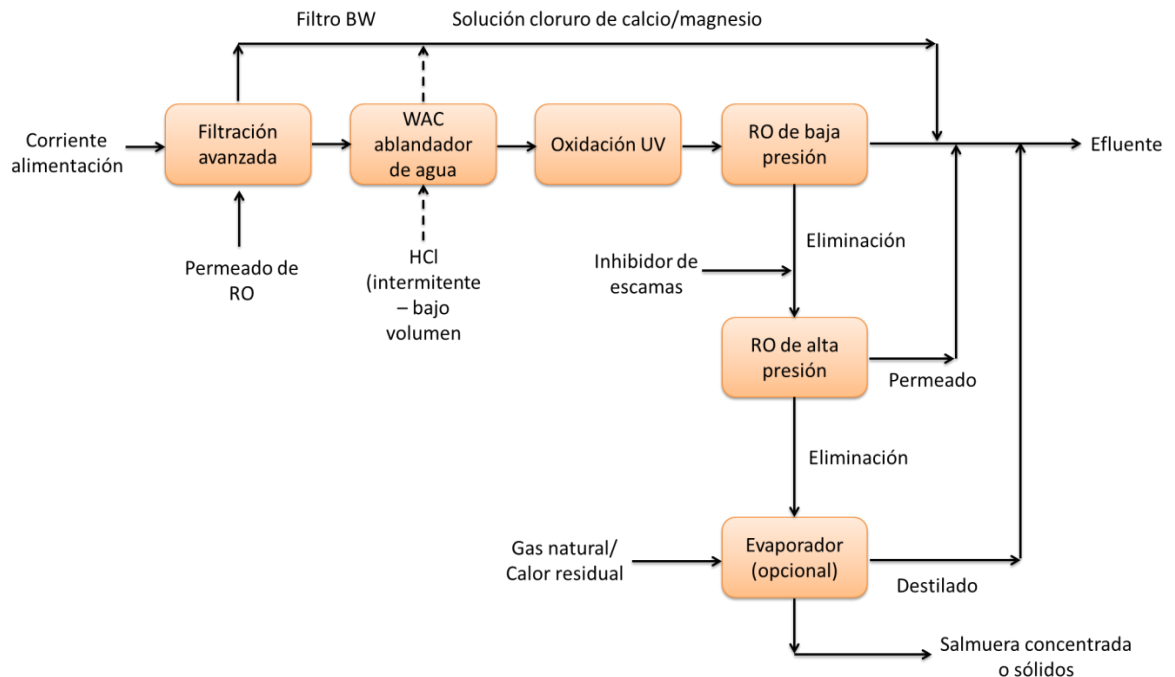
Las membranas de Ósmosis Inversa típicamente logran eliminar 95 a 99 por ciento de las sales disueltas. La concentración de TDS, sólidos suspendidos totales (TSS), y otros contaminantes del agua puede conducir al ensuciamiento y la disminución de la eficiencia de la operación del sistema de Ósmosis Inversa.

²⁸ ZIBRIDA J. et al. Op cit.

²⁹ VALERO M. Selección de tecnologías para el tratamiento de las aguas de producción de shale gas utilizando una técnica de decisión multicriterio. Bucaramanga, 2013. Tesis de maestría (Ingeniería Ambiental). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química.

³⁰ ZIBRIDA J. et al. Op cit.

Figura 5. Esquema general del tratamiento con Ósmosis Inversa



Fuente: Modificada de INDUSTRIAL WATERWORLD. High recovery osmosis for treatment of produced water. Disponible en: <http://www.waterworld.com/articles/iww/print/volume-11/issue-2/feature-editorial/high-recovery-reverse-osmosis-for-treatment-of-produced-water.html>

Puede ser aplicada a corrientes de alimentación con concentraciones de hasta 47.000 mg/L de sólidos totales disueltos (TDS) y a una tasa de aproximadamente 1.000 m³/día. Por lo general se emplean membranas densas y selectivas que son capaces de rechazar contaminantes tan pequeños de hasta 0,0001 µm.³¹ Este proceso puede ser eficaz en la eliminación de arena, limo, arcilla, algas, protozoos (5 a 15 µm), bacterias (0.4 a 30 µm), virus (0.004 a 6 µm), ácidos húmicos, productos químicos orgánicos e inorgánicos, sales acuosas e iones metálicos y no metálicos (Figura 4). Las membranas están diseñadas para lograr rechazos de

³¹ VALERO M. Op. cit.

NaCl en exceso hasta 99%.³² En la figura 5 se puede observar un esquema básico típico del sistema de Ósmosis Inversa. En la tabla 2 se resumen las características de esta tecnología de tratamiento identificando su rango de operación.

Tabla 2. Características propias del proceso de Ósmosis Inversa

Criterio	Descripción
Estado de la tecnología	Tecnología robusta y madura para desalinización de aguas residuales municipales. También ha sido probada en el tratamiento de aguas de producción de shale gas.
Tipo de remoción	Sales, metales, ácidos, azúcares, aminoácidos, materia orgánica, arena limo, arcilla, algas, protozoos, bacterias, virus, iones metálicos/no metálicos.
Ventaja	Remoción de partículas muy pequeñas (tamaño de poro < 0,0001 µm. Presiones de operación moderadas: 225 a 1.000 psi. Requiere menos energía que los procesos térmicos o que otras tecnologías de membranas.
Desventaja	Potencial de ensuciamiento de la membrana.
Calidad del agua de alimentación	Permite tratar aguas con concentración de TDS desde 500 a 47.000 mg/L y aguas que contienen electrolitos monovalentes (Na, Cl), divalentes (Mg, Ca, Ba, SO ₄) y multivalentes (Fe, Mn).
Calidad del agua producto	La calidad del permeado depende de la salinidad del agua de alimentación y las condiciones de operación. Por lo general, los sólidos totales disueltos en las aguas de producción se reducen entre 100 y 1.500 mg/L.
Recuperación de agua*	40% - 65%
Energía requerida.	Entre 0,5 y 3 kWh/gal (0,02 a 0,13 kWh/bbl) de energía para alimentar el sistema de bombas de alta presión.
Uso de químicos	Para la prevención de incrustaciones y ensuciamiento se requiere la adición de sustancias inhibidoras. Las tasas de limpieza dependen de la calidad del agua de alimentación. La limpieza se realiza cuando se superan ciertas especificaciones del diseño, para lo cual se requiere el uso de NaOH, Na ₄ EDTA, HCl, Na ₂ S ₂ O ₄

³² VALERO M. Op. cit.

	y H ₂ O ₂ .
Vida útil	Dependiendo de las condiciones de operación, las membranas pueden requerir un reemplazo de 3 a 7 años.
Condiciones de infraestructura	Mínimas en comparación con las tecnologías de desalinización térmica. Puede ser un sistema altamente automatizable y móvil.
Consideraciones de operación y mantenimiento	<ul style="list-style-type: none"> - Monitoreo y control de pH de alimentación, caudal, TDS, turbidez, así como para las presiones del recipiente. - Sistema automatizado con operación semi-continua, menos mano de obra. - Alta sensibilidad a los componentes orgánicos e inorgánicos en el agua de alimentación. - Auto tolerancia al pH alto, pero no puede ser expuesto a temperaturas superiores a 113 °F (45 °C). - Energía requerida: eléctrica.
Costos totales	Los costos de capital varían de US\$ 0,8 a US\$ 7 por 4L/día o de US\$ 35 a US\$ 295 por 160 L/día, dependiendo de varios factores, incluyendo el tamaño, materiales de construcción, la ubicación del sitio, la calidad y el volumen de agua, entre otros. Los costos de operación están entre US\$ 0,70/kgal (US\$ 0,03/bbl).
Pretratamiento del agua de alimentación	Todas las tecnologías de membrana de alta presión requieren tratamiento previo extenso para reducir los componentes dentro del agua que producen incrustaciones o ensuciamiento de la membrana. Estos pretratamientos incluyen filtración para remover partículas suspendidas y disueltas; intercambio iónico para remover dureza, ajuste de pH y temperatura para ajustar la solubilidad, carbón activado para eliminar cloruros. Se debe prestar especial atención a los compuestos orgánicos hidrofóbicos y sales poco solubles.
Post tratamiento del agua tratada	El agua tratada puede requerir la estabilización del pH o remineralización luego del tratamiento con ósmosis inversa.
Gestión adicional	Se generan moderadas cantidades de salmuera concentrada. Estos sistemas operan en tierra y la salmuera requiere disposición por lo general con inyección en pozos profundos.

Fuente: Modificada de: COLORADO SCHOOL OF MINES. An Integrated Framework for Treatment and Management of Produced Water. RPSEA Proyecto 07122-12, Primera edición. Noviembre, 2009.

*ALL CONSULTING. Shale gas produced water treatment catalog. Water treatment technology fact sheet: reverse osmosis. Disponible en:

<http://www.all-llc.com/publicdownloads/ReverseOsmosisFactSheet.pdf>

3.2.1.5 Ósmosis directa (FO)

El flujo de agua es impulsada a través de la membrana por una diferencia de presión osmótica entre la solución de alimentación y una solución de extracción concentrada en el lado del permeado que tiene una mayor presión osmótica que la alimentación (Figura 6). La alimentación diluye la solución de extracción y reduce el gradiente de presión osmótica que impulsa la separación.³³

Figura 6. Esquema general del tratamiento con Ósmosis directa



Fuente: Modificada. PIERCE D. Water recycling helps with sustainability. En Society of Petroleum Engineers, SPE 134137, 2010

³³ SHAFFER D. et al. Desalination and reuse of high-salinity shale gas produced water: drivers, technologies and future directions. En Environmental Science & Technology, 2013.

La Ósmosis directa tiene varias ventajas en comparación con otras tecnologías para la desalinización de aguas de alimentación de alta salinidad debido a que es impulsada por la presión osmótica en lugar de presión hidráulica. La FO puede desalinizar aguas de alimentación de alta salinidad utilizando equipos simples, de baja presión y de bajo costo. A diferencia de la Ósmosis Inversa, la FO no está limitada por el límite de funcionamiento de alta presión, la cual corresponde a una concentración de TDS de aproximadamente 70.000 mg/L.³⁴

En la tabla 3 se puede encontrar un resumen de las características y los parámetros de operación de la Ósmosis directa.

Tabla 3. Características propias del proceso de Ósmosis directa

Criterio	Descripción
Estado de la tecnología	Emergente.
Tipo de remoción	Sales.
Ventaja	Remoción de compuestos disueltos. No requiere presión hidráulica.
Desventaja	No ha sido utilizada a gran escala. Alto potencial de ensuciamiento de la membrana. Sensibilidad a la calidad fluctuante del agua.
Calidad del agua de alimentación	La concentración de sólidos totales disueltos aceptable es controlada por el diferencial de presión osmótica entre la solución de alimentación y la solución de arrastre. El rango de TDS está entre 500 mg/L hasta 35.000 mg/L. Este proceso tiene un rendimiento equivalente al del proceso dirigido con presión para electrolitos monovalentes y divalentes, metales y compuestos orgánicos.
Calidad del agua producto	Si se desea obtener agua pura es necesario un sistema secundario para extraer el agua pura de la solución de extracción y para reconcentrar la solución de extracción.
Energía requerida.	FO es un proceso osmótico que ocurre espontáneamente sin la

³⁴ SHAFFER D. et al. Op cit.

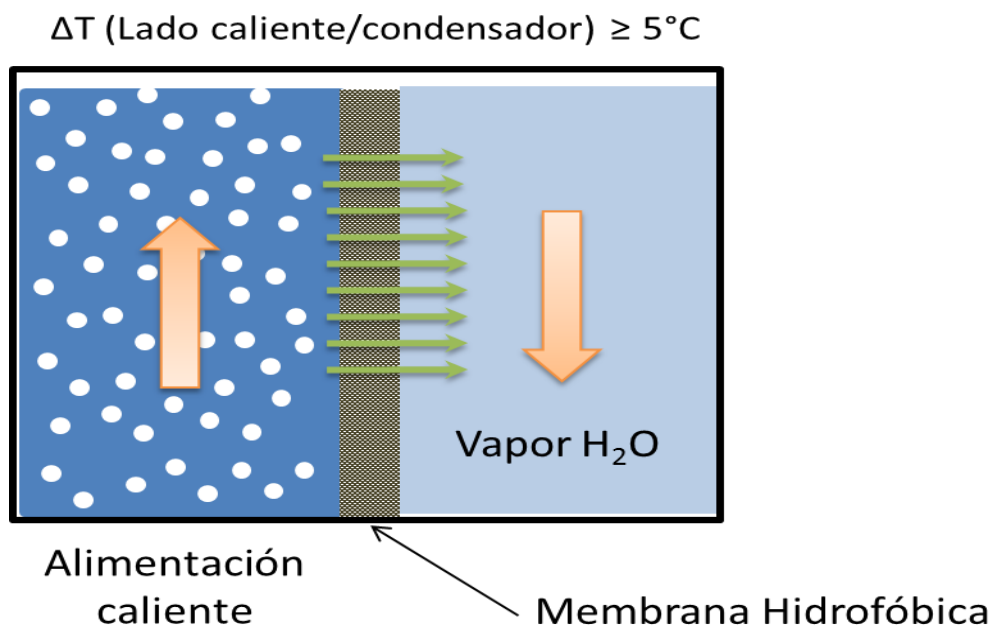
	necesidad de una entrada de energía. El proceso requiere solamente bastante poder para circular la solución de extracción y la solución de alimentación a través de la membrana.
Uso de químicos	Para la prevención de incrustaciones y ensuciamiento. Los periodos de limpieza dependen de la calidad del agua de alimento. Para esto se usa NaOH, Na ₄ EDTA o HCl.
Vida útil	Dependiendo de las condiciones de operación, las membranas pueden requerir un reemplazo de 3 a 7 años.
Condiciones de infraestructura	Se encuentran en etapa de intensa investigación y desarrollo para su optimización.
Consideraciones de operación y mantenimiento	<ul style="list-style-type: none"> - Monitoreo y control requerido para las tasa de flujo y la integridad de la membrana. - El sistema requiere muy poca supervisión, sin embargo se necesita la presencia de un técnico quien realice el mantenimiento rutinario del sistema. - Muy flexible a las fluctuaciones de pH. - Altamente resistentes a la irreversible disminución del caudal. - Los sistemas operan de forma semi-continua con periodos cortos de limpiezas físicas o químicas. - Tipo de energía requerida: eléctrica.
Pretratamiento del agua de alimentación	Un pre-filtro para quitar residuos grandes.
Post tratamiento del agua tratada	La solución de arrastre diluida requiere una separación adicional para producir agua pura y reconcentrar la solución de extracción para su reutilización.
Gestión adicional	Se genera pequeñas cantidades de concentrado salobre que requiere disposición adicional.

Fuente: Modificada de: COLORADO SCHOOL OF MINES. An Integrated Framework for Treatment and Management of Produced Water. RPSEA Proyecto 07122-12, Primera edición. Noviembre, 2009.

3.2.1.6 Destilación por membranas (MD)

Es una tecnología de separación térmica que utiliza una fuente de calor para facilitar el transporte de masa a través de una membrana micro porosa hidrofóbica. El vapor de agua se transporta desde la alimentación, que está a una temperatura elevada en relación con el lado del permeado, a través de una membrana micro porosa hidrofóbica y se condensa en un destilado frío al otro lado del sistema (Figura 7).

Figura 7. Esquema general del tratamiento de destilación por membranas



Fuente: Modificada. PIERCE D. Water Recycling Helps with Sustainability. En Society of Petroleum Engineers, SPE 134137, 2010

Los beneficios más sobresalientes de la destilación por membranas (MD) en comparación con la ósmosis inversa son:³⁵

- Calidad del agua destilada.
- La calidad del producto no es afectada por la salinidad.
- Utiliza un bajo grado de calor residual.
- Bajo costo de capital con el uso de plásticos baratos como material de construcción.
- Puede lograrse la expulsión de sal deseada en pasos simples, donde la ósmosis inversa requiere múltiples pasos.

En la tabla 4 se muestra un resumen de las características propias de la destilación por membranas y su rango de operación.

Tabla 4. Características propias del proceso de destilación por membranas

Criterio	Descripción
Estado de la tecnología	Emergente (aun en investigación).
Tipo de remoción	Sales.
Ventaja	No es necesario superar la presión osmótica que caracteriza las aguas de retorno.
Desventaja	No retiene compuestos como BTEX y otros orgánicos.
Calidad del agua de alimentación	Aplicable a todas las concentraciones de sólidos totales disueltos desde 500 mg/L hasta 50.000 mg/L. Remoción del 100% teórico de solutos no volátiles.
Calidad del agua producto	Sólidos totales disueltos entre 2 a 10 mg/L. Todos los solutos con mayor volatilidad pasaran al agua producto.
Energía requerida.	Proceso impulsado térmicamente y por lo tanto requiere un poco de energía de entrada. Sin embargo, el proceso solo requiere un gradiente de temperatura moderada para funcionar. Esto permite

³⁵ MINIER-MATAR H. et al. Treatment of produced water from unconventional resources by membrane distillation. En Society of Petroleum Engineers, SPE 17481, 2014.

	que el sistema funcione por la recolección de calor de desecho de otros procesos o de otros equipos como compresores, bombas, etc. que se encuentren in situ.
Uso de químicos	Para prevenir ensuciamiento y generación de lodos. Los periodos de limpieza dependen de la calidad del agua de alimentación. Para esto se usa NaOH, Na ₄ EDTA o HCl.
Vida útil	Dependiendo de las condiciones de operación, las membranas pueden requerir un reemplazo de 3 a 7 años.
Condiciones de infraestructura	Los procesos MD aún se encuentran en etapa intensa de investigación y desarrollo para su optimización, por esta razón, requieren de más espacio que los procesos de Ósmosis inversa y Nanofiltración, lo cual reduce su movilidad en comparación con los procesos impulsados por presión.
Consideraciones de operación y mantenimiento	<ul style="list-style-type: none"> - Monitoreo y control de la temperatura del fluido, caudal y la integridad de la membrana. - Sistema automatizado con operación semi-continua, menos mano de obra. - Alta sensibilidad a los agentes tensoactivos, los compuestos orgánicos hidrofóbicos pueden ser difíciles de eliminar de la membrana. - Resistentes al pH y a los agentes oxidantes. - Operan de forma semi-continua con enjuagues químicos cortos para limpieza. - Energía requerida: eléctrica (si no hay ninguna fuente de calor residual disponible).
Costos totales	Los costos de capital estimados para 24.000 bpd son de US\$ 3,34/gpd (o US\$ 0,15/bpd) y el costo de operación estimado de US\$ 1,40/kgal (o US\$ 0,06/bbl).
Pretratamiento del agua de alimentación	La eliminación de cualquier compuesto que pueda humedecer la membrana hidrofóbica.
Post tratamiento del agua tratada	Re-mineralización y estabilización de pH.
Gestión adicional	Las altas tasas teóricas de recuperación de aguas cercanas al 100% generan pequeñas cantidades de salmuera concentrada que debe disponerse.

Fuente: Modificada de COLORADO SCHOOL OF MINES. An Integrated Framework for Treatment and Management of Produced Water. RPSEA Proyecto 07122-12, Primera edición. Noviembre, 2009.

3.2.1.7 Bio-reactor de membranas (MBR)

Una definición simple para el bio-reactor de membrana fue dada S. Jude el cual afirma que es un proceso de tratamiento de aguas que integra la filtración por membranas con un proceso biológico.³⁶ El proceso de bio-reactor de membrana consta de un reactor biológico integrado con un sistema de membrana de ultrafiltración (UF) que reemplaza el clarificador de una planta convencional de lodos activados por una última barrera para el control de la biomasa. En esta configuración, la separación de sólidos se logra mediante la filtración, en lugar de sedimentación por gravedad, lo que significa que la calidad del efluente es independiente de las características de sedimentación de los lodos.³⁷ El proceso MBR también elimina la necesidad de un clarificador secundario y puede operar a elevadas concentraciones de sólidos suspendidos del líquido mezclado, reduciendo así la complejidad general proceso de tratamiento.³⁸

El bio-reactor de membrana ofrece las siguientes ventajas sobre otros clarificadores convencionales:³⁹

- La membrana provee una barrera inconsistente y produce un efluente de alta calidad.
- La membrana retiene aceites emulsionados.

³⁶ JUDE S. The MBR Book. Principles and applications of membrane bioreactors in water and wastewater treatment. Primera edición, 2006.

³⁷ PEETERS J.G. et al. Membrane technology treating oily wastewater for reuse. En CORROSION 2005, Paper No. 05534, 2005. Disponible en Society of Petroleum Engineers.

³⁸ PEETERS J.G. et al. Op cit.

³⁹ JANSON A. et al. Assessing the Biotreatability of Produced Water from a Qatari Gas Field. En Society of Petroleum Engineers, SPE 17318, 2014.

- No vulnerables para procesar los trastornos que afectan la capacidad de sedimentación de la biomasa.
- El equipo deja una huella muy pequeña.
- Muy poco lodo es generado.⁴⁰

Los bio-reactores de membrana son ahora considerados una tecnología madura y diversas plantas de este tipo ahora están tratando volúmenes más grandes que 100 millones de litros de agua por día (MLD)⁴¹

3.2.1.8 Electrodialisis (ED) / Electrodialisis inversa (EDR)

Son procesos electroquímicos en los cuales los iones disueltos se separan del agua a través de membranas permeables bajo la influencia de un gradiente de potencial eléctrico. Las membranas de intercambio iónico, fabricadas a partir de polímeros de intercambio iónico, tienen la capacidad de transportar selectivamente los iones con una carga positiva o negativa y rechazar los iones de carga opuesta. Una pila de electrodialisis se compone de una serie de membranas de intercambio aniónico (AEM) y membranas de intercambio catiónico (CEM) dispuestos en un modo alternante entre el ánodo y el cátodo (figura 18). Los cationes cargados positivamente migran hacia el cátodo, pasan por la membrana de intercambio catiónico, y rechazan la membrana de intercambio aniónico. El proceso de EDR es similar al proceso de ED, excepto que también utiliza inversión periódica de la polaridad para reducir eficazmente el ensuciamiento y las incrustaciones en la membrana, permitiendo así que el sistema opere a recuperaciones relativamente más altas.

⁴⁰ DORES R et al. Op cit.

⁴¹ JUDE S. Op cit.

La eficiencia de la transferencia de iones se determina por la densidad de corriente y el tiempo de residencia de las soluciones dentro de las células de la membrana. La selectividad de la membrana disminuye con el aumento de las concentraciones de iones. EDR y ED se utilizan típicamente en la desalinización de agua salobre (hasta alrededor de 8.000 mg/L TDS para EDR) pero no en agua de mar. Esto es debido a que el costo de estos procedimientos aumenta sustancialmente con el aumento de la salinidad o la concentración de TDS.⁴²

Una desventaja de estos procesos es su limitada remoción de compuestos sin carga, incluyendo moléculas orgánicas, sílica, boro y microorganismos. Además requieren limpieza regularmente con ácido diluido y soluciones alcalinas para restaurar el rendimiento y evitar ensuciamiento de las membranas. Este proceso resulta ser muy costoso para el tratamiento de las aguas de producción con alto contenido de TDS.⁴³

Se han realizado algunos experimentos con salmueras sintéticas en los Estados Unidos para determinar la efectividad de esta tecnología para tratar el flowback.⁴⁴ Se demostró que el proceso ED es efectivo y rentable energéticamente para tratar aguas con bajo contenido de TDS (4.000 a 5.000 mg/L). La energía necesaria para tratar aguas con alto TDS fue aproximadamente 23 veces mayor que la requerida para tratar el agua con bajo TDS. La Electrodialisis es más costosa que la Ósmosis inversa, sin embargo, es más resistente al ensuciamiento de las membranas, lo cual podría reducir costos. A continuación se presenta una tabla resumen de las características de la electrodialisis. A pesar de tener un gran conocimiento de esta tecnología, actualmente no se está utilizando para el tratamiento de flowback en la industria del shale gas de los Estados Unidos.

⁴² VALERO M. Op. cit.

⁴³ VALERO M. Op. cit.

⁴⁴ IGUNNU E., CHEN G. Produced water treatment Technologies. International Journal of Low-Carbon Technologies. 2012. Disponible en: <http://paperity.org/p/37758514/produced-water-treatment-technologies>

Tabla 5. Características propias del proceso de electrodiálisis

Criterio	Descripción
Estado de la tecnología	Tecnología robusta y madura para la desalinización de aguas salobres. Ha sido probada a escala laboratorio para el tratamiento de las aguas de producción.
Tipo de remoción	Sales, orgánicos solubles.
Ventaja	*Más costosa que la osmosis inversa pero las membranas son más resistentes al ensuciamiento. El proceso puede tratar alrededor de 8.000 barriles por día de agua.
Desventaja	<ul style="list-style-type: none"> - No ha sido usada a gran escala. - Sensibilidad fluctuante a la calidad del agua. - Limitada remoción de compuestos sin carga, incluyendo moléculas orgánicas, sílica, boro y microorganismos. - Requieren limpieza regular con ácido diluido y soluciones alcalinas para restaurar el rendimiento y evitar ensuciamiento de las membranas. - Puede ser una tecnología costosa si se va a tratar flowback con alto TDS.
Calidad del agua de alimentación	*Puede tratar aguas de retorno con concentraciones de TDS entre 4.000 mg/L y 15.000 mg/L.
Calidad del agua producto	Depende del número de etapas del proceso ED; puede alcanzar la remoción de contaminantes de hasta 90%.
Energía requerida.	**El consumo de energía está en el intervalo de 0,14 a 0,20 kWh/lb equivalente a NaCl eliminado.
Uso de químicos	Para prevenir ensuciamiento e incrustaciones, es necesario el uso de sustancias inhibidoras. Se requiere limpieza periódica usando ácidos, EDTA, cáusticos y desinfectantes.
Vida útil	Entre 4 y 5 años.
Condiciones de infraestructura	Mínimas. Los sistemas son compactos.
Consideraciones de operación y mantenimiento	<ul style="list-style-type: none"> - Monitoreo y control de la corriente, voltaje, TDS, pH, velocidad de flujo, integridad de la membrana. - Se requiere mano de obra calificada ya que las operaciones ED y EDR son más complicadas que las operaciones de

	<p>ósmosis inversa.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Bastante flexible a las fluctuaciones en la calidad de agua de alimento. - Requiere limpieza química periódica y mantenimiento. - Energía requerida: eléctrica.
Costos totales	El costo total depende del sitio y del contenido de sólidos disueltos en el agua de alimentación.
Pretratamiento del agua de alimentación	Se requiere la eliminación de partículas y otras sustancias para evitar incrustaciones y ensuciamiento en los medios de filtración, ajuste de pH y adición de anti incrustantes.
Post tratamiento del agua tratada	Re-mineralización para ajustar el índice SAR y desinfección.
Gestión adicional	Generación de concentrados que necesitan disposición adicional.

Fuente: Modificada de: COLORADO SCHOOL OF MINES. An Integrated Framework for Treatment and Management of Produced Water. RPSEA Proyecto 07122-12, Primera edición. Noviembre, 2009.

VALERO M. Selección de tecnologías para el tratamiento de las aguas de producción de shale gas utilizando una técnica de decisión multicriterio. Bucaramanga, 2013. Tesis de maestría (Ingeniería Ambiental). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química.

*ALL CONSULTING. Shale gas produced water treatment catalog. Water treatment technology fact sheet: electro dialysis. Disponible en: <http://www.all-llc.com/publicdownloads/ED-EDRFactSheet.pdf>

**NETL. Produced water management and beneficial use/115549 Colorado School of Mines. FWP 49243/CSM-15549. Disponible en:

<http://www.netl.doe.gov/kmd/cds/disk23/D-Water%20Management%20Projects/Produced%20Water%5CFEW%2049243.pdf>

3.2.2 Tecnología para tratamientos térmicos

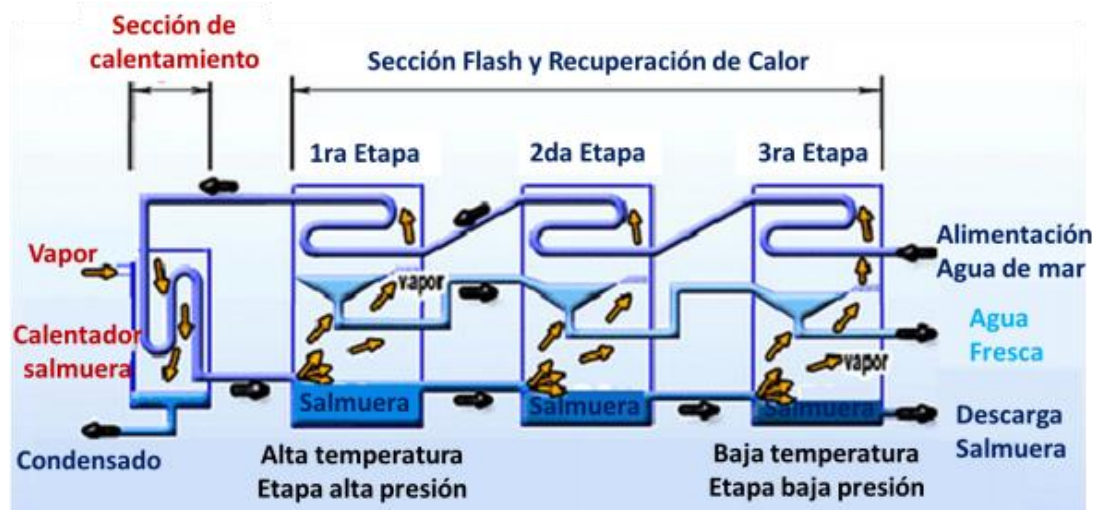
En estos tipos de tecnologías, la energía es usada para calentar el flowback proveniente de los pozos, el cual posteriormente se evaporara y luego condensará para poder obtener agua pura. Todas las tecnologías que se presentarán en esta

sección se derivan del principio de conservación de la energía, como es el caso de la evaporación, la destilación y la cristalización.⁴⁵

3.2.2.1 Destilación Flash Multi Etapa (MSF)

El flowback proveniente de los pozos a alta temperatura fluye hacia una etapa donde existe una presión menor y de esta forma se convierte en vapor. Para lograr una alta eficiencia en el proceso, el flowback de alimentación debe ser precalentado, lo cual se obtiene de la captura del calor de condensación en cada etapa (Figura 8).

Figura 8. Esquema general Destilación Flash Multi etapa



Fuente: Modificada de. <http://blogdelagua.com>

Esta tecnología funciona para concentraciones de TDS alrededor de 40.000 mg/L y el agua que se obtiene por lo general posee una concentración total de sólidos totales disueltos entre 2 y 10 mg/L.

⁴⁵ ELY J et al. Op. cit.

Uno de los problemas operacionales más relevantes en esta tecnología es la formación de incrustaciones en las superficies de los sistemas de transferencia de calor, lo cual hace que el rendimiento del proceso se vea afectado. Por tal motivo es común el uso de fosfonatos, ácidos poli carboxílicos y polimaleicos en conjunto con sistemas de limpieza mecánica para controlar este problema. En la tabla 5 se resumen las características propias de este tipo de tecnología.

Tabla 6. Características propias del proceso de destilación Flash Multi etapa

Criterio	Descripción
Estado de la tecnología	Tecnología robusta y madura para la desalinización de aguas salobres y marinas. Puede ser utilizada en el tratamiento de flowback.
Calidad del agua de alimentación	Por lo general funciona para altas concentraciones de sólidos totales disueltos del orden de 40.000 mg/L.
Calidad del agua producto	Concentración de TDS entre 2 y 10 mg/L.
Energía requerida.	Energía eléctrica varía entre 11 a 21 kWh/kgal (0,45 a 0,9 kWh/bbl). Energía térmica se estima en 0,8 millones de BTU/kgal (aproximadamente 80 kWh/kgal 0 3,35 kWh/bbl). En consecuencia, las necesidades totales de energía estarían entre 70 y 112 kWh/kgal (3,35 a 4,70 kWh/bbl).
Uso de químicos	Inhibidores de incrustaciones y ácidos. El control de la corrosión se realiza por pH. Se requiere una limpieza anual del sistema utilizando ácidos. EDTA u otros químicos similares.
Vida útil	Alrededor de 20 años. Sin embargo, la mayoría de las plantas han operado desde 1970 y 1980 y aún siguen operando.
Condiciones de infraestructura	Se encuentran relacionadas con el tamaño. La tecnología se basa en la disponibilidad de vapor de baja presión ya sea por la generación o cogeneración con plantas de energía adyacentes. Las plantas de MSF tienen poca movilidad.
Consideraciones de operación y mantenimiento	<ul style="list-style-type: none"> - Supervisión y control del pH de alimentación, los caudales y las presiones de vapor y el recipiente. - Alto nivel de mano de obra calificada, sin embargo en menor

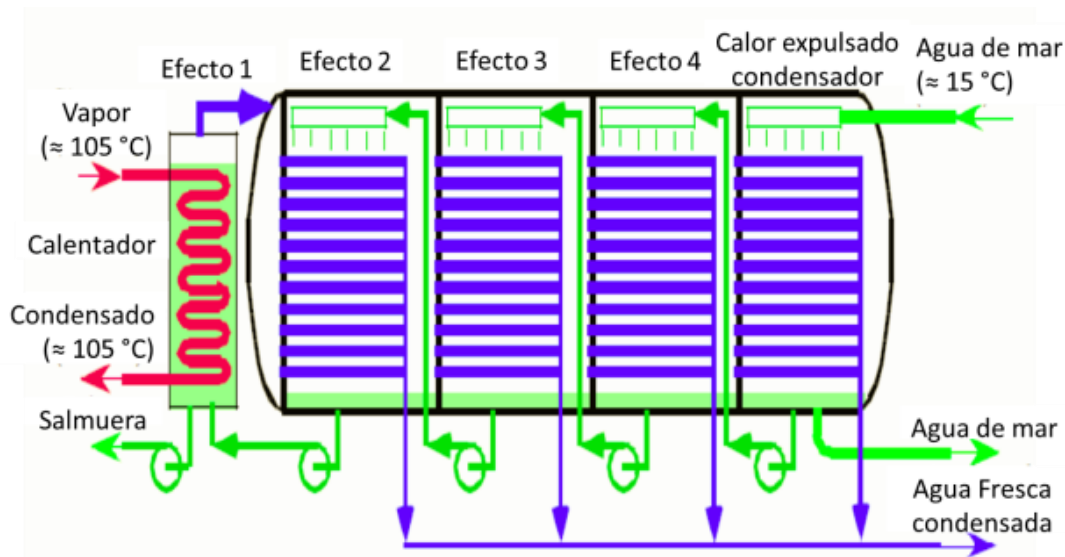
	<p>cantidad respecto a la requerida en los sistemas de membranas.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Fácil de adaptar a la calidad del agua muy variable; no es flexible para variar el caudal de agua. - Alta capacidad para resistir condiciones extremas. - Este sistema opera de forma continua, solo se detiene para el mantenimiento el cual es una vez por año (6 a 8 semanas). - Tipo de energía requerida: Térmica y eléctrica.
Costos totales	<p>Los costos de capital varían de US\$ 6 a US\$ 8,6/gpd (US\$ 250 a 360 por bpd) dependiendo de varios factores incluyendo el tamaño, los materiales de construcción y la ubicación del sitio.</p> <p>No son sistemas modulares.</p> <p>Los costos de operación son de aproximadamente US\$ 3/kgal (o US\$ 0,12/bbl) y los costos totales por unidad son US\$ 4,4/kgal (US\$ 0,19/bbl).</p> <p>Se pueden lograr reducciones significativas en los costos de energía si se utilizan sistemas de cogeneración en donde se tenga disponibilidad de vapor de baja presión.</p>
Pretratamiento del agua de alimentación	<p>Una de las ventajas del sistema MSF en comparación con las tecnologías de membrana es que la operación general requiere pretratamiento menos riguroso pero incluye la filtración para remover grandes sólidos en suspensión. Considerando que las elevadas temperaturas del proceso automáticamente esterilizan el agua, no es necesario el uso de biocidas.</p>
Post tratamiento del agua tratada	<p>Estabilización debido a la baja concentración de TDS.</p>
Gestión adicional	<p>Se generan grandes cantidades de sólidos.</p>

Fuente: Modificada de COLORADO SCHOOL OF MINES. An Integrated Framework for Treatment and Management of Produced Water. RPSEA Proyecto 07122-12, Primera edición. Noviembre, 2009.

3.2.2.2 Destilación Multi efecto (MED)

El principio básico de una destilación Multi-efecto es aplicar suficiente energía para llevar al agua de alimentación a la temperatura de ebullición y luego entregar la energía adicional necesaria para que el calor de vaporización transforme una porción del agua salina a vapor. El paso final es la condensación del vapor en agua pura. La operación en una sola etapa requiere mucha energía, por lo cual se usan múltiples etapas para mejorar la eficiencia del proceso, operando a presiones reducidas para promover ebullición a temperaturas más bajas y lograr así múltiples ciclos de ebullición y evaporización, sin la adición de más calor. Por lo general se utilizan entre 8 y 16 ciclos para reducir al mínimo el consumo de energía.⁴⁶

Figura 9. Esquema general Destilación Flash Multi efecto



Fuente: Modificada de COLORADO SCHOOL OF MINES. An Integrated Framework for Treatment and Management of Produced Water. RPSEA Proyecto 07122-12, Primera edición. Noviembre, 2009.

⁴⁶ COLORADO SCHOOL OF MINES. Op. cit.

La figura 9 muestra un esquema de la destilación Multi-efecto. El agua de alimentación se distribuye en el exterior de los tubos del evaporador en una película delgada para promover la ebullición y la evaporación rápida. El vapor se condensa sobre la superficie más fría en el interior. El vapor producido en cada ciclo es usado para calentar el agua de alimentación que entra al ciclo.⁴⁷ En la siguiente tabla se resumen las características de esta tecnología.

A pesar que la MED es una tecnología más antigua que la MSF, esta no ha sido implementada para el tratamiento de flowback debido a los problemas de incrustaciones generados principalmente por diseños antiguos.

Tabla 7. Características propias del proceso de destilación Multi efecto

Criterio	Descripción
Estado de la tecnología	Tecnología robusta y madura para la desalinización de aguas salobres y marinas. Puede ser utilizada en el tratamiento de flowback.
Calidad del agua de alimentación	Aplicable a varios rangos de concentración de sólidos totales disueltos.
Calidad del agua producto	Por lo general muy bueno, con pequeñas variaciones por el tipo de agua de alimento y el contenido de sales.
Energía requerida.	El consumo de energía es significativamente menor que para una planta de flash multi etapa. El consumo de energía es de 31 a 45 kWh/kgal (1,302 a 1,890 kWh/bbl).
Uso de químicos	Inhibidores de incrustaciones y ácidos. El control de la corrosión se realiza por pH. Se requiere una limpieza anual del sistema utilizando ácidos. EDTA u otros químicos similares.
Vida útil	Alrededor de 20 años.
Condiciones de infraestructura	Similares a los requerimientos de los sistemas flash multi etapa.
Consideraciones de	- Supervisión y control del pH de alimentación, los caudales y las

⁴⁷ COLORADO SCHOOL OF MINES. Op. cit.

operación y mantenimiento	<p>presiones de vapor y el recipiente.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Alto nivel de mano de obra calificada, sin embargo en menor cantidad respecto a la requerida en los sistemas de membranas. - Fácil de adaptar a la calidad del agua muy variable; no es flexible para variar el caudal de agua. - Alta capacidad para resistir condiciones extremas. - Este sistema opera de forma continua, solo se detiene para el mantenimiento el cual es una vez por año. - Tipo de energía requerida: Térmica y eléctrica.
Costos totales	<p>Los costos de capital varían de US\$ 6 a US\$ 8,6/gpd (US\$ 250 a 360 por bpd) dependiendo de varios factores incluyendo el tamaño, los materiales de construcción y la ubicación del sitio.</p> <p>No son sistemas modulares.</p> <p>Los costos de operación son de aproximadamente US\$ 2,6/kgal (o US\$ 0,11/bbl) y los costos totales por unidad son US\$ 3,8/kgal (US\$ 0,16/bbl).</p>
Pretratamiento del agua de alimentación	<p>Requieren pretratamiento menos riguroso que las tecnologías de membranas.</p>
Post tratamiento del agua tratada	<p>Estabilización debido al bajo nivel de sólidos disueltos.</p>
Gestión adicional	<p>Debido a las bajas tasas de recuperación de 20 a 35%, se generan grandes cantidades de residuos (65 a 80%).</p>

Fuente: Modificada de COLORADO SCHOOL OF MINES. An Integrated Framework for Treatment and Management of Produced Water. RPSEA Proyecto 07122-12, Primera edición. Noviembre, 2009.

3.2.2.3 Dewvaporation (DV)

Proceso que implica desalinización por humidificación – deshumidificación con lo cual se reducen los costos de energía mediante el uso de tecnología a contracorriente para el intercambio de calor. El agua de alimentación es evaporada utilizando aire caliente, que se condensa como agua fresca en el lado

opuesto de una pared de transferencia de calor. La energía necesaria para la evaporación es suministrada parcialmente por la energía liberada durante la condensación.⁴⁸ El sistema está diseñado en torres de láminas delgadas de plástico para evitar la corrosión y reducir al mínimo los costos del equipo. Las torres son relativamente baratas debido a que operan a presión atmosférica.⁴⁹

Altela Inc. ha diseñado, fabricado y probado varios prototipos del sistema basados en el proceso Dewvaporation y se conoce de tres plantas a gran escala, denominadas (ARS-4000) que se han empleado en los pozos de gas natural en la cuenca de San Juan, cerca de Farmington en EE.UU. El sistema ARS-4000 puede procesar aproximadamente 4.000 galones por día (100 bbl/día) de agua de producción con concentraciones de sal superiores a 60.000 mg/L de TDS.⁵⁰

Estos sistemas pueden reducir el volumen de residuos a ser eliminados hasta en un 90%, debido a que la corriente de agua tratada es agua destilada de muy alta calidad.⁵¹ Según reporta el fabricante, la concentración de TDS del flowback puede reducirse de 41.700 mg/L a 106 mg/L, la concentración de cloruros de 25.300 mg/L a 59 mg/L. Del mismo modo, la concentración de benceno hasta 150 µg/L a no detectable luego del tratamiento con este sistema.⁵² A continuación se presenta una tabla resumen con las características propias de la tecnología.

Tabla 8. Características propias del proceso Dewvaporation

Criterio	Descripción
Estado de la tecnología	En desarrollo. Se ha empleado a gran escala para el tratamiento de aguas de producción.

⁴⁸ VALERO M. Op. cit.

⁴⁹ IGUNNU E., CHEN G. Op. cit.

⁵⁰ IGUNNU E., CHEN G. Op. cit.

⁵¹ COLORADO SCHOOL OF MINES. Op. cit.

⁵² ALTELA INC. AltelaRainSM Produced Water Treatment Technology, Making Water from Waste. International Petroleum Environmental Conference. Houston, Texas. Noviembre, 2006.

Calidad del agua de alimentación	Aplicable a corrientes con concentración de TDS entre 40.000 y 60.000 mg/L.
Calidad del agua producto	Muy alta. TDS entre 20 y 100 mg/L. El proceso también tiene alto nivel de eliminación de metales pesados, orgánicos y radio nucleídos.
Recobro de agua	Aproximadamente 90%.
Energía requerida.	Altela Inc. Sostiene que las necesidades de electricidad son bajas debido a que el sistema funciona a presión atmosférica y baja temperatura. Los costos de energía del sistema son aproximadamente solo del 30% en comparación con los procesos convencionales de evaporación - destilación.
Uso de químicos	Ninguno.
Condiciones de infraestructura	Disponibilidad de electricidad a 110 V y de energía térmica.
Consideraciones de operación y mantenimiento	<ul style="list-style-type: none"> - Bajo nivel de supervisión y control. - Bajo nivel de obra calificada requerida. - Alto nivel de flexibilidad: fácil de adaptar a la calidad del agua y la cantidad de esta. - Alto nivel de robustez. - Alto nivel de factibilidad. - Tipos de energía requerida: electricidad y térmica.
Costos totales	Acuerdo con el proveedor, los costos de construcción, instalación, mantenimiento y servicio son menores a los costos asociados al transporte e inyección convencional.
Pretratamiento del agua de alimentación	No requieren ningún pretratamiento previo. Se requiere el uso de filtros de > 300 micras para retener sólidos del agua de producción y así proteger las bombas y las válvulas en las líneas de entrada.
Post tratamiento del agua tratada	Re-mineralización.
Gestión adicional	Aproximadamente 10% de corriente salobre que deber ser transportada fuera del campo y ser inyectada a un pozo para disposición o evaporación o almacenamiento en estanques.

Fuente: Modificada de COLORADO SCHOOL OF MINES. An Integrated Framework for Treatment and Management of Produced Water. RPSEA Proyecto 07122-12, Primera edición. Noviembre, 2009.

3.2.2.4 Destilación por compresión de vapor

Este sistema utiliza vapor a alta temperatura con el fin de generar una fuente de calor para la evaporación. Hay dos tipos de sistemas: mecánico (MVC Distillation) y térmico. El sistema mecánico es por lo general accionado con electricidad o con diésel dependiendo del tipo de motor;⁵³ por su parte, el sistema térmico usa un eyector de vapor a altas presiones para comprimir el vapor.⁵⁴

En este sistema, el vapor de agua se extrae de la cámara de evaporación utilizando un compresor y luego se condensa en el exterior de los tubos en las mismas cámaras (Figura 10). El calor de condensación se utiliza para evaporar una película de agua salina aplicada al interior de los tubos dentro de las cámaras de evaporación. El sistema opera a temperaturas inferiores a 70°C lo que disminuye el potencial de formación de incrustaciones y la corrosión.⁵⁵

Las unidades de destilación por compresión mecánica para el tratamiento de desalinización de corrientes de agua de mar (concentración TDS de aproximadamente 38.000 mg/L) son capaces de producir 500 m³/día (3.000 bbl/día) de agua destilada a un consumo de energía de 10,4 a 11,2 kWh/m³ de destilado y pueden recuperar hasta un 40% del volumen inicial. El rendimiento del proceso (es decir, la masa del destilado por unidad de energía a la entrada) aumenta con la capacidad⁵⁶ y el rendimiento del proceso aparentemente

⁵³ COLORADO SCHOOL OF MINES. Op. cit.

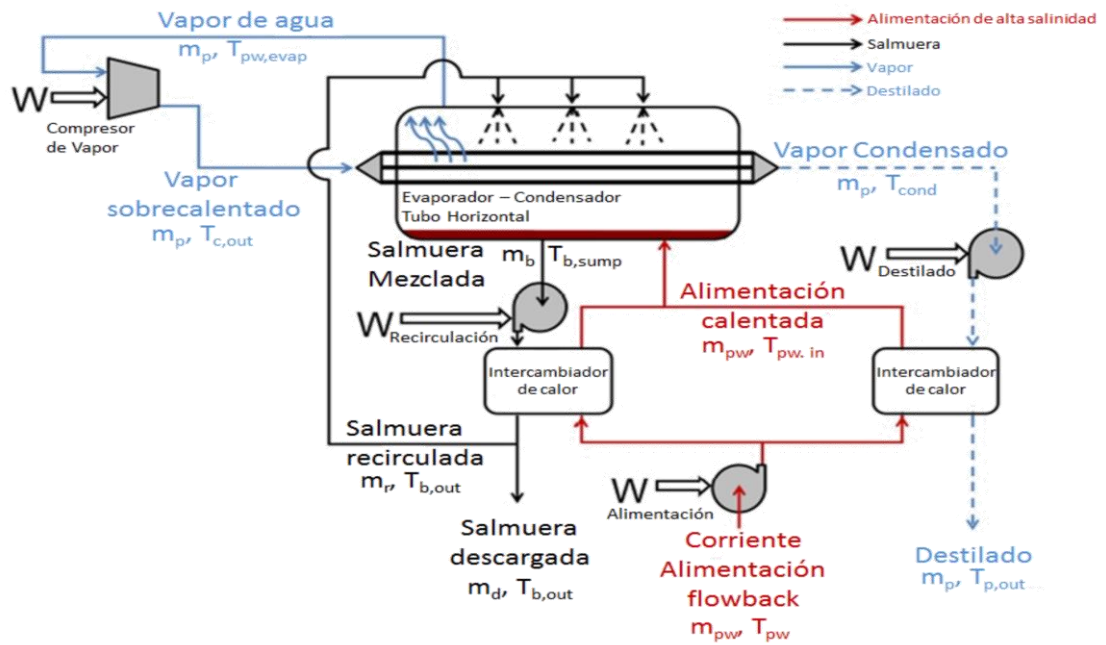
⁵⁴ PIERCE D. Op. cit.

⁵⁵ VALERO M. Op. cit.

⁵⁶ BAHAR R. et al. Performance evaluation of a mechanical vapor compression desalination system. En ScienceDirect. Desalination, Volumen 166. Agosto, 2014. 123-127p.

disminuye ligeramente con la salinidad de alimentación.⁵⁷ En la siguiente tabla se resumen las características propias de esta tecnología para tratamiento de flowback.

Figura 10. Diagrama esquemático de la destilación por compresión de vapor mecánica



Fuente: Modificada de SHAFFER D. et al. Desalination and Reuse of High-Salinity Shale Gas Produced Water: Drivers, Technologies and Future Directions. En Environmental Science & Technology, 2013.

Tabla 9. Características propias de la destilación por compresión de vapor

Criterio	Descripción
Estado de la tecnología	Tecnología robusta y madura. Varias tecnologías mejoradas han sido empleadas para el tratamiento de las aguas de producción.

⁵⁷DARWISH M.A. Thermal analysis of vapor compression desalination system. En ScienceDirect. Desalination, Volumen 69. 1998. 275-295p.

Calidad del agua de alimentación	TDS > 40.000 mg/L
Calidad del agua producto	Muy buena. Para cero descarga de líquido (ZLD) estos sistemas funcionan como cristalizadores y logran altas recuperaciones.
Recobro de agua	Aproximadamente 40% para desalinización.
Energía requerida.	Para desalinización, el consumo aproximado de una planta grande es de 30 kWh/kgal (1,3 kWh/bbl) de agua producto. Para el sistema mecánico el consumo de electricidad es de 26,5 kWh/kgal (1,1 kWh/bbl). Para alcanzar ZLD, la demanda de energía para la evaporación y la cristalización es de aproximadamente 100 a 250 kWh/kgal (4,2 a 10,5 kWh/bbl).
Uso de químicos	Inhibidores de incrustaciones y ácidos. El control de la corrosión se realiza por pH. Se requiere una limpieza anual del sistema utilizando ácidos, EDTA u otros químicos similares.
Condiciones de infraestructura	Similares a los requerimientos de las unidades MSF y MED.
Consideraciones de operación y mantenimiento	<ul style="list-style-type: none"> - Se requiere supervisión y control del pH del agua de alimentación, los caudales y las presiones de vapor y el recipiente. - Alto nivel de mano de obra calificada requerida. En especial los sistemas mecánicos son más complejos. - Nivel de flexibilidad: fácil de adaptar a la calidad del agua variable; no es flexible para variaciones del caudal de agua. - Alta capacidad del equipo para soportar condiciones extremas. - El sistema opera de forma continua con parada solo para mantenimiento planeado una vez por año. - Tipos de energía requerida: térmica o eléctrica dependiendo del tipo de sistema.
Costos totales	El costo capital depende de varios factores como el tamaño, los materiales de construcción y localización. Los costos de operación depende del propósito del sistema; el costo para lograr ZLD son mayores a los de la desalinización debido a la energía requerida. Se pueden obtener reducciones significativas en el costo de la energía por cogeneración en donde se tenga un sistema de vapor a baja presión.

	El costo capital para desalinizar con el sistema mecánico es de alrededor de US\$ 3,3 a US\$ 6/gpd (US\$ 140 a US\$ 250 /bpd). El costo total está en US\$ 1,9/kgal (US\$ 0,08/bbl).
Pretratamiento del agua de alimentación	Menos riguroso que para los tratamientos con membranas.
Post tratamiento del agua tratada	Estabilización por bajo nivel de sólidos disueltos.
Gestión adicional	Para ZLD, se generan sólidos que deben ser dispuestos.

Fuente: Modificada de COLORADO SCHOOL OF MINES. An Integrated Framework for Treatment and Management of Produced Water. RPSEA Proyecto 07122-12, Primera edición. Noviembre, 2009.

3.2.2.5 Freeze Thaw Evaporation (FTE)

La tecnología FTE es un proceso de tratamiento de agua que combina la congelación, la descongelación y la tecnología de evaporación convencional.^{58, 59}

Naturalmente, las sales y otros constituyentes disueltos en el flowback se les reducen su punto de congelación por debajo de 32 °F.⁶⁰ Cuando se enfría el agua producida por debajo de 32 °F pero no por debajo de su punto de congelación, se forman cristales de hielo relativamente puros y una solución no congelada. La solución no congelada contiene alta concentración de constituyentes disueltos en el agua producida y se drena desde el hielo. El hielo puede ser recogido y se funde para obtener agua limpia. Alrededor del 50% del agua se puede recuperar de este proceso durante el invierno, pero en otras estaciones, no se recupera

⁵⁸ BOYSEN J. The Freeze-Thaw/Evaporation (FTE®) Process for Produced Water Treatment, Disposal and Beneficial Uses. IPEC Conferene. 2007. Disponible en: http://ipec.utulsa.edu/Conf2008/Manuscripts%20&%20presentations%20received/Boysen_37_FreezeThaw.pdf

⁵⁹ IGUNNU E., CHEN G. Op. cit.

⁶⁰ ENERGY & ENVIRONMENT RESEARCH CENTER. Northern Great Plains Water Consortium. Innovative Water Treatment. Freeze-Thaw/Evaporation (FTE). Disponible en: <http://www.undeerc.org/Water/Decision-Support/Treatment-Technologies/Innovative-Water-Treatment.aspx>

agua porque la tecnología FTE funciona como un estanque de evaporación convencional. La FTE puede eliminar más del 90% de los metales pesados, TDS, compuestos orgánicos volátiles y semi-volátiles, sólidos suspendidos totales y los hidrocarburos recuperables de petróleo totales en el agua producida.^{61, 62}

La ganancia principal de esta tecnología es en el impacto financiero positivo que se puede esperar en lo que respecta al manejo del agua. También ofrece una alternativa económica a la inyección en pozos profundos en lugares donde las restricciones de las normativas o las condiciones geológicas hacen de la inyección un proceso costoso. Por último, muchos productores en los estados áridos occidentales han informado el transporte de 50 a 90 por ciento más de agua durante los meses de invierno. Además el volumen tratado de agua puede ser utilizado por el público. La ineficiencia de la evaporación en los meses más fríos resulta en tanques de las instalaciones y las piscinas de almacenamiento que llegan a su capacidad máxima, lo que significa un aumento de transporte de flowback. El resultado de un aumento de la manipulación de flowback implica mayores costos.⁶³

3.2.3 Tecnologías para tratamientos químicos

3.2.3.1 Adsorción

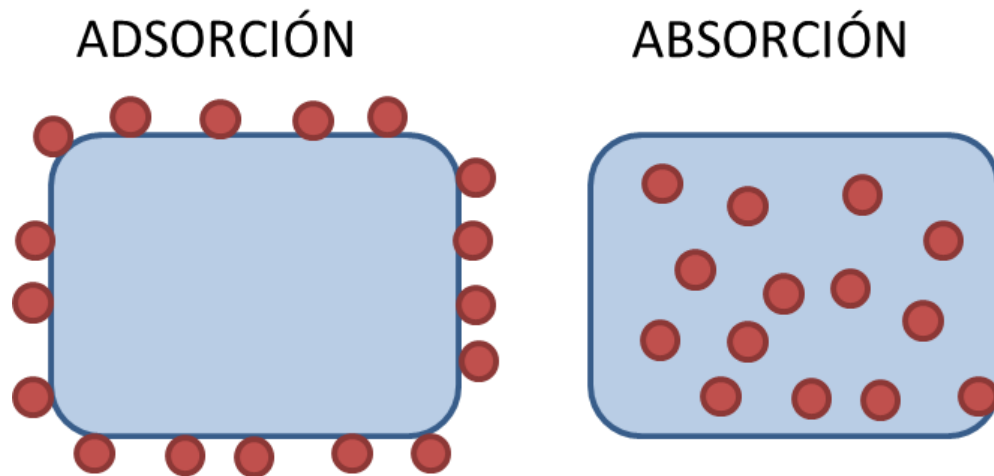
El proceso de adsorción consiste, en términos generales, en la captación de sustancias solubles presentes en la interfase de una solución (Figura 11). Esta interfase puede hallarse entre un líquido y un gas, un sólido, o entre dos líquidos diferentes. El proceso tiene lugar en tres etapas: macro transporte, micro transporte y sorción.

⁶¹ IGUNNU E., CHEN G. Op. cit.

⁶² BOYSEN J. et al. The Current Status of comercial Deployment of the Freeze Thaw Evaporation Treatment Of Produced Water. En Society of Petroleum Engineers, SPE 52700, 1999.

⁶³ BOYSEN J. et al. Op. cit.

Figura 11. Adsorción y absorción



Fuente: cienciaypresencia.blogspot.com

La adsorción no solo usa carbón activado para su ejecución, también puede estar acompañada por una variedad de materiales incluyendo la zeolita, arcillas orgánicas y aluminio activado. Los químicos no son requeridos para un proceso de adsorción convencional.

Los absorbentes son capaces de remover hierro, manganeso, carbón orgánico total, componentes BTEX, metales pesados y aceites del agua de retorno. Cuando todo el sitio activo del material de adsorción ha sido consumido, el material o bien debe ser regenerado o desechado.⁶⁴

En la tabla 10 se pueden observar características propias del tratamiento por medio de la adsorción.

⁶⁴ COLORADO SCHOOL OF MINES. Op. cit.

Tabla 10. Características propias de la adsorción

Criterio	Descripción
Estado industrial	Comúnmente usada para tratamiento de agua producida.
Calidad del agua de alimentación	Aplicable a cualquier concentración de TDS, independiente del tipo de sal. Este proceso puede remover hierro, manganeso, TOC, BTEX, y aceites. Las zeolitas pueden ser usadas para intercambiar el calcio por el magnesio para reducir SAR.
Calidad del agua producto	Remoción de > 80% de metales pesados.
Recobro de agua	Cercano al 100%.
Energía requerida.	Mínima.
Uso de químicos	Pueden ser usados para la regeneración del medio.
Vida útil	El medio podría requerir reemplazo frecuente o regeneración dependiendo del tipo del medio y la calidad del agua de alimentación.
Condiciones de infraestructura	Requiere de un reactor para contener el medio y las bombas y los tubos para implementar el lavado.
Consideraciones de operación y mantenimiento	Habrà una pérdida de presión a través del filtro, sin embargo, dependiendo de la configuración de la planta, esto puede no requerir ninguna(s) bomba(s) adicional(es). Las bombas serán necesarias para lavar los filtros.
Pre y post tratamiento	La adsorción se utiliza mejor como una etapa de pulido para evitar el uso rápido de material adsorbente.

Fuente: Modificada de COLORADO SCHOOL OF MINES. An Integrated Framework for Treatment and Management of Produced Water. RPSEA Proyecto 07122-12, Primera edición. Noviembre, 2009.

3.2.3.2 Intercambio iónico

Esta tecnología es ampliamente usada para la remoción de iones monovalentes, divalentes y metales de las aguas de retorno por medio de resinas. El principal objetivo de las resinas es la eliminación del sodio de las muestras de flowback.

Los ablandadores de agua utilizan columnas de intercambio iónico llenas de un tipo específico de resina. La resina se carga con iones de sodio haciendo pasar una solución salina concentrada a través de la columna. Como el agua cargada con hierro y manganeso se mueve a través de la columna, los iones son atraídos a las resinas, que prefieren unirse con el hierro y el manganeso. El sodio se libera cuando la resina se sujeta al hierro y al manganeso. Posterior a esto, la columna se lava en contracorriente y se regenera con una solución salina fresca.⁶⁵ Los solutos contaminantes catiónicos más encontrados son el calcio, magnesio, bario, estroncio, y el radio los cuales se eliminan mediante resinas de intercambio catiónico, y los solutos aniónicos tales como fluoruro, nitrato, fulvatos, humatos, arseniato, selenato, cromato y complejos aniónicos de uranio pueden ser eliminados por resinas de intercambio aniónico.⁶⁶ En la tabla 11 se muestra una tabla resumen en la cual se muestran las características más importantes de esta tecnología.

Tabla 11. Características propias del intercambio iónico

Criterio	Descripción
Estado industrial	Amplias operaciones industriales incluyendo la utilización para el tratamiento del agua producida del gas asociado a mantos de carbón en la cuenca Powder River.
Calidad del agua de	Flowback con concentración de TDS entre 500 mg/L y 7.000 mg/L.

⁶⁵ VEIL J. Produced Water Management Options and Technologies. Capítulo 29. En Springer Link, 2011.

⁶⁶ LETTERMAN R., Water Quality and Treatment, 5th ed., McGraw-Hill, New York, 1999.

alimentación	
Calidad del agua producto	Depende de la calidad del agua de alimentación (salinidad) y las condiciones de operación. Se puede alcanzar una eliminación mayor de 93% de los iones mono y divalentes.
Recobro de agua	Depende de la regeneración de las resinas, pero normalmente el recobro oscila entre el 98%.
Energía requerida.	Los requerimientos de energía son mínimos y podrían incluir los costos de bombeo. La demanda de energía podría ser más baja que 1,5 kWh/kgal (0,07 kWh/bbl), asumiendo una tasa de flujo de 200 gpm y 80% de eficiencia en el bombeo.
Uso de químicos	Las tasas de químicos para limpieza dependen de la calidad del agua de alimentación y la capacidad de adsorción de la resina. Las soluciones de regeneración podrían requerir el uso de HCl, H ₂ SO ₄ , NaOH, Na ₂ CO ₃ o NaCl. Desinfección química adicional podría ser requerida para mitigar el bio-ensuciamiento y típicamente consistiría de soluciones de limpieza de H ₂ O ₂ o NaOCl.
Vida útil	La vida útil promedio de la resina es de alrededor de 4 a 8 años para intercambio aniónico, mientras que para intercambio catiónico, la resinas podrían ser útiles entre 10 a 15 años.
Condiciones de infraestructura	Este proceso de tratamiento tiene una huella operativa muy variable, puede ser dimensionado para pequeñas unidades hasta grandes plantas de tratamiento de agua potable y aguas residuales municipales. Los sistemas pueden ser móviles, aunque algunos requerirían el uso de maquinaria pesada para la relocalización.
Consideraciones de operación y mantenimiento	<ul style="list-style-type: none"> - Se requiere monitoreo y control para las tasas de flujo, calidad del agua producto y la regeneración de la resina. - El sistema requeriría poca supervisión. - Baja a moderada flexibilidad dependiendo del tipo de resina. - Son altamente sensibles al ensuciamiento causado por materiales orgánicos y sólidos suspendidos. - Las resinas para intercambio catiónico no deben ser expuestas a temperaturas de 120°C. - Tipo de energía requerida: eléctrica.
Costos totales	Los costos varían entre US\$ 1,9 a US\$ 2,6/kgal (US\$ 0,08 – US\$

	0,11/bbl) a 220 gpm (5 bbl por minuto) y US\$ 1 – US\$ 1,7/kgal (US\$ 0,04 – US\$ 0,07/bbl) a 880 gpm (21 bbl por minuto). Para bajas tasas de flujo, los costos de operación son contabilizados alrededor del 70% del total de los costos con regenerantes, agua no potable, mantenimiento y trabajo como los contribuyentes más importantes. A 880 gpm, los costos de operación se incrementan en 80%.
Pre y post tratamiento	El proceso requeriría opciones de pretratamiento incluyendo solidos suspendidos, metales oxidados y remoción de incrustaciones minerales. El agua producto podría requerir estabilización de pH o re mineralización.

Fuente: Modificada de COLORADO SCHOOL OF MINES. An Integrated Framework for Treatment and Management of Produced Water. RPSEA Proyecto 07122-12, Primera edición. Noviembre, 2009.

3.2.3.3 Procesos de oxidación avanzada

Los procesos de oxidación avanzados (AOP) se definen como “aquellos procesos de oxidación que implican la generación de radicales hidroxilo en cantidad suficiente para reaccionar con los compuestos orgánicos del medio”. Se trata de una familia de métodos que utilizan la elevada capacidad oxidante de los radicales OH y que se diferencian entre sí en la forma en la que los generan.

Los más comunes utilizan combinaciones de ozono (O₃), peróxido de hidrogeno (H₂O₂), radiación ultravioleta y fotocatalisis. Una consecuencia de la elevada reactividad del agente oxidante es que los procesos avanzados de oxidación se caracterizan también por su baja selectividad; pero lo que en un proceso de producción puede ser una desventaja, es sin embargo una característica deseable

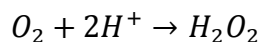
en el caso de la eliminación de contaminantes de aguas residuales.⁶⁷ En la tabla 12 se presentan los diversos procesos de oxidación avanzada.

- **Electroquímica**

Los procesos electroquímicos para la oxidación de contaminantes orgánicos se basan en la utilización de energía eléctrica para romper los enlaces de las moléculas. Se clasifican como procesos avanzados de oxidación porque los electrones se transfieren al compuesto orgánico en el último extremo mediante la intervención de radicales hidroxilo.⁶⁸

La electroquímica como AOP puede llevarse a cabo usando ánodos capaces de oxidar el agua a radicales ·OH. Entre los ánodos más utilizados se encuentran SnO₂, PbO₂, IrO₂, RuO₂ y Pt y más recientemente, electrodos de boro dopados con diamante.⁶⁹

La principal ventaja de este tipo de procesos es evitar la introducción de reactivos en disolución. En la oxidación anódica, los compuestos orgánicos se oxidan mediante los radicales hidroxilo generados en un ánodo a partir de la oxidación de moléculas de agua. En la oxidación electroquímica, los compuestos orgánicos reaccionan con oxidantes moleculares generados electroquímicamente, como el peróxido de hidrógeno que se produce en cátodos, por ejemplo de grafito, a partir del oxígeno disuelto en el medio:



⁶⁷ FERNANDEZ – ALBA A. et. al. Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales. Informe de vigilancia tecnológica. CEIM, Dirección General de Universidades e Investigación, 2006.

⁶⁸ FERNANDEZ – ALBA A. et. al. Op. cit.

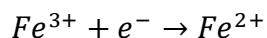
⁶⁹ SARRIA V et al. Nuevos sistemas electroquímicos y fotoquímicos para el tratamiento de aguas residuales y de bebida. En Revista Colombiana de Química. Volumen 34, no. 2 de 2005.

Tabla 12. Procesos de oxidación avanzada

Procesos Homogéneos
<p><i>a. Sin aporte externo de energía</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Ozonización en medio alcalino. • Ozonización con peróxido de Hidrógeno. • Peróxido de hidrogeno y catalizador. <p><i>b. Con aporte externo de energía.</i></p> <p>b1. Energía procedente de radiación ultravioleta.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ozonización y radiación ultravioleta. • Peróxido de hidrogeno y radiación ultravioleta. • Ozono, peróxido de hidrogeno y radiación ultravioleta. • Foto – Fenton. <p>b2. Energía procedente de ultrasonidos</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ozonización y ultrasonidos. • Peróxido de hidrogeno y ultrasonidos. <p>b3. Electroquímica.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Oxidación electroquímica. • Oxidación anódica. • Electro – Fenton.
Procesos Heterogéneos
<ul style="list-style-type: none"> • Oxidación catalítica. • Ozonización fotocatalítica. • Fotocatálisis heterogénea.

Fuente: FERNANDEZ – ALBA A. et. al. Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales. Informe de vigilancia tecnológica. CEIM, Dirección General de Universidades e Investigación, 2006.

La capacidad oxidativa del peróxido de hidrógeno puede incrementarse en medio ácido con la introducción de una sal de Fe (II) de una forma similar a la que se describió al tratar el reactivo de Fenton. En este caso, a las vías ya descritas para la regeneración del catalizador a partir del Fe (III), se une la reducción catódica directa:



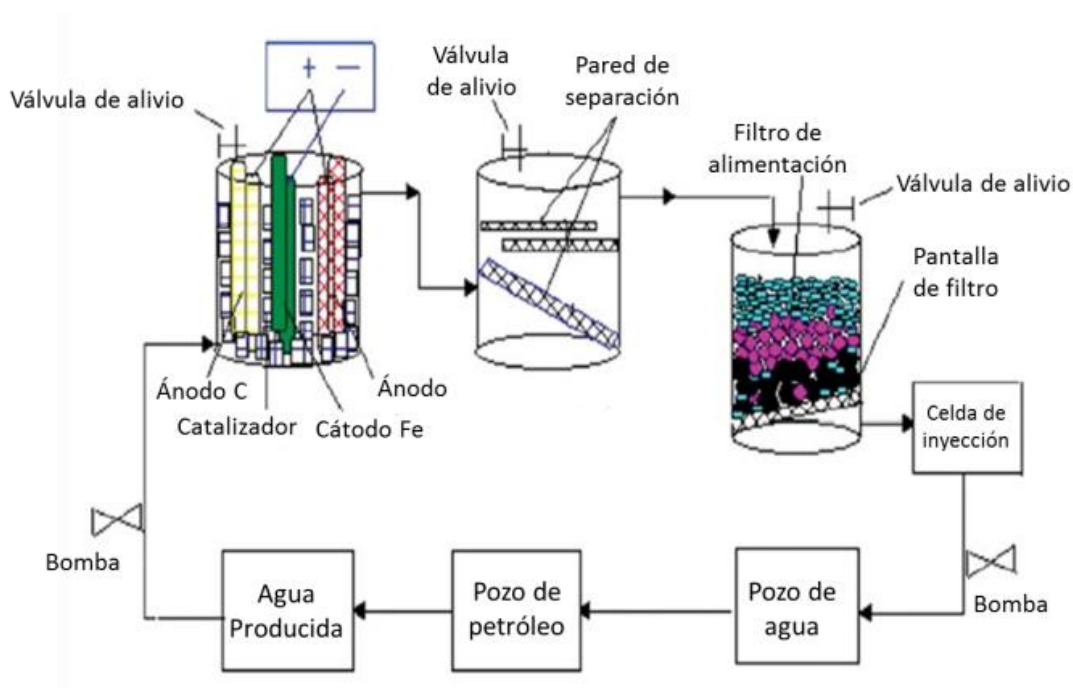
El proceso descrito se conoce como Electro-Fenton y, en caso de que se combine con aporte de radiación ultravioleta, Foto-Electro-Fenton. El ánodo suele ser de Pb/PbO₂ o de platino. Este tipo de procesos presenta como desventaja fundamental su coste elevado en comparación con otros procesos de oxidación avanzada. Además, es necesario convertir el efluente en conductor para lo que suele ser necesario añadir una sal.⁷⁰

La utilización de la electroquímica para remover contaminantes en aguas residuales resulta promisoria dadas las atractivas características que posee: 1) versatilidad, ya que es posible realizar oxidaciones o reducciones, tanto directas como indirectas, de soluciones concentradas o diluidas del contaminante; 2) automatización, puesto que las variables eléctricas usadas (corriente y potencial) son fácilmente manejables para el control y la adquisición de datos; 3) compatibilidad con el ambiente, debido a que el principal reactivo utilizado es el electrón y, generalmente, no es necesaria la inclusión de otras especies. Una de las grandes desventajas que presentan los tratamientos químicos de oxidación y electroquímica son sus altos costos de operación.⁷¹

⁷⁰ FERNANDEZ – ALBA A. et. al. Op. cit.

⁷¹ SARRIA V. et al. Op. cit.

Figura 12. Planta piloto de Electroquímica catalítica



Fuente: Modificada de MA Y WANG. Electrochemical pilot-scale plant for oil field produced wastewater by M/C/Fe electrodes for injection. En ScienceDirect. Journal of Hazardous Materials, Volumen 132,1998. 237 -243p.

Ma y Wang establecieron una planta electroquímica catalítica a escala piloto para la eliminación de compuestos orgánicos a partir de flowback de yacimientos petrolíferos, utilizando ánodos dobles de metal activo y grafito, el hierro como cátodo y un catalizador de metal noble con gran superficie (Figura 12). Ellos encontraron que la DQO y DBO se redujeron en más del 90% en 6 minutos, los sólidos en suspensión en un 99%, el contenido de Ca^{2+} en un 22%, la tasa de corrosión en un 98% y las bacterias (bacterias reductoras de sulfato de hierro y bacterias) en 99% en 3 minutos bajo 15V/120A.⁷²

⁷² MA Y WANG. Electrochemical pilot-scale plant for oil field produced wastewater by M/C/Fe electrodes for injection. En ScienceDirect. Journal of Hazardous Materials, Volumen 132,1998. 237 -243p.

- **Electrocoagulación**

La electrocoagulación es un proceso que utiliza la electricidad para eliminar contaminantes en el agua que se encuentran suspendidos, disueltos o emulsificados. La técnica consiste en inducir corriente eléctrica en el agua residual a través de placas metálicas paralelas de diversos materiales, dentro de los más comúnmente utilizados están el hierro y el aluminio. La corriente eléctrica proporciona la fuerza electromotriz que provoca las reacciones químicas que desestabilizan las formas en las que los contaminantes se encuentran presentes, bien sea suspendidas o emulsificadas. Es así que los contaminantes presentes en el medio acuoso forman agregados, produciendo partículas sólidas que son menos coloidales y menos emulsificadas (o solubles) que en estado de equilibrio. Cuando esto ocurre, los contaminantes forman componentes hidrofóbicos que se precipitan y/o flotan y se pueden remover fácilmente por algún método de separación de tipo secundario.⁷³

La generación de iones metálicos tienen lugar en el ánodo y en el cátodo hay liberación de burbujas de hidrógeno gaseoso las cuales ayudan a la flotación de las partículas floculadas, las mismas que serán retiradas posteriormente

El reactor utilizado para realizar la electrocoagulación en una operación por batch, en su forma más simple, está formado por una celda electroquímica con un ánodo y un cátodo dispuestos en forma vertical⁷⁴ y conectada a una fuente de energía externa. El material anódico se corroe eléctricamente debido a la oxidación, mientras que el cátodo permanece pasivo. El sistema para la electrocoagulación requiere de una fuente de corriente directa, un regulador de densidad de corriente y de un multímetro para leer los valores de corriente. En la Figura 6 se muestran

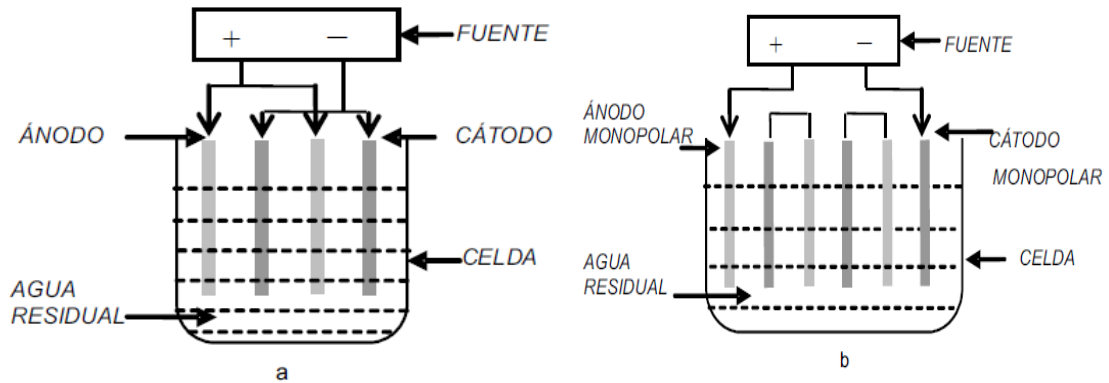
⁷³ ARANGO A. La electrocoagulación: una alternativa para el tratamiento de aguas residuales. Revista Lasallista de Investigación, Volumen 2 No. 1, 2005. Disponible en: <http://www.lasallista.edu.co/fxcul/media/pdf/Revista/vol2n1/electrocoagulacion.pdf>

⁷⁴HOLT P. et. al. The future for electrocoagulation as a localised water treatment technology. En Sciencedirect. Chemosphere, Volumen 59, 2005. 355 – 367 p.

dos reactores para electrocoagulación con electrodos en paralelo. El lado positivo sufre reacciones anódicas, mientras que el lado negativo sufre reacciones catódicas.

Para aumentar la eficiencia de remoción de los iones indeseables se puede hacer pasar el agua residual a través de una serie de celdas que tienen electrodos compuestos de varios metales. Los parámetros como pH, conductividad y potencial de óxido-reducción deben ser ajustados de acuerdo con el tipo de contaminante.⁷⁵ Entre los factores que más afectan la electrocoagulación se pueden encontrar la densidad de corriente, presencia de NaCl, pH y temperatura.

Figura 13. Reactores para electrocoagulación tipo bach: (a) Reactor con electrodos monopolares conectados en paralelo, (b) Reactor con electrodos monopolares conectados en serie



Fuente: ARANGO A. La electrocoagulación: una alternativa para el tratamiento de aguas residuales. Revista Lasallista de Investigación, Volumen 2 No. 1, 2005.

⁷⁵ MOLLAH M. et. al. Electrocoagulation (EC) – science and applications. En Sciencedirect. Journal of Hazardous Materials, volumen 84, 2001. 29 – 41 p.

3.2.3.3.3 Fotocatálisis heterogénea

Los procesos fotocatalíticos se basan en la irradiación de suspensiones de óxidos semiconductores, generalmente dióxido de titanio, en presencia de las especies contaminantes que se quiere degradar. Si los fotones suministrados al sistema tienen la energía adecuada, se origina en el semiconductor una separación de cargas (pares hueco-electrón). Entre otros procesos, los huecos pueden dar lugar a la formación de radicales hidroxilo ($\cdot\text{OH}$), especies de alto poder oxidante capaces de reaccionar con una gran variedad de compuestos orgánicos, conduciendo en último término a su completa mineralización. Se ha demostrado que hay una gran variedad de moléculas contaminantes que pueden ser degradadas fotocatalíticamente. Algunos ejemplos son:⁷⁶

- Fenoles.
- Colorantes.
- Cianuros.
- Compuestos orgánicos clorados.
- Herbicidas e insecticidas.

Otra forma de llevar a cabo este procedimiento a cabo es la fotocatalisis heterogénea sobre TiO_2 . Esta tecnología se basa en la utilización de un material semiconductor como catalizador, el cual es activado por la luz para generar reacciones redox que pueden modificar químicamente los contaminantes, convirtiéndolos en sustancias más biodegradables, o en muchos casos logrando la completa mineralización de los mismos.⁷⁷

⁷⁶ MI+D. Fotocatálisis Heterogénea: una técnica alternativa para el tratamiento de aguas contaminadas. Disponible en: <http://www.madrimasd.org/blogs/remtavares/2011/04/18/131614>

⁷⁷ SARRIA V. et al. Op. cit.

3.2.4 Tecnologías para tratamientos biológicos

Estos tipos de tratamientos constituyen una serie de importantes procesos que utilizan microorganismos como las bacterias, los hongos, los protozoos, rotíferos y las algas para eliminar los componentes indeseables del agua, aprovechando la actividad metabólica de los mismos. Para el caso de tratamientos de aguas residuales industriales, el principal objetivo del tratamiento biológico es reducir la concentración de componentes orgánicos e inorgánicos. En algunas ocasiones, es inminente llevar a cabo un pretratamiento debido al potencial de toxicidad de estos compuestos para los microorganismos.⁷⁸ Se pueden distinguir las siguientes formas para efectuar los tratamientos biológicos:^{79, 80}

- **Sistemas aerobios:** La presencia de O_2 hace que este elemento sea el aceptor de electrones, por lo que se obtienen unos rendimientos energéticos elevados, provocando una importante generación de fangos, debido al alto crecimiento de las bacterias aerobias. Su aplicación a aguas residuales puede estar muy condicionada por la baja solubilidad del oxígeno en el agua.
- **Sistemas anaerobios:** En este caso el aceptor de electrones puede ser el CO_2 o parte de la propia materia orgánica, obteniéndose como producto de esta reducción el carbono en su estado más reducido, CH_4 . La utilización de este sistema tendría como ventaja importante, la obtención de un gas combustible.
- **Sistemas anóxicos:** Se denominan así los sistemas en los que la ausencia de O_2 y la presencia de NO_3^- hacen que este último elemento sea el aceptor de electrones, transformándose, entre otros, en N_2 , elemento completamente

⁷⁸ METCALF & EDDY, INC. Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización. Volumen I. Tercera Edición. McGraw-Hill. ISBN: 84-481-1727-1. Aravaca (Madrid), 1995.

⁷⁹ FERNANDEZ – ALBA A. et. al. Op. cit.

⁸⁰ LENTECH. Water Treatment Solutions. Tratamiento biológico. Disponible en: <http://www.lenntech.es/tratamiento-biologico.htm>

inerte. Por tanto, es posible, en ciertas condiciones, conseguir una eliminación biológica de nitratos (desnitrificación).

Dentro de los procesos aerobios podemos encontrar:

- **Cultivos en suspensión:** Proceso de fangos activados (lodos activados) y modificaciones en la forma de operar: aireación prolongada, contacto – estabilización, reactor discontinuo secuencial (SBR).
- **Cultivos fijos:** Los microorganismos se pueden inmovilizar en la superficie de sólidos (biomasa soportada), destacando los filtros percoladores (también conocido como lechos bacterianos o filtros biológicos).

El proceso de fangos activados permite poner en contacto en un medio aerobio, el agua residual con flóculos biológicos previamente formados, en los que se adsorbe la materia orgánica y donde es degradada por las bacterias presentes.

Dentro de los parámetros básicos de funcionamiento, un parámetro muy importante es la aireación. La solubilidad del oxígeno en el agua es pequeña (alrededor de 8 – 9 mgO₂/L dependiendo de la presión y la temperatura) por lo que será necesario asegurar el suministro a los microorganismos, utilizando aireadores superficiales, capaces de suministrar 1 kgO₂/kWh, o bien difusores. El valor mínimo de operación aconsejable de concentración de oxígeno disuelto es de 2 mg/L.⁸¹ El consumo eléctrico en esta operación será importante dentro de los costes de operación del proceso. En la tabla 13 se muestra los parámetros de operación típicos en procesos de fangos activados.

Por otro lado, tratamientos biológicos anaerobios son procesos complejos en ausencia de oxígeno y en el cual intervienen varios grupos de bacterias. Surgen como alternativa para el tratamiento de aguas de retorno con alta carga orgánica

⁸¹ FERNANDEZ – ALBA A. et. al. Op. cit.

frente al que sería un costoso tratamiento aerobio. Se caracteriza por la producción del denominado “bio-gas” formado por metano (60-80%) y dióxido de carbono (40 – 20%).

Tabla 13. Parámetros de operación típicos en procesos de fangos activados

	Convencional	Aireación prolongada	Contacto estabilización
A/M (Kg DBO₅/Kg_{xv} d)	0,2 – 0,4	0,05 – 0,15	0,2 – 0,6
THR (h)	4 – 8	18 – 36	3 – 6
TRS (d)	5 – 15	20 – 30	5 – 15
MLTSS (ppm)	1.500 – 3.000	1.500 – 5.000	4.000 – 9.000
Carga orgánica (Kg DBO₅/m³d)	0,3 – 0,6	0,1 – 0,4	1 – 1,2
Recuperación (%)	25 – 50	5 – 15	5 – 15

Fuente: Modificada de FERNANDEZ – ALBA A. et. al. Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales, 2006.

Entre las ventajas más significativas del tratamiento anaerobio frente al aerobio se destacan la alta eficacia de los sistemas, incluso en aguas residuales de alta carga, el bajo consumo de energía, pequeña producción de fangos y por tanto, pequeño requerimiento de nutrientes, así como su eficacia ante alteraciones importantes de carga y la posibilidad de grandes periodos de pausa sin alteración importante en la población bacteriana. Sin embargo, como desventajas caben destacar la baja efectividad en la eliminación de nutrientes y patógenos, generación de malos olores y la necesidad de un post-tratamiento, generalmente aerobio, para alcanzar los niveles de depuración demandados.⁸²

En los procesos anaerobios es importante tener en cuenta los factores medioambientales. También, es relevante considerar los parámetros de seguimiento y control, los cuales se centrarían en la fase sólida (materiales

⁸² FERNANDEZ – ALBA A. et. al. Op. cit.

orgánicos e inorgánicos en suspensión); fase líquida (parámetros fisicoquímicos y composición) y gaseosa (producción y composición). También se deben considerar los parámetros de operación como por ejemplo la velocidad de carga orgánica, la toxicidad, la velocidad volumétrica de flujo, el tiempo de retención hidráulico, la concentración de sólidos volátiles en el reactor, producción de fangos, etc.

Tabla 14. Condiciones de operación para distintos reactores anaerobios

Reactor	DQO de entrada (mg/L)	Tiempo retención hidráulico (h)	Carga orgánica (Kg DQO/m ³ día)	Eliminación de DQO (%)
De contacto	1.500 – 5.000	2 – 10	0,5 - 2,5	75 – 90
EGSB	5.000 – 15.000	4 – 12	15 – 25	75 – 85
FA	10.000 – 20.000	24 – 48	5 – 55	75 – 85
RALF	5.000 – 10.000	5 – 10	05 – 10	80 – 85

Fuente: Modificada de FERNANDEZ – ALBA A. et. al. Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales, 2006.

Se pueden encontrar diversas configuraciones de reactores anaerobios, entre los cuales se pueden destacar: el reactor de contacto, el reactor de manto de lodos y flujo ascendente (UASB), Filtro anaerobio (FA), el reactor anaerobio de lecho fluidizado (RALF) y el Expanded granular sludge blanket (EGSB).⁸³ En la tabla 14 se pueden encontrar las condiciones de operación para distintos reactores anaerobios. Finalmente, en la siguiente tabla se puede observar un resumen de todas las tecnologías con sus principales características. Además, en el anexo A se resume las tecnologías para el tratamiento de aguas de retorno presentadas durante esta sección, además se identifica que contaminantes del flowback pueden remover. También se incluyen algunos procesos convencionales utilizados para la eliminación de contaminantes en aguas.

⁸³ FERNANDEZ – ALBA A. et. al. Op. cit.

Tabla 15. Tabla resumen tecnologías para tratamiento de flowback

Tecnologías	Nanofiltración	Ósmosis inversa	Ósmosis directa	Destilación por membranas	Bio-reactor de membranas	Electrodialisis / Electrodialisis inversa
Factibilidad	Tecnología robusta y madura para ablandamiento de aguas y remoción de metales en varios sectores del tratamiento de aguas. Ha sido empleado en el tratamiento de aguas residuales.	Tecnología robusta y madura para desalinización de aguas residuales municipales. También ha sido probada en el tratamiento de aguas de producción de shale gas.	Tecnología emergente para el tratamiento de aguas de retorno.	Tecnología emergente para el tratamiento de aguas de retorno.	Tecnología madura utilizada para el tratamiento de aguas residuales industriales.	Tecnología robusta y madura para la desalinización de aguas salobres. Ha sido probada a escala laboratorio para el tratamiento de las aguas de producción.
Ventajas	Es más útil para el tratamiento de agua con electrolitos divalentes (Mg, Ca, Ba, SO ₄), metales multivalentes (Fe, Mn) y radio nucleídos. También aplicable para algunos componentes orgánicos.	Remoción de partículas muy pequeñas (tamaño de poro < 0,0001 µm. Presiones de operación moderadas: 225 a 1.000 psi. Requiere menos energía que los procesos térmicos o que otras tecnologías de	Remoción de compuestos disueltos. No requiere presión hidráulica. Trabaja con un rango de TDS que está entre 500 mg/L hasta 35.000 mg/L El proceso requiere solamente bastante poder para circular la	No es necesario superar la presión osmótica que caracteriza las aguas de retorno. Aplicable a todas las concentraciones de sólidos totales disueltos desde 500 mg/L hasta 50.000 mg/L. Remoción del 100% teórico de solutos no volátiles.	La membrana provee una barrera inconsistente y produce un efluente de alta calidad. La membrana retiene aceites emulsionados. No vulnerables para procesar los trastornos que afectan la capacidad de sedimentación de la	Más costosa que la osmosis inversa pero las membranas son más resistentes al ensuciamiento. El proceso puede tratar alrededor de 8.000 barriles por día de agua. Puede tratar aguas de retorno con concentraciones de TDS entre 4.000 mg/L y 15.000 mg/L.



		<p>membranas.</p> <p>Remueve Sales, metales, ácidos, azúcares, aminoácidos, materia orgánica, arena limo, arcilla, algas, protozoos, bacterias, virus, iones metálicos/no metálicos.</p> <p>Permite tratar aguas con concentración de TDS desde 500 a 47.000 mg/L.</p>	<p>solución de extracción y la solución de alimentación a través de la membrana.</p>		<p>biomasa.</p> <p>El equipo deja una huella muy pequeña.</p> <p>Muy poco lodo es generado</p>	
Desventajas	<p>Auto tolerancia al pH alto, pero no puede ser expuesto a temperaturas superiores a 113 °F (45 °C).</p> <p>Todas las tecnologías de membranas de alta presión requieren de un extensivo pretratamiento para mitigar los constituyentes nocivos del agua de alimentación.</p>	<p>Requiere tratamiento previo extenso para reducir los componentes dentro del agua que producen incrustaciones o ensuciamiento de la membrana.</p>	<p>No ha sido utilizada a gran escala. Alto potencial de ensuciamiento de la membrana. Sensibilidad a la calidad fluctuante del agua.</p> <p>Requiere tratamiento previo.</p> <p>Se genera pequeñas cantidades de concentrado</p>	<p>No retiene compuestos como BTEX y otros orgánicos.</p> <p>Alta sensibilidad a los agentes tensoactivos, los compuestos orgánicos hidrofóbicos pueden ser difíciles de eliminar de la membrana.</p> <p>Pretratamiento para alargar vida útil de la membrana.</p>	<p>La membrana es la parte más débil de esta tecnología, por lo cual se debe tener control de los contaminantes del afluente.</p> <p>Costos en la instalación y el mantenimiento.</p>	<p>No ha sido usada a gran escala.</p> <p>Sensibilidad fluctuante a la calidad del agua.</p> <p>Limitada remoción de compuestos sin carga, incluyendo moléculas orgánicas, sílica, boro y microorganismos.</p> <p>Requieren limpieza regular con ácido diluido y soluciones alcalinas para restaurar el rendimiento y evitar</p>



			salobre que requiere disposición adicional.		<p>ensuciamiento de las membranas.</p> <p>Puede ser una tecnología costosa si se va a tratar flowback con alto TDS.</p> <p>Se requiere la eliminación de partículas y otras sustancias para evitar incrustaciones y ensuciamiento en los medios de filtración, ajuste de pH y adición de anti incrustantes.</p>
--	--	--	---	--	---



Tecnologías	Flash Multi-etapa	Multi-efecto	Dewvaporation	Compresión de Vapor	Freeze Thaw Evaporation
Factibilidad	Tecnología robusta y madura. Funciona para tratar altas concentraciones de TDS del orden de 40.000 mg/L. Efluente obtenido con TDS entre 2 y 10 mg/L.	Tecnología robusta y madura para desalinización de agua de mar y salobre. Aplicable a varios rangos de concentración de sólidos totales disueltos.	Tecnología a escala industrial pero en desarrollo. Ha sido empleada a gran escala para el tratamiento de aguas de producción. Aplicable a flowback con TDS entre 40.000 y 60.000 mg/L. Calidad del agua entre 100 y 200 mg/L.	Tecnología madura y robusta. Trabaja con flowback con TDS > 40.000 mg/L. Buen desempeño. Efluente de alta calidad.	Tecnología robusta y madura para tratamiento de flowback. Este proceso requiere de las condiciones del suelo favorables, una cantidad significativa de tierra y un importante número de días con temperaturas bajo cero
Ventajas	<p>Menos pretratamiento.</p> <p>Adaptable a cualquier calidad del agua.</p> <p>Buen desempeño para flowback con alto TDS.</p> <p>Soporta condiciones duras.</p> <p>Vida útil larga.</p>	<p>Menos Pretratamiento.</p> <p>Vida útil larga.</p> <p>Requerimiento energía menor a MSF.</p> <p>Buena para agua con alto TDS.</p> <p>Adaptable a cualquier calidad del agua.</p> <p>Recobro de agua tratada del 67% utilizando configuración de tubo vertical apilado.</p>	<p>No tratamiento previo.</p> <p>Eliminación de residuos de hasta 90%.</p> <p>No requiere infraestructura especial.</p>	<p>Aplicable a todo tipo de agua y agua con TDS > 40.000 mg/L.</p> <p>Unidad pequeña comparada con MSF y MED.</p> <p>Trabaja en condiciones extremas.</p> <p>Menos pretratamiento.</p>	<p>Excelente para cero descarga de líquido (ZLD).</p> <p>Requiere poco personal calificado, seguimiento y control.</p> <p>Es altamente fiable y se puede adaptar fácilmente a diversas calidades y cantidades de agua.</p>



		Agua tratada de alta calidad.			
Desventajas	<p>Bajo recobro de agua tratada (10% y 20%).</p> <p>No flexible para variación de las tasas de flujo.</p> <p>Problemas de escamas y corrosión.</p>	<p>Bajo recobro de agua tratada (20% y 35%).</p> <p>No flexible para variación de las tasas de flujo.</p> <p>Problemas de escamas y corrosión.</p> <p>Alto nivel de mano de obra calificada necesaria.</p>	<p>Alto requerimiento de electricidad.</p>	<p>Recobro de agua alrededor del 40%.</p> <p>No flexible para variación de las tasas de flujo.</p> <p>Problemas de escamas y corrosión.</p> <p>Alto nivel de habilidades se requieren para operar el sistema</p>	<p>No se puede tratar el agua producida con alta concentración de metanol.</p> <p>La calidad del agua del producto contiene moderado TDS de aprox. 1,000 mg/L.</p> <p>Sólo puede trabajar en invierno y en lugares con temperaturas bajo cero.</p> <p>Se requiere una cantidad significativa de tierra.</p> <p>Genera flujos de desechos secundarios.</p>



Tecnologías	Adsorción	Intercambio Iónico	Procesos de oxidación avanzada		Biológicos
Factibilidad	Comúnmente usada para tratamiento de agua producida.	Amplias operaciones industriales incluyendo la utilización para el tratamiento del agua producida del gas asociado a mantos de carbón en la cuenca Powder River.	Tecnologías emergentes para el uso en el tratamiento de flowback en proyectos de yacimientos no convencionales. Los más utilizados en lo que respecta a tratamientos de agua son la electroquímica, la fotocátalisis, radiación ultravioleta, electrocoagulación entre otras.		Procesos que se han utilizado desde hace varios años en la industria del tratamiento de aguas residuales.
Ventajas	<p>Aplicable a cualquier concentración de TDS, independiente del tipo de sal. Este proceso puede remover hierro, manganeso, TOC, BTEX, y aceites.</p> <p>Las zeolitas pueden ser usadas para intercambiar el calcio por el magnesio para reducir SAR.</p> <p>Remoción de > 80% de metales pesados.</p>	<p>Trabaja con flowback con concentración de TDS entre 500 mg/L y 7.000 mg/L.</p> <p>Depende de la calidad del agua de alimentación (salinidad) y las condiciones de operación. Se puede alcanzar una eliminación mayor de 93% de los iones mono y divalentes.</p> <p>El recobro de agua oscila entre el 80%.</p> <p>El sistema requeriría</p>	<p>La principal ventaja de este tipo de procesos es evitar la introducción de reactivos en disolución (electroquímica).</p> <p>Los residuos de estos procesos son mínimos en comparación con los residuos generados por otras tecnologías.</p> <p>Remoción de la mayoría de los contaminantes en el afluente.</p>		<p>Bajo consumo de energía y baja producción de fangos en los tratamientos anaerobios.</p> <p>Los sistemas aerobios producen alta cantidad de fangos.</p> <p>Se obtiene un efluente para uso agrícola.</p> <p>Altas eficiencias de remoción, 75% - 85% sólidos en suspensión y microorganismos 95% - 99%.</p>



	<p>El recobro de agua es cercano al 100%.</p> <p>La energía requerida es mínima.</p>	<p>poca supervisión.</p>			
Desventajas	<p>La adsorción se utiliza mejor como una etapa de pulido para evitar el uso rápido de material adsorbente.</p> <p>El medio podría requerir reemplazo frecuente o regeneración dependiendo del tipo del medio y la calidad del agua de alimentación.</p>	<p>El proceso requeriría opciones de pretratamiento incluyendo sólidos suspendidos, metales oxidados y remoción de incrustaciones minerales. El agua producto podría requerir estabilización de pH o re mineralización.</p> <p>Las resinas para intercambio catiónico no deben ser expuestas a temperaturas de 120°C.</p>	<p>Muy pocos proyectos han sido implementados a escala industrial. La mayoría de estas tecnologías se han probado a escala de laboratorio.</p> <p>El rango máximo que puede contener una corriente de alimentación es de alrededor de 10.000 mg/L.</p>		<p>En algunas ocasiones, es inminente llevar a cabo un pretratamiento debido al potencial de toxicidad de estos compuestos para los microorganismos.</p> <p>La cinética de la reacción de los procesos biológicos es lenta, por lo tanto, el diseño de los reactores debe llevar una gran cantidad de microorganismos.</p> <p>Se necesita de un área amplia para implementar este tipo de proceso.</p>

Fuente: Autor. Datos tomados de COLORADO SCHOOL OF MINES. An Integrated Framework for Treatment and Management of Produced Water. RPSEA Proyecto 07122-12, Primera edición. Noviembre, 2009.

4. CARACTERIZACIÓN Y ANÁLISIS FISCOQUIMICO DEL FLOWBACK PARA LA SELECCIÓN DE LAS TECNOLOGIAS PARA TRATAMIENTO

La siguiente etapa de este trabajo de investigación consistió en identificar una formación extranjera la cual fuera geológicamente similar a una formación colombiana, con el fin de correlacionar las características fisicoquímicas del flowback. Posteriormente, se realizó análisis de sensibilidad a cinco índices de estabilidad del agua para identificar cuáles eran los parámetros que más incidían sobre éstos, de esta manera y en base a esos resultados, se realizó una preselección de tecnologías. Luego, se analizó la viabilidad económica y técnica de cada una de las tecnologías preseleccionadas con la finalidad de determinar la tecnología óptima a implementar para el tratamiento de flowback en Colombia.

4.1 IDENTIFICACION FORMACION EXTRANJERA

En la tabla 16 se muestran las características de yacimiento de los shales más importantes en los Estados Unidos. Se desarrollaron diversos estudios basados en los datos presentados y se demostró que la Formación La Luna y el shale de Eagle Ford presentan similitudes en las características petrofísicas y geológicas. En la tabla 17 se puede observar con más detalle la analogía establecida entre el shale Eagle Ford y la formación La Luna. Para establecer las similitudes entre estas dos formaciones se tuvieron en cuenta los siguientes parámetros: Porosidad, permeabilidad, TOC,⁸⁴ tipo de Hidrocarburos, tipo de kerógeno, temperatura y reflectancia de la vitrinita (Ro).

⁸⁴ CERÓN M. et. al. Comparison of reservoir quality of La Luna, Gacheta and Eagle Ford Shale formations: Using Digital Rock Physics. En AAPG Datapages, Search and Discovery. Disponible en: http://www.searchanddiscovery.com/pdfz/documents/2013/50875ceron/ndx_ceron.pdf.html

Tabla 16. Características de yacimiento de shales Estados Unidos

Formación	Eagle Ford	Marcellus	Bakken	Barnett	Haynesville
Edad	Cretácico	Devónico medio	Devónico-Carbonífero temprano	Mississippian	Jurásico superior
Área aproximada (acres)	3'000.000*	15'000.000	192'000.000	3'200.000	5'760.000
Cuenca	Appalachian	Appalachian	Williston	Forth Worth	Salado
Composición Mineralógica	Cuarzo: 3% Calcita: 77% Dolomita: 2% Pirita: 6% Arcilla: 8% Otros: 4%	Cuarzo: 3% Calcita: 77% Dolomita: 2% Pirita: 6% Arcilla: 8% Otros: 4%	Cuarzo: 51% Calcita: 3% Dolomita: 30% Arcilla: 14% Otros: 2%	Cuarzo: 59% Calcita: 12% Dolomita: 1% Arcilla: 3% Otros: 4%	Cuarzo: 28% Calcita: 2% Pirita: 5% Arcilla: 57% Otros: 8%
Porosidad (%)	4-10	4-10	4-8	4-8	8-14
Permeabilidad (μd)	1-1,5	0,2-0,9	<100	0,05-2	0,5-400
Espesor (pies)	100-330	50-330	23 (superior), 85 (medio) y 50 (inferior)	100-600	200-300
TOC (%)	2-9**	3-12	5-10	4-8	0,5-5
Profundidad promedio (pies)	5.500-15.000*	3.300-8.800	10.000-12.000	6.500-8.500	10.000-14.000
Gradiente de presión (psi/pie)	0,4 – 0,65**	0,4-0,6	0,5-0,7	0,52	0,85-0,93
Tipo de hidrocarburo	Gas seco, Gas húmedo/condensado y petróleo con un API entre 33° y 50°.	Gas Condensado	Gas condensado petróleo con API promedio entre 39-46	Gas seco y gas húmedo	Gas seco
Temperatura (°F)	170-231*	110-160	158-280	205	300-400
Tipo de kerógeno	I y II	I, II y III	I y II	I, II y III	II
Ro (%)	0,8 – 3	0,8 – 3	0,3 – 0,7	0,6-1,6	1,7-2,5
Recursos técnicamente recuperables	3,35 MM barriles 21 Tcf de gas***	410 Tcf	4MMM barriles 1,8 Tcf	43 Tcf	75 Tcf

Fuente: *DONG Z et. al. Probabilistic assessment of world recoverable shale gas resources. En Society of Petroleum Engineers, SPE 167768, 2014.

** LESAR D. Shale developments III. Halliburton, 2011.

*** U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION. Review of emerging resources: U.S. shale gas and shale oil plays. Disponible en:

<http://www.eia.gov/analysis/studies/usshalegas/pdf/usshaleplays.pdf>

QUIREIN J. et. al. A workflow to evaluate mineralogy, porosity, TOC and hydrocarbon volumen in the Eagle Ford shale. En Society of Petroleum Engineers, SPE 167012, 2013.

QUANXIN G. et. al. Marcellus and Haynesville Drilling Data: Analysis and Lessons Learned. En Society of Petroleum Engineers, SPE 158894, 2012.

PATHAK M. et. al. Geologic Control on Production of shale play resources: case of the Eagle Ford, Bakken and Niobrara. En Society of Petroleum Engineers, URTEC 1922781, 2014.

SAYED M. et. al. Required understanding for the development of shale reservoirs in the middle east in light of developments in North America. En Society of Petroleum Engineers, SPE 172939, 2015.

HORSFIELD B. et. al. Gas Generation and Retention in the Bakken Shale, Williston Basin. En American Association of Petroleum Geologist, Search and Discovery article #40330, noviembre 2008. Disponible en:

http://www.searchanddiscovery.com/pdfz/documents/2008/08230horsfield/ndx_horsfield.pdf.html

Para el caso de la porosidad, se puede evidenciar que los rangos de valores de los dos miembros considerados de la formación La Luna (Salada y Galembo) se encuentran dentro del dato de porosidad que se presenta para Eagle Ford. Para el caso de la permeabilidad, la dos miembros de la formación La Luna presentan una desviación respecto al dato de permeabilidad registrado para Eagle Ford, sin embargo, la diferencia no es tan grande y puede considerarse que existe similitud entre las dos formaciones respecto a esta propiedad petrofísica.

Para el caso del tipo de kerógeno, tanto el shale Eagle Ford como la formación La Luna poseen kerógeno tipo II, el cual se presenta principalmente en ambientes lacustres y en ambientes marinos, aunque en menor proporción este último. Este tipo de kerógeno proviene de materia algácea, planctónica u otro tipo que ha sido transformada por la acción de microorganismos que se encuentran en el sedimento.

Respecto al tipo de hidrocarburos, la formación de interés colombiana posee crudo liviano, pesado y gas húmedo, fluidos que también son característicos del shale

play Eagle Ford. Es importante tener en cuenta que el crudo pesado se establece en un rango de 20 a 25° API para el caso de shale plays.

Tabla 17. Analogía entre Eagle Ford y la formación La Luna

Formación	Eagle Ford	La Luna	
		Miembro Salada	Miembro Galembo
Edad	Cretácico	Cretácico superior	
Área aproximada (acres)	3'000.000*	1'529.600	
Cuenca	Appalachian	VMM	
Composición Mineralógica	Cuarzo: 3% Calcita: 77% Dolomita: 2% Pirita: 6% Arcilla: 8% Otros: 4%	Cuarzo: 62% Carbonatos: 25% Arcilla: 13%	
Porosidad (%)	4-10	8,3 +/- 0,023 8,27+ / -3,54	8,69% +/- 0,037 6,89 +/- 2,9
Permeabilidad (µd)	1-1,5	17	4,3
Espesor (pies)	100-330	650-900	900-1.700
TOC (%)	2-9**	3,7 +/- 1,63	3 +/- 1,22
Profundidad promedio (pies)	5.500-15.000*	2.742 - 12.405	
Gradiente de presión (psi/pie)	0,4 – 0,65**	0,55 – 0,8	
Tipo de hidrocarburo	Gas seco, Gas húmedo/condensado y petróleo con un API entre 33° y 50°.	Crudo liviano y gas húmedo	Crudo Pesado
Recursos totales	150Tcf de gas y 210Bbl/MMcf de petróleo	117.8 Tcf 76.3 MMM Bbl	
Temperatura (°F)	170-231*	180 – 190	
Temperatura máxima (°F)	-	430 – 448	
Tipo de kerógeno	I y II	II	
Ro (%)	0,8 – 3	0,6 – 1	
Coefficiente de Poisson	-	0.120-0.375	
Módulo de Young (10 ⁶ psi)	-	1.476 – 5.248	
Recursos técnicamente recuperables	3,35 MM barriles 21 Tcf de gas***	14.1 Tcf 4.58 MMM Bbl	

Fuente: *DONG Z et. al. Probabilistic assessment of world recoverable shale gas resources. En Society of Petroleum Engineers, SPE 167768, 2014.

** LESAR D. Shale developments III. Halliburton, 2011.

*** U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION. Review of emerging resources: U.S. shale gas and shale oil plays. Disponible en:

<http://www.eia.gov/analysis/studies/usshalegas/pdf/usshaleplays.pdf>

QUIREIN J. et. al. A workflow to evaluate mineralogy, porosity, TOC and hydrocarbon volumen in the Eagle Ford shale. En Society of Petroleum Engineers, SPE 167012, 2013.

Los datos mostrados de la formación La Luna en la tabla son obtenidos por la caracterización integrada de laboratorio del intervalo corazonado en el pozo La Luna 1 en el ICP, 2012.

La temperatura en los dos miembros de la formación La Luna (entre 180 – 190 °F) se encuentran en un rango similar al rango de temperatura registrado para Eagle Ford. Finalmente, la reflectancia de la vitrinita, la cual hace referencia a la medida de la madurez de la materia orgánica con respecto al hecho de si se ha generado hidrocarburos o podría constituir una roca generadora efectiva⁸⁵, posee valores similares para las dos formaciones en cuestión.

4.2 ANALISIS FISICOQUIMICO DEL FLOWBACK

Identificado el shale Eagle Ford como la formación geológica extranjera análoga a la formación La Luna, se asume que la composición fisicoquímica del flowback proveniente de esta formación en Estados Unidos es la composición base del flowback de un yacimiento no convencional en Colombia. En la tabla 18 se especifican los contaminantes del flowback tanto en el shale de Eagle Ford y algunos campos colombianos ubicados en el Valle Medio del Magdalena como comparación. Para el desarrollo posterior de este trabajo de investigación, se trabajará con los datos del shale Eagle Ford.

⁸⁵ SCHLUMBERGER. Oilfield Glossary. Reflectancia de la vitrinita. Disponible en: http://www.glossary.oilfield.slb.com/es/Terms/v/vitrinite_reflectance.aspx

Tabla 18. Composición fisicoquímica del flowback en Eagle Ford y el Valle Medio del Magdalena

Componente		Eagle Ford	Composición fisicoquímica aguas Valle Medio del Magdalena			
		Concentración (mg/L)	Campo Lisama	Campo Under River	Campo Colorado	Campo La Cira
Nombre	Fórmula		Concentración (mg/L)			
Metales						
Aluminio***	Al	<1000	-	-	-	-
Arsénico***	As	<25	-	-	0.14	-
Bario*	Ba	10	0.2	7	102.9	-
Boro***	B	711	-	-	0.056	-
Cadmio***	Cd	<20	-	-	0.081	-
Calcio*	Ca	1.270	377.7	1.346	-	150
Cromo***	Cr	55	-	-	-	-
Cobre***	Cu	<130	-	-	-	-
Estroncio*	Sr	203	6.2	-	-	-
Hierro*	Fe	112	0	-	0.6	-
Magnesio*	Mg	111	12.7	54.4	54.4	125
Manganeso**	Mn	1,2	-	-	-	-
Mercurio***	Hg	<0,2	-	-	-	-
Molibdeno***	Mb	<50	-	-	-	-
Níquel***	Ni	<200	-	-	0.35	-
Potasio*	K	192	15.5	-	-	-
Plata	Ag	<50	-	-	-	-
Plomo***	Pb	22,4	-	-	0.64	-
Selenio***	Se	<25	-	-	0.36	-
Sodio*	Na	10.900	3.364	-	-	5.000

Zinc***	Zn	<100	-	-	0.052	-
Química general						
Alcalinidad (mg/L CaCO ₃)**	-	406	-	320	-	1.000
Cloruros*	Cl ⁻	19.318	5.325	1.300	17.867,6	6.200
Salinidad			9.323	8.500	3.728	13.000
Nitrato	NO ₃				0.41	-
Nitrógeno	N ₂	19,3	-	-	-	-
Sílice**	SiO ₂	148	36.9	-	-	-
Sulfato*	SO ₄ ²⁻	163	141.3	50.4	67.7	110
Bicarbonato*	HCO ₃	736	160	192	-	2.700
TOC***	-	612	-	-	-	-
pH**	-	7	7.8 @ 20°C	-	7.6	-
Turbidez (NTU)**	-	>100	-	134	-	-
Conductividad (µs/cm)**	-	37.000	-	3.500	-	-
TSS*	-	840	-	1.200	1.110	-
TDS*	-	33.015	9.439	286	-	-
Temperatura (°C)*	-	25	-	-	24	-

Fuente: *SLUTZ J. et. al. Key shale gas water management strategies: an economic assessment tool. En Society of Petroleum Engineers, SPE 157532, 2012

**HALLDORSON B. Successful oilfield water management.

En American Association of Drilling Engineers. Disponible en: <http://www.aade.org/app/download/7120409804/AADE-13-FTCE-14.pdf>

***ECOLOTRON. Water recovery systems. Treatment of flow back and produced water from the hydraulic fracturing of oil shale – Eagle Ford formation, McMullen County Texas. Eagle Ford analytical results. Disponible en:

<http://ecolotron.com/wp-content/uploads/2015/05/EcolotronFlowBack.pdf>

(A) NARANJO C. et. al. Factibilidad experimental de la inyección de agua en las arenas mugrosa del campo Lisama. Revista Fuentes: El reventón energético. Vol. 8 N° 1 de 2010 – Enero/Junio.

(B) ORTIZ W. Diseño de una planta de tratamiento de agua de producción en un campo en la cuenca del Valle Medio del Magdalena. . Bucaramanga, 2013, 157 p. Tesis de pregrado. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos.

(C) BENAVIDEZ J., JAIMES Y. Factibilidad técnico – financiera de los usos alternativos del agua de producción en campo escuela colorado. Bucaramanga, 2014, 136 p. Tesis de pregrado. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos.

(D) GARZÓN J. Análisis de distribución de la inyección de agua en un sector del área 3W del campo La Cira-Infantas a través de trazadores radioactivos. Bucaramanga, 2009, 25 p. Tesis de pregrado. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos.

Para analizar el comportamiento de los datos presentados en la tabla anterior se trabajará con cinco índices de estabilidad del agua los cuales permiten identificar si un volumen de agua es agresivo, corrosivo o incrustante. El agua es agresiva cuando este volumen posee la tendencia a disolver las incrustaciones calcáreas. Un agua es corrosiva cuando su composición fisicoquímica favorece la corrosión de un determinado metal. Finalmente, el agua incrustante tiende a formar incrustaciones calcáreas. En la tabla 19 se presentan los índices de estabilidad más importantes para caracterizar aguas.

Tabla 19. Índices de estabilidad del agua

Índice	Formula	Descripción
Langelier*	$I_L = pH - pH_s$ $pH_s = (pK_2 - pK_s) + \log Ca + \log Alcalinidad + 5pfm$ $pK_2 = 107,8871 + 0,03252849 * T - \frac{5151,79}{T} - 38,92561 \log T + \frac{563713,9}{T^2}$ $pK_s = 171,9065 + 0,077993 * T + \frac{2839,319}{T} - 71,595 \log T$ <p>Donde T está en grados Kelvin.</p> $pfm = A \frac{\sqrt{I}}{1 + \sqrt{I}} - 0,3 * I$ <p>I = Fuerza iónica</p>	<p>Es el índice más utilizado. A través de este se define la agresividad del agua con respecto al carbonato de calcio (CaCO₃). Se basa en el efecto del pH sobre el equilibrio de solubilidad del CaCO₃. Permite determinar la estabilidad y el pH óptimo de un agua. También es usado como indicador de la corrosividad del agua.</p> <p>Si $I_L > 0$, el agua esta sobresaturada, el CaCO₃ se deposita, por lo tanto el agua es incrustante.</p> <p>Si $I_L = 0$, el agua está saturada (en equilibrio) con CaCO₃, no se precipita ni se disuelve.</p> <p>Si $I_L < 0$, el agua esta insaturada, el CaCO₃ tiende a disolverse por lo tanto el agua es agresiva.</p>

	$I = \frac{TDS}{40000}$ $A = 1,82 * 10^6 * (E * T)^{-1,5}$ <p>E = Constante dieléctrica</p> $E = \frac{60954}{T + 116} - 68,937$	
Ryznar*	$I_r = 2pH_s - pH$	<p>Índice empírico para determinar el carácter corrosivo o incrustante de las aguas. Se ha confirmado que el valor de este índice permite determinar el comportamiento del agua.</p> <p>Si $I_R < 6$, indica que el agua es incrustante.</p> <p>Si $6 < I_R < 7$, indica que el agua está cercana al equilibrio.</p> <p>Si $I_R > 8$, indica que el agua es corrosiva.</p>
Puckorius**	$PSI = 2pH_s - pH_{eq}$ $pH_{eq} = 1,465 + \log(\text{alcalinidad}) + 4,54$	<p>Similar al índice desarrollado por Ryznar, sin embargo utiliza un valor calculado de pH del agua en lugar del pH medido en el circuito.</p> <p>Si $PSI < 4,5$ indica tendencia a la incrustación.</p> <p>Si $4,5 < PSI < 6,5$ indica que no hay corrosión.</p> <p>Si $PSI > 6,5$ indica tendencia a la corrosión.</p>
Agresividad***	$AI = pH_{actual} + C + D$ $C = \log(Ca)$ $D = \log(\text{Alcalinidad})$	<p>Este índice se deriva del pH actual, la alcalinidad total y la dureza al calcio. Es más simple de usar, sin embargo, es menos exacto respecto al índice de</p>

		<p>Langelier.</p> <p>Si $AI < 10$, indica que el agua es altamente agresiva.</p> <p>Si $10 < AI < 12$, indica que el agua es medianamente agresiva.</p> <p>Si $AI > 12$, indica que el agua no es corrosiva.</p>
<p>Índice de Larsson & Skold**</p>	$L\&SKI = \frac{(Cl^{-} + SO_4^{2-})}{(HCO_3^{-} + CO_3^{2-})}$	<p>Este índice considera los cloruros, los sulfatos y la alcalinidad total. Es útil para aguas equilibradas y también las depuradas, en especial las aguas frías ($< 20^{\circ}C$). Con aguas con alcalinidad muy baja (aguas desaladas) o alcalinidad muy alta no funciona bien.</p> <p>Si $L\&SKI < 0,8$, no hay corrosión.</p> <p>Si $0,8 < L\&SKI < 1,2$, corrosión significativa.</p> <p>Si $L\&SKI > 1,2$ la corrosión es elevada.</p>

Fuente: *De SOUSA C. et. al. Corrosión e incrustaciones en los sistemas de distribución de agua potable: Revisión de las estrategias de control. En Boletín de Malariología y Salud Ambiental. Vol. I, No. 2, agosto – diciembre, 2010. En línea: http://www.scielo.org.ve/scielo.php?pid=S1690-46482010000200003&script=sci_arttext

ROBERGE P. Handbook of Corrosión Engineering. McGraw-Hill. New York, 2000.

Varo Galvañ P., Chillón M. F. & Prats D. (2004). Características Físicoquímicas de las Aguas A blandadas. Ingeniería Química. Universidad de Alicante. 146-150. Disponible en:

<http://www.inese.es/html/files/pdf/amb/iq/409/09ARTICULOEN.pdf>

** GUEVARA A. Control anticorrosivo en tuberías de producción de un pozo productor de crudo del campo cononaco. Quito, 2013, 59-60 p. Tesis de grado. Universidad Tecnológica Equinoccial. Facultad de Ciencias de la Ingeniería. Carrera de tecnología de Petróleos.

***HACH. Langelier and Agressive Indices. Method 8073. Disponible en: <http://www.hach.com/quick.search-quick.search.jsa?keywords=langelier+and+agressive+indices>

4.3 SELECCIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS PARA TRATAR EL FLOWBACK EN COLOMBIA

Para la selección de las tecnologías para el tratamiento de flowback en los yacimientos no convencionales en Colombia, se plantea un análisis de sensibilidad de cada uno de los índices anteriormente explicados para identificar cuál o cuáles son los parámetros fisicoquímicos que más inciden en éstos y así, de acuerdo a la revisión bibliográfica, determinar que tecnologías son las idóneas para llevar a cabo el tratamiento y generar un afluyente con buena calidad. También se plantea sensibilizar la temperatura para determinar en qué condiciones los índices de estabilidad muestran el comportamiento del agua más crítico.

Para el desarrollo del análisis de sensibilidad de los parámetros que constituyen cada índice, se establecieron tres escenarios: el primero considera un aumento del 25% de cada variable o componente (TDS, calcio, etc.); el segundo es el escenario base el cual considera la composición fisicoquímica inicial de los componentes que afectan a cada índice y que se encuentra consignado en la tabla 18 y por el último, el tercer escenario considera una disminución del 60% de cada componente involucrado en los índices. Además, la temperatura a la cual se hizo el cálculo de cada uno de los índices fue de 30°C (303 °K).

El primer índice analizado fue el de Langelier el cual depende del pH y el pHs, este último a su vez es dependiente de las siguientes variables: TDS, Ca^{2+} y alcalinidad al CaCO_3 . Primero se calculó el término pHs como se observa en la tabla 23 variando cada uno de los parámetros que lo influyen en los escenarios anteriormente propuestos (tabla 20). Para el cálculo del pHs se debe calcular los términos pK_2 , pK_s y pfm teniendo en cuenta las formulas planteadas en la tabla 19.

Tabla 20. Parámetros que influyen en el del índice de Langelier en los tres escenarios propuestos

Variable	Disminución 60%	Aumento 25%	Base
Ca	508	1587,5	1.270
Alcalinidad	162,4	507,5	406
TDS	13206	41268,75	33.015

Tabla 21. Valores obtenidos para el cálculo de pHs

pK₂	10,2890
pK_s	8,5088
E	76,5379
A	0,5153

El cálculo del termino I está influenciado por el TDS, por lo cual se debe tener en cuenta los tres escenarios planteados. Los resultados se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 22. Valores obtenidos parámetros I y pfm

Cálculo I		pfm	
Disminución 60%	0,33015	Disminución	0,08901
Aumento 25%	1,03172	Aumento	-0,04984
Base	0,82538	Base	-0,00230

Tabla 23. Cálculo de pHs

Variable	Cálculo pHs		
	Disminución 60%	Aumento 25%	Base
Ca	7,0831	7,5780	7,4811
Alcalinidad	7,0831	7,5780	7,4811
TDS	7,9376	7,2434	7,4811

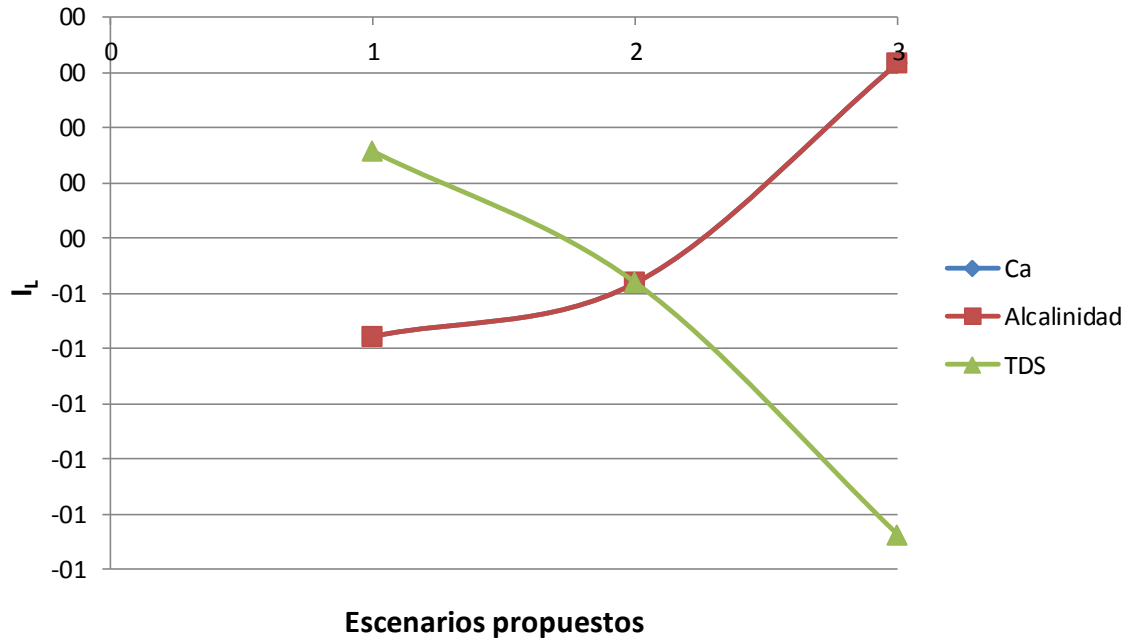
Finalmente se hace el cálculo del índice de Langelier.

Tabla 24. Cálculo del índice de Langelier

Variable	Cálculo IL		
	Disminución 60%	Aumento 25%	Base
Ca	-0,0831	-0,5780	-0,4811
Alcalinidad	-0,0831	-0,5780	-0,4811
TDS	-0,9376	-0,2434	-0,4811

Conforme a los datos presentados en la tabla 24, se observa que el TDS es la variable más sensible en el cálculo del Índice de Langelier seguido por el ion Calcio (Ca) y la alcalinidad al CaCO_3 . Para el escenario de aumento, el calcio y la alcalinidad obtuvieron los valores más altos respecto a las demás variables: -0,5780 cada uno. Para estos valores, el agua tendría una tendencia agresiva. Por su parte, en el escenario de disminución, se puede encontrar que el Ca y la alcalinidad presentan valores muy cercanos al rango óptimo del índice: -0,0831 cada uno. Estos valores indican que el agua está en equilibrio (no se precipita ni se disuelve). Para el caso del TDS en este mismo escenario se observa que tiene un valor en el cual el agua se caracteriza por ser agresiva. Finalmente, para el escenario base, el valor del índice de Langelier es -0,4811, este valor indica que el agua se encuentra sobresaturada y por tanto, el CaCO_3 se deposita, lo que significa que el agua es también agresiva a estas condiciones.

Figura 14. Diagrama de araña índice de Langelier



Con base en la figura 14, se puede observar que el TDS es el parámetro que más afectó al índice de Langelier debido a que la línea de tendencia presenta una pendiente más pronunciada que la de las demás variables y además, está acorde con los datos presentados en la tabla 24. Es importante tener claro que el escenario de aumento en la gráfica se presenta con el número “1”, el escenario base con el número “2” y el escenario de disminución con el número “3” para la representación de este índice y de los demás.

De esta forma, las tecnologías seleccionadas deben estar enfocadas en remover el calcio, la alcalinidad y el TDS hasta la concentración adecuada, para lograr diseñar un fluido de fractura en base a flowback que cumpla con los parámetros de operación.

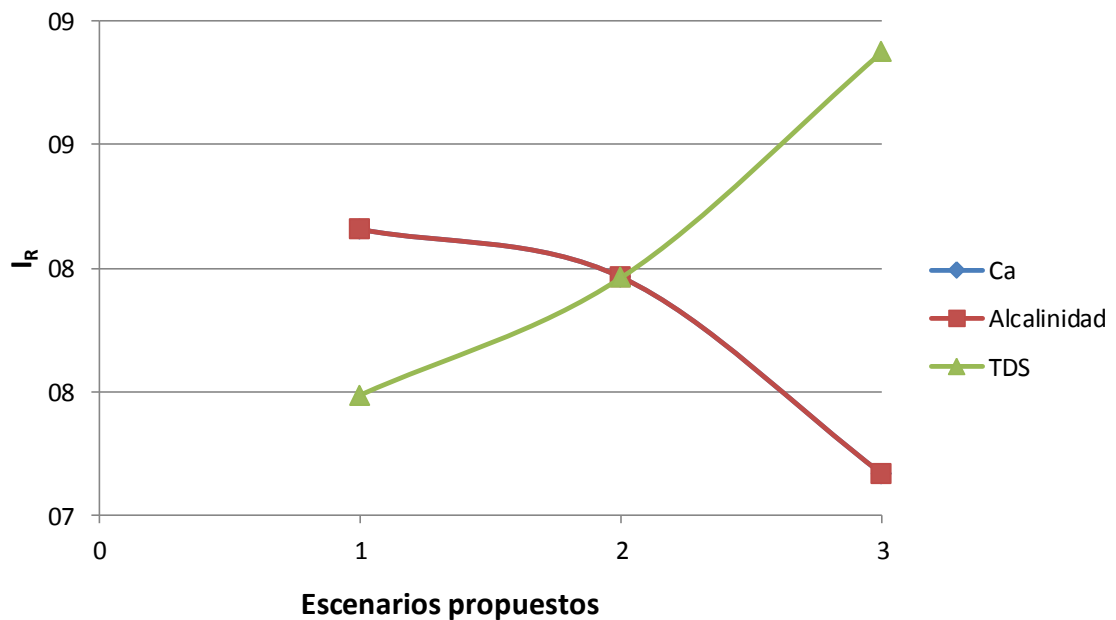
El segundo índice analizado fue el de Ryznar. Para este caso, éste índice está en función del pH y el pHs, este último a su vez depende de las siguientes variables: TDS, Ca^{2+} y alcalinidad al CaCO_3 . El cálculo del término pHs se hizo de la misma manera como se hizo para el índice de Langelier (de la tabla 20 a la 23). En la tabla 25 se muestran los resultados obtenidos del índice de Ryznar en los tres escenarios propuestos.

Conforme a los cálculos mostrados la tabla 25, para el caso base, el agua es corrosiva. Para el escenario de disminución se puede observar que el TDS es el valor más alto respecto a las demás variables (8,8752), por tanto el agua es corrosiva. Por su parte, tanto el calcio como la alcalinidad tienen valores que hacen que el agua se encuentre casi en equilibrio. Para el escenario de aumento se observa que la variación de cada uno de los parámetros da como resultado que el agua sea corrosiva.

Tabla 25. Cálculo del índice de Ryznar

Variable	Cálculo IR		
	Disminución 60%	Aumento 25%	Base
Ca	7,1663	8,1560	7,9621
Alcalinidad	7,1663	8,1560	7,9621
TDS	8,8752	7,4868	7,9621

Figura 15. Diagrama de araña índice de Ryznar



En la gráfica 15 se puede observar con mayor claridad que el TDS es el parámetro que más afecta al índice de Ryznar. También es importante resaltar que tanto el calcio como la alcalinidad son variables a tener en cuenta para la selección de la tecnología para el tratamiento del flowback.

El tercer índice que se analizó fue el de Puckorious, el cual está en función del pH y el pHeq, siendo este último término dependiente de la alcalinidad al CaCO_3 . El cálculo del termino pHs se hizo de la misma manera como se hizo para el índice de Langelier y Ryznar. El cálculo del pHeq también se fundamentó en los tres escenarios propuestos como se puede observar en la tabla 25. En la tabla 26 se muestran los resultados obtenidos del índice de Puckorious en los tres escenarios propuestos.

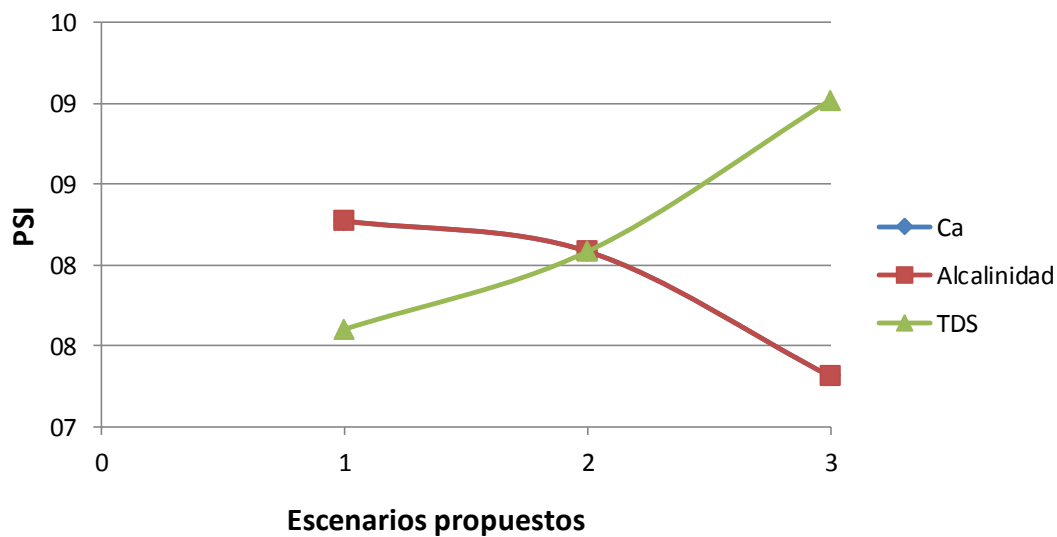
Tabla 26. Cálculo del término pHeq

Cálculo pHeq			
Variable	Disminución 60%	Aumento 25%	Base
Alcalinidad	6,8552	6,8846	6,8790

Tabla 27. Cálculo del índice de Puckorius

Variable	Cálculo PSI		
	Disminución 60%	Aumento 25%	Base
Ca	7,3110	8,2714	8,0832
Alcalinidad	7,3110	8,2714	8,0832
TDS	9,0200	7,6022	8,0832

Figura 16. Diagrama de araña índice de Puckorius



De acuerdo a los valores obtenidos en el escenario base y conforme a lo establecido en la tabla 27, se puede determinar que el agua posee tendencia a la

corrosión. Para el escenario de aumento, los valores obtenidos del índice de Puckorius indican que el agua sigue siendo corrosiva, en este caso los valores oscilan entre 7,6 y 8,2. Para el escenario de disminución se puede observar que el agua sigue siendo corrosiva. También es importante resaltar con base en la figura 16 que la alcalinidad, el TDS y el ion calcio tienen una incidencia similar en el cálculo del índice de Puckorius.

El cuarto índice que se analizó fue el índice de agresividad el cual depende del pH actual, el Ca y la alcalinidad. En la tabla 28 se muestra el análisis de sensibilidad para los parámetros que inciden en este índice.

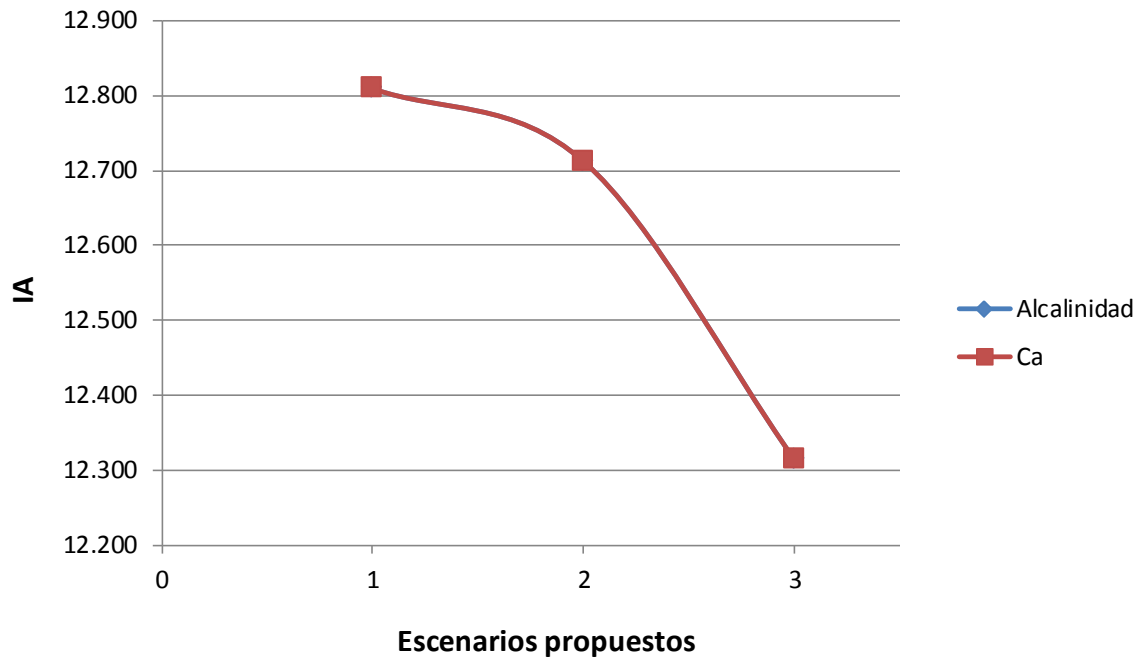
Tabla 28. Valores de los parámetros que inciden en el índice de agresividad

Variable	Disminución 60%	Aumento 25%	Base
Ca	508	1587,5	1.270
Alcalinidad	162,4	507,5	406

Tabla 29. Cálculo del índice de Agresividad

Variable	Calculo AI		
	Disminución 60%	Aumento 25%	Base
Ca	12,3144	12,8092	13
Alcalinidad	12	13	13

Figura 17. Diagrama de araña índice de agresividad



En la tabla 29 se puede observar que para el escenario base, el agua no es corrosiva ($AI > 12$). Para el escenario de disminución se puede observar que el valor permanece similar independiente del parámetro que se haya sensibilizado, sin embargo, al sensibilizar el parámetro Ca se puede observar que el agua deja de ser corrosiva. Para el escenario de aumento se puede observar que el agua no es corrosiva para cada uno de los parámetros sensibilizados. La figura 17 muestra que tanto la alcalinidad como el calcio varían de manera similar.

El último índice analizado fue el de Larson & Skold el cual está en función del cloruro (CL^-), el sulfato (SO_4^{2-}), el bicarbonato (HCO_3^-) y el dióxido de carbono (CO_2^{2-}). Para trabajar este índice, la concentración debe estar en meq/L y para obtener esta concentración se debe dividir la concentración en mg/L en el peso equivalente. Para hallar el peso equivalente se divide la masa atómica sobre la

valencia. En la tabla 30 se puede observar estos cálculos para cada uno de los parámetros que afectan a este índice.

Tabla 30. Valores de los parámetros que incide en el índice de Larson & Skold

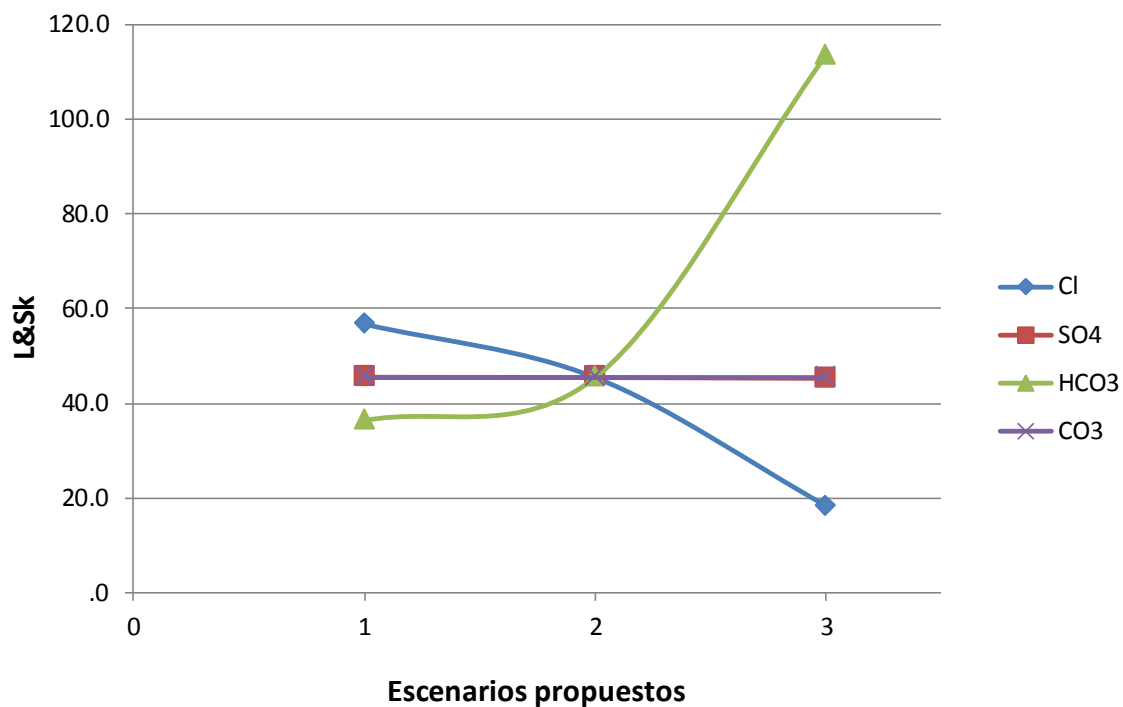
Variable	Disminución 60% (meq/L)	Aumento 25% (meq/L)	Base (meq/L)
Cl	217,956	681,113	544,890
SO ₄	1,357	4,242	3,394
HCO ₃	4,825	15,078	12,062
CO ₃	0,000	0,000	0,000

Tanto en la tabla 31 como en la figura 18 se puede observar que los parámetros que más inciden en el índice de Larson & Skold son el ion cloruro y el ion bicarbonato, por tanto las tecnologías que se escojan deben estar enfocadas en la remoción de estos iones. También es importante resaltar que en todos los escenarios propuestos, el agua es corrosiva en gran proporción.

Tabla 31. Cálculo del índice Larson & Skold

Variable	Disminución 60%	Aumento 25%	Base meq/L
Cl	18,3506	56,7478	45,4545
SO ₄	45,2857	45,5249	45,4545
HCO ₃	113,6364	36,3636	45,4545
CO ₃	45,4545	45,4545	45,4545

Figura 18. Diagrama de araña índice de Larson & Skold



A modo de resumen, en la tabla 32 se muestra cuáles fueron las variables que más incidieron en los diferentes índices sensibilizados:

Tabla 32. Parámetros que más afectan a los índices propuestos

Índice	Parámetros que más influyen
Langelier	Alcalinidad, Calcio, TDS
Ryznar	Alcalinidad, Calcio, TDS
Puckorius	Alcalinidad, Mg^{2+} , SO_4^{2-}
Agresividad	Calcio, alcalinidad
Larson & Skold	HCO_3^- , Cl

También se realizó un análisis a diferentes condiciones de temperatura a la cual pueden determinarse los índices de estabilidad del agua. Para este caso, se trabajó con los índices de Langelier, Ryznar y Puckorius. Se plantearon cuatro escenarios de temperatura: 303 °K, 333 °K, 363 °K y 383°K. En la tabla 33 se puede observar los resultados obtenidos.

Tabla 33. Resultados obtenidos de los índices de estabilidad del agua a diferentes condiciones de temperatura.

Temperatura [°K]	I. Langelier	I. Ryznar	PSI
303	-0,5	6,5	6,3
333	-0,2	6,8	5,7
363	0,1	7,1	5,2
383	0,3	7,3	4,8

Figura 19. Índice de Langelier a diferentes condiciones de temperatura

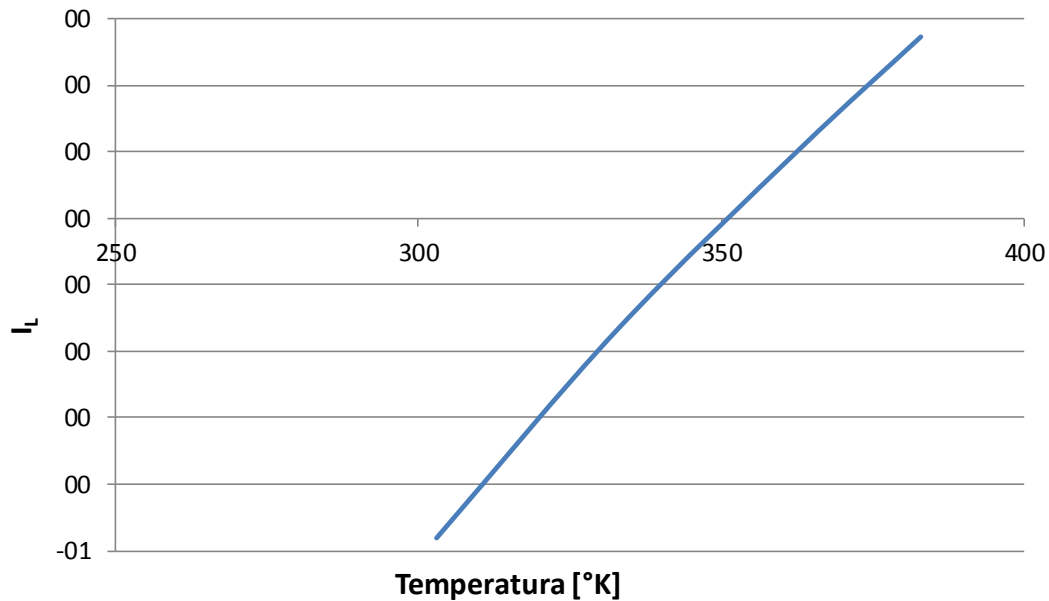


Figura 20. Índice de Ryznar a diferentes condiciones de temperatura

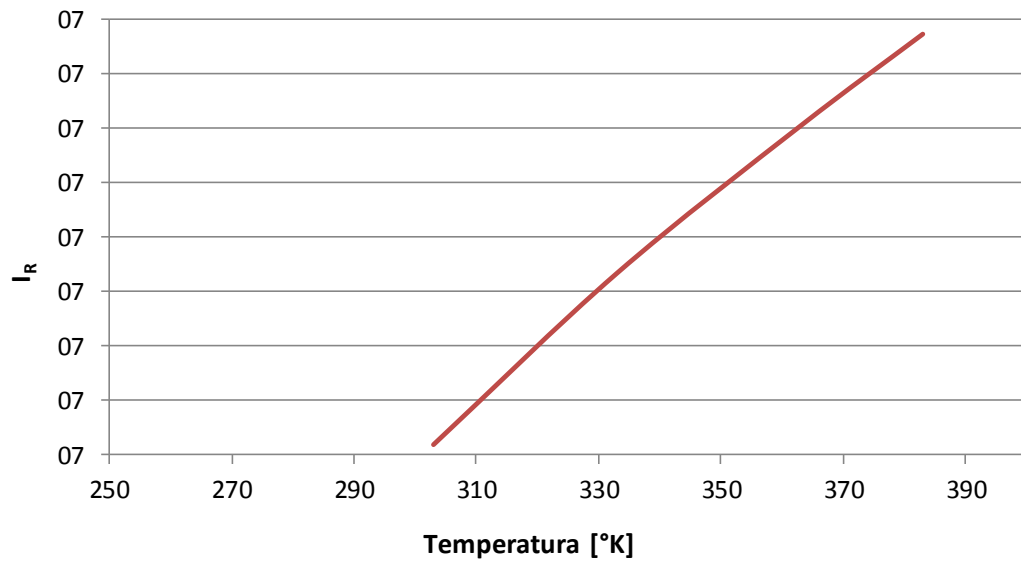
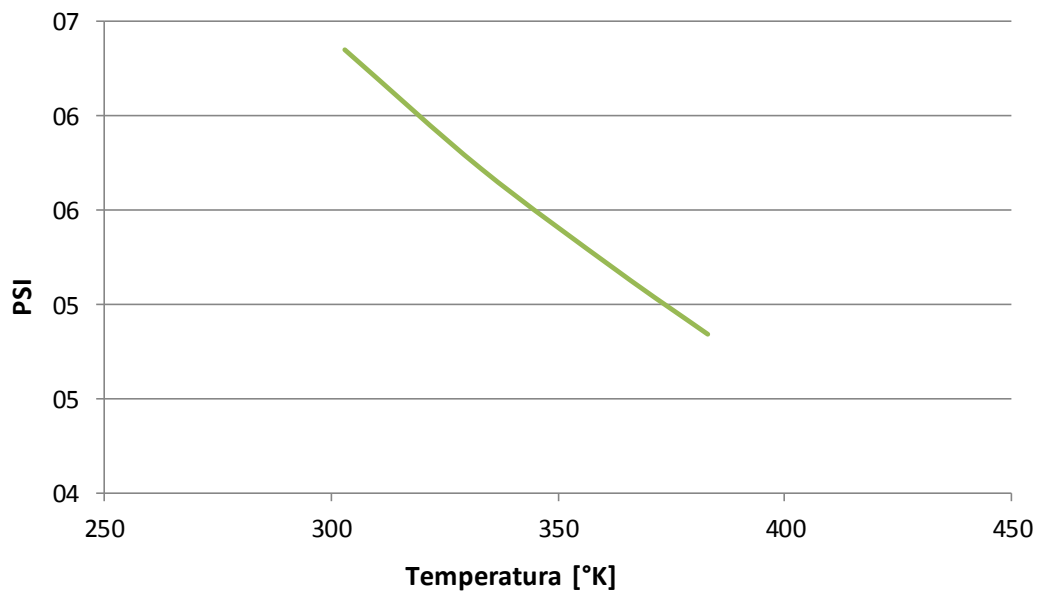


Figura 21. Índice de Puckorious a diferentes condiciones de temperatura



Conforme a los resultados obtenidos de la tabla 33 y las gráficas 19, 20 y 21 se puede concluir lo siguiente:

- Para el caso del Índice de Langelier, a medida que aumenta la temperatura, el comportamiento del agua pasa de ser agresiva (temperaturas entre 300°K y 335°K aproximadamente) a ser incrustante (temperaturas mayores a 360°K aproximadamente), es decir, el valor del índice aumenta. El rango adecuado para que el agua se encuentre en equilibrio es cuando $I_L = 0$. Algunos autores afirman que el agua sigue estando en equilibrio cuando el I_L se encuentre entre -0,3 y 0,3.
- En el caso del Índice de Ryznar, el agua deja de ser incrustante y llega a ser corrosiva a medida que la temperatura aumenta. Es importante recordar que el agua se encuentra en equilibrio para valores de I_R entre 6 y 7 (hasta $T = 350^\circ\text{K}$ aproximadamente).
- Para el caso del índice de Puckorius, a medida que aumenta la temperatura, el valor del índice disminuye y por lo tanto, el agua tiene tendencia incrustante. El agua se encuentra en equilibrio para valores del índice entre 4,5 y 6,5.

Hay que recordar que el objetivo de este proyecto de investigación es el re-uso del flowback para etapas posteriores de fracturamiento hidráulico, por lo tanto en ciertos casos no es necesaria la remoción de todos los contaminantes que puedan estar presentes. Por ejemplo, la presencia de calcio en el agua puede incidir de dos maneras: 1) afecta el desempeño reológico del fluido de fractura pero depende de la concentración y del tipo de fluido que se esté utilizando y 2) Tiende a formar incrustaciones inorgánicas de tipo carbonato de calcio, para lo cual se debe tratar mediante alguna tecnología de tratamiento como también utilizando inhibidores de incrustaciones que mitiguen su efecto. También es importante considerar otros contaminantes para la selección de las tecnologías para tratamiento de flowback como el caso del hierro, el cual normalmente se remueve aunque esto depende nuevamente del fluido de fractura con el que se esté trabajando.

El primer criterio utilizado para seleccionar las tecnologías para el tratamiento de flowback de un yacimiento no convencional en Colombia es el rango de TDS de la alimentación, el cual es un valor alto para este caso (33.015 mg/L), con lo cual el número de tecnologías para poder tratar este flowback se restringe a un grupo reducido. Entre las tecnologías que podrían ser aptas para poder llevar a cabo este tratamiento conforme a las especificaciones anteriormente dadas (sensibilidad de los índices de estabilidad del agua, demás contaminantes contemplados en la tabla 18, el anexo A y la capacidad de tratamiento) se encontrarían algunas de las tecnologías térmicas como por ejemplo la Dewvaporation, la destilación por compresión de vapor y la destilación flash multi etapa; la osmosis inversa y la destilación con membranas (combinación de tratamientos físicos y térmicos).

Para este caso, la combinación de dos o más tecnologías no sería viable debido a que las tecnologías térmicas anteriormente seleccionadas tienen la ventaja que el flowback no requiere pretratamiento, o si lo requiere, es un proceso sencillo sin gran uso de químicos. Caso particular ocurre con la osmosis inversa, ya que ésta podría combinarse con otra tecnología para lograr un efluente de alta calidad, sin embargo, lo que se busca no es obtener un efluente de muy alta calidad como sería el caso para vertimiento, debido a que eso implicaría que los costos del tratamiento se eleven. De esta manera, el efluente obtenido por la RO podría presentar una buena estabilidad a la hora de diseñar un fluido de fractura mediante la adición de inhibidores de corrosión y/o incrustaciones como ya se ha demostrado en algunas partes del mundo. Teóricamente, la composición fisicoquímica que presentaría el efluente luego de ser tratado por cada una de las tecnologías preseleccionadas para el tratamiento sería el que se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 34. Composición teórica del afluente y del efluente

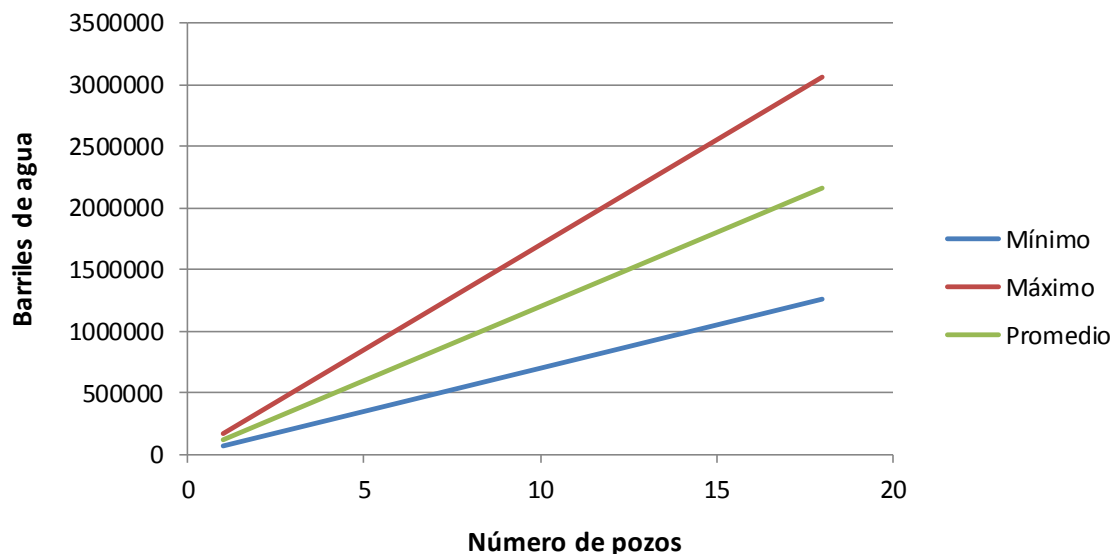
Composición fisicoquímica [mg/L]	Afluente	Efluente				
		RO	MD	DV	MVC	MSF
Aluminio	<1000	200	180	130,0	100	40
Arsénico	<25	-	2,3	3,3	2	1
Bario	10	200	0,9	1,3	0,1	0,4
Boro	711	60	64	92,4	0,4	28,44
Cadmio	<20	0,2	0,2	2,6	2	0,8
Calcio	1.270	1118	114,3	165,1	3,2	50,8
Cromo	55	6,6	5	7,2	5,5	2,2
Cobre	<130	25	11,7	16,9	6,5	5,2
Estroncio	203	26	18,3	26,4	0,5	8,1
Hierro	112	100	10,1	14,6	0,1	4,5
Magnesio	111	13,3	10	14,4	0,4	4,4
Manganeso	1,2	0,1	0,11	0,2	0,1	0,05
Mercurio	<0,2	0,2	0,2	0	0,01	0,1
Molibdeno	<50	12	4,5	6,5	2,5	2
Níquel	<200	28	20	26	10	8
Potasio	192	23	17,3	25	0,5	7,7
Plata	<50	6	4,5	6,5	3	2
Residuos	22,4	3	2	2,9	0,1	0,9
Selenio	<25	3	4	3,3	1,2	1
Sodio	10.900	1308	981	1417	14,3	436
Zinc	<100	12	14	13,0	5	4
Alcalinidad (mg/L CaCO ₃)	406	48,7	36,5	52,8	263	16,2
Cloruros	19.318	966	1738,6	2511,3	966	772,72
Nitrógeno	19,3	9,3	1,7	2,5	1	0,772
Sílice	148	17,7	13,3	19,2	7,4	5,92
Sulfato	163	0,43	14,7	21,2	6	6,52
Bicarbonato	736	88,3	66,2	95,7	36,8	29,44
TOC	612	100	55	79,6	22	24,48
pH	7	7	6,8	6,7	7	7
Turbidez (NTU)	>100	80	90	13	5	4
Conductividad (µs/cm)	37.000	30.000	28.000	4810	267	1480
TSS	840	101	75,6	109,2	9	33,6
TDS	33.015	3301,5	2971,4	4292	171	1320,6

4.4 FACTIBILIDAD ECONOMICA DE LAS TECNOLOGIAS SELECCIONADAS PARA EL TRATAMIENTO DE FLOWBACK

La proyección de demanda de agua para fracturamiento hidráulico en yacimientos no convencionales en Colombia se espera que sea cada más más grande conforme aumentan los proyectos y el número de pozos que se quieren completar por medio de esta técnica. La figura 22 muestra el aumento considerable de agua que se podría tener respecto al número de pozos en tres escenarios en los cuales se consideraron los siguientes datos ⁸⁶:

- Barriles de agua por etapa: 10.000 bbl
- Número de etapas mínima: 7
- Número de etapas máxima: 17

Figura 22. Escenarios de demanda de agua para fracturamiento hidráulico



⁸⁶ OSISANYA S. et. al. Evaluation of cementing and stimulation techniques for horizontal Wells drilled in unconventional shale formations. En Society of Petroleum Engineers, SPE 172162 MS, 2014.

Con los datos anteriores se calcula el volumen requerido de agua por pozo para cada uno de los escenarios anteriormente mencionados en función del número de pozos estimulados.

Con un total de 18 pozos completados por fracturamiento hidráulico, el consumo de agua ascendería a 1'260.000 barriles para el escenario mínimo, 3'060.000 barriles de agua para el escenario máximo y 2'160.000 barriles de agua para el escenario promedio. Esto muestra una gran tendencia del uso del agua en un futuro, lo cual hace inminente la reutilización de los volúmenes residuales generados en la industria para convertirlos en activos de interés para nuevos procesos de fracturamiento. De este modo, es importante establecer los costos de las tecnologías que anteriormente fueron seleccionadas para poder escoger cual es la mejor opción.

Inicialmente se debe conocer el volumen de agua que ha retornado a superficie como flowback después de una etapa de fracturamiento. Para esto y conforme a los datos del shale de Eagle Ford encontrados en la literatura, se parte de los tres datos anteriormente especificados (barriles de agua por etapa, número de etapas mínimas y máximas)⁸⁷ para calcular lo siguiente:

- Volumen de agua mínima por pozo: 70.000 bbl
- Volumen de agua máxima por pozo: 170.000 bbl

Con estos dos datos se calcula el valor promedio el cual es 120.000 barriles de agua por pozo. Se asume que el volumen que retorna a superficie es el 15%⁸⁸ de lo que se inyectó, por consiguiente, el volumen de flowback es de 18.000 bbl/pozo, es decir, la cantidad que se debe tratar.

⁸⁷ OSISANYA S. et. al. Op. cit.

⁸⁸ HALLIBURTON. Produced and flowback water recycling and reuse. Economics, limitations and technology. En Society of Petroleum Engineers, Oil and Gas Facilities, Febrero de 2014. Disponible en: http://www.spe.org/ogf/print/subscribers/2014/02/07_Feat_Unconventional.pdf

Conocido este dato, se analizará a continuación el costo de cada una de las tecnologías seleccionadas las cuales se relacionan a continuación:

- Osmosis inversa.
- Destilación por membranas.
- Dewvaporation.
- Destilación por Compresión mecánica de vapor.
- Destilación Flash Multi etapa.

Es importante aclarar que el costo total que se presenta en cada una de las tablas hace referencia a que la tecnología de tratamiento se encuentra ubicada en el pozo. En caso contrario, el costo de la implementación de esta tecnología se incrementaría. El dato del costo unitario variable de energía asumido para los cálculos fue de 479,0784 COP/kWh.⁸⁹ Los costos de operación están tasados para un año. Finalmente la tasa de cambio que se utilizó para un dólar fue de COP 2.300.

En la tabla 35 se puede detallar el costo que implicaría implementar un tratamiento físico de osmosis inversa. El costo de que se asume en químicos se basa en el pretratamiento que el afluente requiere para que pueda ingresar con la calidad adecuada al sistema de tratamiento para no afectar la eficiencia del proceso. También es importante aclarar que la capacidad que posee esta planta de tratamiento es de 17.000 barriles de agua por día, la cual fue implementada en el shale de Barnett.

⁸⁹ Electrificadora de Santander S.A. E.S.P. – ESSA. Tarifas, mayo 2015. Disponible en: http://www.essa.com.co/site/Portals/14/Docs/Tarifas/tarifas%202015/Tarifa_ESSA_201505.pdf

Tabla 35. Costos de implementación Ósmosis inversa

Implementación Ósmosis Inversa			
Costo Capital	US\$/bbl	US\$	COP
Equipos, infraestructura equipos, Red eléctrica de alimentación, adjudicación terrenos, instalación de equipos, almacenamiento.	\$ 0,94	\$ 16.920	\$ 38.916.000
Total		\$ 16.920	\$ 38.916.000
Costo de operación			
Mantenimiento y otros	\$ 0,03	\$ 540	\$ 1.242.000
Consumo Energía			\$ 251.803.607
Químicos (US\$/Ton)*		\$ 5.000	\$ 11.500.000
Total			\$ 264.545.607
Total implementación RO en sitio			\$ 303.461.607

Fuente: Autor. Datos tomados de:

* ALL CONSULTING. Shale gas produced water treatment catalog. Water treatment technology fact sheet: reverse osmosis. Disponible en: <http://www.all-llc.com/publicdownloads/ReverseOsmosisFactSheet.pdf>

** COLORADO SCHOOL OF MINES. An Integrated Framework for Treatment and Management of Produced Water. RPSEA Proyecto 07122-12, Primera edición. Noviembre, 2009.

En la tabla 36 se puede observar los costos asociados a la implementación de la destilación por membranas como tecnología para tratamiento de flowback en los yacimientos no convencionales en Colombia.

Es importante resaltar que el consumo de químicos para esta tecnología es menor que el consumo presentado en la osmosis inversa ya que el número de químicos utilizados es menor (su uso se restringe a la re-mineralización y la estabilización del pH posterior al tratamiento). Esta tecnología posee una capacidad de tratamiento de alrededor 24.000 barriles por día de agua.

Tabla 36. Costos de implementación Destilación por membranas

Implementación Destilación por membranas			
Costo Capital	US\$/bbl	US\$	COP
Equipos, infraestructura equipos, Red eléctrica de alimentación, adjudicación terrenos, Instalación de equipos.	\$ 0,15	\$ 2.700	\$ 6.210.000
Total		\$ 2.700	\$ 6.210.000
Costo de operación			
Mantenimiento y otros	\$ 0,06	\$ 1.080	\$ 2.484.000
Consumo Energía			\$ 62.950.902
Químicos (US\$/Ton)*		\$ 3.200	\$ 7.360.000
Total			\$ 72.794.902
Total implementación MD en sitio			\$ 79.004.902

Fuente: Autor. Datos tomados de: COLORADO SCHOOL OF MINES. An Integrated Framework for Treatment and Management of Produced Water. RPSEA Proyecto 07122-12, Primera edición. Noviembre, 2009.

Tabla 37. Costos de implementación Dewvaporation

Implementación Dewvaporation			
Costo Capital	US\$/bbl	US\$	COP
Equipos, infraestructura equipos, Red eléctrica de alimentación, adjudicación terrenos, Instalación de equipos.	\$ 4,50	\$ 81.000	\$ 186.300.000
Total		\$ 81.000	\$ 186.300.000
Costo de operación			
Mantenimiento y otros	\$ 2,00	\$ 36.000	\$ 82.800.000
Consumo Energía			\$ 3.777.054.106
Químicos (US\$/Ton)*		\$ 0	\$ 0
Total			\$ 3.859.854.106
Total implementación Dewvaporation en sitio			\$ 4.046.154.106

Fuente: Autor. Datos tomados de *U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation. Dewvaporation desalination 5.000-gallon-per-day pilot plant. Reclamation, managing water in the west, junio 2008. Disponible en: <https://www.usbr.gov/research/AWT/reportpdfs/report120.pdf>

En la tabla 37 se puede observar los costos asociados a la implementación de la Dewvaporation como tecnología para tratamiento de flowback. En este caso, es importante tener en cuenta que se debe re-mineralizar el agua que sale del sistema. También el costo asociado a los químicos utilizados en esta tecnología de tratamiento son cero, lo cual puede ser un punto a favor en ciertas situaciones.

Tabla 38. Costos de implementación Destilación por compresión de vapor

Implementación Destilación por compresión de vapor			
Costo Capital	US\$/bbl	US\$	COP
Equipos, infraestructura equipos, Red eléctrica de alimentación, adjudicación terrenos, Instalación de equipos.	\$ 190	\$ 3.420.000	\$ 7.866.000.000
Total		\$ 3.420.000	\$ 7.866.000.000
Costo de operación			
Mantenimiento y otros	\$ 0,08	\$ 1.440	\$ 3.312.000
Consumo Energía			\$ 4.091.808.614
Químicos (US\$/Ton)*		\$ 0	\$ 0
Total			\$ 4.095.120.614
Total implementación VCD, MVR en sitio			\$ 11.961.120.614

Fuente: Autor. Datos tomados de *COLORADO SCHOOL OF MINES. An Integrated Framework for Treatment and Management of Produced Water. RPSEA Proyecto 07122-12, Primera edición. Noviembre, 2009.

En la tabla 38 se puede detallar los costos asociados a la implementación de la Destilación por compresión de vapor como alternativa al tratamiento de flowback para yacimientos no convencionales en Colombia. Esta tecnología ha tenido éxito en diversos lugares del mundo, entre ellos la planta de tratamiento llamada Aqua

Pure ubicada en el shale de Barnett. Esta tecnología posee una alta capacidad para tratar agua por día (> 30.000 barriles de agua) generando un efluente de alta calidad.

Finalmente, en la tabla 39 se puede detallar los costos asociados a la implementación de la Destilación flash multi etapa como tecnología alternativa al tratamiento de flowback en Colombia.

Tabla 39. Costos de implementación Destilación flash multi etapa

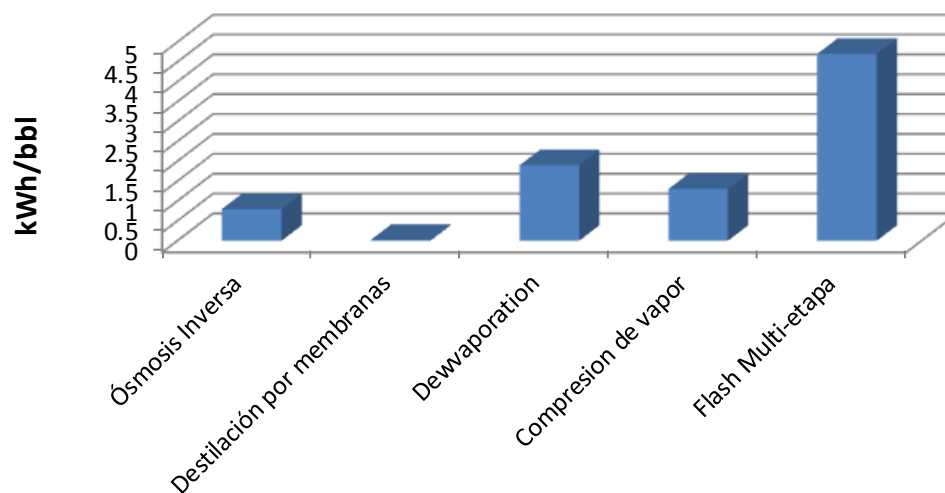
Implementación Destilación flash multi etapa			
Costo Capital	US\$/bbl	US\$	COP
Equipos, infraestructura equipos, Red eléctrica de alimentación, adjudicación terrenos, Instalación de equipos.	\$ 360	\$ 6.480.000	\$ 14.904.000.000
Total		\$ 6.480.000	\$ 14.904.000.000
Costo de operación			
Mantenimiento y otros	\$ 0,12	\$ 2.160	\$ 4.968.000
Consumo Energía			\$ 12.668.868.979
Químicos (US\$/Ton)*		\$ 0	\$ 0
Total			\$ 12.673.836.979
Total implementación MSF en sitio			\$ 27.577.836.979

Fuente: Autor. Datos tomados de *COLORADO SCHOOL OF MINES. An Integrated Framework for Treatment and Management of Produced Water. RPSEA Proyecto 07122-12, Primera edición. Noviembre, 2009.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

La evaluación técnica y económica de cada una de las tecnologías permitirá hacer la selección de la tecnología óptima para el tratamiento de flowback de los yacimientos no convencionales en Colombia.

Figura 23. Consumo de energía de las tecnologías preseleccionadas para el tratamiento



En la figura 23 se puede observar que el consumo de energía es mayor en las tecnologías para tratamiento térmicas, destacándose la destilación flash multi etapa como la tecnología que más consume de las cinco preseleccionadas. Sin embargo, esta tecnología logra un porcentaje de remoción de contaminantes muy alto (> 90%). Cabe resaltar que por medio de las tecnologías térmicas se obtiene un efluente de alta calidad, tanto así que puede ser vertido a cuerpos de agua superficiales sin necesidad de un post tratamiento. Por su parte, la destilación por membranas es la tecnología que menos energía consume, por lo tanto y de

acuerdo a esta variable y su calidad de tecnología térmica, sería la tecnología más adecuada para el tratamiento de flowback.

Figura 24. Costo de capital las tecnologías preseleccionadas para el tratamiento

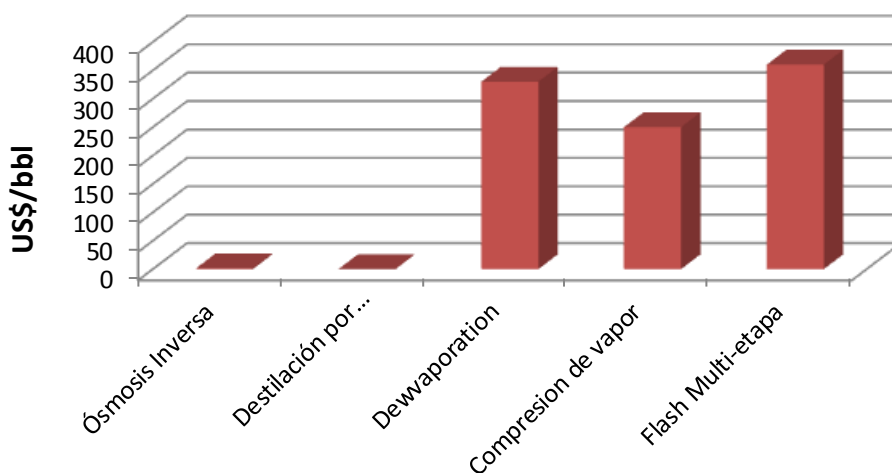


Figura 25. Capacidad de las tecnologías preseleccionadas para el tratamiento

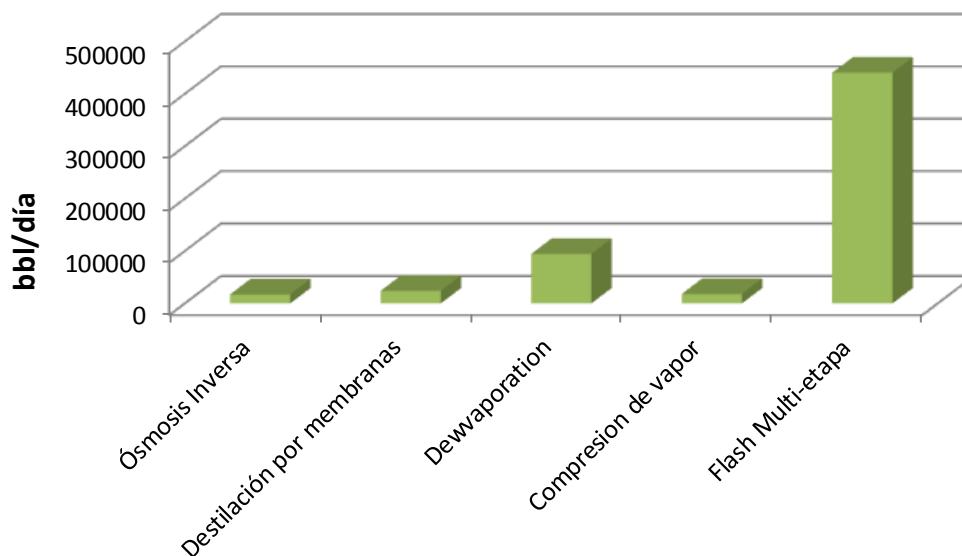
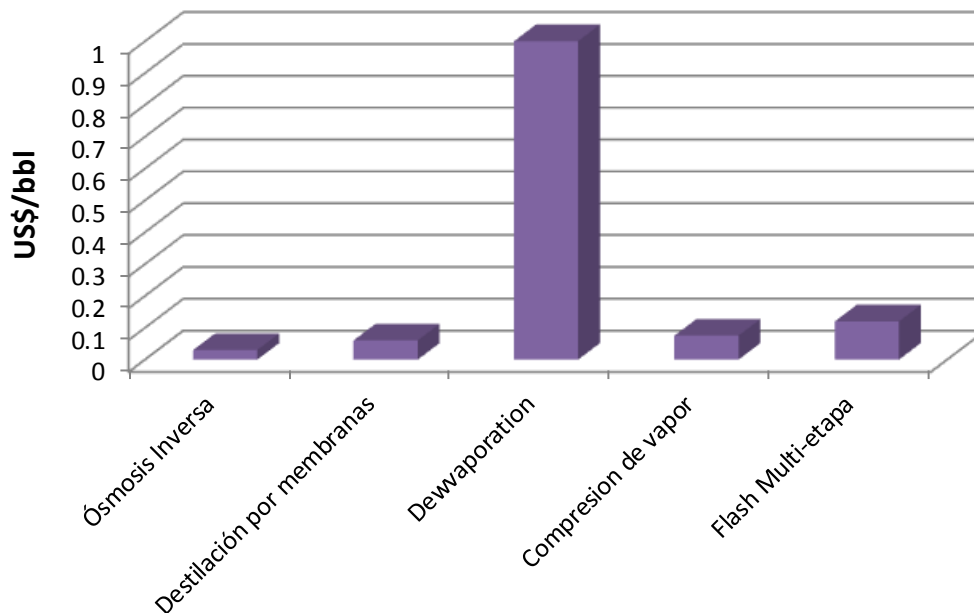


Figura 26. Costos de operación de las tecnologías preseleccionadas para el tratamiento



La figura 24 muestra el costo capital de las tecnologías preseleccionadas en donde se identifica que la inversión para la Dewvaporation, la destilación por compresión de vapor y la destilación flash multi etapa es alta respecto a la de la Ósmosis inversa y la destilación por membranas, por tanto, en este escenario, estas dos últimas tecnologías serían las idóneas para llevar a cabo el tratamiento.

De igual forma, se observa que la destilación flash multi etapa tiene la mayor capacidad por día para tratar flowback (figura 25). Sin embargo, las tecnologías preseleccionadas cuentan con la capacidad de tratar el volumen de agua anteriormente especificado, luego la inversión en una tecnología sobredimensionada no sería tan factible y viable en la parte económica. Para el caso de los costos de operación, la Dewvaporation es la tecnología que tiene los costos de operación más altos en comparación con las demás tecnologías (figura 26) los cuales se asocian principalmente al mantenimiento del sistema de

tratamiento, por lo cual sería la primera opción a descartar ya que se busca una alta eficiencia operacional al menor costo posible.

Finalmente, con base a lo presentado anteriormente, la tecnología óptima para el tratamiento de flowback de los yacimientos no convencionales en Colombia sería la destilación por membranas ya que, además de tener la capacidad de eliminar los contaminantes necesarios para que el flowback posea la composición fisicoquímica adecuada para el diseño de fluidos de fractura, posee la capacidad para tratar el volumen que se requiere. Además, los costos totales para implementar esta tecnología en sitio es el más bajo (COP 79.004.902) respecto a los costos de implementación de las demás tecnologías. También, los costos asociados al consumo de energía son los más bajos respecto a lo que presentan las demás tecnologías (figura 23).

Como segunda opción surge la Ósmosis inversa ya que además de tener la capacidad de remoción de iones monovalentes, divalentes y multivalentes (porcentaje de eliminación > 90%), tiene la capacidad para tratar grandes volúmenes de agua por día como se ha demostrado en numerosos shales alrededor del mundo. El costo de implementación de esta tecnología llegaría a ser de COP 303.461.607.

6. CONCLUSIONES

Las tecnologías para el tratamiento de flowback jugarán un papel importante en la industria petrolera a nivel mundial debido a que constituyen una alternativa que permitirán operaciones más viables ambiental y operacionalmente con la finalidad de suplir la demanda energética.

Con base a los resultados obtenidos del análisis de la composición fisicoquímica inicial del agua de retorno, la sensibilidad de los índices de estabilidad del agua y el análisis económico, la destilación por membranas sería la tecnología óptima para llevar a cabo el tratamiento de flowback de los yacimientos no convencionales en Colombia. Como segunda opción surge la Ósmosis inversa. Cada una de estas tecnologías lograría una eficiencia de remoción mayor de 90% teóricamente.

La Dewvaporation y la destilación flash multi etapa pueden ser consideradas como tecnologías alternativas para el tratamiento de flowback a pesar que su uso no es tan amplio en la industria del petróleo en campo. Se debe tener en cuenta que a pesar que estas tecnologías tienen un alto consumo de energía y un alto costo, estas pueden ser útiles en algunos lugares específicos donde otras tecnologías no lo son, ya que el efluente que se obtiene es de gran calidad.

La alcalinidad al CaCO_3 y el calcio son los parámetros que más afectan a cuatro de los cinco índices de estabilidad analizados en este trabajo de investigación (a excepción del índice de Larson & Skold). Bajo esta premisa, las tecnologías preseleccionadas se basaron en estos parámetros, como también en la concentración de TDS, cloruros, bicarbonatos y contaminantes con concentraciones considerables.

El shale de Eagle Ford es la formación geológica extranjera similar a la formación La Luna. Entre los parámetros de geología y petrofísica con los cuales se determinó tal aseveración son la reflectancia a la vitrinita, la porosidad, el TOC, el tipo de kerógeno, el tipo de hidrocarburo, la permeabilidad y la temperatura.

7. RECOMENDACIONES

Se deben tomar muestras de flowback en yacimientos no convencionales en Colombia y analizar sus características fisicoquímicas con el fin de validar las consideraciones realizadas en este trabajo de investigación para la selección de las tecnologías óptimas para el tratamiento.

Se deben estudiar y analizar otros índices de estabilidad que involucren otros componentes del flowback para tener una data más amplia y de esta forma tener más claridad y exactitud en la selección de las tecnologías para el tratamiento.

Se requiere un estudio detallado de evaluación de riesgos para conocer el impacto ambiental de las tecnologías seleccionadas.

Se recomienda utilizar un software comercial enfocado en el tratamiento de aguas ya que por medio de este se profundizaría más en la caracterización del sistema de tratamiento y su comportamiento durante un lapso determinado.

Se debe realizar un estudio más detallado de las tecnologías que actualmente se utilizan en Colombia para el tratamiento de aguas para identificar las ventajas y los problemas operacionales que han presentado en los procesos.

Ningún proceso de tratamiento de flowback tiene una eficiencia del 100%, por lo tanto se debe considerar los residuos que estos generan, lo cual puede catalogarse como un punto de partida para una investigación enfocada a la optimización de las tecnologías o al manejo y aprovechamiento eficiente de los residuos.



BIBLIOGRAFÍA

ADHMAN S., MATAR M. Water Sustainability and the Petroleum Industry. En Society of Petroleum Engineers, ITPC 13347, 2009.

ALKOUH A. et. al. New advances in shale reservoir analysis using flowback data. En Society of Petroleum Engineers, SPE 165693, 2013.

ALL CONSULTING. Shale Gas Produced Water Treatment Catalog. Disponible en: http://www.all-llc.com/projects/produced_water_tool/page.php?14

ALLEN W. et. al. Water value and environmental implications of hydraulic fracturing: Eagle-Ford shale. Texas Water Resources Institute. Disponible en: <http://twri.tamu.edu/media/469726/tr-466.pdf>

ALTELA INC. AltelaRainSM Produced Water Treatment Technology, Making Water from Waste. International Petroleum Environmental Conference. Houston, Texas. Noviembre, 2006.

ARANGO A. La electrocoagulación: una alternativa para el tratamiento de aguas residuales. Revista Lasallista de Investigación, Volumen 2 No. 1, 2005. Disponible en: <http://www.lasallista.edu.co/fxcul/media/pdf/Revista/vol2n1/electrocoagulacion.pdf>

ARNOLD K. & STEWART M. Surface Production Operations. Design of oil handling systems and facilities. Volumen 1. Tercera edición. Gulf Professional Publishing – Elsevier. ISBN: 978-0-7506-7853-7. Burlington, 2008.



BAHAR R. et al. Performance evaluation of a mechanical vapor compression desalination system. En ScienceDirect, Desalination, Volumen 166. Agosto 2014. 123-127p.

BALCH R. et al. Cost-Efficient Well-Head Purification of Produced Water using a Humidification-Dehumidification Process. En Society of Petroleum Engineers, SPE 169526 MS, 2014.

BLAUCH M. et al. Marcellus Shale Post-Frac Flowback waters – Where is All the Salt Coming from and What are the Implications? En Society of Petroleum Engineers, SPE 125740, 2009.

BLAUCH M.E. Developing effective and environmentally suitable fracturing fluids using hydraulic fracturing flowback waters. En Society of Petroleum Engineers, SPE 131784, 2010.

BLESA M, CYTED. Eliminación de contaminantes por Fotocatálisis heterogénea. Argentina, 2001.

BOYER C. et al. Gas de lutitas: Un recurso global. En Oilfield Review, volumen 23, no. 3, Otoño de 2011.

BOYSEN J. et al. The Current Status of comercial Deployment of the Freeze Thaw Evaporation Treatment Of Produced Water. En Society of Petroleum Engineers, SPE 52700, 1999.

BOYSEN J. The Freeze-Thaw/Evaporation (FTE®) Process for Produced Water Treatment, Disposal and Beneficial Uses. IPEC Conferene. 2007. Disponible en: http://ipec.utulsa.edu/Conf2008/Manuscripts%20&%20presentations%20received/Boysen_37_FreezeThaw.pdf



CAMARA J. Las técnicas de desalación y sus costes. Disponible en: http://www.magrama.gob.es/ministerio/pags/biblioteca/revistas/pdf_Agri%2FAgri_2004_866_746_755.pdf

CARDENAS J. Desarrollo de un modelo analítico para predecir la geometría de fractura y el flujo de fluidos en operaciones de fracturamiento hidráulico con fluidos visco elásticos. Bucaramanga, 2013, 25 p. Tesis de maestría (Ingeniería de Hidrocarburos). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos.

CARDOSO C. et. al. Facilitating treatment of produced water from offshore platforms by an oxidation/coagulation/flocculation approach. En Society of Petroleum Engineers, SPE 153643, 2012.

CERÓN M. et. al. Comparison of reservoir quality of La Luna, Gacheta and Eagle Ford Shale formations: Using Digital Rock Physics. En AAPG Datapages, Search and Discovery. Disponible en: http://www.searchanddiscovery.com/pdfz/documents/2013/50875ceron/ndx_ceron.pdf.html

CHANDRA DAS P. Selection of technology for produced water treatment. En Society of Petroleum Engineers, SPE 151864, 2012.

CIMCOOL. Selección de un inhibidor de corrosión. Disponible en: <http://www.cimcool.ca/uploads/downloads/SelecciondeunInhibidordeCorrosion.pdf>

COLORADO SCHOOL OF MINES. An Integrated Framework for Treatment and Management of Produced Water. RPSEA Proyecto 07122-12, Primera edición. Noviembre, 2009.



CONSEJO NACIONAL DEL PETROLEO (NPC) DE EUA. Unconventional Gas reservoirs. Contribución no. 29, 18 de julio de 2007.

DARWISH M.A. Thermal analysis of vapor compression desalination system. En ScienceDirect, Desalination, Volumen 69, 1998. 275-295p.

De SOUSA C. et. al. Corrosión e incrustaciones en los sistemas de distribución de agua potable: Revisión de las estrategias de control. En Boletín de Malariología y Salud Ambiental. Vol. I, No. 2, agosto – diciembre, 2010. En línea: http://www.scielo.org.ve/scielo.php?pid=S1690-46482010000200003&script=sci_arttext

DONG Z et. al. Probabilistic assessment of world recoverable shale gas resources. En Society of Petroleum Engineers, SPE 167768, 2014.

DORE M. Forecasting the economic cost of desalination technology. En ScienceDirect, Desalination, Volumen 172, Febrero 2005. 207–214p.

DORES R. et al. Using Advanced Water Treatment Technologies to treat Produced Water from the Petroleum Industry. En Society of Petroleum Engineers, 157108, 2012.

ECOLOTRON. Water recovery systems. Treatment of flow back and produced water from the hydraulic fracturing of oil shale – Eagle Ford formation, McMullen County Texas. Eagle Ford analytical results. Disponible en: <http://ecolotron.com/wp-content/uploads/2015/05/EcolotronFlowBack.pdf>

EHLIG ECONOMIDES C. et. al. Water as proppant. En Society of Petroleum Engineers, SPE 147603, 2011.



ELY J et al. Game changing Technology for treating and recycling frac water. Society of Petroleum Engineers, 145454, 2011.

ENERGY & ENVIRONMENT RESEARCH CENTER. Northern Great Plains Water Consortium. Innovative Water Treatment. Freeze-Thaw/Evaporation (FTE). Disponible en: <http://www.undeerc.org/Water/Decision-Support/Treatment-Technologies/Innovative-Water-Treatment.aspx>

EVANS R. Unconventional gas water management: what can be applied from decades of experience with conventional oil produced water management? En Society of Petroleum Engineers, SPE 167808, 2014.

FERNANDEZ – ALBA A. et. al. Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales. Informe de vigilancia tecnológica. CEIM, Dirección General de Universidades e Investigación, 2006.

FONTENELLE L. et. al. Recycling water: case studies in designing fracturing fluids using flowback, produced and nontraditional water sources. En Society of Petroleum Engineers, SPE 165641, 2013.

FORERO J. y ORTIZ O. Aplicación de procesos de oxidación avanzada como tratamiento de fenol en aguas residuales industriales de refinería. En Ciencia, tecnología y futuro (CT&F). Volumen 3 no. 1. Bucaramanga. Diciembre, 2005.

GEZA M. et. al. Decision support tool (DST) for characterization, treatment and beneficial use of unconventional gas frac flowback and produced water. En Society of Petroleum Engineers, SPE 168805, 2013.

GOMAA A. et al. New insights into shale fracturing treatment design. En Society of Petroleum Engineers, SPE 167754, 2014.



GREENLEE L. et al. Reverse osmosis desalination: Water sources, technology and today's challenges. En ScienceDirect, Water Research Volumen 43, Mayo de 2009. 2317–2348p.

GUADLIP A.W. Macellus Shale Water Management Challenges in Pennsylvania. En Society of Petroleum Engineers, SPE 119898, 2008.

GUEVARA A. Control anticorrosivo en tuberías de producción de un pozo productor de crudo del campo cononaco. Quito, 2013, 59-60 p. Tesis de grado. Universidad Tecnológica Equinoccial. Facultad de Ciencias de la Ingeniería. Carrera de tecnología de Petróleos.

GUOHUA C. Electrochemical technologies in wastewater treatment. En ScienceDirect, Separation and Purification Technology, Volumen 38, 2004. 11- 41 p.

HACH. Langelier and Agressive Indices. Method 8073. Disponible en: <http://www.hach.com/quick.search-quick.search.jsa?keywords=langelier+and+agressive+indices>

HAGHSHENAS A. et. al. Effect of disolved solids on reuse of produced water and proppant handling in Hydraulic fracturing Jobs in tight sand gas reservoirs. En Society of Petroleum Engineers, SPE 168614, 2014.

HALLDORSON B. Successful oilfield water management. En American Association of Drilling Engineers. Disponible en: <http://www.aade.org/app/download/7120409804/AADE-13-FTCE-14.pdf>

HALLIBURTON. Produced and flowback water recycling and reuse. Economics, limittions and technology. En Society of Petroleum Engineers, Oil and Gas



Facilities, Febrero de 2014. Disponible en:
http://www.spe.org/ogf/print/subscribers/2014/02/07_Feat_Unconventional.pdf

HARRIS J.B. et. al. Laboratory Evaluation of H₂S bioscavenging in produced water at 60°C. En Society of Petroleum Engineers, SPE 164129, 2013.

HE C. et al. Microfiltration in recycling of Marcellus Shale flowback Water: Solids removal and potential fouling of polymeric microfiltration membranes. En Science Direct, Journal of membrane science, volumen 462, julio 2014, 88-95p.

HOLT P. et. al. The future for electrocoagulation as a localised water treatment technology. En ScienceDirect. Chemosphere, Volumen 59, 2005. 355 – 367 p.

HORNER P. et al. Shale Gas Water Treatment Value Chain – A review of Technologies, including Case Studies. En Society of Petroleum Engineers, SPE 147264, 2011.

HORSFIELD B. et. al. Gas Generation and Retention in the Bakken Shale, Williston Basin. En American Association of Petroleum Geologist, Search and Discovery article #40330, noviembre 2008. Disponible en:
http://www.searchanddiscovery.com/pdfz/documents/2008/08230horsfield/ndx_horsfield.pdf.html

HUSSAIN A. et al. Advanced technologies for Produced water Treatment and Reuse. ConocoPhillips. En Society of Petroleum Engineers, IPTC 17394, 2014.

IGUNNU E., CHEN G. Produced Water Treatment Technologies. International Journal of Low-Carbon Technologies. 2012. Disponible en:
<http://paperity.org/p/37758514/produced-water-treatment-technologies>



JANSON A. et al. Assessing the Biotreatability of Produced Water from a Qatari Gas Field. En Society of Petroleum Engineers, SPE 17318, 2014.

JOINT RESEARCH CENTER, COMISIÓN EUROPEA. An overview of hydraulic fracturing and other stimulation technologies for shale gas production. En Reporte EUR 26347, Luxemburgo, 2013.

JUDE S. The MBR Book. Principles and Applications of Membrane Bioreactors in Water and Wastewater treatment. Primera edición, 2006.

KAKADJIAN S. Stable fracturing fluids from waste water. En Society of Petroleum Engineers, SPE 167175, 2013.

KARAGIANNIS I. et al. Water desalination cost literature: review and assessment. En ScienceDirect, European Desalination Society and Center for Research and Technology Hellas (CERTH), Sani Resort 22–25 April 2007. Halkidiki, Greece.

KUIJVENHOVEN C. et. al. Water Management approach for shale operations in North America. En Society of Petroleum Engineers, SPE 167057, 2013.

LEE J.M. et al. Treatment of Produced Water with an Ultrafiltration (UF) Membrane – A field trial. En Society of Petroleum Engineers, SPE 95735, 2005.

LENTECH Water Treatment Solutions. Disponible en: <http://www.lenntech.es/micro-y-ultra-filtracion.htm>

LENTECH. Water Treatment Solutions. Biocidas. Disponible en: <http://www.lenntech.es/biocidas.htm>

LENTECH. Water Treatment Solutions. Coagulantes y Floculantes. Disponible en: <http://www.lenntech.es/coagulantes-y-floculantes.htm>



LENTECH. Water Treatment Solutions. Limpiadores de oxígeno. Disponible en: <http://www.lenntech.es/productos-quimicos-tratamiento-agua.htm#Limpiadores%20de%20ox%C3%ADgeno>

LENTECH. Water Treatment Solutions. Tratamiento biológico. Disponible en: <http://www.lenntech.es/tratamiento-biologico.htm>

LENTECH. Water Treatment Solutions. Water Treatment Chemicals. Disponible en: <http://www.lenntech.com/products/chemicals/water-treatment-chemicals.htm#Scale%20inhibitors>

LESAR D. Shale developments III. Halliburton, 2011.

LETTERMAN R., Water Quality and Treatment, 5th ed., McGraw-Hill, New York, 1999.

LI L. et. al. High-temperature fracturing fluids prepared with extremely high-TDS and hard produced water. En Society of Petroleum Engineers, SPE 170607, 2014.

LI L. et. al. Well treatment fluids prepared with oilfield produced water. En Society of Petroleum Engineers, SPE 124212, 2009.

MA Y WANG. Electrochemical pilot-scale plant for oil field produced wastewater by M/C/Fe electrodes for injection. En ScienceDirect, Journal of Hazardous Materials, Volumen 132,1998. 237 -243p.

METCALF & EDDY, INC. Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización. Volumen I. Tercera Edición. McGraw-Hill. ISBN: 84-481-1727-1. Aravaca (Madrid), 1995.



MI+D. Aplicación de la ozonización en el tratamiento de aguas: descripción y funcionamiento. Disponible en:

<http://www.madrimasd.org/blogs/remtavares/2008/01/16/82477>

MI+D. Fotocatálisis Heterogénea: una técnica alternativa para el tratamiento de aguas contaminadas. Disponible en:

<http://www.madrimasd.org/blogs/remtavares/2011/04/18/131614>

MINIER-MATAR H. et al. Treatment of Produced Water from Unconventional Resources by Membrane Distillation. En Society of Petroleum Engineers, SPE 17481, 2014.

MOLLAH M. et. al. Electrocoagulation (EC) – science and applications. En ScienceDirect. Journal of Hazardous Materials, volumen 84, 2001. 29 – 41 p.

NETL. Introduction for Produced Water. Disponible en:
<http://www.netl.doe.gov/research/coal/crosscutting/pwmis/intro>

NICOT J. Water use for shale-gas production in Texas, U.S. En Environmental Science&Technology, 2012.

NOLEN-HOEKSEMA. Elementos del fracturamiento hidráulico. En Oilfield Review. Volumen 25, no. 2, 2013.

ORTIZ W. Diseño de una planta de tratamiento de agua de producción en un campo en la cuenca del Valle Medio del Magdalena. Bucaramanga, 2013, 29 p. Tesis de pregrado. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos.



OSISANYA S. et. al. Evaluation of cementing and stimulation techniques for horizontal Wells drilled in unconventional shale formations. En Society of Petroleum Engineers, SPE 172162 MS, 2014.

PALMGREN T. et. al. Aeration and microfiltration for solids removal of produced water from the Barnett shale. En Society of Petroleum Engineers, SPE 163803, 2013.

PATHAK M. et. al. Geologic Control on Production of shale play resources: case of the Eagle Ford, Bakken and Niobrara. En Society of Petroleum Engineers, URTEC 1922781, 2014.

PAZMIÑO K. et. al. Benefits of a dedicated industrial water treatment plant. En Society of Petroleum Engineers, SPE 165600, 2013.

PAZMIÑO URQUIZO Jorge. Fundamentos de la teoría del fracturamiento hidráulico, 2005.

PEETERS J.G. et al. Membrane technology treating oily wastewater for reuse. En CORROSION 2005, Paper No. 05534, 2005. En Society of Petroleum Engineers.

PIERCE D. Water Recycling Helps with Sustainability. En Society of Petroleum Engineers, SPE 134137, 2010.

PLATT F.M. Pre-Treatment Options for Frac Flow Brines: Laboratory and Pilot Plant Testing of Oil Removal Materials. En Society of Petroleum Engineers, CSUG/SPE 147417, 2011.

QUANXIN G. et. al. Marcellus and Haynesville Drilling Data: Analysis and Lessons Learned. En Society of Petroleum Engineers, SPE 158894, 2012.



QUIREIN J. et. al. A workflow to evaluate mineralogy, porosity, TOC and hydrocarbon volumen in the Eagle Ford Shale. En Society of Petroleum Engineers, SPE 167012 MS, 2013.

RAMALHO R.S. Tratamiento de aguas residuales. Editorial Reverté S.A. Facultad de Ciencia e Ingeniería, Quebec, Canadá.

ROBERGE P. Handbook of Corrosión Engineering. McGraw-Hill. New York, 2000.

SALAZAR F. et. al. Hydraulic fracturing with water-based fluids in water-sensitive formations. En Society of Petroleum Engineers, SPE 165082, 2013.

SARRIA V. et al. Nuevos sistemas electroquímicos y fotoquímicos para el tratamiento de aguas residuales y de bebida. En Revista Colombiana de Química. Volumen 34, no. 2 de 2005.

SAYED M. et. al. Required understanding for the development of shale reservoirs in the middle east in light of developments in North America. En Society of Petroleum Engineers, SPE 172939, 2015.

SCHLUMBERGER. Oilfield Glossary. Reflectancia de la vitrinita. Disponible en: http://www.glossary.oilfield.slb.com/es/Terms/v/vitrinite_reflectance.aspx

SCHULTHEISS N. et. al. Residue-free fracturing fluid provides superior cleanup and exceptional proppant transport. En Society of Petroleum Engineers, SPE 165128, 2013.

SERVYECO. Productos químicos para el tratamiento de aguas residuales. Disponible en: http://www.servyeco.com/530053_es/Productos-qu%25C3%25ADmicos-para-tratamiento-de-aguas-residuales/



SETH K. et. al. Maximizing flowback reuse and reducing freshwater demand: case studies from the challenging Marcellus shale. En Society of Petroleum Engineers, SPE 165693, 2013.

SHAFER L. Water recycling and purification in the Pinedale Anticlin field: results from the anticline disposal project. En Society of Petroleum Engineers, SPE 141448, 2011.

SHAFFER D. et al. Desalination and Reuse of High-Salinity Shale Gas Produced Water: Drivers, Technologies and Future Directions. En Environmental Science & Technology, 2013.

SLUTZ J. et. al. Key shale gas water management strategies: an economic assessment tool. En Society of Petroleum Engineers, SPE 157532, 2012

TROMBETTA J. El agua en la explotación de los yacimientos no convencionales. En Petrotecnia: Agosto, 2012, p. 52-64. Disponible en: http://www.petrotecnia.com.ar/agosto12/sin_publicidad/EIAGua.pdf

TRUSMIYADI Y. et. al. Produced water treatment improvements in Facing Indonesian Government Regulation on Onshore Disposed Waste Water. En Society of Petroleum Engineers, SPE 145651, 2011.

U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation. Dewvaporation desalination 5.000-gallon-per-day pilot plant. Reclamation, managing water in the west, junio 2008. Disponible en: <https://www.usbr.gov/research/AWT/reportpdfs/report120.pdf>

U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION. Review of emerging resources: U.S. shale gas and shale oil plays. Disponible en: <http://www.eia.gov/analysis/studies/usshalegas/pdf/usshaleplays.pdf>



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA. Facultad de Ingeniería y Arquitectura
Sede Manizales. Coagulación. Disponible en:
[http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/manizales/4080004/contenido/Capitulo_8/Pages/Proceso_tratamiento_aguas\(b\)_continuacion.htm](http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/manizales/4080004/contenido/Capitulo_8/Pages/Proceso_tratamiento_aguas(b)_continuacion.htm)

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA. Facultad de Ingeniería y Arquitectura
Sede Manizales. Floculación. Disponible en:
[http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/manizales/4080004/contenido/Capitulo_8/Pages/Proceso_tratamiento_aguas\(b\)_continuacion1.htm](http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/manizales/4080004/contenido/Capitulo_8/Pages/Proceso_tratamiento_aguas(b)_continuacion1.htm)

URRUTIA F. Evolución global de la capacidad instalada de plantas desaladoras.
Revista I.T. N° 72. 2005. Disponible en:
<http://www.ciccp.es/revistait/textos/pdf/09FUrru.pdf>

VALERO M. Selección de tecnologías para el tratamiento de las aguas de producción de shale gas utilizando una técnica de decisión multicriterio. Bucaramanga, 2013. Tesis de maestría (Ingeniería Ambiental). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química.

Varo Galvañ P., Chillón M. F. & Prats D. (2004). Características Físicoquímicas de las Aguas Ablandadas. Ingeniería Química. Universidad de Alicante. 146-150. Disponible en: <http://www.inese.es/html/files/pdf/amb/iq/409/09ARTICULOEN.pdf>

VASILIU C. et. al. Challenging wastewater treatment. En Society of Petroleum Engineers, SPE 157615, 2012.

VAZQUEZ O. et al. Post-frac flowback water chemistry matching in a Shale development. En Society of Petroleum Engineers, SPE 169799, 2014.



VEIL J. Produced Water Management Options and Technologies. Capítulo 29. En Springer Link, 2011.

WEBB C. et al. Desalination of Oilfield-Produced Water at the San Ardo Water Reclamation Facility, CA. En Society of Petroleum Engineers, SPE 121520, 2009.

WINTER D. et al. Desalination using membrane distillation: Experimental studies on full scale spiral wound modules. En ScienceDirect, Journal of Membrane Science, volumen 375, junio 2011. 104-112p.

ZIBRIDA J. et al. Advances in Reverse Osmosis application in water reuse. NACE International. En CORROSION 2000, 26-31 Marzo, Orlando, Florida, 2000. Disponible en Society of Petroleum Engineers. Disponible en: <https://www.onepetro.org/conference-paper/NACE->

ANEXOS

ANEXO A. Resumen tecnologías para tratamiento de flowback y los contaminantes que pueden remover

Proceso de Tratamiento	Rango de operación TDS (mg/L)	Extracción aceite	Remoción sólidos suspendidos	Remoción de Hierro	Remoción de Manganeso	Remoción / Reblandecimiento Ca y Mg	Remoción orgánicos solubles	Remoción trazas orgánicos	Desalinización	Ajuste de SAR (Sodium adsorption ratio)	BO D	CO D	Remoción de silicato y boro	Amonio	Metales Pesados	BTEX
Separador API		•	•													
Filtro de lecho profundo		•	•													
Hidrociclón	Rango amplio	•	•													
Flotación de gas inducido		•	•													
Sedimentación y Aireación			•	•												
Reblandecimiento por precipitación						•							•			
Filtración de arena			•													
Tratamiento por UV	500							•								
Carbón activado								•								
Tratamiento biológico	Bajo						•					•				
Adición química										•						
Floculación/Coagulación			•													
Adsorción	Rango amplio	•		•	•					•					•	•

Intercambio Iónico	500 - 5.000			•		•						•			
Ozonización		•		•			•	•			•	•			
Oxidación Avanzada	< 10.000						•	•							
Electrocoagulación		•	•	•			•	•			•	•			
Bio-reactor de membranas	< 30.000	•	•				•								
Ósmosis Inversa	20.000 - 47.000					•			•			•(4)	•(3)		
Ósmosis directa	500 - 70.000	•	•						•				•(1)		
Ultrafiltración	1.000 - 25.000	•	•												
Nanofiltración	1.000 - 25.000	•	•	•(2)		•				•			•(1)		
Destilación por membranas	500 - 70.000								•			•(5)		•	
Freeze Thaw Evaporation	> 40.000						•		•					•	
Flash Multi etapa	40.000								•						
Flash Multi efecto	Rango amplio								•						
Dewvaporation	> 60.000								•						
MVC (Compresión Mecánica de Vapor)	> 40.000								•						
MVR (Recompresión Mecánica de Vapor)	80.000 - 100.000								•						
Electrodialisis	< 8.000						•		•						

Cristalización	> 50.000									•						
Destilación	40.000 - 45.000									•						

Información adicional tabla:

- 1) Remoción 80%.
- 2) Remoción > 99% de MgSO₄; Remoción moderada otros metales (< 90%).
- 3) Remoción 60% – 80%.
- 4) Remoción menor a 50%.
- 5) Remoción de Boro.