

**DESEMPEÑO TÉCNICO Y AMBIENTAL DE LAS TECNOLOGÍAS
CONVENCIONALES Y MODERNAS DE TRATAMIENTO DE AGUA
PRODUCIDA**

**MARÍA CAMILA MORALES RINCON
ASTRID CAROLINA REVELO NÚÑEZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA
2016**

**DESEMPEÑO TÉCNICO Y AMBIENTAL DE LAS TECNOLOGÍAS
CONVENCIONALES Y MODERNAS DE TRATAMIENTO DE AGUA
PRODUCIDA**

**MARÍA CAMILA MORALES RINCON
ASTRID CAROLINA REVELO NÚÑEZ**

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero de Petróleos

**Director
M.Sc. MANUEL ENRIQUE CABARCAS SIMANCA
Docente de planta EIP UIS**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA
2016**

DEDICATORIA

A Dios por permitirme vivir, por darme siempre esperanza, por mantener viva mi fe, por rodearme de tanto amor y por guiarme en el camino.

A mi papá y a mi mamá por darme una vida llena de amor, por buscar siempre mi felicidad, por dejar a un lado sus sueños para alentar los míos, por estar siempre presentes, por sus sacrificios, por su protección, por su paciencia, por acompañarme en los éxitos, por consolarme en los fracasos y porque gracias a ellos nada ha sido imposible.

A mis hermanas Gabi y Vivi por acompañarme en el camino, por ser mis cómplices, porque nuestros momentos de risas y tonterías dan plenitud a mi vida.

A mis abuelitos por estar siempre a mi lado, por consentirme, por sus enseñanzas, por sus consejos, por ser mis confidentes, por ser mis alcahuetas, por darme fortaleza en momentos de oscuridad, por ser mis referentes de amor y tenacidad.

A toda mi familia por tenerme presente en sus pensamientos y alentarme siempre a ser feliz.

A Astrid por todos los momentos que hemos compartido, por ser mi amiga en las buenas y en las malas, porque este triunfo no sería posible sin su apoyo y perseverancia.

A Vane, Rosshy y Any por tener la capacidad de sacarme una sonrisa hasta en el peor de los días, porque el cariño no se mide con el tiempo. A Felipe y Carlitos por ser incondicionales, por consentirme y acompañarme en todos mis estados de ánimo.

A todos mis amigos por convertirse en mi segunda familia.

A la junta de ACEIP por el cariño y por permitirme hacer parte del equipo.

Finalmente, a todas las personas que me acompañan desde la eternidad, quedarán por siempre grabadas en mi corazón.

María Camila.

A Dios por darme vida y salud, para lograr culminar con éxito una etapa más de mi vida.

A mi familia quienes son el motor de mi vida. A mis padres por ser mi más grande apoyo, por confiar y creer siempre en mí y por no dejarme desfallecer en ningún momento. A mi hermano Diego Alejandro a quien adoro con toda mi alma.

A todos mis amigos quienes fueron mis compañeros de aventuras en este camino que recorrimos juntos. A Nía y a Isa por ser como mi familia en estas tierras Santandereanas. A Vane, Rosshí y Any por ser aquellas personas que acompañaron mis momentos difíciles y por ser los causantes de mis rabias, pero también de mis más gratos recuerdos.

A Cami, quien no solo fue mi compañera de tesis, sino una amiga. Aunque no fue mucho el tiempo compartido, fue suficiente para vivir gratos momentos.

Astrid Carolina.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar a DIOS, pues sin Él nada de esto hubiese sido posible.

A nuestras familias, quienes han sido el mayor apoyo en cada una de las etapas de nuestras vidas. Gracias por su incondicionalidad y cariño.

A la Universidad Industrial de Santander por brindarnos la valiosa oportunidad de formarnos como profesionales.

A Los profesores de la Escuela de Ingeniería de Petróleos por compartir con nosotros parte de sus conocimientos.

Agradecimiento especial a nuestro director, el ingeniero Manuel Enrique Cabarcas, por su apoyo constante, su motivación y por todo el tiempo dedicado para orientarnos en el desarrollo de este proyecto.

A nuestros amigos por ser la compañía perfecta en los momentos de alegría, tristeza y desesperación.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	18
1. CARACTERIZACIÓN DEL AGUA PRODUCIDA.....	22
1.1. ACEITE DISUELTO.....	24
1.2. ACEITE DISPERSO.....	25
1.3. METALES PESADOS.....	25
1.4. QUÍMICOS DE TRATAMIENTO.....	25
1.5. GASES DISUELTOS.....	27
1.6. SOLIDOS PRODUCIDOS.....	27
1.7. MATERIALES RADIATIVOS.....	27
1.8. MINERALES DISUELTOS.....	27
2. ESTRATEGIAS DE MANEJO DEL AGUA PRODUCIDA.....	28
2.1. REDUCCIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE AGUA.....	28
2.2. REÚSO O RECICLADO DEL AGUA PRODUCIDA.....	29
2.2.1. Inyección para incrementar la recuperación de petróleo.....	29
2.2.2. Uso beneficioso.....	29
2.2.3. Usos industriales.....	30
2.3. MÉTODOS DE DISPOSICIÓN.....	30
2.3.1. Descarga controlada en la superficie.....	30
2.3.2. Descarga controlada en aguas superficiales.....	30

2.3.3. Descarga controlada en ambientes marinos costeros.....	30
2.3.4. Descarga en aguas profundas (Sin Mareas).....	30
2.3.5. Evaporación.....	30
2.3.6. Inyección como método de eliminación.....	31
2.4. MANEJO DEL AGUA PRODUCIDA EN COLOMBIA	31
3. IMPACTOS GENERADOS POR LOS CONTAMINANTES DEL AGUA PRODUCIDA.....	34
3.1. BENCENO	34
3.2. ETILBENCENO	34
3.3. TOLUENO	35
3.4. XILENO	35
3.5. FENOLES.....	35
3.6. HIDROCARBUROS AROMÁTICOS POLICÍCLICOS.....	36
3.7. CADMIO	36
3.8. ARSÉNICO.....	37
3.9. BARIO	37
3.10. COBRE.....	37
3.11. NÍQUEL	38
3.12. CROMO	38
3.13. PLATA	38
3.14. VANADIO	39
3.15. PLOMO.....	39
3.16. CINC.....	40

3.17. MERCURIO	40
3.18. RADIO	41
3.19. URANIO.....	41
3.20. SULFATOS.....	41
3.21. CLORUROS	41
3.22. SODIO	42
4. REGULACIONES GUBERNAMENTALES PARA EL MANEJO DEL AGUA PRODUCIDA.....	43
4.1. INYECCIÓN.....	43
4.2. REÚSO.....	43
4.3. DESCARGA.....	43
4.4. EVOLUCIÓN DE LA NORMATIVIDAD COLOMBIANA PARA CONTROLAR Y REDUCIR LA CONTAMINACIÓN DEL AGUA.	45
4.4.1. Decreto 2811 de 1974 y Ley 9 de 1979.	45
4.4.2. Decreto 1594 de 1984.	46
4.4.3. Decreto 3930 de 2010.	46
4.4.4. Resolución 0631 de 2015.	47
6. TRATAMIENTO CONVENCIONAL DEL AGUA PRODUCIDA.....	50
6.1. TRATAMIENTO PRIMARIO.....	50
6.1.1. Tanques de sedimentación.	51
6.1.2. Tanques desnatadores	51
6.1.3. Separador API.	52
6.1.4. Placas coalescedoras.	52

6.2. TRATAMIENTO SECUNDARIO.....	53
6.2.1. Flotación por gas disuelto (DGF) y flotación por gas inducido (IGF).	53
6.2.2. Hidrociclones.	54
6.2.3. Centrífugas.	54
6.3. TRATAMIENTO Terciario	55
6.3.1. Filtros.....	55
6.4. TRATAMIENTO CONVENCIONAL PARA INYECCIÓN.....	55
6.5. TRATAMIENTO CONVENCIONAL PARA DESCARGA O REÚSO	56
7. TRATAMIENTO MODERNO DEL AGUA PRODUCIDA.....	57
7.1. FILTRACIÓN POR MEMBRANAS	57
7.2. VSEP	63
7.3. ADSORCIÓN.....	63
7.4. EVAPORACIÓN	63
7.5. CONGELACIÓN Y DESCONGELACIÓN.....	63
7.6. ELECTRODIÁLISIS Y ELECTRODIÁLISIS REVERSIBLE	64
7.8. FILTROS BIOLÓGICOS AIREADOS	64
7.9. DESTILACIÓN POR MEMBRANA.....	65
7.10. INTERCAMBIO IÓNICO	65
7.11. SISTEMA DE TRATAMIENTO PROPUESTO POR LOS AUTORES.....	65
8. CASOS DE APLICACIÓN DE NUEVAS TECNOLOGÍAS DE TRATAMIENTO DE AGUA PRODUCIDA A NIVEL MUNDIAL.....	68
8.1. CAMPO SAN ARDO, CALIFORNIA.....	68
8.2. CAMPO ARROYO GRANDE, CALIFORNIA.....	71

8.3. CAMPO LYSITE, WYOMING72

8.4. CAMPO JONAH, WYOMING73

8.5. CUENCA DEL RÍO POWDER, WYOMING75

9. CONCLUSIONES77

BIBLIOGRAFÍA.....79

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Distribución del agua en el planeta tierra	22
Figura 2. Perfil típico de producción de un campo petrolero.....	23
Figura 3. Estrategias de manejo del agua producida.	28
Figura 4. Relación de producción Agua-Petróleo en Colombia.	32
Figura 5. Estadísticas de manejo de agua producida en Colombia	33
Figura 6. Parámetros y límites máximos establecidos para Vertimientos en algunos países.	44
Figura 7. Línea de tiempo de la normatividad ambiental para controlar y reducir la contaminación del agua.	45
Figura 8. Tratamiento de fluidos producidos en un campo petrolero.	50
Figura 9. Esquema de tratamiento convencional de agua producida	51
Figura 10. Configuración propuesta por los autores para el tratamiento del agua producida.....	67
Figura 11. Tecnología OPUS en el campo San Ardo.	69
Figura 12. Esquema del sistema de tratamiento empleado en el campo San Ardo, California	70
Figura 13. Esquema del sistema de tratamiento empleado en el campo Arroyo Grande, California.....	72
Figura 14. Esquema del sistema de tratamiento empleado en el campo Lysite, Wyoming.	73
Figura 15. Congelación y descongelación Campo Jonah en 1998.	74

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Composición típica del agua de mar y del agua producida a partir de yacimientos de gas y de petróleo.....	26
Tabla 2. Estrategias de manejo del agua producida en Colombia y sus respectivos Volúmenes.....	33
Tabla 3. Efectos generados por los contaminantes del agua producida.	34
Tabla 4. Parámetros y valores límites máximos permisibles en vertimientos superficiales para la industria de los hidrocarburos.....	48
Tabla 5. Tecnologías avanzadas para el tratamiento del agua producida.	58
Tabla 6. Resultados obtenidos con la tecnología OPUS en los primeros 12 meses de operación en el campo San Ardo, California	71
Tabla 7. Resultados obtenidos en un tren de tratamiento de agua producida donde se emplea la ED.	73
Tabla 8. Resume de los resultados obtenidos al emplear congelación y descongelación en el campo Jonah.....	75
Tabla 9. Resultados del tratamiento de Higgins Loop para un ensayo de campo en la cuenca del río Powder en Wyoming.....	76

RESUMEN

TITULO: DESEMPEÑO TÉCNICO Y AMBIENTAL DE LAS TECNOLOGÍAS CONVENCIONALES Y MODERNAS DE TRATAMIENTO DE AGUA PRODUCIDA.*

AUTORES: MARÍA CAMILA MORALES RINCÓN
ASTRID CAROLINA REVELO NÚÑEZ**

PALABRAS CLAVE: AGUA PRODUCIDA, TECNOLOGÍA DE TRATAMIENTO, VERTIMIENTO, CONTAMINANTES.

DESCRIPCIÓN:

El objetivo de este trabajo ha sido describir el desempeño de las tecnologías disponibles para el tratamiento del agua producida, teniendo en cuenta su rendimiento técnico y el cumplimiento de las regulaciones establecidas por las entidades ambientales. En primer lugar, se identificaron los componentes presentes en el agua producida y los impactos que generan en los ecosistemas. Luego se describieron las opciones disponibles para el manejo del agua producida y sus aplicaciones en Colombia. Adicionalmente, se llevó a cabo una revisión de la legislación internacional en cuanto a vertimiento del agua producida, así como de la normatividad colombiana y su evolución. Finalmente, se clasificaron las unidades de tratamiento según su principio de funcionamiento y los componentes que pueden remover. Se encontró que muchos componentes del agua producida presentan tendencias carcinogénicas tanto para los seres humanos como para los animales. De igual manera, se infirió que las regulaciones ambientales se han hecho más estrictas con el tiempo y como respuesta a ello se han desarrollado una variedad de tecnologías de tratamiento con el propósito de generar un efluente de alta calidad. Se concluyó que las tecnologías convencionales para tratamiento de agua producida no son eficientes para remover contaminantes disueltos y por ello se sugiere una configuración de tratamiento que incluya unidades convencionales y modernas, lo que podría garantizar concentraciones mínimas de los componentes contaminantes del agua producida.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director: M.Sc. Manuel Enrique Cabarcas Simancas.

ABSTRACT

TITLE: TECHNICAL AND ENVIRONMENTAL PERFORMANCE OF THE CONVENTIONAL AND MODERN TREATMENT TECHNOLOGIES FOR THE PRODUCED WATER.*

AUTHORS: MARÍA CAMILA MORALES RINCÓN
ASTRID CAROLINA REVELO NÚÑEZ**

KEYWORDS: PRODUCED WATER, TREATMENT TECHNOLOGY, SHEDDING, CONTAMINANTS.

DESCRIPTION:

The aim of this study was to describe the efficiency of available technologies for the treating of the produced water, taking into account their technical performance and the compliance with the regulations established by the environmental agencies. Firstly, the components present in the produced water and the impacts generated on ecosystems were identified. The options available for the handling of the produced water and its applications in Colombia were then described. Additionally, a review of the international legislation regarding dumping of produced water was conducted, as well as Colombian law and their evolution. Finally, the treatment units were classified according to their operating principle and removed components from the water. It was found that many components of the produced water have carcinogenic trends for both humans and animals. Similarly, it was inferred that environmental regulations have become more stringent over time and in response there to a variety of treatment technologies have been developed in order to generate a high-quality effluent. It was concluded that conventional technologies for treatment of the produced water are not efficient for removing dissolved contaminants and therefore a configuration treatment including conventional and modern units is suggested, which could guarantee minimum concentrations of the polluting components of the produced water.

* Undergraduate project

** Physiochemical Engineerings Faculty. Petroleum Engineering School. Director: M.Sc Manuel Enrique Cabarcas Simancas.

INTRODUCCIÓN

A pesar de su importancia, el petróleo se produce con grandes volúmenes de residuos. El agua producida representa más del 80% de los residuos líquidos y en los campos maduros este porcentaje alcanza un 95%¹. La producción mundial promedio de petróleo en el año 2014 fue de 80 millones de barriles por día (bbls/d), comparado con 315 millones de bbls/d de agua². Según estas cifras, se producen de 3 a 5 barriles de agua con cada barril de petróleo, aunque en ciertos yacimientos maduros esta cifra puede ser de 10 a 14³. Se pronostica que para el 2020, la industria de los hidrocarburos producirá más de 500 millones de bbls/d de agua en operaciones en tierra firme⁴, lo que representa un incremento del 37% con base a la producción de 2014. Es de aclarar que más del 40% de esta agua producida se descarga al medio ambiente⁵.

En el año 2014, Colombia produjo 12.45 barriles de agua por cada barril de crudo⁶, cifra que equivale a una producción diaria de 11.5 millones de bbls de agua. De estos volúmenes de agua, el 65% se destinó para proyectos de inyección y el 35% restante en vertimientos y otros usos.

La gestión o manejo del agua producida se ha convertido en un reto, ya que las opciones son cada vez más limitadas, las regulaciones más estrictas y las fuentes de agua más escasas. En vista de estos desafíos, las empresas de exploración y producción son conscientes de que el agua producida puede ser una fuente de valor o un activo⁷.

El agua producida puede tener diferentes impactos ambientales dependiendo de su composición, concentración y lugar de descarga. Los vertimientos en el océano abierto tienen un menor impacto que aquellos realizados en cuerpos de agua

¹ KAUR, Guneet, et al. Control of sulfidogenic bacteria in produced water from the Kathloni oilfield in northeast India. Elsevier [en línea], 2009, vol.63 no.2. Disponible en Science Direct.

² FAKHRU'L-RAZI, Ahmadun, et al. Review of technologies for oil and gas produced water treatment. Elsevier [en línea], 2009, vol.170 no.2-3. Disponible en Science Direct

³ IFP ENERGIES NOUVELLES. Water in fuel production Oil production and refining. Lyon, 2011.

⁴ STANIC, Jelena. Unconventional Oil and Gas Production Drives Trends in Water Management and Treatment. Global Water Intelligence, 2014.

⁵ IGUNNU, Ebenezer T. y CHEN, George Z. Produced water treatment technologies. Oxford University Press, 2012.

⁶ ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE PETRÓLEO (ACP) Y ECOPEPETROL. Informe de Gestión Ambiental del Sector Hidrocarburos. Bogotá, 2014.

⁷ STANIC, Op. Cit.

pequeños, debido a la dilución que tiene lugar después de la descarga⁸. Algunos animales, como las aves, son muy sensibles al aceite, incluso en pequeñas concentraciones⁹. Los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) se han asociado con mayor preocupación a numerosos riesgos, principalmente por su tendencia carcinógena y mutagénica¹⁰.

Frecuentemente, los proyectos de petróleo y gas tienen como objetivo un esquema de cero descargas, debido a la vulnerabilidad de los ecosistemas¹¹. En países como Noruega, el desarrollo de nuevos proyectos sin cero descargas no está permitido y para el caso de las licencias existentes, se permite la descarga de máximo el 5% del agua producida totalmente tratada¹². Estas políticas pueden ser ampliadas y desarrolladas como sistemas regulatorios en el futuro, razón por la que se promueven los retos para el tratamiento de agua¹³.

En Colombia, el manejo de vertimientos está ligado a la obligación que tiene el Estado de garantizar un ambiente sano a todos los ciudadanos. Cumpliendo sus funciones, recientemente el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS) presentó La Resolución 0631 de 2015. Esta norma establece los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público. Según el MADS, este decreto se construyó durante cuatro años, a partir de la revisión de normas internacionales, información suministrada por las autoridades y la comunidad en general.

Con la implementación de esta resolución, se busca reducir y controlar las sustancias contaminantes que llegan a los cuerpos superficiales de agua dulce. El

⁸ VEIL, John A., et al. A White Paper Describing Produced Water from Production of Crude Oil, Natural Gas and Coal Bed Methane. USA, 2004.

⁹ O'HARA, Patrick D. y MORANDIN, Lora A. Effects of sheens associated with offshore oil and gas development on the feather microstructure of pelagic seabirds. Elsevier [en línea], 2010, vol.60, no.5. Disponible en Science Direct.

¹⁰ UKPOHOR, T.O. Produced Water: Environmental Issues/ Technological Solution Of The Nigeria Depletion Era. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, Louisiana, 30 September-3 October [en línea] 2001. SPE-71437-MS. Disponible en One Petro.

¹¹ KNOL, Maaïke. The uncertainties of precaution: zero discharges in the Barents Sea. Elsevier [en línea], 2011, vol.35, no.3. Disponible en Science Direct.

¹² BUFFAGNI, Melania, et al. Environmental Risk Management of E&P Operations in the Barents Sea: environmental indicators and thresholds levels. SPE International Conference on Health, Safety and Environment in Oil and Gas Exploration and Production, Rio de Janeiro, Brazil, 12-14 April [en línea] 2010. SPE-126710-MS. Disponible en One Petro.

¹³ ZHENG, Jisi., et al. Offshore produced water management: A review of current practice and challenges in harsh/Arctic environments. Elsevier [en línea], 2016, vol.104, no.1-2. Disponible en Science Direct.

control se realizará a partir de la medición de la cantidad de sustancias descargadas y no del proceso de tratamiento, así se podrá evaluar el impacto del agua descargada y no la eficiencia del proceso de tratamiento. Tal vez uno de los cambios más importantes que trae la nueva Norma es la medición, que ahora se realizará en mg/L y no en kg/día, como se venía haciendo.

Las preocupaciones ambientales y las regulaciones cada vez más estrictas, han impulsado la investigación en el tratamiento de agua producida. Es necesario implementar modernas tecnologías de tratamiento de agua producida, ya que las tecnologías convencionales están dirigidas a la remoción de aceite disperso y sólidos suspendidos, permitiendo el paso de contaminantes que pueden generar ciertos impactos ambientales. Se han desarrollado varios estudios en cuanto a composición, reglamentación y tecnologías de tratamiento del agua producida.

Alley et al.¹⁴ (2011) reunieron un gran conjunto de datos para extraer información de las diferencias o similitudes en los componentes del agua producida a partir de diferentes tipos de yacimientos. Una discusión sobre las características fisicoquímicas, procedencia e impactos ambientales del agua producida se puede encontrar en Veil et al.¹⁵ (2004). Arthur et al.¹⁶ (2005) intentaron describir, resumir y analizar diferentes sistemas de tratamiento de agua producida desarrollados hasta el momento. De igual manera Igundu y Chen¹⁷ (2012) revisaron las tecnologías actuales para el manejo del agua producida y examinaron el uso de la electroquímica en esta área. Adicionalmente, Munirasu et al.¹⁸ (2016) analizaron el tratamiento convencional y moderno del agua producida, centrándose en las diversas tecnologías de membrana.

El propósito de este trabajo es describir las diversas opciones que se han desarrollado para el tratamiento del agua producida, teniendo en cuenta aspectos técnicos y ambientales. Para cumplir con ello se realizó una caracterización del agua producida y se identificaron los componentes contaminantes, sus concentraciones típicas y su impacto en la salud humana y los ecosistemas “onshore”. También se

¹⁴ ALLEY, Bethany, et al. Chemical and physical characterization of produced waters from conventional and unconventional fossil fuel resources. Elsevier, [en línea], 2011, vol.85, no.1. Disponible en Science Direct.

¹⁵ VEIL, John A., *et al.*, Op. Cit.

¹⁶ ARTHUR, J. Daniel, et al. Technical summary of oil & gas produced water treatment technologies. ALL CONSULTING, LLC. Tulsa, 2005.

¹⁷ IGUNNU, Ebenezer T. y CHEN, George Z., Op. Cit.

¹⁸ MUNIRASU, Selvaraj, et al. Use of membrane technology for oil field and refinery produced water treatment-A review. Elsevier [en línea], 2016, vol.100. Disponible en Science Direct.

identificaron las estrategias para el manejo del agua producida y sus respectivas restricciones ambientales, haciendo énfasis en los vertimientos. Por otra parte, se especificaron los tratamientos requeridos para la disposición del agua producida y se clasificaron las unidades de tratamiento según su principio de funcionamiento y los componentes que pueden remover. Adicionalmente se sugiere que la descarga a cuerpos de aguas superficiales se haga después de haber realizado un tratamiento que incluya tecnologías convencionales y modernas. Finalmente, se presentan algunos casos de aplicación de las nuevas tecnologías a nivel mundial.

1. CARACTERIZACIÓN DEL AGUA PRODUCIDA

El agua es el recurso natural fundamental para todas las formas de vida. En el planeta tierra hay aproximadamente 1,386 millones de kilómetros cúbicos de agua¹⁹, distribuidos como se muestra en la **Figura 1**. A pesar de ser el elemento más abundante en el planeta Tierra, la cantidad de agua dulce es muy limitada. Aproximadamente las dos terceras partes del agua dulce se encuentran inmovilizadas en glaciares y sólo la cantidad restante es de fácil acceso para el consumo humano.

La escasez de agua para atender las necesidades cotidianas es una realidad para muchos, según la Organización Mundial de la Salud (OMS), afecta a todos los continentes y a cuatro de cada diez personas en el mundo. Esta situación está empeorando como consecuencia del crecimiento de la población, el desarrollo urbanístico y el aumento del uso del agua con fines industriales y domésticos. No se puede modificar la cantidad de agua que existe en el planeta, pero se puede hacer un uso responsable de este recurso.

Figura 1. Distribución del agua en el planeta tierra



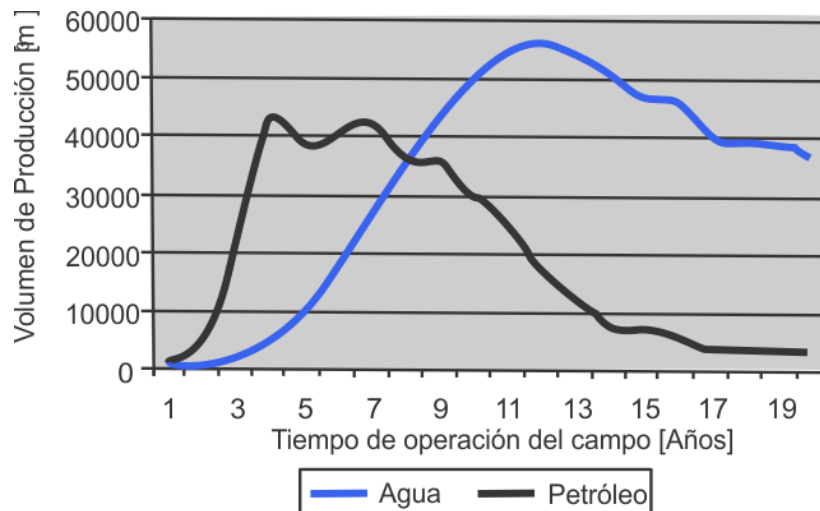
Fuente: Modificado de UNESCO. Water, a shared responsibility. Changing natural systems. París, 2006. ISBN UNESCO: 92-3-104006-5.

¹⁹ UNITED NATIONS EDUCATIONAL, SCIENTIFIC AND CULTURAL ORGANIZATION (UNESCO). Water, a shared responsibility. Changing natural systems. París, 2006. ISBN UNESCO: 92-3-104006-5.

Originalmente las rocas son impregnadas por fluidos subterráneos como agua, petróleo, gas y soluciones salinas. Antes de atrapar compuestos hidrocarburos, las rocas se encuentran saturadas con agua salina. Los hidrocarburos de menor densidad migran hacia lugares como trampas, dando lugar al desplazamiento del agua salina de la formación. Finalmente, las rocas del yacimiento absorben esta mezcla de fluidos²⁰.

En las actividades de producción de petróleo y gas se inyecta agua con los objetivos de mantener la presión del yacimiento y conseguir factores de recobro más altos. También son añadidos algunos productos químicos para tratar o prevenir los problemas operacionales que se presentan durante dicha etapa²¹. Una mezcla de agua inyectada, agua de formación y químicos de tratamiento se producen junto a los hidrocarburos²². La cantidad de agua producida aumenta con la madurez de los campos petroleros (Ver **Figura 2**).

Figura 2. Perfil típico de producción de un campo petrolero.



Fuente: Modificado de IGUNNU, Ebenezer T. y CHEN, George Z. Produced water treatment technologies. Oxford University Press, 2012.

Las propiedades fisicoquímicas del agua producida se ven afectadas por la ubicación del terreno, el tiempo de vida del yacimiento y el tipo de hidrocarburo con que se produzca²³. Sus características dependen de la naturaleza de la formación

²⁰ FAKHRU'L-RAZI, Ahmadun, *et al.*, Op. Cit.

²¹ STEPHENSON, M.T. Components of Produced Water: A Compilation of Industry Studies. Journal of Petroleum Technology, 1992.

²² STRØMGREN, T., *et al.* Acute toxic effects of produced water in relation to chemical composition and dispersion. Elsevier [en línea], 1995, vol.40, no.2. Disponible en Science Direct.

²³ VEIL, John A., *et al.*, Op. Cit.

productora o almacenadora de la que se retire, las condiciones operativas y los productos químicos utilizados en las facilidades de superficie²⁴. Las principales fuentes de agua producida incluyen yacimientos de gas natural convencional, petróleo convencional, metano en capas de carbón, gas de esquisto y gas de arenas compactas²⁵.

El agua producida tiene una composición compleja. Algunos componentes que requieren de tratamiento para su remoción, pueden ser comunes en todas las aguas producidas, independientemente de la fuente²⁶. Sus constituyentes se pueden clasificar a grandes rasgos en orgánicos e inorgánicos²⁷. Generalmente los componentes presentes en el agua producida incluyen: aceite disuelto y disperso, metales pesados, químicos de tratamiento, gases disueltos, materiales radiactivos, sólidos producidos y minerales disueltos²⁸.

La composición del agua producida a partir de un campo de gas y uno de petróleo difiere en algunos aspectos. En los campos de gas no se inyecta agua y por lo tanto el agua producida es una mezcla de agua de formación y agua condensada²⁹. Alrededor de un tercio de los productos químicos que se utilizan para el tratamiento del gas incluyendo el metanol, etilenglicol, y trietilenglicol están presentes en el agua producida³⁰. La concentración de componentes volátiles y la acidez en el agua producida a partir de yacimientos de gas son más altas que las del agua producida a partir de yacimientos de petróleo³¹. La **Tabla 1** muestra la composición típica del agua de mar y del agua producida a partir de yacimientos de gas y de petróleo.

1.1. ACEITE DISUELTO

El agua no puede disolver todos los hidrocarburos, así que la mayoría del aceite se dispersa en agua. La cantidad de aceite disperso y disuelto en el agua producida antes del tratamiento depende de factores como la composición del aceite, el pH, la

²⁴ FAKHRU'L-RAZI, Ahmadun, *et al.*, Op. Cit.

²⁵ ALLEY, Bethany, *et al.*, Op. Cit.

²⁶ Ibid.

²⁷ IGUNNU, Ebenezer T. y CHEN, George Z., Op. Cit.

²⁸ (FAKHRU'L-RAZI, Ahmadun, *et al.*, Op. Cit.; AL-MAAMARI, Rashid S., et al. Flotation, Filtration, and Adsorption: Pilot Trials for Oilfield Produced-Water Treatment. Oil and Gas Facilities [en línea], 2014, vol.3, no.02. Disponible en One Petro; AL-MANHAL. Oil & water (produced-treatment and disposal). Emiratos Árabes, 2003.

²⁹ FAKHRU'L-RAZI, Ahmadun, *et al.*, Op. Cit.

³⁰ NEFF, Jerry M. Bioaccumulation in Marine Organisms: Effect of Contaminants from Oil Well Produced Water. Elsevier, 2002. ISBN: 978-0-08-043716-3

³¹ FAKSNESS, Liv-Guri, et al. Partitioning of semi-soluble organic compounds between the water phase and oil droplets in produced water. Elsevier [en línea], 2004, vol.48, no.7-8. Disponible en Science Direct.

salinidad, los sólidos disueltos Totales (TDS), la temperatura, la relación aceite/agua, el tipo y cantidad de compuestos estabilizadores de emulsión (ceras, asfaltenos y sólidos finos) y de los productos químicos utilizados en el campo petrolero³². El BTEX (Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xileno), los fenoles, los hidrocarburos alifáticos, el ácido carboxílico y compuestos aromáticos de bajo peso molecular se clasifican como aceite disuelto³³.

1.2. ACEITE DISPERSO

El aceite disperso está compuesto por pequeñas gotas de aceite en suspensión en el agua producida. La cantidad de aceite disperso depende de la densidad del aceite, la historia de cizallamiento de la gota, la cantidad de precipitación del aceite y la tensión interfacial entre el agua y el aceite³⁴. Los Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP) menos solubles y los Alquil-Fenoles pesados están presentes en el agua producida como aceite disperso³⁵.

1.3. METALES PESADOS

Las concentraciones de metales pesados en el agua producida dependen de la edad de los pozos y la geología de la formación productora o almacenadora³⁶. La concentración de metales pesados en el agua producida es generalmente más alta que la del agua utilizada en recobro mejorado y el agua de mar³⁷. Altas concentraciones de metales pesados incluidos Bario (Ba), Berilio (Be), Cadmio (Cd), Cromo (Cr), Cobre (Cu), Hierro (Fe), Plomo (Pb), Níquel (Ni), Plata (Ag) y Zinc (Zn) se encuentran en el agua producida³⁸.

1.4. QUÍMICOS DE TRATAMIENTO

Además de los componentes del agua producida propios de cada fuente, durante el proceso de producción de petróleo se utilizan algunos compuestos químicos adicionales ya sea para recobro mejorado o para mitigar problemas operacionales³⁹. Estos químicos incluyen inhibidores de corrosión, inhibidores de escamas, demulsificantes, metanol y glicol⁴⁰.

³² FAKHRU'L-RAZI, Ahmadun, *et al.*, Op. Cit.

³³ IGUNNU, Ebenezer T. y CHEN, George Z., Op. Cit.

³⁴ FAKHRU'L-RAZI, Ahmadun, *et al.*, Op. Cit.

³⁵ IGUNNU, Ebenezer T. y CHEN, George Z., Op. Cit.

³⁶ FAKHRU'L-RAZI, Ahmadun, *et al.*, Op. Cit.

³⁷ IGUNNU, Ebenezer T. y CHEN, George Z., Op. Cit.

³⁸ NEW LOGIC RESEARCH. Using VSEP to Treat Produced Water: An effective and economical solution. USA, 2016.

³⁹ IGUNNU, Ebenezer T. y CHEN, George Z., Op. Cit.

⁴⁰ IGWE, Chibunna Onyems, et al. Optimal Options for Treatment of Produced Water in Offshore Petroleum Platforms. Nantes, 2013.

Tabla 1. Composición típica del agua de mar y del agua producida a partir de yacimientos de gas y de petróleo.

COMPONENTE	AGUA DE MAR (mg/L)	AGUA PRODUCIDA CON GAS (mg/L)	PETRÓLEO (mg/L)
Aceite Disuelto			
BTEX	–	0.068 – 578 ^a	0.39 – 35 ^c
Fenoles	–	ND	0.4 – 23 ^a
Aceite Disperso			
HAP	1e-6 – 45e-6 ^a	ND	0.04 – 3 ^a
Metales Pesados			
Cadmio	4e-6 – 23e-6 ^a	< 0.02 – 1.21 ^b	< 0.005 – 0.2 ^b
Arsénico	–	< 151 ^b	< 0.3 ^b
Bario	22e-6 – 8e-5 ^a	< 1 – 1,740 ^b	1.3 – 650 ^b
Níquel	–	< 0.08 – 9.2 ^d	ND
Cobre	2e-5 – 5e-3 ^a	< 5 ^b	< 0.002 – 105 ^b
Cromo	–	< 0.03 ^b	0.02 – 1.1 ^b
Vanadio	–	ND	0.02 – 0.5 ^a
Plomo	2e-5 – 81e-6 ^a	< 0.2 – 10.2 ^b	0.002 – 8.8 ^b
Plata	–	0.047 – 7 ^d	< 0.001 – 0.15 ^d
Cinc	0.0003 – 0.0014 ^a	< 0.02 – 5 ^b	0.01 – 35 ^b
Mercurio	1e-6 – 3e-6 ^a	ND	< 0.005 – 0.3 ^c
Químicos De Tratamiento			
Inhibidores de Corrosión	–	2 – 10 ^c	2 – 10 ^c
Inhibidores de Escamas	–	–	4 – 30 ^c
Demulsificantes	–	–	1 – 2 ^c
Poliectrolito	–	–	0 – 10 ^c
Glicol	–	1,000 – 15,000 ^c	–
Metanol	–	500 – 2,000 ^c	–
Material Radioactivo			
Radio (bq/L)	–	ND	5.56 ^a
Uranio (bq/L)	–	ND	ND
Minerales Disueltos			
Sulfatos	2,712 ^a	< 0.1 – 47 ^d	< 2 – 1,650 ^d
Bicarbonatos	142 ^a	ND	77 – 3,990 ^d
Sodio	10,700 ^a	520 – 120,000 ^b	132 – 97,000 ^b
Cloruros	19,353 ^a	1,400 – 190,000 ^b	80 – 200,000 ^b

ND = No disponible. BTEX = Benceno, Tolueno, Etilbenceno, Xileno. HAP = Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos.

Fuente: Modificado de: ^aZHENG, Jisi., et al. (2016); ^bMUNIRASU, Selvaraj, et al. (2016); ^cIGUNNU, Ebenezer T. y CHEN, George Z. (2012); ^dFAKHURU'L-RAZI, Ahmadun, et al. (2009).

1.5. GASES DISUELTOS

Los principales gases disueltos se forman naturalmente por las actividades de bacterias o por reacciones químicas en el agua⁴¹. El Dióxido de carbono (CO₂), El Oxígeno O₂ y el ácido sulfhídrico (H₂S) son los gases más comunes incluidos en el agua producida⁴².

1.6. SÓLIDOS PRODUCIDOS

Los sólidos de producción son una amplia gama de materiales que incluyen arcillas, sólidos precipitados, ceras, bacterias, carbonatos, arenas y limos, productos de corrosión y escamas, sólidos de la formación, ceras y asfáltenos⁴³.

1.7. MATERIALES RADIATIVOS

Dependiendo de la condición geológica algunas aguas producidas contienen materiales radiactivos de origen natural como Radio (Ra) y Uranio (U) en sus isótopos ²²⁶Ra, ²²⁷Ra, ²²⁸Ra, ²³⁸U y ²³⁵U.⁴⁴

1.8. MINERALES DISUELTOS

Los cationes y aniones afectan la química del agua producida en términos de la conductividad, la salinidad, y el potencial de formación de escamas⁴⁵. El Sodio (Na⁺) y el Cloro (Cl⁻) son responsables de la salinidad, que va desde unos pocos miligramos por litro (mg/L) a 300,000 mg/L. El Cl⁻, los Sulfatos (SO₄²⁻), los Carbonatos (CO₃²⁻), los Bicarbonatos (HCO₃⁻), Na⁺, el Potasio (K⁺), el Calcio (Ca⁺²), el Bario (Ba⁺²), el Magnesio (Mg⁺²), el hierro (Fe⁺²) y el Estroncio (Sr⁺²) afectan la conductividad y el potencial de formación de escamas⁴⁶.

⁴¹ IGUNNU, Ebenezer T. y CHEN, George Z., Op. Cit.

⁴² FAKHRU'L-RAZI, Ahmadun, *et al.*, Op. Cit.

⁴³ FAKHRU'L-RAZI, Ahmadun, *et al.*, Op. Cit.; IGUNNU, Ebenezer T. y CHEN, George Z., Op. Cit.

⁴⁴ MUNIRASU, Selvaraj, *et al.* Op. Cit.

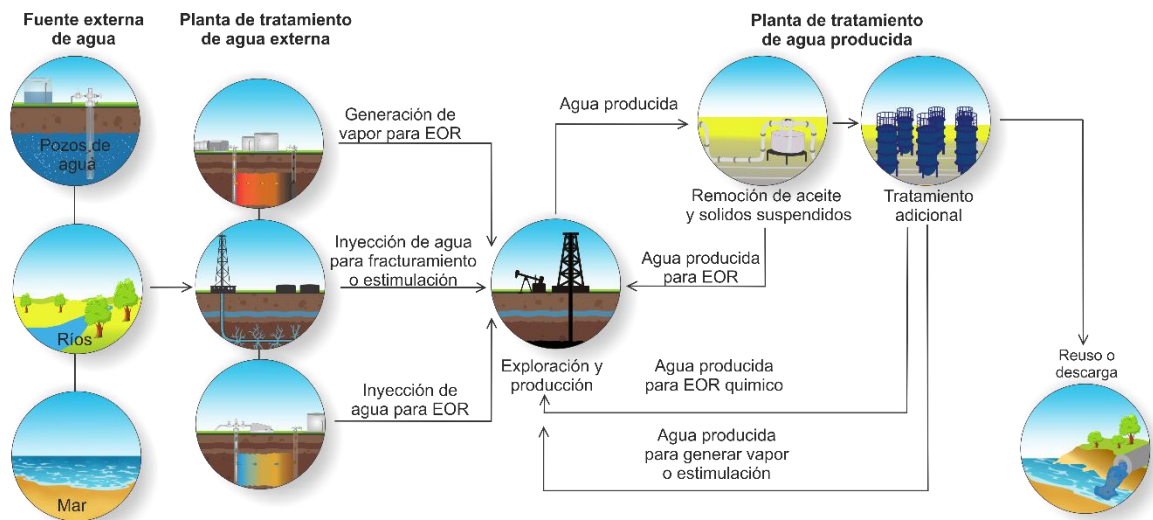
⁴⁵ FAKHRU'L-RAZI, Ahmadun, *et al.*, Op. Cit.

⁴⁶ IGUNNU, Ebenezer T. y CHEN, George Z., Op. Cit.

2. ESTRATEGIAS DE MANEJO DEL AGUA PRODUCIDA

Existen numerosos enfoques en el manejo del agua producida. La estrategia más apropiada para un lugar específico depende principalmente de la ubicación del sitio, la aceptación normativa, la viabilidad técnica, el costo y la disponibilidad de infraestructura y equipamiento⁴⁷. Con el propósito de reducir la contaminación, inicialmente se recomienda minimizar la producción de agua, luego el reusó o el reciclado de la misma y finalmente la disposición⁴⁸. Algunas de las opciones disponibles para el manejo del agua producida se muestran en la **Figura 3**.

Figura 3. Estrategias de manejo del agua producida.



Fuente: Modificado de DEGRÉMONT INDUSTRY. Water treatment for upstream oil and gas industry [en línea]. [citado 2 de agosto de 2016]. Disponible en Internet: <http://www.degremont-industry.com/en/your-industrial-sector/oil-and-gas-industry/>

2.1. REDUCCIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE AGUA

Se puede lograr mediante la modificación de los procesos existentes, la adaptación de tecnologías antiguas o nuevas y la sustitución de productos para asegurar que se genere menos agua desde el inicio. Es un reto reducir al mínimo la cantidad de agua producida, pero hay algunas estrategias que pueden utilizarse para restringir la entrada de agua del pozo. Estos implican dispositivos mecánicos de bloqueo o químicos que "cerrarán" las fracturas proveedoras de agua dentro de la formación evitando que el agua siga su camino hacia el pozo. Estas opciones representan una gran oportunidad para proteger el medio ambiente y ahorrar algunos costos, pero

⁴⁷ VEIL, John A., et al., Op. Cit.

⁴⁸ FAKHRU'L-RAZI, Ahmadun, et al., Op. Cit.

por lo general se considera que están en el ámbito de las actividades de ingeniería de yacimientos y producción en lugar del manejo del agua producida.

2.2. REÚSO O RECICLADO DEL AGUA PRODUCIDA

En algunos casos el agua puede tener usos alternativos, pero generalmente éstos están limitados por la calidad del agua. A veces, el agua se puede utilizar sin tratamiento, particularmente cuando el agua producida es muy limpia o cuando el uso final no requiere un agua de alta calidad. En la mayoría de los casos, el agua debe ser tratada antes de que pueda ser reutilizada. El costo de tratamiento del agua para cumplir con un uso final es un factor importante en la determinación de la opción adecuada. A continuación, se describen algunos enfoques para el reúso y el reciclado del agua producida:

2.2.1. Inyección para incrementar la recuperación de petróleo. La mayoría del agua producida generada se inyecta en tierra para mantener la presión del yacimiento y el accionamiento hidráulico del aceite hacia un pozo productor. Esta práctica se conoce a menudo como recuperación mejorada de petróleo (EOR), inyección de agua o vapor, dependiendo de la temperatura del agua. Cuando se maneja a través de la inyección para EOR, el agua producida se convierte en un recurso y no en un producto de desecho⁴⁹.

2.2.2. Uso beneficioso. Incluye la reutilización para el riego de cultivos, agua para el ganado, hábitat de la vida silvestre, la acuicultura y el cultivo de vegetales hidropónicos. Un reto importante para el uso de agua producida para fines agrícolas es la salinidad del agua. Los cultivos varían en su susceptibilidad a la salinidad y cuando esta se eleva por encima del umbral para una especie, los frutos pueden disminuir. Otra preocupación a la hora de usar el agua producida es la sodicidad. Los niveles excesivos de sodio pueden conducir a la pérdida de la estructura y la reducción de la conductividad hidráulica de los suelos y la creación de condiciones que pueden limitar o prevenir el crecimiento de plantas. Elementos adicionales en el agua producida puede causar daño a las plantas cuando está presente en cantidades suficientes⁵⁰. Es necesario el tratamiento del agua producida para cumplir con la calidad requerida para usos beneficiosos⁵¹.

⁴⁹ CLARK, C.E. y VEIL, J.A. Produced Water Volumes and Management Practices in the United States. USA, 2009.

⁵⁰ CLARK, C.E. y VEIL, J.A., Op. Cit.

⁵¹ FAKHRU'L-RAZI, Ahmadun, *et al.*, Op. Cit.

2.2.3. Usos industriales. Incluye agua para fractura miento hidráulico en campos de petróleo y gas, agua para la generación de energía, control de polvo y control de incendios. Para iniciar las operaciones de producción y mejorar la producción en curso, los pozos pueden ser fracturados hidráulicamente. La fracturación requiere una gran cantidad de barriles de agua. En los lugares donde las fuentes de agua locales son insuficientes o no están disponibles, el agua producida se puede utilizar para fracturar las formaciones productoras⁵².

2.3. MÉTODOS DE DISPOSICIÓN

El agua producida es tratada antes de su descarga o disposición. El proceso de tratamiento o la tecnología que se utilizará depende de la naturaleza del cuerpo que recibirá el agua producida tratada o de la calidad del agua necesaria.

2.3.1. Descarga controlada en la superficie. El agua producida es usada para rociar los caminos en el invierno y su contenido salino es aprovechado para derretir el hielo y la nieve a temperaturas cercanas al punto de congelamiento. La descarga en la superficie también se practica en algunas zonas áridas del mundo en donde el agua es rociada sobre los caminos para controlar al polvo⁵³.

2.3.2. Descarga controlada en aguas superficiales. La descarga controlada en aguas dulces superficiales se practica también en algunas zonas, para ello se ejerce el control sobre la cantidad de componentes disueltos en ella.

2.3.3. Descarga controlada en ambientes marinos costeros. Requiere principalmente un control del contenido del petróleo y del punto de descarga. Los objetivos principales son evitar las aguas muertas o estancadas y las zonas pesqueras⁵⁴.

2.3.4. Descarga en aguas profundas (Sin Mareas). Las descargas desde plataformas han sido comunes. Los controles aplicados han sido dirigidos principalmente al contenido de petróleo⁵⁵.

2.3.5. Evaporación. El agua se evapora de forma pasiva. La velocidad de evaporación dependerá del tamaño, la profundidad y la localización del estanque, así como de la calidad del agua producida. En las regiones semiáridas, el calor, y el

⁵² CLARK, C.E. y VEIL, J.A., Op. Cit.

⁵³ VEIL, John A., et al., Op. Cit.

⁵⁴ Ibid.

⁵⁵ Ibid.

movimiento de aire seco en la superficie de la tierra dará lugar a altas tasas de evaporación en los estanques más pequeños. A medida que la concentración de sólidos y otros constituyentes aumentan en el agua producida restante, la tasa de evaporación disminuye. Este enfoque de gestión puede llevarse a cabo in situ en pequeños estanques de evaporación o puede llevarse a cabo fuera de las instalaciones en grandes instalaciones comerciales. El agua se purifica por la evaporación, pero las sales y sólidos disueltos permanecen en la fosa de evaporación. Eventualmente, se deberá disponer de estos sólidos en forma segura. Una desventaja de los estanques de evaporación es que a menudo son atractivos para las aves acuáticas⁵⁶.

2.3.6. Inyección como método de eliminación. Los pozos de inyección para eliminación a menudo se encuentran en las formaciones que permiten que el agua sea bombeada a presiones inferiores a la presión de fractura y que a su vez estén aisladas de formaciones productoras de hidrocarburos. Además de la localización de una formación con características apropiadas para recibir el agua, también es importante que el agua producida sea químicamente compatible con las formaciones receptoras. Esto puede requerir tratamiento antes de la inyección para administrar excesos de sólidos disueltos, aceite, corrosión, reacciones químicas o microorganismos⁵⁷.

2.4. MANEJO DEL AGUA PRODUCIDA EN COLOMBIA

Para el año 2014, en Colombia por cada barril de crudo producido se generaron 1,98 m³ de agua, lo que en otras unidades equivale a 12,45 barriles de agua (Ver **Figura 4**), según el Informe de Gestión Ambiental del Sector Hidrocarburos, publicado por la Asociación Colombiana del Petróleo (ACP) y Ecopetrol (2014).

En Colombia el agua producida durante las operaciones de producción se maneja a través de las siguientes opciones disponibles:

- Se reinyecta para varios propósitos entre los que se destaca el recobro mejorado o el mantenimiento de la presión de los yacimientos.
- En otros casos, el agua producida se inyecta a otras formaciones almacenadoras como procedimiento de disposición final. Es importante mencionar que antes de realizar una inyección o reinyección se adelantan tratamientos de acuerdo con

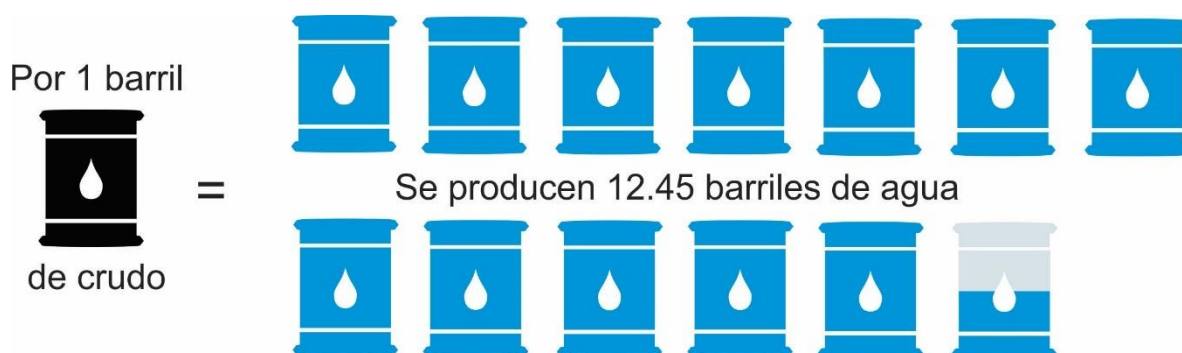
⁵⁶ CLARK, C.E. y VEIL, J.A., Op. Cit.

⁵⁷ Ibid.

las normas establecidas y luego sí se procede a la reinyección o inyección del agua producida.

- Otra parte de esta agua se dispone como vertimiento en los cuerpos de agua superficial. Este procedimiento debe estar debidamente autorizado en las licencias ambientales y debe cumplir con los límites permisibles de vertimiento.
- Una parte del agua no inyectada se reutiliza en riego de vías y aspersion en suelos previamente seleccionados por su capacidad receptora o para uso agrícola.
- Por último, otra parte se entrega a terceros debidamente legalizados para su disposición final.

Figura 4. Relación de producción Agua-Petróleo en Colombia.



Fuente: Modificado de ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE PETRÓLEO (ACP) Y ECOPETROL. Informe de Gestión Ambiental del Sector Hidrocarburos. Bogotá, 2014.

En la **Tabla 2** se puede observar el destino del agua producida y sus respectivos volúmenes para el año 2014. Aunque más del 50% (Ver **Figura 5**) del agua producida está siendo inyectada y reinyectada, una cantidad importante se descarga cada año en la superficie. Esta razón hace que los efectos causados por el agua producida en la salud humana y los ecosistemas sean un tema de gran interés actualmente.

Tabla 2. Estrategias de manejo del agua producida en Colombia y sus respectivos Volúmenes.

OPCION DE MANEJO	VOLUMEN (m ³)	VOLUMEN (bbbls)
Inyección y Reinyección	435,754,963	2,740,816,360
Reinyección para recobro	85,722,288	539,176,990
Inyección como disposición final	350,032,675	2,201,639,370
Vertimiento y otros	234,307,587	1,473,750,438
Vertimiento a cuerpos de agua	228,473,328	1,437,054,052
Riego en vías	187,446.07	1,179,000.35
Entrega a terceros	679,492.002	4,273,876.27
Aspersión	1,827,599.18	11,495,253.4
Reutilización para riego y otras actividades	3,139,721.67	19,748,255.9
Total	670,062,550	4,214,566,798

Fuente: Modificado de ACP Y ECOPETROL. Informe de Gestión Ambiental del Sector Hidrocarburos. Bogotá, 2014.

Figura 5. Estadísticas de manejo de agua producida en Colombia



Fuente: Modificado de ACP Y ECOPETROL. Informe de Gestión Ambiental del Sector Hidrocarburos. Bogotá, 2014.

3. IMPACTOS GENERADOS POR LOS CONTAMINANTES DEL AGUA PRODUCIDA

El agua producida a partir de la industria de los hidrocarburos es descargada con frecuencia en el medio ambiente generando impactos negativos. La toxicidad del agua y la carga orgánica generalmente pueden caracterizar el impacto de la descarga⁵⁸. La experiencia ha demostrado que los mayores contribuyentes al impacto ambiental son el aceite disperso, los compuestos aromáticos volátiles y pesados, los fenoles, los productos químicos añadidos⁵⁹ y los metales. Los principales efectos de algunos componentes del agua producida en la salud humana y los ecosistemas se muestran en la **Tabla 3**.

Tabla 3. Efectos generados por los contaminantes del agua producida.

EFFECTOS EN LA SALUD HUMANA	EFFECTOS EN LOS ECOSISTEMAS	POTENCIAL CANCERIGENO	LÍMITES DE TOXICIDAD
3.1. BENCENO			
La ingestión de alimentos o bebidas que contienen niveles altos de benceno puede producir vómitos, irritación del estómago, mareo, somnolencia, convulsiones, aceleración del latido del corazón, coma y la muerte. Los efectos del consumo de alimentos o líquidos que contienen niveles bajos de benceno no se conocen. ^a	En animales, la exposición a través de alimentos o agua contaminada con benceno puede alterar elementos de la sangre y el sistema inmunitario. Además, puede producir cáncer. ^a	El DHHS, la IARC y la EPA han determinado que el benceno es carcinogénico en seres humanos. ^a	La EPA estima que la exposición de por vida a 0.01 mg/L en el agua podría causar 1 caso de cáncer por cada 100,000 personas. Recomienda que los niños no se expongan a más de 0.2 mg/L en el agua. ^a
3.2. ETILBENCENO			
No hay datos fiables sobre los efectos causados en los seres humanos por beber etilbenceno. ^a	Las ratas que ingirieron cantidades altas de etilbenceno sufrieron daño grave del oído interno. ^a	La IARC ha determinado que el etilbenceno es posiblemente carcinogénico en seres humanos. ^a	La EPA recomienda no ingerir pescados ni agua de cuerpos de agua con contenido mayor a 0.53 mg/L. ^a

⁵⁸ HANSEN, BR. y DAVIES, SR. Review of potential technologies for the removal of dissolved components from produced water. Elsevier [en línea], 1994, vol.72. Disponible en Science Direct.

⁵⁹ GRINI, P.G., et al. Choosing Produced Water Treatment Technologies Based on Environmental Impact Reduction. SPE International Conference on Health, Safety and Environment in Oil and Gas Exploration and Production, Kuala Lumpur, Malaysia, 20-22 March, [en línea] 2002. SPE-74002-MS. Disponible en One Petro

Tabla 3. Continuación.

EFECTOS EN LA SALUD HUMANA	EFECTOS EN LOS ECOSISTEMAS	POTENCIAL CANCERIGENO	LÍMITES DE TOXICIDAD
3.3. TOLUENO			
<p>El tolueno es absorbido fácilmente por el cuerpo luego de su ingestión, produciendo depresión del sistema nervioso central. Síntomas como irritación pulmonar severa, daño al tejido pulmonar y la muerte pueden resultar luego de ingerir tolueno. ^b</p>	<p>Los efectos del tolueno en animales son similares a los observados en seres humanos. El efecto principal es sobre el cerebro y el sistema nervioso, pero cantidades moderadas o altas de tolueno también pueden experimentar efectos adversos en el hígado, los riñones, los pulmones y el sistema inmunitario. ^a</p>	<p>La IARC determinó que el tolueno no es clasificable en cuanto a carcinogenicidad en seres humanos. La EPA determinó que no hay información adecuada para evaluar la carcinogenicidad del tolueno. ^a</p>	<p>La EPA ha establecido un nivel de contaminación máximo en el agua potable de 1 mg/L. ^a</p>
3.4. XILENO			
<p>La exposición a niveles altos durante períodos breves o prolongados puede producir dolores de cabeza, falta de coordinación muscular, mareo, confusión y alteraciones del equilibrio. La exposición breve a niveles altos también puede causar irritación de la garganta; problemas pulmonares; alteraciones de la memoria; malestar estomacal; alteraciones del hígado y los riñones. La exposición a niveles muy altos puede causar pérdida del conocimiento y la muerte. ^a</p>	<p>En animales la exposición a grandes cantidades de xileno puede producir alteraciones del hígado, los riñones, los pulmones, el corazón y el sistema nervioso. La exposición breve a concentraciones muy altas produce espasmos musculares, incoordinación, sordera, alteraciones del comportamiento, alteraciones del peso de algunos órganos y también la muerte. ^a</p>	<p>Tanto la IARC como la EPA han determinado que no hay suficiente información para determinar si el xileno es carcinogénico y lo consideran no clasificable en cuanto a carcinogenicidad en seres humanos. ^a</p>	<p>La EPA ha establecido un NMC de 10 mg/L en agua suministrada a todo usuario de sistemas públicos de agua. ^a</p>
3.5. FENOLES			
<p>La ingestión de concentraciones altas de fenol ha producido daño intestinal grave, quemaduras internas y la muerte. ^a</p>	<p>Algunos animales que tomaron agua con concentraciones muy altas de fenol sufrieron temblores musculares, dificultad para caminar y la muerte. ^a</p>	<p>La IARC y la EPA han determinado que el fenol no es clasificable en cuanto a carcinogenicidad en seres humanos. ^a</p>	<p>La FDA ha determinado que la concentración en el agua en botella no debe exceder 0.001 mg/L. ^a</p>

Tabla 3. Continuación.

EFECTOS EN LA SALUD HUMANA	EFECTOS EN LOS ECOSISTEMAS	POTENCIAL CANCERIGENO	LÍMITES DE TOXICIDAD
3.6. HIDROCARBUROS AROMÁTICOS POLICÍCLICOS			
<p>Los estudios realizados en los seres humanos demuestran que en ciertas circunstancias las personas pueden contraer cáncer. También se podrían presentar problemas reproductivos. ^a</p>	<p>Varios HAP, han causado tumores en los animales de laboratorio. Las ratonas durante el embarazo tuvieron problemas reproductivos, así como sus crías tuvieron defectos congénitos y disminución del peso corporal. También pueden causar efectos dañinos en la piel, los fluidos corporales y el sistema que utiliza el cuerpo para combatir las enfermedades después de exposiciones tanto a corto como a largo plazo. ^a</p>	<p>El DHHS ha determinado que algunos HAP son reconocidos carcinógenos animales y es razonable predecir que son carcinogénicos en seres humanos. La IARC y la EPA han determinado que son posibles carcinógenos humanos. ^a</p>	<p>La OMS ha establecido que el agua potable no debe contener más de 0.0007 mg/L. ^c</p>
3.7. CADMIO			
<p>Ingerir niveles de cadmio muy altos produce irritación grave del estómago causando vómitos y diarrea. La exposición prolongada a niveles más bajos produce acumulación en los riñones y posiblemente enfermedad renal. ^a</p> <p>Otros efectos pueden ser daño del pulmón y fragilidad de los huesos, fallos en la reproducción y posible infertilidad, daño al sistema nervioso central y al sistema inmune, desordenes psicológicos, posible daño en el ADN o desarrollo de cáncer. ^c</p>	<p>Las vacas pueden tener grandes cantidades de Cadmio en sus riñones. Las lombrices y otros animales esenciales para el suelo son extremadamente sensibles al envenenamiento por Cadmio y pueden morir a muy bajas concentraciones. El Cadmio se puede bioacumular en mejillones, ostras, gambas, langostas y peces. En los animales algunas veces se presenta presión sanguínea alta, daños del hígado y daños en nervios y el cerebro. ^c</p>	<p>El DHHS y la IARC han determinado que el cadmio y los compuestos de cadmio son carcinogénicos en seres humanos. La EPA también determinó que es probablemente carcinogénico en seres humanos. ^a</p>	<p>La EPA autoriza sólo 0.005 mg/L en el agua para consumo humano. La FDA ha determinado que la concentración de cadmio en agua embotellada para beber no debe exceder 0.005 mg/L. ^a</p>

Tabla 3. Continuación.

EFECTOS EN LA SALUD HUMANA	EFECTOS EN LOS ECOSISTEMAS	POTENCIAL CANCERIGENO	LÍMITES DE TOXICIDAD
<p>3.8. ARSÉNICO</p> <p>Niveles bajos de arsénico pueden producir náuseas y vómitos, disminución del número de glóbulos rojos y blancos, ritmo cardíaco anormal, fragilidad capilar y sensación de hormigueo en las extremidades. ^a</p> <p>Puede causar cambios en la piel e irritación de los pulmones y el estómago. Altas concentraciones pueden causar infertilidad y abortos, pérdida de las defensas y daño del cerebro. ^c</p>	<p>En las aguas superficiales aumentan las posibilidades de alterar el material genético de los peces. Las aves comen peces que contienen eminentes cantidades de arsénico y mueren como resultado del envenenamiento por arsénico como consecuencia de la descomposición de los peces en sus cuerpos. ^c</p>	<p>El DHHS y la EPA han determinado que el arsénico inorgánico es un elemento reconocido como carcinogénico en seres humanos. La IARC ha determinado que el arsénico inorgánico es carcinogénico en seres humanos. ^a</p>	<p>La EPA redujo el límite en el agua potable de 0.05 a 0.01 mg/L. ^a</p>
<p>3.9. BARIO</p> <p>La ingestión durante un período breve de cantidades relativamente altas puede producir vómitos, calambres estomacales, diarrea, dificultad para respirar, aumento o disminución de la presión sanguínea, adormecimiento de la cara y debilidad muscular. La ingestión de cantidades muy altas de compuestos de bario puede alterar el ritmo del corazón y producir parálisis y posiblemente la muerte. ^a</p>	<p>Algunos animales que ingirieron bario durante mucho tiempo sufrieron daño del riñón, pérdida de peso y algunos fallecieron. ^a</p> <p>Cuando peces y otros organismos acuáticos absorben los compuestos del Bario, éste se acumula en sus cuerpos. ^c</p>	<p>El DHHS y la IARC no han clasificado al bario en cuanto a carcinogenicidad. La EPA ha determinado que es improbable que la ingestión de bario produzca cáncer en seres humanos. ^a</p>	<p>La EPA ha determinado que el agua potable no debe contener más de 2 mg/L. ^a</p>
<p>3.10. COBRE</p> <p>La ingestión de niveles altos de cobre puede producir náuseas, vómitos y diarrea. Cantidades muy altas de cobre pueden dañar el hígado y los riñones y pueden aún causar la muerte. ^a</p>	<p>Los animales pueden absorber concentraciones de que dañan su salud. Las ovejas sufren un gran efecto por envenenamiento, debido a que los efectos del Cobre se manifiestan a bajas concentraciones. ^c</p>	<p>La EPA ha determinado que el cobre no es clasificable en cuanto a carcinogenicidad en seres humanos. ^a</p>	<p>La EPA ha establecido que el agua potable no contenga más de 1.3 mg/L. ^a</p>

Tabla 3. Continuación.

EFECTOS EN LA SALUD HUMANA	EFECTOS EN LOS ECOSISTEMAS	POTENCIAL CANCERIGENO	LÍMITES DE TOXICIDAD
<p>3.11. NÍQUEL</p> <p>Tras la ingestión de bajas cantidades algunas personas sufren dolores de estómago y efectos adversos en la sangre y los riñones. ^a Altas cantidades traen consecuencias como elevadas probabilidades de desarrollar cáncer de pulmón, nariz, laringe y próstata, embolia de pulmón, fallos respiratorios, defectos de nacimiento, asma, bronquitis crónica y desordenes del corazón. ^c</p>	<p>Ha producido enfermedad del pulmón en perros y ratas. Ha afectado el estómago, la sangre, el hígado, los riñones y el sistema inmunitario en ratas y ratones, como también la reproducción y el desarrollo. ^a Altas concentraciones en suelos pueden dañar las plantas y en aguas superficiales puede disminuir el rango de crecimiento de las algas. ^c</p>	<p>El DHHS ha determinado que es razonable predecir que el níquel y los compuestos de níquel son sustancias reconocidas como carcinogénicas. La IARC ha determinado que algunos compuestos de níquel son carcinogénicos en seres humanos. ^a</p>	<p>La EPA recomienda que los niveles en el agua potable no excedan 0.1 mg/L. ^a</p>
<p>3.12. CROMO</p> <p>La toma elevada de cromo puede causar efectos como erupciones cutáneas, malestar de estómago y úlceras, problemas respiratorios, debilitamiento del sistema inmune, daño en los riñones e hígado, alteración del material genético, cáncer de pulmón y muerte. ^c</p>	<p>Los efectos principales en animales son irritación, úlceras tanto en el estómago como en el intestino delgado y anemia. Se han observado daños de los espermatozoides y del sistema reproductivo. ^a Puede causar problemas respiratorios y formación de tumores. ^c</p>	<p>El DHHS, la IARC y la EPA han determinado que los compuestos de cromo son carcinogénicos en seres humanos. ^a</p>	<p>La EPA ha establecido un NMC de 0.1 mg/L para la cantidad total de cromo en el agua potable. ^a La FDA ha determinado que en el agua en botella no deben exceder 0.1 mg/L. ^a</p>
<p>3.13. PLATA</p> <p>La exposición a altos niveles de plata por un período largo puede producir una condición llamada argiria, que es un descoloramiento azul-grisáceo de la piel y otros tejidos. ^a Algunos efectos de la ingestión pueden ser: molestias estomacales, náuseas, vómitos, diarrea, narcosis y anomalías cardíacas. ^c</p>	<p>Estudios en animales han demostrado que produce depósitos de plata en la piel. ^a La sobre exposición crónica tiene efectos como: daños renales, oculares, pulmonares, hepáticos, cerebrales y anemia. ^c</p>	<p>La EPA ha determinado que la plata no es clasificable en cuanto a carcinogenicidad en seres humanos. ^a</p>	<p>La EPA recomienda que la concentración de la plata en el agua potable no exceda 0.10 mg/L para evitar que el descoloramiento de la piel ocurra. ^a</p>

Tabla 3. Continuación.

EFECTOS EN LA SALUD HUMANA	EFECTOS EN LOS ECOSISTEMAS	POTENCIAL CANCERIGENO	LÍMITES DE TOXICIDAD
<p>3.14. VANADIO</p> <p>Personas que han ingerido vanadio han sufrido diarrea leve y calambres estomacales. ^a</p> <p>Otros efectos son irritación de pulmones, garganta, ojos y cavidades nasales, daño cardíaco y vascular, daño en el sistema nervioso, sangrado del hígado y riñones, irritación de la piel, temblores severos, parálisis, sangrado de la nariz, dolor de cabeza, mareos y cambios de comportamiento. ^c</p>	<p>En animales se han descrito efectos como disminución del número de glóbulos rojos, aumento de la presión sanguínea y leves efectos neurológicos. ^a</p> <p>También puede causar desordenes respiratorios, daño en el sistema reproductivo de los machos, alteraciones en el ADN, parálisis y efectos negativos en el hígado y los riñones. ^c</p>	<p>La IARC lo ha clasificado como posiblemente carcinogénico en seres humanos basado en evidencia de cáncer de pulmón en ratones. El DHHS y la EPA no han clasificado al vanadio en cuanto a carcinogenicidad en seres humanos. ^a</p>	<p>La EPA ha decidido que consumir menos de 0.009 mg de pentóxido de vanadio por kilogramo de su peso corporal, no es riesgoso. ^a</p>
<p>3.15. PLOMO</p> <p>El plomo puede afectar a casi todos los órganos y sistemas en el cuerpo. Puede producir debilidad en los dedos, las muñecas o los tobillos, un pequeño aumento de la presión sanguínea y anemia. La exposición a niveles altos de plomo puede dañar seriamente el cerebro y los riñones, producir abortos, alterar la producción de espermatozoides y causar la muerte. ^a</p> <p>El Plomo también puede causar perturbación del sistema nervioso y daño al cerebro. ^c</p>	<p>El Plomo se acumula en los cuerpos de los organismos acuáticos y del suelo, que experimentan efectos en su salud por envenenamiento por Plomo. Los efectos sobre la salud de los crustáceos pueden tener lugar incluso sólo en pequeñas concentraciones. ^c</p>	<p>El DHHS ha determinado que el plomo y los compuestos de plomo son carcinogénicos en seres humanos. La EPA ha determinado que es probablemente carcinogénico en seres humanos. La IARC ha determinado que el plomo inorgánico probablemente es carcinogénico, pero no se ha determinado si los compuestos orgánicos de plomo pueden producir cáncer en seres humanos. ^a</p>	<p>La EPA limita la cantidad de plomo en el agua potable a 0.015 mg/L. ^a</p>

Tabla 3. Continuación.

EFECTOS EN LA SALUD HUMANA	EFECTOS EN LOS ECOSISTEMAS	POTENCIAL CANCERIGENO	LÍMITES DE TOXICIDAD
<p>3.16. CINCO</p> <p>La ingestión de grandes cantidades brevemente puede causar calambres estomacales, náusea y vómitos. Si se ingieren grandes cantidades durante un período más prolongado pueden causar anemia y disminución de los niveles del tipo de colesterol que es beneficioso. ^a</p> <p>Altos niveles también pueden dañar el páncreas y disturbar el metabolismo de las proteínas, y causar arteriosclerosis. ^c</p>	<p>La administración de grandes cantidades de cinc a ratas las hizo estériles. ^a</p> <p>Algunos peces pueden acumular Zinc en sus cuerpos y es capaz de biomagnificarse en la cadena alimentaria. Puede ser una amenaza para el ganado y para las plantas. Además, puede tener influencias negativas en la actividad de microorganismos y lombrices. ^c</p>	<p>El DHHS y la IARC no han clasificado al cinc en cuanto a carcinogenicidad. Basado en información incompleta de estudios en seres humanos y en animales, la EPA ha determinado que el cinc no es clasificable en cuanto a carcinogenicidad en seres humanos. ^a</p>	<p>Los niveles que producen efectos adversos son más altos de 11 mg/día para hombres y 8 mg/día para mujeres. La EPA recomienda que el agua potable contenga menos de 5 mg/L. ^a</p>
<p>3.17. MERCURIO</p> <p>El sistema nervioso es muy susceptible al mercurio. Puede dañar de forma permanente los riñones y el cerebro. Los efectos pueden ser: irritabilidad, timidez, temblores, alteraciones a la vista o la audición y problemas de la memoria. ^a</p> <p>También puede causar daños en el ADN y cromosomas (causa mongolismo), la reproducción, el esperma, defectos de nacimiento y abortos. Además, puede causar otros efectos como cansancio, dolor de cabeza, irritación de los pulmones, los ojos, reacciones en la piel, vómitos y diarreas. ^c</p>	<p>El Mercurio en los animales puede provocar daños en los riñones e intestinos, trastornos en el estómago, fallos en la reproducción y alteración del ADN. ^c</p>	<p>La EPA ha determinado que el cloruro mercúrico y el metil mercurio son posiblemente carcinogénicos en seres humanos. ^a</p>	<p>La EPA ha establecido un NMC de 0.002 mg/L en el agua potable y recomienda que en ríos, lagos y arroyos no exceda 0.000144 mg/L. La FDA confisca pescados, mariscos y semillas que contengan más de 1 mg/L de metil mercurio. ^a</p>

Tabla 3. Continuación.

EFECTOS EN LA SALUD HUMANA	EFECTOS EN LOS ECOSISTEMAS	POTENCIAL CANCERIGENO	LÍMITES DE TOXICIDAD
<p>3.18. RADIO</p> <p>Se ha demostrado que el radio produce efectos en la sangre (anemia) y los ojos (cataratas). También afecta los dientes, produciendo fractura de los dientes y aumento de caries. ^a</p> <p>Cuando la exposición es larga puede incluso causar cáncer y puede eventualmente producir la muerte. ^c</p>	<p>El radio puede encontrarse en peces y otros organismos acuáticos por lo cual se da la biomagnificación en la cadena trófica. ^c</p>	<p>La EPA y el Comité de Efectos Biológicos de la Radiación ionizante de la Academia Nacional de Ciencias han manifestado que el radio es un carcinógeno reconocido en seres humanos. ^a</p>	<p>La EPA ha establecido un límite en agua potable de 0.185 bq/L para el radio²²⁶ y el radio²²⁸ (combinados). ^a</p>
<p>3.19. URANIO</p> <p>La ingestión de compuestos de uranio solubles en agua causa efectos en el riñón. ^a</p> <p>Puede provocar enfermedades del hígado, efectos en la reproducción humana y hay posibilidades de desarrollar cáncer. ^c</p>	<p>En ratas y ratones machos, la exposición al uranio disminuye la fertilidad. ^a</p> <p>Las plantas absorben uranio a través de sus raíces y lo almacenan allí. ^c</p>	<p>Ni el NTP, ni la IARC o la EPA han clasificado al uranio en cuanto a cáncer. ^a</p>	<p>La EPA ha establecido un NMC de 0.03 mg/L para uranio en el agua potable, sin embargo el objetivo es que el agua potable no contenga uranio. ^a</p>
<p>3.20. SULFATOS</p> <p>Niveles elevados de sulfato pueden provocar diarrea y deshidratación. ^c</p>	<p>En animales jóvenes, altos niveles pueden estar asociados con diarrea crónica y grave, y en algunos casos, la muerte. ^c</p>	<p>No hay información disponible sobre una clasificación de los sulfatos en cuanto a carcinogenicidad.</p>	<p>Como precaución, aguas con un nivel de sulfatos superior a 400 mg/L no deben ser usadas en la preparación de alimentos. ^c</p>
<p>3.21. CLORUROS</p> <p>Niveles bajos pueden producir irritación de la nariz, la garganta y los ojos. Niveles más altos puede producir tos, alteraciones del ritmo respiratorio y daño de los pulmones. ^a</p> <p>También irrita la piel y el sistema respiratorio. ^c</p>	<p>Es especialmente dañino para organismos que viven en el agua y el suelo. ^c</p>	<p>El DHHS, la IARC y la EPA no han clasificado al cloro en cuanto a carcinogenicidad en seres humanos. ^a</p>	<p>La EPA ha establecido un NMC de 4 mg/L para cloro libre en el agua potable. ^a</p>

Tabla 3. Continuación.

EFECTOS EN LA SALUD HUMANA	EFECTOS EN LOS ECOSISTEMAS	POTENCIAL CANCERIGENO	LÍMITES DE TOXICIDAD
3.22. SODIO			
Un exceso de sodio puede dañar los riñones e incrementar las posibilidades de hipertensión. Exposiciones muy severas pueden causar dificultad para respirar, tos y bronquitis química. ^c	En ecosistemas acuáticos puede afectar especies como el pez mosquito y el pez sol. ^c	No hay información disponible sobre una clasificación de los sulfatos en cuanto a carcinogenicidad.	El límite Medio de Tolerancia para el pez mosquito es 125 mg/L en 96 horas y para el pez sol es 88 mg/L en 48 horas. ^c

DHHS = Departamento de Salud y Servicios Humanos. IARC = Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer. EPA = Agencia de Protección del Medio Ambiente. HAP = Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos. OMS = Organización Mundial de la Salud. NMC = Nivel máximo de contaminación. FDA = Agencia de Alimentos y Medicamentos. NTP = Programa de Toxicología Nacional.

Fuente: Modificado de: ^a AGENCIA PARA SUSTANCIAS TÓXICAS Y EL REGISTRO DE ENFERMEDADES (ATSDR); ^b CENTRO CANADIENSE DE SEGURIDAD Y SALUD OCUPACIONAL (CCSSO); ^c LENNTECH.

4. REGULACIONES GUBERNAMENTALES PARA EL MANEJO DEL AGUA PRODUCIDA

4.1. INYECCIÓN

Los criterios de calidad del agua producida deben establecerse teniendo en cuenta la estrategia de manejo que será aplicada. En el caso de la inyección es necesario reducir el ensuciamiento y la cantidad de bacterias presentes en el agua para evitar daños en la formación receptora⁶⁰. El pH debe estar entre 5.5 y 9 y las concentraciones de cloruros, Bario, Plomo y aceite y grasa, no deben ser mayores a 250 mg/L, 5 mg/L, 0.4 mg/L y 30 mg/L respectivamente⁶¹.

4.2. REÚSO

Para el reúso del agua producida también han sido establecidos algunos criterios de calidad. En Colombia el pH debe estar entre 6 y 9 y la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) no debe superar los 30 mg/L de O₂. Las concentraciones de HAP y BTEX deben ser de 0.01 mg/L y 0.001 mg/L respectivamente. Metales como Aluminio, Hierro y Plomo no deben superar los 5 mg/L. La máxima concentración de cloruros debe ser de 300 mg/L y la de sulfatos de 500 mg/L⁶².

4.3. DESCARGA

La descarga del agua producida debe cumplir con los límites permisibles en los vertimientos en alta mar o en tierra de cada país. Una legislación general para la descarga del agua producida en el mar ha sido de 40 mg/L de aceite en agua⁶³. El límite de aceite y grasa permitido para la descarga de agua producida en alta mar en Australia es de 30 mg/L en promedio⁶⁴. Según la normativa de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA, 2011), el límite diario máximo de aceite y grasa en el agua para descarga es 42 mg/L y el promedio mensual es 29 mg/L. La demanda química de oxígeno (DQO) y el límite mensual promedio de descarga de aceite y grasa establecidos por la República Popular de China son 100

⁶⁰ ARTHUR, J. Daniel, et al. Op. Cit.

⁶¹ FEDERACIÓN DE COMUNIDADES NATIVAS DEL CORRIENTES (FECONACO). Características y calidad del agua de reinyección [en línea]. [citado 26 de agosto de 2015]. Disponible en Internet: http://feconaco.org/documentos/teoria_reinyeccion.htm#calidad

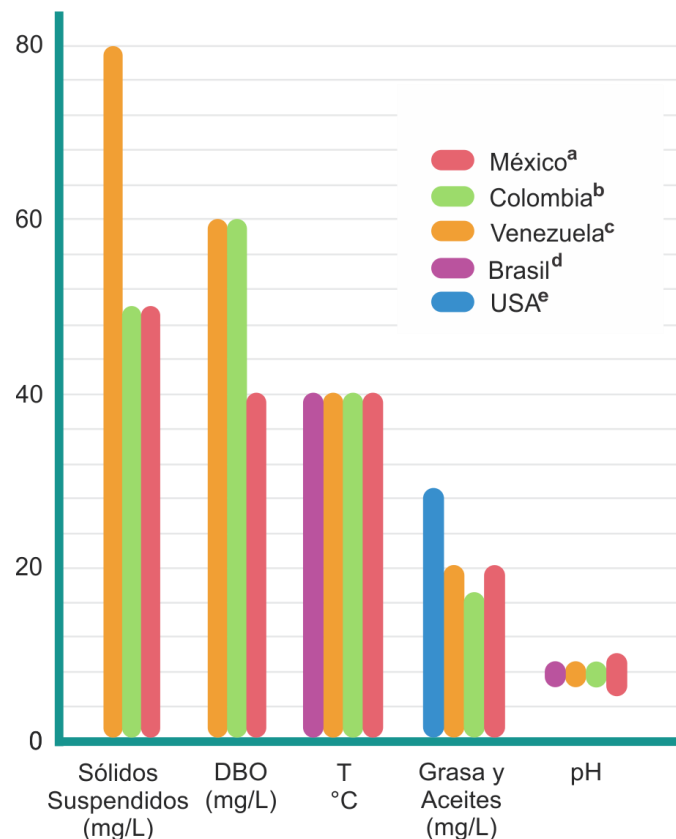
⁶² COLOMBIA, MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE (MADS). Resolución 1207 de 2014, (25 de julio de 2014). Disposiciones relacionadas con el uso de aguas residuales tratadas.

⁶³ IGUNNU, Ebenezer T. y CHEN, George Z., Op. Cit.

⁶⁴ NEFF, Jerry M. Op. Cit.

y 10 mg/L, respectivamente⁶⁵. En el sector noruego del Mar del Norte los operadores deben cumplir con la legislación noruega que llama a "cero impactos ambientales" de los vertimientos al agua⁶⁶. Actualmente en Colombia el contenido de aceite y grasa en el agua producida no debe superar los 15 mg/L para descargas en tierra⁶⁷. La **Figura 6** muestra algunos parámetros y sus límites máximos para la descarga del agua producida en ciertos países.

Figura 6. Parámetros y límites máximos establecidos para Vertimientos en algunos países.



Fuente: Modificado de ^a Norma Oficial Mexicana NOM-001 (1997). ^b Resolución 0631 (2015). ^c Ley Orgánica de Ambiente, Decreto 883 (1995). ^d Resolução 357 (2005). ^e EPA (2011).

⁶⁵ TELLEZ, Gilbert T., et al. Performance evaluation of an activated sludge system for removing petroleum hydrocarbons from oilfield produced water. Elsevier [en línea], 2002, vol.6, no.4. Disponible en Science Direct.

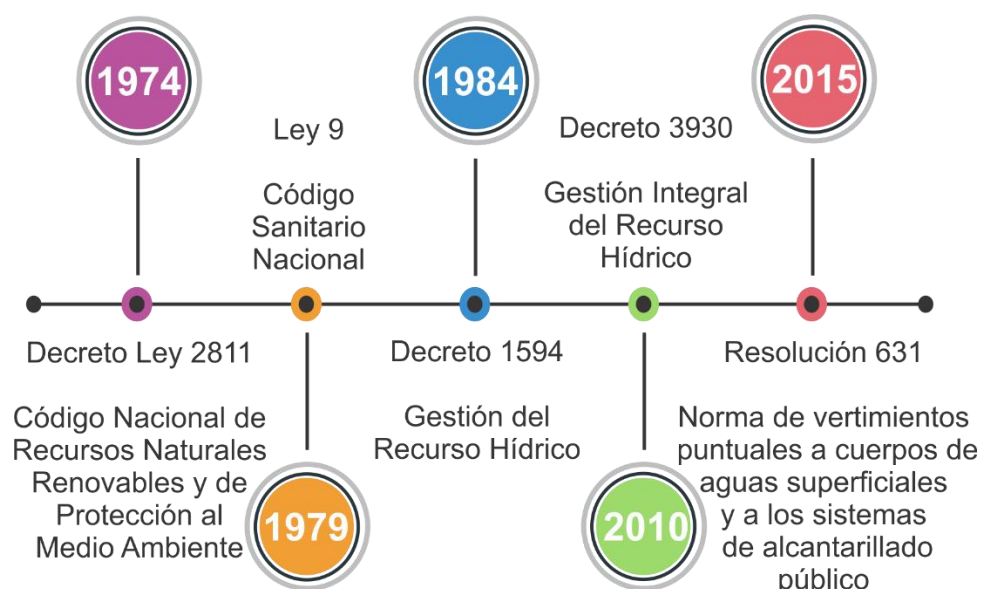
⁶⁶ BYBEE, Karen. A Process Option to Comply with Zero-Harmful-Discharge Legislation in Norwegian Waters. Journal of Petroleum Technology [en línea], 2009, vol.61, no.04. Disponible en One Petro.

⁶⁷ COLOMBIA, MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE (MADS). Resolución 0631 de 2015 (17 de marzo de 2015). Parámetros y límites máximos permisibles es los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público.

4.4. EVOLUCIÓN DE LA NORMATIVIDAD COLOMBIANA PARA CONTROLAR Y REDUCIR LA CONTAMINACIÓN DEL AGUA.

En Colombia, la normatividad ambiental con el propósito de controlar y reducir la contaminación del agua ha evolucionado como se muestra en la **Figura 7**. Según el MADS los cambios en la legislación se han dado por la disminución de la cantidad y calidad del agua para el desarrollo productivo y por el deterioro progresivo de los ríos y quebradas del país.

Figura 7. Línea de tiempo de la normatividad ambiental para controlar y reducir la contaminación del agua.



Fuente: Los Autores.

4.4.1. Decreto 2811 de 1974 y Ley 9 de 1979. El Decreto 2811 (1974) trató de establecer condiciones para prevenir y controlar los perjuicios ambientales que se pudieran producir por el uso del agua en actividades de exploración y explotación. Definió parámetros con el propósito de evitar daños en los con tornos terrestres o acuáticos tras derrames de petróleo y escapes de gas. Hizo énfasis en los hábitats de especies vulnerables y en áreas declaradas dignas de protección. Prontamente, la Ley 9 (1979) estableció que todo vertimiento de residuos líquidos a cuerpos de agua superficiales debía cumplir con los requisitos establecidos por el Ministerio de Salud, teniendo en cuenta las características de la fuente receptora correspondiente. Aunque fue el inicio de la legislación ambiental, los aspectos fueron contemplados de manera muy general y no se llegó a establecer límites en

los contaminantes para vertimientos. Lo anterior, no permitió realizar un control adecuado sobre la calidad del agua.

4.4.2. Decreto 1594 de 1984. El Decreto 1594 (1984) identificó los límites máximos permisibles de las sustancias de interés sanitario y los criterios de calidad del agua con respecto a su uso. Consideró la toxicidad de cada sustancia con el fin de evitar daños en la salud humana o la muerte de organismos. Prohibió todo vertimiento de residuos líquidos a las calles, calzadas, canales o sistemas de alcantarillado y su inyección a los acuíferos. Sin embargo, estableció que se permite la reinyección del agua proveniente de la exploración o explotación, siempre y cuando no se impida el uso potencial de un acuífero. Algunos parámetros que debía cumplir un vertimiento a cuerpos de agua según este Decreto son: pH de 5 a 9, temperatura menor a 40 °C, remoción de grasas y aceites mayor al 80% en carga. Dependiendo del tipo de usuario (existente o nuevo) la remoción de sólidos suspendidos debía ser mayor al 50% u 80% y la de DQO mayor al 20% u 80% en carga. Fijó un mecanismo de control en kg/día y no en mg/L.

Algunas falencias y aciertos fueron encontrados en este Decreto. Londoño y Parra⁶⁸ (2007) argumentan que se debe reconocer que el problema no sólo está centrado en la calidad de los vertimientos, sino también en la conservación de la calidad de los cuerpos de agua y que una de las grandes falencias que presenta esta norma es que se ve limitada al control de los vertimientos puntuales, dejando de lado los vertimientos no puntuales. En el documento Conpes 3177 (2002) se afirma que *“aunque la norma contempla varios contaminantes, ...no se ha logrado una disminución significativa de la contaminación vertida, aun cuando muchos grandes industriales han realizado inversiones importantes para alcanzar el cumplimiento de dicha norma”*⁶⁹. Según el Ministerio del Medio Ambiente (1997), se debió relacionar la norma con el criterio de calidad para garantizar que los usos no fueran afectados por las descargas y que los deficientes resultados obtenidos después de la implementación de este decreto pudieron deberse a vacíos en la legislación y carencias estructurales en las autoridades ambientales.

4.4.3. Decreto 3930 de 2010. El Decreto 3930 (2010) derogó el Decreto 1594 de 1984. Sin embargo, siguieron transitoriamente vigentes los artículos que establecían los valores límites de contaminantes. Este decreto responsabilizó al

⁶⁸ LONDOÑO PÉREZ, Rubén Darío y PARRA MARTÍNEZ, Yanneth. Manejo de vertimientos y desechos en Colombia. Una visión general. Universidad de La Salle. Bogotá, 2007.

⁶⁹ DEPARTAMENTO NACIONAL DE PLANEACIÓN (2002). Acciones prioritarias y lineamientos para la formulación del plan nacional de manejo de aguas residuales. CONPES, 3177. Bogotá, 2002.

MADS de fijar mediante resolución los usos del agua y sus criterios de calidad para cada uso, los límites para vertimiento a los cuerpos de agua, aguas marinas, alcantarillados públicos y al suelo y el Protocolo para el Monitoreo de los Vertimientos en Aguas Superficiales y Subterráneas. Obedeciendo a lo anterior, se creó la resolución 0631 de 2015.

4.4.4. Resolución 0631 de 2015. La Norma de Vertimientos Puntuales a Cuerpos de Agua Superficiales y a los Sistemas de Alcantarillado está vigente desde el 1 de enero de 2016 y es más rigurosa que todas las anteriores. Para su estructuración se observaron como referencia indicadores internacionales e información enviada tanto por cada sector como por las autoridades ambientales que realizan el seguimiento⁷⁰. Se estableció un régimen de transición de 2 años para las empresas con permiso vigente de vertimientos que cumplieran con el decreto 1594 y 1.5 años para aquellos que no estuviesen cumpliendo el decreto 1594. Si durante el primer año de vigencia de la nueva norma la empresa presenta Plan de Reconversión a Tecnologías Limpias tiene 3 años adicionales⁷¹.

Esta resolución fija de manera más exigente los parámetros y los límites máximos permisibles de sustancias contaminantes que llegan a los cuerpos de agua. Además, contempla 56 parámetros mostrados en la **Tabla 4**, para 73 actividades productivas y ocho sectores, entre los cuales está el sector Hidrocarburos. El Artículo 11 de dicha resolución es el relacionado con las actividades asociadas con hidrocarburos (petróleo crudo, gas natural y derivados).

Adicionalmente hace algunas aclaraciones en sus párrafos. El primero de estos establece que en casos en los que el vertimiento puntual se realice en un cuerpo de agua superficial que tenga como destino el uso del agua para consumo humano, doméstico y pecuario, la concentración de HAP en el vertimiento puntual deberá ser menor o igual a 0,01 mg/L para aquellas actividades que lo tienen definido como de análisis y reporte. En el segundo párrafo prohíbe los vertimientos de agua producida a partir de yacimientos no convencionales de hidrocarburos hasta que el MADS cuente con la información técnica que le permita establecer los parámetros y sus valores límites máximos permisibles.

⁷⁰ MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE (MADS). Instrumentación Ambiental. Respuestas a los comentarios presentados por actores externos a propuestas normativas. Bogotá, 2015.

⁷¹ MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE (MADS). Minambiente presenta nueva Norma de Vertimientos que permitirá mejorar la calidad del agua del país [en línea]. Bogotá, 18 de marzo de 2015. Disponible en Internet: <https://goo.gl/o0nQ1b>

Contrario al Decreto 1594, esta norma establece los límites en mg/L y no en kg/día, lo que permite un mayor control en los vertimientos. Una de las principales falencias en el Decreto 0631 de 2015 es que muchos de los parámetros que se han identificado como altamente tóxicos para la salud humana y los ecosistemas no tienen establecida una concentración límite. En su lugar aparece para “*análisis y reporte*”, expresión que según el MADS (2015) tiene como objetivo generar una línea base para establecer en el futuro un límite máximo permisible.

Tabla 4. Parámetros y valores límites máximos permisibles en vertimientos superficiales para la industria de los hidrocarburos.

PARÁMETRO	UNIDADES	EXPLORACIÓN	PRODUCCIÓN
Generales			
pH	Unidades de pH	6 a 9	6 a 9
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L O ₂	400	180
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)	mg/L O ₂	200	60
Sólidos suspendidos Totales (SST)	mg/L	50	50
Sólidos Sedimentables (SSED)	mg/L	1	1
Grasas y aceites	mg/L	15	15
Fenoles	mg/L	0.2	0.2
Sustancias Activas al Azul de Metileno (SAAM)	mg/L	AR	AR
Temperatura	° C	40	40
Hidrocarburos			
Hidrocarburos Totales (HTP)	mg/L	10	10
Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP)	mg/L	AR	AR
BTEX (Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xileno)	mg/L	AR	AR
Compuestos Orgánicos Halogenados Adsorbibles (AOX)	mg/L	AR	AR
Compuestos de Fósforo			
Fósforo Total (P)	mg/L	AR	AR
Ortofósatos (P-PO ₄ ³⁻)	mg/L	AR	AR
Compuestos de Nitrógeno			
Nitratos (N-NO ₃ ⁻)	mg/L	AR	AR
Nitrógeno Amoniacal (N-NH ₃)	mg/L	AR	AR
Nitrógeno Total (N)	mg/L	10	10

Tabla 4. Continuación

PARÁMETRO	UNIDADES	EXPLORACIÓN	PRODUCCIÓN
Iones			
Cianuro Total (CN ⁻)	mg/L	1	1
Cloruros (Cl ⁻)	mg/L	1 200	1 200
Fluoruros (F ⁻)	mg/L	AR	AR
Sulfatos (SO ₄ ²⁻)	mg/L	300	300
Sulfuros (S ²⁻)	mg/L	1	1
Metales y Metaloides			
Arsénico (As)	mg/L	0.1	0.1
Bario (Ba)	mg/L	AR	AR
Cadmio (Cd)	mg/L	0.1	0.1
Cinc (Zn)	mg/L	3	3
Cobre (Cu)	mg/L	1	1
Cromo (Cr)	mg/L	0.5	0.5
Hierro (Fe)	mg/L	3	3
Mercurio (Hg)	mg/L	0.01	0.01
Níquel (Ni)	mg/L	0.5	0.5
Plata (Ag)	mg/L	AR	AR
Plomo (Pb)	mg/L	0.2	0.2
Selenio (Se)	mg/L	0.2	0.2
Vanadio (V)	mg/L	1	1
Otros Parámetros para Análisis y Reporte			
Acidez Total	mg/L CaCO ₃	AR	AR
Alcalinidad Total	mg/L CaCO ₃	AR	AR
Dureza Cálcica	mg/L CaCO ₃	AR	AR
Dureza Total	mg/L CaCO ₃	AR	AR
Color Real (Medidas de absorbancia a las siguientes longitudes de onda: 436 nm, 525 nm y 620 nm)	m ⁻¹	AR	AR

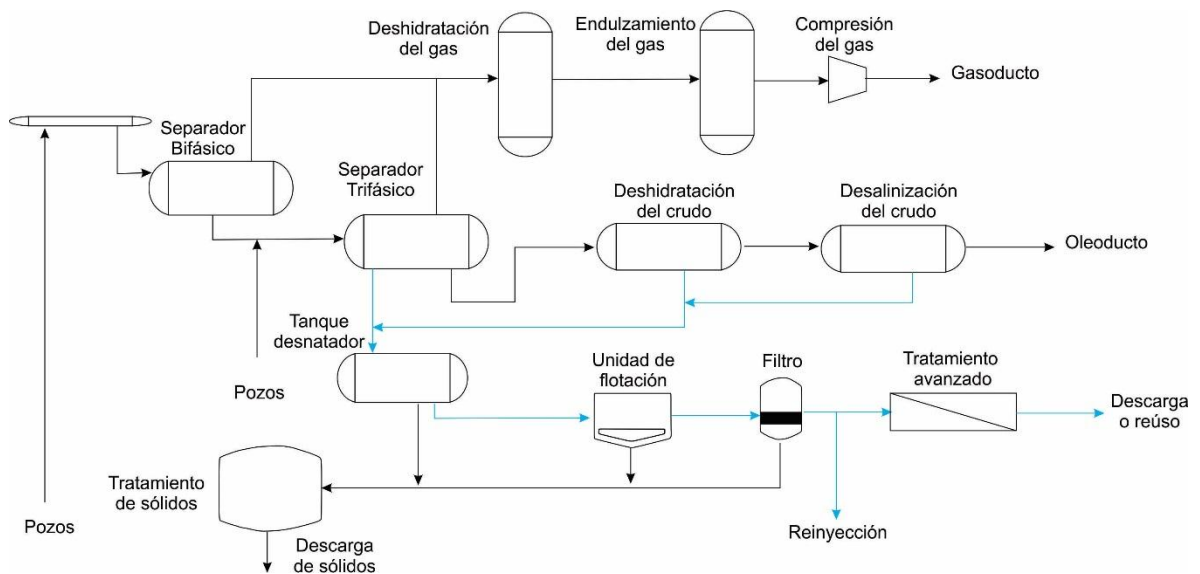
AR = Análisis y Reporte.

Fuente: COLOMBIA, MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE (MADS). Resolución 0631 de 2015 (17 de marzo de 2015). Parámetros y límites máximos permisibles es los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público.

6. TRATAMIENTO CONVENCIONAL DEL AGUA PRODUCIDA

Entre las operaciones realizadas en un campo petrolero se encuentra el tratamiento del agua producida. Una vez separados los fluidos producidos, una serie de procesos como los mostrados en la **Figura 8** se llevan a cabo. Cada etapa tiene como objetivo mejorar la calidad del fluido involucrado. El tratamiento convencional del agua producida se limita a la remoción de los sólidos suspendidos y aceites dispersos. Algunos componentes tóxicos como los metales pesados, materiales radiactivos de origen natural (NORM) e hidrocarburos de bajo peso molecular que se encuentran disueltos en el agua producida, no pueden ser removidos con el tratamiento convencional. La generación de residuos sólidos también forma parte de las desventajas del tratamiento convencional; adiciona costos al proceso y su descarga impacta el medio ambiente.

Figura 8. Tratamiento de fluidos producidos en un campo petrolero.



Fuente: Modificado de WALSH, John Michael y GEORGIE, Wally John. Produced Water Treatment Systems: Comparison of North Sea and Deepwater Gulf of Mexico. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, Texas, USA, 8-10 October, [en línea] 2012. SPE-159713-MS. Disponible en One Petro.

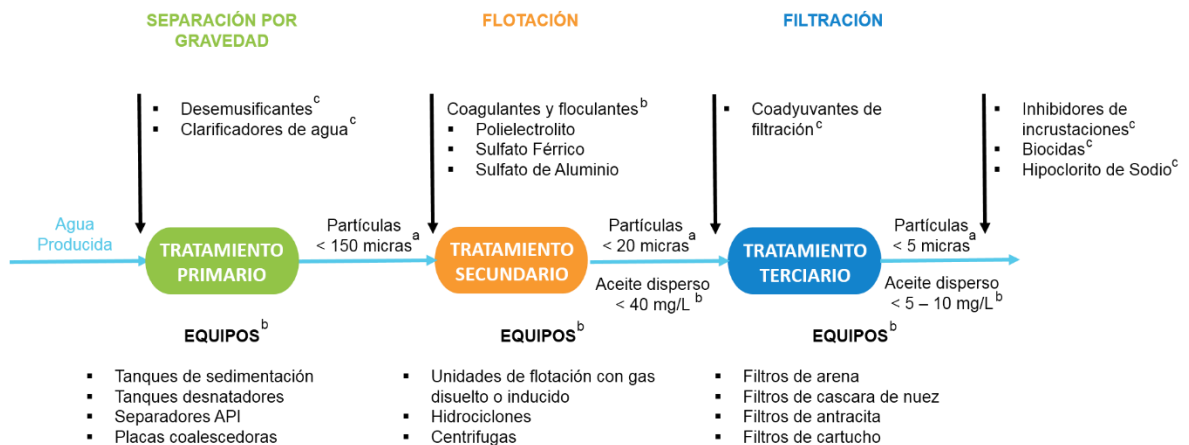
6.1. TRATAMIENTO PRIMARIO

El tratamiento convencional del agua producida consta de tres etapas (ver **Figura 9**). El tratamiento primario remueve el aceite libre y los sólidos gruesos⁷² empleando la gravedad como mecanismo de separación. La diferencia en la gravedad

⁷² AL-MAAMARI, Rashid S., *et al.* Op. Cit.

específica hace que el aceite flote en la superficie del agua y las gotas se unan en el proceso de coalescencia, facilitando su remoción⁷³. El proceso de separación aceite-agua se mejora con la inyección de demulsificantes como el poliglicol, las resinas fenólicas etoxiladas, las resinas oxialquiladas y los ésteres de glicol⁷⁴.

Figura 9. Esquema de tratamiento convencional de agua producida



Fuente: Modificado de ^aARNOLD, Ken y STEWART, Maurice (1989); ^bAL-MAAMARI, Rashid S., et al. (2014); ^cROBINSON, David (2013).

6.1.1. Tanques de sedimentación. Se utilizan para eliminar grandes partículas en el agua con ayuda de la gravedad. El grado y el tamaño de eliminación de partículas dependen del tiempo de retención del agua en el tanque. En este proceso no se requieren químicos, pero pueden ser utilizados para mejorar la eficiencia. Dentro de las especificaciones técnicas de los tanques de sedimentación, el agua de alimentación no tiene restricciones. Por otro lado, la calidad del agua resultante depende del diseño del sistema y los residuos sólidos requieren disposición⁷⁵.

6.1.2. Tanques desnatadores. Son normalmente diseñados para proporcionar largos tiempos de residencia durante el cual puede ocurrir la coalescencia y la separación por gravedad. En este equipo de tratamiento no se pueden ignorar los efectos de la vibración, la turbulencia, los cortocircuitos, etc. Los desnatadores pueden tener una configuración vertical (las gotas de aceite deben ascender en

⁷³ ARNOLD, Ken, y STEWART, Maurice. Surface Production Operations, Design of Oil-Handling Systems and Facilities Vol.1. 2 ed. Houston, 1989. ISBN: 978-0-88415-821-9

⁷⁴ IGWE, Chibunna Onyems, et al. Op. Cit.; ROBINSON, David. Oil and gas: Treatment and discharge of produced waters offshore. Londres, 2013.

⁷⁵ COLORADO SCHOOL OF MINES. Technical assessment of produced water treatment technologies. USA, 2009.

contracorriente con el flujo descendente del agua) u horizontal (las gotas de aceite se elevan de manera perpendicular al flujo del agua). En las dos configuraciones el aceite será recogido y desnatado de la superficie. Los tanques horizontales son más eficientes en el tratamiento de agua porque las gotas de aceite no tienen que fluir en contracorriente al flujo de agua⁷⁶.

6.1.3. Separador API. Es un dispositivo de separación por gravedad que funciona con el principio de la Ley de Stokes. Esta ley define la velocidad de ascenso de una partícula de aceite en función de su densidad y tamaño. Su función principal es eliminar la mayoría del aceite y de sólidos en suspensión del agua. Por lo tanto, su diseño se basa en la diferencia en la gravedad específica del aceite y el agua que serán separados. Mientras los glóbulos de aceite subirán debido a las fuerzas boyantes para formar una capa de aceite sobre la superficie del agua, los sólidos aceitosos con una gravedad específica mayor a 1.0 se depositarán en el fondo del separador. Esto hace que sean relativamente fáciles de eliminar⁷⁷.

6.1.4. Placas coalescedoras. Son tanques desnatadores que usan platos internos para mejorar el proceso de separación por gravedad. Existen varias configuraciones que se denominan comúnmente: interceptores paralelos de placa (PPI), interceptores de placas corrugadas (IPC) o separadores de flujo cruzado. Todos ellos dependen de la separación por gravedad para permitir que las gotas de aceite se eleven a la superficie de la placa donde se producen la coalescencia y captura. El flujo se vierte entre un número de placas paralelas separadas por una corta distancia. Para facilitar la captura de las gotas de aceite, las placas se inclinan horizontalmente. La Ley de Stokes debería aplicarse a las gotas de aceite de diámetro pequeño como de 1 a 10 micras. Sin embargo, la experiencia de campo indica que un límite inferior razonable en los tamaños de las gotas que se pueden eliminar es 30 micras. Esto se debe a que por debajo de este tamaño tienden a impedir la elevación de las gotas hacia la superficie de coalescencia. Una desventaja de los separadores de placas no son eficientes para los flujos con baches de aceite o grandes aumentos repentinos en la velocidad de flujo del líquido y no pueden manejar de manera efectiva grandes cantidades de sólidos⁷⁸.

6.1.4.1. Interceptor de Placas Paralelas (PPI). Las placas forman una "V" a lo largo del eje de flujo de manera que el aceite migre hasta la parte inferior de la placa

⁷⁶ ARNOLD, Ken, y STEWART, Maurice. Op. Cit.

⁷⁷ FULLER, Rick. API Separator [en línea]. [citado 27 de marzo de 2016]. Disponible en Internet: http://waterfacts.net/Unit_Processes/Gravity_Separators/API_Separator/api_separator.html

⁷⁸ ARNOLD, Ken, y STEWART, Maurice. Op. Cit.

de coalescencia y hacia los lados. Los sedimentos migran hacia el centro y hacia la parte inferior del separador, donde se remueven⁷⁹.

6.1.4.2. Interceptor de Placas Corrugadas (CPI). Es el más usado en campos de petróleo. En los CPI las placas paralelas son corrugadas (como el material de cubierta) con el eje de las ondulaciones paralelas en la dirección del flujo. El paquete de placas está inclinado en un ángulo de 45° y la mayor parte del flujo de agua es forzado hacia abajo. El aceite se eleva para contrarrestar el flujo de agua y se concentra en la parte superior de cada ondulación. Cuando el aceite alcanza el final del paquete de placas, se recoge en un canal y se lleva a la interface aceite-agua⁸⁰.

6.1.4.3. Separadores de flujo cruzado. Son una modificación de la configuración del CPI. Este permite que las placas se puedan poner en un ángulo más inclinado para facilitar la remoción de sedimentos, y para que el paquete de placas sea más convenientemente empaquetado en un tanque a presión⁸¹.

6.2. TRATAMIENTO SECUNDARIO

El tratamiento secundario reduce la concentración de aceite disperso y remueve los sólidos finos⁸² utilizando la flotación. La separación de las gotas de aceite y la fase continua de agua se logra aumentando la diferencia de densidad entre los dos fluidos, uniendo burbujas de gas⁸³. Las partículas y gotas de aceite en suspensión se asocian a las burbujas y ascienden a la superficie, formando una espuma que posteriormente es removida⁸⁴. Coagulantes y floculantes como sulfato férrico, cloruro de aluminio y sulfato de aluminio o alúmina, son usados como un pretratamiento a la flotación; aglomeran gotas de aceite y sólidos en flóculos grandes permitiendo una separación más eficiente⁸⁵. Sin embargo, no son eficaces para la remoción de componentes disueltos⁸⁶.

6.2.1. Flotación por gas disuelto (DGF) y flotación por gas inducido (IGF). Las dos tecnologías se diferencian por el método utilizado para generar burbujas de gas y los tamaños de burbujas resultantes. En las unidades de DGF, el gas (puede ser aire, nitrógeno, u otro tipo de gas inerte) se introduce en la cámara de flotación, que

⁷⁹ Ibid.

⁸⁰ Ibid.

⁸¹ Ibid.

⁸² AL-MAAMARI, Rashid S., et al. Op. Cit.

⁸³ ARNOLD, Ken, y STEWART, Maurice. Op. Cit.

⁸⁴ COLORADO SCHOOL OF MINES. Op. Cit.

⁸⁵ MUNIRASU, Selvaraj, et al. Op. Cit.

⁸⁶ FAKHRU'L-RAZI, Ahmadun, et al., Op. Cit.

se llena con una solución completamente saturada. Dentro de la cámara, el gas se libera por aplicación de vacío o mediante la creación de una caída de presión rápida. La tecnología IGF utiliza cizallamiento mecánico o hélices para crear burbujas que se introducen en la parte inferior de la cámara de flotación. La coagulación se puede utilizar como tratamiento previo a la flotación⁸⁷. La flotación por aire disuelto (DAF) puede remover partículas tan pequeñas como 25 μm . Si se añade la coagulación como pre tratamiento, DAF puede eliminar los contaminantes de 3-5 μm . Se puede utilizar para eliminar la grasa y aceite, materia orgánica natural, compuestos orgánicos volátiles y partículas pequeñas del agua producida⁸⁸.

6.2.2. Hidrociclones. Utilizan métodos físicos para separar sólidos de líquidos basados en la densidad de los sólidos a separar. Están hechos de metal, plástico o cerámica. Por lo general, tienen una parte superior cilíndrica y una base cónica, sin partes móviles. El rendimiento de los hidrociclones es determinado por el ángulo de su sección cónica. Usan la fuerza centrífuga para eliminar las gotas de aceite e hidrocarburos del agua⁸⁹. Pueden eliminar las partículas en el intervalo de 5 a 15 micras y reducir las concentraciones de aceite y grasa a 10 ppm. Para este proceso no se requiere ningún pre tratamiento ni producto químico⁹⁰, sin embargo, cumplen una función como pre tratamiento en combinación con otras tecnologías. Una desventaja importante de esta tecnología es la generación de grandes lechadas de residuos sólidos concentrados⁹¹.

6.2.3. Centrífugas. Se encargan de la separación de las partículas mediante fuerza de aceleración gravitacional que se logra gracias a una rotación rápida. Es un proceso de separación que utiliza la acción de la fuerza centrífuga para promover la aceleración de partículas en una mezcla sólido-líquido. Las centrífugas operan con el mismo principio físico de los hidrociclones, pero difieren en que la entrada de alimentación tangencial genera la fuerza centrífuga y las partes móviles generan el movimiento de rotación. También eliminan sólidos suspendidos y se ocupa de partículas sólidas tan pequeñas como 2 micras. Las desventajas de las centrífugas incluyen altos costos de mantenimiento y bajo rendimiento⁹².

⁸⁷ COLORADO SCHOOL OF MINES. Op. Cit.

⁸⁸ IGUNNU, Ebenezer T. y CHEN, George Z., Op. Cit.

⁸⁹ Ibid.

⁹⁰ COLORADO SCHOOL OF MINES. Op. Cit.

⁹¹ IGUNNU, Ebenezer T. y CHEN, George Z., Op. Cit.

⁹² ARTHUR, J. Daniel, et al. Op. Cit.

6.3. TRATAMIENTO TERCIARIO

El tratamiento terciario remueve cualquier contaminante disperso en el agua después de la flotación⁹³ empleando la filtración como mecanismo de separación. Los filtros atrapan las gotas de aceite y promueven la coalescencia entre ellas⁹⁴. Coadyuvantes de filtración como tierra de diatomeas, pulpa de celulosa, carbón activo, arcilla y talco han sido utilizados para optimizar el rendimiento⁹⁵.

6.3.1. Filtros. Se utilizan ampliamente para la remoción de Carbono Orgánico Total (TOC), aceite y grasa del agua producida. Esta se puede lograr mediante el uso de diversos tipos de medios filtrantes, tal como arena, grava, antracita, cáscara de nuez, entre otros. Los filtros de cáscara de nuez son los más comúnmente usados para el tratamiento del agua producida. Este proceso no se ve afectado por la salinidad del agua y se puede aplicar a cualquier tipo de agua. Los medios de filtración son altamente eficientes para la extracción de aceite y grasa, con una eficiencia reportada de más del 90%. La eficiencia puede mejorarse aún más si se añaden coagulantes al agua de alimentación antes de la filtración. La regeneración de los medios y la eliminación de residuos sólidos son las desventajas de este proceso⁹⁶.

6.4. TRATAMIENTO CONVENCIONAL PARA INYECCIÓN

El tratamiento del agua producida será diferente de acuerdo con el método de eliminación previsto. La remoción de aceite por gravedad seguido de un ciclo de filtración con cáscara de nuez puede proporcionar agua producida que cumpla con la mayoría de las especificaciones de reinyección⁹⁷. Cuando el agua producida va a ser inyectada se debe identificar un acuífero que esté geológicamente aislado y que no será usado para propósitos potables o agrícolas. Dado que el agua no va a cumplir alguna función secundaria, la calidad del agua a inyectar no debe ser demasiado alta. El único tratamiento requerido para inyectar el agua producida es la remoción convencional de aceite, sin la necesidad de ningún tratamiento adicional. En algunos casos es necesario inyectar inhibidores de incrustaciones como los ésteres de fosfato o compuestos de fosfato⁹⁸ para evitar que el agua de mar se incruste bajo condiciones de yacimiento o para controlar las incrustaciones si el agua de inyección y los acuíferos receptores son químicamente incompatibles.

⁹³ MUNIRASU, Selvaraj, et al. Op. Cit.

⁹⁴ ARNOLD, Ken, y STEWART, Maurice. Op. Cit.

⁹⁵ ROBINSON, David. Op. Cit.

⁹⁶ IGUNNU, Ebenezer T. y CHEN, George Z., Op. Cit.

⁹⁷ ROBINSON, David. Op. Cit.

⁹⁸ IGWE, Chibunna Onyems, et al. Op. Cit.

La microbiología de los sistemas también debe ser controlada con biocidas, por ejemplo, el hipoclorito de sodio permite controlar los organismos marinos en los sistemas de agua de mar⁹⁹.

6.5. TRATAMIENTO CONVENCIONAL PARA DESCARGA O REÚSO

Un tratamiento ideal del agua producida para vertimiento a cuerpos de agua o para reúso es aquel que sea capaz de disminuir la concentración de todos los componentes tóxicos hasta niveles tolerables por el ser humano, los animales y las plantas. En Colombia, el tratamiento convencional de agua producida no permite cumplir con todos los límites de contaminantes establecidos en la Resolución 0631 de 2015 (Ver **Tabla 4**). Incluso mediante la combinación de tratamiento fisicoquímico y biológico, no todos los contaminantes peligrosos se pueden remover¹⁰⁰. Para lograr bajas concentraciones de metales pesados es necesario implementar tratamientos adicionales, como por ejemplo la adsorción, el intercambio iónico o técnicas de evaporación. En la extracción de color, olor, virus y componentes disueltos procesos de filtración con membranas son requeridos. La literatura reporta que un agua de alta calidad sólo puede lograrse mediante un tratamiento avanzado que involucre las membranas de ósmosis inversa. Si el agua se pretende utilizar para consumo humano, podría ser necesario un post tratamiento especial para obtener una calidad aceptable¹⁰¹.

⁹⁹ ROBINSON, David. Op. Cit.

¹⁰⁰ FAKHRU'L-RAZI, Ahmadun, *et al.*, Op. Cit.

¹⁰¹ MUNIRASU, Selvaraj, *et al.* Op. Cit.

7. TRATAMIENTO MODERNO DEL AGUA PRODUCIDA

La industria de los hidrocarburos ha aumentado su esfuerzo por desarrollar tecnologías modernas o avanzadas para el tratamiento del agua producida. Las nuevas regulaciones y la escasez actual de agua han aumentado la necesidad de un tratamiento mejorado y rentable. Se busca obtener efluentes compatibles con las normas de calidad de agua para vertimiento y reúso, minimizando así la captación de agua dulce¹⁰². Un tratamiento avanzado del agua producida no sólo proporcionará agua para su reutilización, sino que protegerá el medio ambiente de la contaminación al momento de su descarga. El manejo del agua producida también es de gran importancia en la exploración y producción, pues contribuye significativamente en el costo capital de las operaciones en yacimientos de petróleo y gas¹⁰³. En vista de que las unidades de tratamiento convencional, en la mayoría de los casos, no son capaces de producir agua de alta calidad¹⁰⁴, se han investigado una variedad de tecnologías avanzadas para el tratamiento del agua producida. Un resumen de estas se muestra en la **Tabla 5**.

Las tecnologías para el tratamiento avanzado del agua producida se basan en diferentes mecanismos para llevar a cabo la separación de contaminantes. A continuación, se presenta una breve descripción de estas tecnologías:

7.1. FILTRACIÓN POR MEMBRANAS

Las *membranas* son películas finas con tamaños de poro específicos que separan selectivamente un fluido desde sus componentes. Son fabricadas con materiales orgánicos o inorgánicos sintéticos¹⁰⁵. La tecnología de membrana opera con filtración de flujo cruzado o filtración cerrada a una presión impulsada por el sistema¹⁰⁶. La presión de operación aumenta drásticamente a medida que disminuye el tamaño de poro. La operación de *las membranas de microfiltración (MF)* y *ultrafiltración (UF)* se basa en el mecanismo de flujo de poro conectivo o Ley de Darcy, *las membranas de ósmosis inversa (OI)* se basan en el mecanismo de difusión-solución o Ley de Fick y *las membranas de nanofiltración (NF)* operan bajo un mecanismo que se encuentra entre flujo de poro y la difusión¹⁰⁷.

¹⁰² HUSSAIN, A., et al. Advanced Technologies for Produced Water Treatment. International Petroleum Technology Conference, Doha, Qatar, 19-22 January, [en línea] 2014. IPTC-17394-MS. Disponible en One Petro.

¹⁰³ IGWE, Chibunna Onyems, et al. Op. Cit.

¹⁰⁴ HUSSAIN, A., et al. Op. Cit.

¹⁰⁵ FAKHRU'L-RAZI, Ahmadun, et al., Op. Cit.

¹⁰⁶ IGUNNU, Ebenezer T. y CHEN, George Z., Op. Cit.

¹⁰⁷ MUNIRASU, Selvaraj, et al. Op. Cit.

Tabla 5. Tecnologías avanzadas para el tratamiento del agua producida.

Tecnología	Desventajas	Desechos generados	Componentes removidos	% de remoción	Calidad del agua de alimento	Pre tratamiento	Grado de desarrollo	Costo
MF	No remueve componentes disueltos ni sales. ^c Requiere limpieza periódica y tratamiento adicional para los sólidos generados. ^a	Residuos durante el retro lavado y los procesos de limpieza. ^a	Sólidos en suspensión. ^{ab} Aceite disperso y Partículas > 100 nm. ^h Turbidez y sólidos en suspensión. ^c	DQO = 35, COT = 25, AYG = 92, Fenol = 35 ^h SST = 100 ^a	Relativamente limpia en términos de componentes de aceite. ^h	Filtración de cartucho y coagulación. ^a Micro filtros. ^g	Comercial.	No Disponible.
UF	No elimina sales. ^c Requiere limpieza periódica. ^a Tratamiento adicional para los sólidos generados. ^a Susceptible a las incrustaciones. ^h	Residuos durante el retro lavado y los procesos de limpieza. ^a	Macromoléculas. ^{ab} Color, olor, virus, materia orgánica coloidal, hidrocarburos, SST y componentes disueltos. ^h	HT = 96 BTX = 54 Cu = 95 Zn = 95 ^b SST = 100 ^a	Aceite < 50 mg/L, Sólidos < 15 mg/L ^b Baja salinidad. ^h	Filtración y coagulación. ^a	Comercial.	Capital de \$0.02 a \$0.05/bpd. Operación de \$0.02 a \$0.05/bbl. ^c
NF	Sensible a constituyentes orgánicos e inorgánicos. ^a No pueden soportar T > 45°C. ^a Requiere varios ciclos de lavado a contracorriente. ^a Propensas al ensuciamiento. ^h	Pequeñas cantidades de salmuera concentrada. ^c	Iones multivalentes. ^{ab} Dureza. ^a Iones divalentes, metales, radionucleidos. ^c	Cationes = 33 – 94 y Aniones = 3 – 77 ^h Dureza = 99 MgSO ₄ > 90 Iones divalentes, metales > 99 y sales < 90 ^c	STD entre 500 y 25,000 mg/L. ^c Relativamente limpia en términos de SST, barro y suciedades orgánicas. ^h	Cáusticos e inhibidores de escamas para prevenir el ensuciamiento. ^c Filtración. ^h	Comercial.	Capital de \$35 a \$170/bpd. Operación \$0.03/bbl. ^c

Tabla 5. Continuación.

Tecnología	Desventajas	Desechos generados	Componentes removidos	% de remoción	Calidad del agua de alimento	Pre tratamiento	Grado de desarrollo	Costo
OI	Amplio pre tratamiento del agua de alimentación. ^a Sensible a constituyentes orgánicos e inorgánicos. ^a No pueden soportar T>45°C. ^a Propensas al ensuciamiento. ^h Escalamiento. ^c	Salmuera concentrada. ^c	Componentes disueltos e iónicos. ^{ab} Iones y moléculas monovalentes y multivalentes. ^c Metales. ^c	Solutos de agua = 99 ^h NaCl > 99 ^c Radionucleidos > 99 ^c STD > 99.4 Amoniaco = 80 Boro < 50 ^c	STD entre 20,000 y 47,000 mg/L ^c Relativamente limpia en términos de SST, barro y suciedades orgánicas. ^h	Cáusticos e inhibidores de escamas para prevenir el ensuciamiento. ^c Filtración con membranas. ^b	Comercial.	Capital de \$35 a \$295/bpd. Operación de \$0.03 a \$0.08/bbl. ^c
VSEP	Puede que no sea económica debido al alto consumo de energía. ^c	Salmuera concentrada. ^c Lodos aceitosos concentrados. ^f	DBO, DQO, SST, STD y color ^f	SST > 99 ^f	STD <30,000 mg/L y diferente composición química. ^c	Puede requerir filtración para eliminar sólidos en suspensión y materia orgánica. ^c	Comercial.	Operación \$0.01554/bl. ^c
Adsorción	Alta retención de agua y alto costo de operación. ^e Requiere regeneración del lecho adsorbente. ^b	Residuos producto de la regeneración del lecho. ^a	Manganeso, hierro, COT, BTEX, aceite y metales pesados. ^a	BTEX= 70-85 ^b AyG = 85 ^b Metales pesados > 80 ^c	Todas las gamas de STD. ^c	Tratamiento primario para remover compuestos orgánicos. ^c	Comercial.	Capital \$50,000/unidad. Operación \$674,520/año. ^e

Tabla 5. Continuación.

Tecnología	Desventajas	Desechos generados	Componentes removidos	% de remoción	Calidad del agua de alimento	Pre tratamiento	Grado de desarrollo	Costo
Congelación/Descongelación	Requiere temperaturas bajo cero y una gran cantidad de tierra. ^{a,c} Alto consumo de energía. ^c No trata aguas con más de 5% de metanol. ^c	Salmuera concentrada que es evaporada en estanques ^c	SST, STD, HPRT, compuestos orgánicos volátiles y semivolátiles, metales pesados. ^{a,c}	Mayor al 90% de los componentes del agua producida. ^c	STD >40,000 mg/L. Sin alta concentración de metanol. ^c	Se requiere si hay aceite presente en el agua. ^c	Comercial.	Capital de \$1.75 a 2.0 millones. Operación de \$0.75 a \$1.00/bbl ^c
Electrodiálisis/electrodiálisis reversible (ED/EDR)	Alto costo de tratamiento. ^a Ensuciamiento y escamas. ^c La selectividad disminuye cuando aumenta la concentración de iones. ^c	Salmuera concentrada que necesita disposición. ^c	Iones disueltos con carga positiva y negativa. ^b	Depende de las etapas ED/EDR, puede alcanzar más del 90. ^c	STD < 8,000 mg/L y todo tipo de composición química del agua. ^c	Filtración y resinas de intercambio catiónico, disminución de pH, cáusticos e inhibidores de escamas. ^c	Experimental.	Capital según el sitio, depende de los STD. Operación \$0.15/bbl. ^a
Filtros biológicos aireados	Altas concentraciones de sales disminuyen su eficacia por efecto de toxicidad ^c	Los residuos generados se eliminan en forma sólida ^a	Aceite, SST, amoníaco y nitrógeno, DQO, DBO, metales pesados, compuestos orgánicos solubles y H ₂ S ^c	Nitrógeno= 70 Aceite = 80 DQO = 60 DBO = 95 SST = 85 ^c	Cloruro < 6.600 mg/L Aceite < 60 mg/L DQO < 400 mg/L DBO < 50 mg/L ^c	Sedimentación primaria. ^a	Comercial	No disponible. ^a

Tabla 5. Continuación.

Tecnología	Desventajas	Desechos generados	Componentes removidos	% de remoción	Calidad del agua de alimento	Pre tratamiento	Grado de desarrollo	Costo
Evaporación	Lodos. ^c	Acumulación de lodos. ^c	El agua se evapora y el lodo se acumula. ^c	No aplica. ^c	STD entre 2,000 y >40,000 mg/L ^c	No requiere. ^c	Comercial.	No disponible. ^a
Oxidación química	Altos costos de productos químicos. ^c	No se genera desecho. ^c	Hierro, manganeso, DQO, DBO, azufre, color, sabor, olor y productos químicos orgánicos sintéticos ^c	Depende de la dosis química, el tipo de oxidante utilizado y tiempo de contacto entre oxidantes y el agua. ^c	Todas las gamas de STD, independiente del tipo de sal y concentración. ^c	No se requiere. ^c	Comercial.	Capital \$0.01/gpd. Operación >\$0.01/bbl ^c
Luz Ultra Violeta (UV)	Alto requerimiento de energía. ^f	No genera desechos. ^c	Contaminantes microbianos. ^c Componentes orgánicos disueltos, orgánicos volátiles y no volátiles. ^f	Contaminantes microbianos = 90 – 99 ^c	Aplicable a todas las gamas de STD. Puede no ser adecuado para el agua muy turbia ^c	Remover sólidos suspendidos y/o disueltos y las altas concentraciones de calcio manganeso, hierro y magnesio. ^c	Piloto.	Altos costos estimados en \$0.13/gpd. ^c

Tabla 5. Continuación.

Tecnología	Desventajas	Desechos generados	Componentes removidos	% de remoción	Calidad del agua de alimento	Pre tratamiento	Grado de desarrollo	Costo
Intercambio iónico	Sensible al ensuciamiento, alto costo capital y de químicos. ^a Limitaciones de temperatura para las resinas ^c	Cantidades muy reducidas de salmuera concentrada. ^c	Arsénico, metales pesados, nitratos, radio, uranio ^d , iones monovalentes y divalentes ^a	iones objetivo = 93 ^c	STD entre 500 y 7,000 mg/L. ^c	Eliminación de SST, minerales y metales oxidados. ^a ^c	Comercial.	Capital de \$0,08 a \$0.11/bbl. Operación de 70 a 8. ^a
Destilación por membrana	Requiere limpieza para suciedad e incrustaciones. ^c Alta sensibilidad a los agentes tensoactivos. ^c	Pequeñas cantidades de salmuera concentrada. ^c	Sales. ^h	Sales = 100 aproximadamente. ^h Solutos no volátiles = 100 ^c	TSD entre 500 y 50,000 mg/L. ^c Libre de gases y compuestos orgánicos, especialmente de bajo punto de ebullición. ^h	Pre filtrado para eliminar partículas grandes y surfactantes. ^c Cáusticos e inhibidores de escamas para prevenir el ensuciamiento. ^c	Experimental.	Capital \$0.15/bpd. Operación \$0.06/bbl. ^c

DQO = Demanda Química de Oxígeno. DBO = Demanda Bioquímica de Oxígeno. COT = Carbono Orgánico Total. AYG = Aceite y Grasas. SST = Sólidos Suspendidos Totales. STD = Sólidos Totales Disueltos. HPRT = Hidrocarburos de Petróleo Recuperables Totales.

Fuente: Modificado de: ^a IGUNNU, Ebenezer T. y CHEN, George Z. (2012); ^b FAKHRU'L-RAZI, *et al.* (2009); ^c COLORADO SCHOOL OF MINES (2009); ^d ARTHUR, J. Daniel, *et al.* (2005); ^e ZHENG, Jisi., *et al.* (2016); ^f NEW LOGIC RESEARCH; ^g UAT VENEZUELA; ^h MUNIRASU, Selvaraj, *et al.* (2016).

7.2. VSEP

El proceso realizado de cizalla vibratorio, *VSEP* por sus siglas en inglés, es un sistema de membrana de filtración mejorada por un cizallamiento vibratorio en la superficie y en los poros¹⁰⁸. Tiene una configuración donde cientos de hojas de membrana dispuestas de forma paralela y separada por empaques están apiladas una encima de la otra. Las ondas producidas por la vibración de la membrana causan que los sólidos y suciedades que rechaza la superficie de la membrana vuelvan a mezclarse con el material fluyente. El sistema se puede emplear con las membranas de OI o NF en un arreglo de una o de múltiples etapas¹⁰⁹.

7.3. ADSORCIÓN

La *adsorción* es un proceso en el que los compuestos orgánicos disueltos en el agua producida se adhieren a la superficie de un medio poroso. En este tratamiento se emplean varios adsorbentes como carbón activado, arcillas orgánicas, alúmina activada y zeolitas¹¹⁰. El agua es bombeada dentro de una columna que contiene el adsorbente, la eficiencia del adsorbente de la columna depende de la temperatura y de la naturaleza de las sustancias. El agua pasa a través de la columna constantemente y produce una acumulación de sustancias en el medio poroso. Por esa razón el adsorbente necesita ser sustituido periódicamente.

7.4. EVAPORACIÓN

Los estanques de *evaporación* son una amplia piscina de poca profundidad que requiere de grandes espacios para evaporar el agua por medio de la energía solar. Están diseñados ya sea para prevenir la infiltración de agua en el subsuelo o su migración, dependiendo de la calidad. Es una tecnología favorable para los climas cálidos y secos por el potencial para altas tasas de evaporación¹¹¹.

7.5. CONGELACIÓN Y DESCONGELACIÓN

El ciclo de *congelación y descongelación* se combina con la evaporación convencional. Naturalmente, las sales y otros componentes disueltos en el agua producida bajan su punto de congelación por debajo de 32 °F (0 °C). Se forman cristales de hielo relativamente puro y una solución no congelada (salmuera) que contiene elevadas concentraciones de constituyentes disueltos que se drenan del hielo. El hielo puede ser recogido y se funde para obtener agua limpia. Sin embargo,

¹⁰⁸ FAKHRU'L-RAZI, Ahmadun, *et al.*, Op. Cit.

¹⁰⁹ COLORADO SCHOOL OF MINES. Op. Cit.

¹¹⁰ IGUNNU, Ebenezer T. y CHEN, George Z., Op. Cit.

¹¹¹ Ibid.

sólo se puede trabajar en climas con tiempos prolongados de temperatura por debajo de cero. Por lo general este proceso requiere una cantidad significativa de tierra¹¹².

7.6. ELECTRODIÁLISIS Y ELECTRODIÁLISIS REVERSIBLE

La electrodiálisis (ED) y electrodiálisis reversible (EDR) son procesos en los cuales se separan iones disueltos del agua. Utilizan membranas permeables fabricadas a partir de polímeros de intercambio iónico. Una pila de ED se compone de una serie de membranas de intercambio aniónico y catiónico dispuestos de modo alternante entre el ánodo y el cátodo. Los cationes migran hacia el cátodo, pasan la membrana de intercambio de cationes y son rechazados por la membrana de intercambio aniónico. Lo opuesto ocurre cuando los aniones migran al ánodo. El proceso de EDR es similar, excepto que adicionalmente utiliza inversión periódica de la polaridad para reducir el ensuciamiento de la membrana¹¹³.

7.7. OXIDACIÓN QUÍMICA

La *oxidación química* depende de reacciones de óxido-reducción que se producen en el agua producida debido a que los electrones libres no pueden existir en solución. El oxidante se mezcla con los contaminantes causando la descomposición de los productos químicos en el agua¹¹⁴. Para este proceso se utiliza un oxidante fuerte (ozono, peróxido, permanganato, oxígeno o cloro), catalizadores e irradiación¹¹⁵.

7.8. FILTROS BIOLÓGICOS AIREADOS

Los *filtros biológicos aireados (FBA)* son una tecnología biológica que consta de medios permeables como rocas, grava o medios plásticos. Utiliza condiciones aeróbicas para facilitar la oxidación bioquímica y la separación de constituyentes orgánicos en el agua contaminada¹¹⁶. El agua fluye a través de los medios y con el tiempo se genera una capa microbiana en la superficie. Eventualmente, esta capa aumenta de espesor y comienza a desprenderse en el efluente a medida que se utiliza el filtro. Los medios deben tener un diámetro entre 1 y 4 pulgadas para generar un espacio poroso que no prohíba el flujo a través del filtro y evitar las obstrucciones¹¹⁷.

¹¹² Ibid.

¹¹³ COLORADO SCHOOL OF MINES. Op. Cit.

¹¹⁴ IGUNNU, Ebenezer T. y CHEN, George Z., Op. Cit.

¹¹⁵ FAKHRU'L-RAZI, Ahmadun, *et al.*, Op. Cit.

¹¹⁶ IGUNNU, Ebenezer T. y CHEN, George Z., Op. Cit.

¹¹⁷ COLORADO SCHOOL OF MINES. Op. Cit.

7.9. DESTILACIÓN POR MEMBRANA

La *destilación por membrana (MD)* es un proceso impulsado térmicamente en una membrana hidrófoba y microporosa. Los materiales empleados para la MD incluyen politetrafluoroetileno, polipropileno y difluoruro de polivinilideno. En el tratamiento del agua producida MD se puede operar por contacto directo (DCMD) o cámara de aire (AGMD). En DCMD una corriente de alimentación caliente fluye en un lado de la membrana, mientras una solución de destilado fría fluye en contracorriente. Las moléculas de agua se evaporan y circulan a través de los poros de la membrana. Al entrar en contacto con la solución enfriadora en el lado del producto, el vapor se condensa y queda en la solución. AGMD funciona con un principio similar, pero en lugar de la solución enfriadora contiene un espacio de aire y una placa de frío en donde el vapor se condensa¹¹⁸.

7.10. INTERCAMBIO IÓNICO

El *intercambio iónico* es una reacción química reversible. Los cationes y aniones presentes en el agua son reemplazados por iones cargados de manera similar presentes dentro de una resina. Las resinas de intercambio iónico son zeolitas inorgánicas de origen natural o resinas orgánicas producidas sintéticamente. Cuando se agotan los iones de sustitución y se ha agotado la capacidad de adsorción de la resina, ésta puede regenerarse y recargarse con más iones de intercambio¹¹⁹.

7.11. SISTEMA DE TRATAMIENTO PROPUESTO POR LOS AUTORES

La nueva norma colombiana de vertimientos a cuerpos de aguas superficiales reduce significativamente los límites de concentración permisibles. Como ya se mencionó, el tratamiento convencional no puede generar una corriente de descarga cumpliendo los límites exigidos en dicha norma. Tomando como referencia la información reportada en la literatura, se ha propuesto una configuración para el tratamiento eficaz del agua producida (Ver **Figura 10**). Es importante aclarar que el dimensionamiento de los equipos y el tratamiento químico adicional deben seleccionarse teniendo en cuenta las propiedades y características específicas del agua de alimento.

Se sugiere que la remoción de los contaminantes presentes en el agua producida se lleve a cabo mediante los siguientes procesos:

¹¹⁸ Ibid.

¹¹⁹ ARTHUR, J. Daniel, et al. Op. Cit.

- Se propone que el agua producida se reciba en un tanque desnatador donde se prevé la remoción de gotas de aceite libre y partículas con un diámetro mayor a 100-150 μm ¹²⁰ y 150 μm ¹²¹ respectivamente.
- Con unidades de flotación por gas y coagulantes se pueden eliminar partículas y gotas de aceite con un diámetro entre 3-5 μm ¹²² y 15-20 μm ¹²³ respectivamente. En un estudio publicado, la flotación consiguió una remoción del 93% de aceite¹²⁴. Las unidades de flotación son los equipos más económicos del tratamiento secundario¹²⁵ y aquellas que emplean el gas disuelto son fáciles de operar y tienen un tamaño más pequeño¹²⁶, razones por las que se proponen.
- Mediante la filtración se espera eliminar cualquier contaminante disperso que quede en el agua después de la flotación. Una eficiencia de remoción de aceite y grasa de más del 90% se ha informado¹²⁷, aunque puede mejorarse si se añaden coagulantes y coadyuvantes de filtración como pre tratamiento. Los filtros de cascara de nuez son los más usados para tratar agua producida¹²⁸, pero en este caso se recomienda utilizar un filtro de cartucho, pues según lo reportado en la literatura se requiere como pre tratamiento para la MF.
- La MF se propone como pre tratamiento a la OI y para la remoción total del material suspendido.
- La adsorción se propone como una etapa de pulido y se espera remover componentes volátiles, fenoles y metales pesados. Un estudio mostró que el carbón activado granular logró una remoción de 99% de fenol¹²⁹. De igual manera la adsorción se ha logrado remover el 80% de metales pesados¹³⁰ y del 70-85% de BTEX¹³¹. Se recomienda que el adsorbente empleado sea el carbón

¹²⁰ ARNOLD, Ken, y STEWART, Maurice. Op. Cit.

¹²¹ AL-MAAMARI, Rashid S., et al. Op. Cit.

¹²² VEIL, John A., et al., Op. Cit.

¹²³ ARNOLD, Ken, y STEWART, Maurice. Op. Cit.

¹²⁴ COLORADO SCHOOL OF MINES. Op. Cit.

¹²⁵ AL-MAAMARI, Rashid S., et al. Op. Cit.

¹²⁶ ARNOLD, Ken, y STEWART, Maurice. Op. Cit.

¹²⁷ COLORADO SCHOOL OF MINES. Op. Cit.

¹²⁸ IGUNNU, Ebenezer T. y CHEN, George Z., Op. Cit.

¹²⁹ PRIATNA, Rachmat, et al. Phenol Compound in Produced Water. SPE Health, Safety and Environment in Oil and Gas Exploration and Production Conference, Jakarta, Indonesia, 25-27 January, [en línea] 1994. SPE-27134-MS. Disponible en One Petro.

¹³⁰ COLORADO SCHOOL OF MINES. Op. Cit.

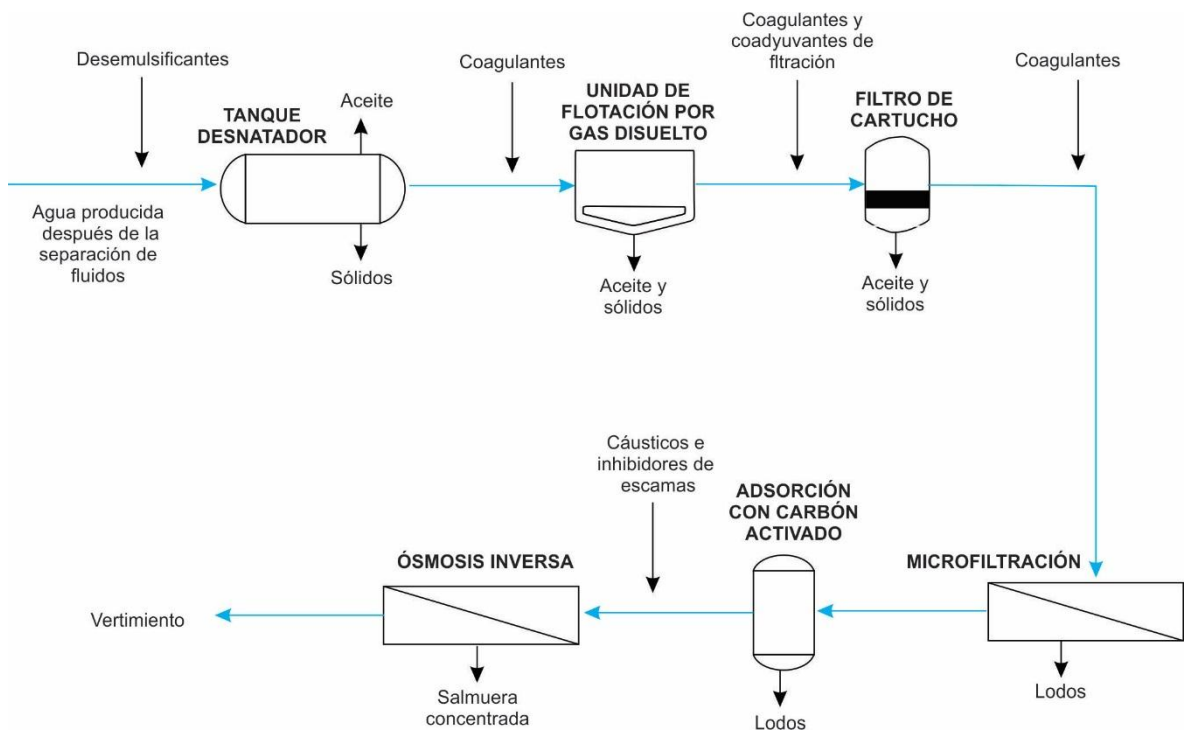
¹³¹ FAKHRU'L-RAZI, Ahmadun, et al., Op. Cit.

activado debido a su amplio uso en la industria y a que es el material adsorbente más rentable¹³².

- Finalmente, la OI permitiría reducir la concentración de los componentes disueltos en el agua producida, generando un agua de alta calidad. Con la OI se ha reportado la remoción del 99% de los componentes disueltos en el agua¹³³. Un buen pre tratamiento combinado con la OI son métodos eficaces para el tratamiento del agua producida¹³⁴.

Sin embargo, los volúmenes de agua producida en cada campo petrolero y la composición específica de esta agua, hacen necesario un estudio detallado para seleccionar el mejor esquema de tratamiento.

Figura 10. Configuración propuesta por los autores para el tratamiento del agua producida.



Fuente: Los Autores.

¹³² AL-MAAMARI, Rashid S., et al. Op. Cit.

¹³³ COLORADO SCHOOL OF MINES. Op. Cit.; MUNIRASU, Selvaraj, et al. Op. Cit.

¹³⁴ FAKHRU'L-RAZI, Ahmadun, et al., Op. Cit.

8. CASOS DE APLICACIÓN DE NUEVAS TECNOLOGÍAS DE TRATAMIENTO DE AGUA PRODUCIDA A NIVEL MUNDIAL

8.1. CAMPO SAN ARDO, CALIFORNIA

Un ejemplo de una instalación a gran escala donde las tecnologías de filtración por membranas se utilizan para tratar el agua producida se presenta en el campo petrolero San Ardo, California. La planta de tratamiento de agua de San Ardo es considerada la primera aplicación a gran escala de OI para tratar agua producida. Históricamente, el agua producida era dispuesta a través de inyección en pozos profundos. Sin embargo, los volúmenes generados en el campo excedían la capacidad de los pozos de eliminación y se tomó la decisión de instalar el sistema para tratar y reutilizar el agua producida¹³⁵.

El campo petrolífero San Ardo de Chevron en el sur de California producen en promedio 10.200 barriles de petróleo pesado al día¹³⁶. El proceso de extracción se traduce en importantes volúmenes de agua producida que requiere tratamiento y disposición. Chevron junto con las tecnologías de tratamiento de agua de Veolia, expertos en ingeniería y operaciones proporcionaron una solución sostenible para el tratamiento del agua producida para la descarga superficial, al tiempo que permite la producción mejorada de petróleo.

El agua producida de este campo de petróleo tiene una Temperatura de 200 °F, y contiene alrededor de 25 mg/L de aceite libre, 80 mg/L de TOC, 240 mg/L de sílice, 26 mg/L de boro, 240 mg/L de dureza y 6,500 mg/L de STD. El objetivo del proyecto era reducir el STD del agua de alimentación a menos de 510 mg/L y el boro a menos de 0.64 mg/L para la descarga. También se buscaba reducir al mínimo el volumen de agua producida que requiere re inyección. Para la generación de vapor, el objetivo del proyecto era reducir la dureza del agua de alimentación a menos de 2 mg/L como CaCO₃¹³⁷.

Como solución, se instaló el primer montaje de la tecnología OPUS® (Optimized Pretreatment and Unique Separation) (Ver **Figura 11**). Es un proceso fiable y robusto para el tratamiento exitoso de agua producida para descarga superficial,

¹³⁵ HUSSAIN, A., et al. Op. Cit.

¹³⁶ AERA ENERGY. San Ardo [en línea]. [citado 21 de septiembre de 2016]. Disponible en Internet: <http://www.aeraenergy.com/san-ardo.asp>

¹³⁷ VEOLIA^a. Chevron, San Ardo Produced Water Treatment [en línea]. [citado 21 de septiembre de 2016]. Disponible en Internet: http://www.veoliawatertech.com/en/news-resources/case-studies/opus_technology_aquifer.htm

que elimina suficientemente los contaminantes como para cumplir con los requisitos establecidos para la descarga. El agua tratada se libera a los humedales superficiales en las cuencas de recarga de acuíferos que reponen los recursos hídricos locales¹³⁸.

Figura 11. Tecnología OPUS en el campo San Ardo.



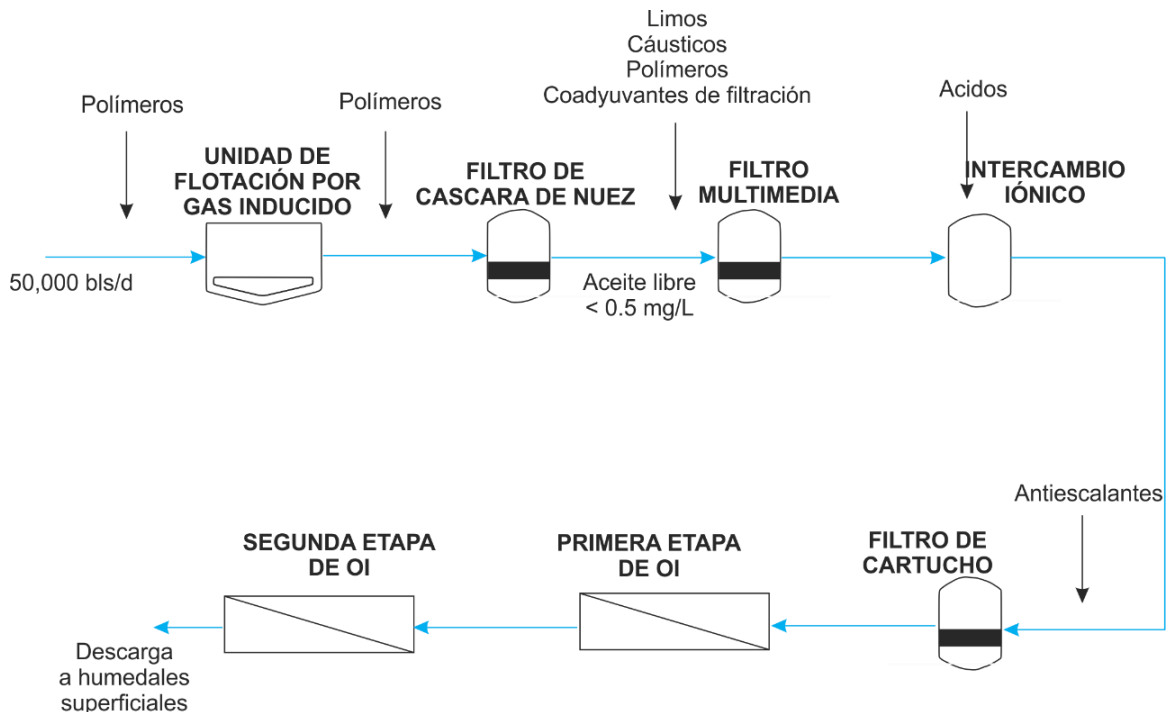
Fuente: VEOLIA^c. Fighting resource scarcity, one battle at a time [en línea]. [citado 21 de septiembre de 2016]. Disponible en Internet: <http://www.veoliawatertechnologies.com/en/media/articles/fighting-resource-scarcity-one-battle-time>.

El proceso de tratamiento incluye una etapa de pre tratamiento convencional para la remoción del aceite libre, seguido por la tecnología OPUS (ver **Figura 12**) para lograr la calidad del agua de descarga y un sistema de ablandamiento de la serie para la generación. El sistema de remoción de aceite libre consiste en un sistema de flotación de gas inducido y un sistema de filtración de cáscara de nuez para reducir el aceite libre a menos de 0.5 mg/L. La tecnología OPUS consta de varias etapas de tratamiento, incluyendo intercambio de calor, desgasificación, suavizantes químicos, medios de filtración, intercambio iónico para el

¹³⁸ VEOLIA^b. Produced Water Facility at South-ern California Oil Field Features the First-Ever Installation of OPUS® [en línea]. [citado 21 de septiembre de 2016]. Disponible en Internet: <http://www.veolianorthamerica.com/en/san-ardo-refinery>

ablandamiento y un sistema de OI de doble paso para cumplir los requisitos de calidad de los efluentes. Los sólidos generados por el sistema se deshidratan y descargan en un vertedero. El sistema de ablandamiento de la serie consta de dos etapas de suavizantes ácidos catiónicos para reducir la dureza del agua de alimentación y así lograr la especificación de la calidad del agua¹³⁹.

Figura 12. Esquema del sistema de tratamiento empleado en el campo San Ardo, California



Fuente: Modificado de VEOLIA^a. Chevron, San Ardo Produced Water Treatment [en línea]. [citado 21 de septiembre de 2016]. Disponible en Internet: http://www.veoliawatertech.com/en/news-resources/case-studies/opus_technology_aquifer.htm

OPUS se instaló en 2008 con una capacidad de 50,000 bbls/d. El sistema de tratamiento fue capaz de superar estos desafíos y el agua tratada es ahora reutilizada para la recarga en acuíferos¹⁴⁰. Los resultados obtenidos durante los primeros 12 meses de operación se muestran en la **Tabla 6**.

¹³⁹ Veolia^a. Op. Cit.

¹⁴⁰ HUSSAIN, A., et al. Op. Cit.

Tabla 6. Resultados obtenidos con la tecnología OPUS en los primeros 12 meses de operación en el campo San Ardo, California

COMPONENTE	AGUA PRODUCIDA	EFLUENTE FINAL TRATADO	ESPECIFICACIONES PARA EFLUENTES	CUMPLE
STD (mg/L)	6,500	120	510	Si
Sodio (mg/L)	2,300	43	85.0	Si
Cloruro (mg/L)	3,400	11	127.5	Si
Sulfato (mg/L)	133	120	127.5	Si
Nitrato (mg/L)	10.0	No detectado	4.25	Si
Boro (mg/L)	26.0	0.24	0.64	Si
pH	7.5	7.0	6.5 - 8.4	Si

TDS = Sólidos totales disueltos.

Fuente: VEOLIA^a. Chevron, San Ardo Produced Water Treatment [en línea]. [citado 21 de septiembre de 2016]. Disponible en Internet: http://www.veoliawatertech.com/en/news-resources/case-studies/opus_technology_aquifer.htm

8.2. CAMPO ARROYO GRANDE, CALIFORNIA

El campo petrolero Arroyo Grande ubicado en la Zona de San Luis Obispo-California, produce crudo pesado (con gravedad API 12 a 16) a partir de pozos con profundidades promedio de 1,700 pies. Este campo petrolífero requiere la inyección continua de vapor para operar. El proceso de recuperación de petróleo produce agua que actualmente está siendo reinyectada en el yacimiento producto¹⁴¹.

Para aumentar la producción de crudo, la compañía Plains Exploration & Production Company (PXP), contrató a Veolia Water para diseñar, construir y operar una planta de regeneración de agua producido de 45,000 bbls/d. El objetivo es generar agua de alta calidad para proporcionar 25,000 bbls/d para su uso en la generación de vapor y 20,000 bbls/d para descarga superficial¹⁴².

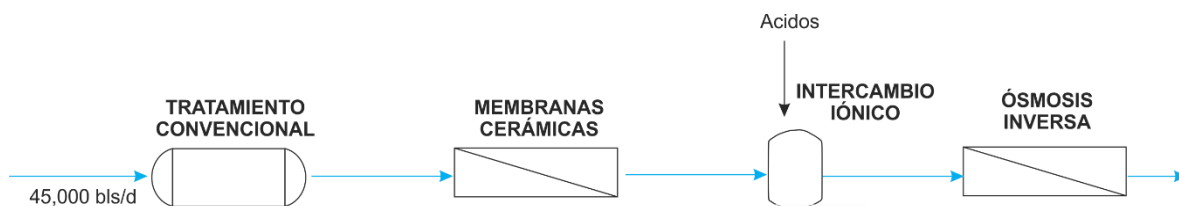
La nueva planta de regeneración de agua producida, diseñada y construida por Veolia Water Solutions & Technologies, incorpora la tecnología OPUS II patentada por la compañía. OPUS II se compone de varios procesos de tratamiento, incluido el intercambio iónico con suavizantes químicos, la filtración por membrana y la OI (Ver **Figura 13**). El proceso de OI funciona a un pH elevado, controla efectivamente el ensuciamiento de las membranas por partículas orgánicas y biológicas, elimina las incrustaciones causadas por el silicio y aumenta el rechazo de silicio y boro. La

¹⁴¹ VEOLIA^d. PXP Selects OPUS® II [en línea]. [citado 21 de septiembre de 2016]. Disponible en Internet: <http://www.veoliawatertech.com/en/news-resources/articles-technical-papers/PXPselectsopusII.htm>

¹⁴² Ibit.

tecnología también utiliza membranas cerámicas como pre tratamiento al intercambio iónico y la OI, para proporcionar reducción o remoción de sólidos suspendidos, sílice, aceite disperso y turbidez¹⁴³.

Figura 13. Esquema del sistema de tratamiento empleado en el campo Arroyo Grande, California.



Fuente: Modificado de VEOLIA^d. PXP Selects OPUS® II [en línea]. [citado 21 de septiembre de 2016]. Disponible en Internet: <http://www.veoliawatertech.com/en/news-resources/articles-technical-papers/PXPselectsopusII.htm>

En la actualidad, el proceso OPUS con membranas cerámicas como pre tratamiento está instalado en el campo petrolero Arroyo Grande en California con una capacidad de 45,000 bbls/d de agua producida¹⁴⁴.

8.3. CAMPO LYSITE, WYOMING

El agua producida a partir de un pozo convencional en la cuenca del río Wind en Wyoming, contiene H₂S, aceite, ácidos, BTEX, sólidos disueltos, etc. Alrededor del 93% de los STD (8.300 a 10.000 mg/L) se contabilizan como sodio, cloruro, calcio y bicarbonatos. El contenido de aceite y grasa es de aproximadamente 65 mg/L y el valor de la DBO es de más de 330 mg/L (aportada por acetatos y ácidos volátiles). El tren de tratamiento consiste en (ver **Figura 14**): (1) La extracción de aceite a través de una unidad de flotación por gas inducido, (2) La remoción de orgánicos disueltos a través de dos reactores de lecho fluidizado. Primero un reactor anaeróbico para reducir las grandes cantidades de productos orgánicos. Luego un reactor aeróbico para garantizar la oxidación de compuestos orgánicos disueltos. (3) La desalinización o desmineralización utilizando una unidad de ED¹⁴⁵.

La ED proporcionó una desmineralización económica en este caso. El agua de alimentación tenía aproximadamente 9.000 mg/L de STD. Como de costumbre, el

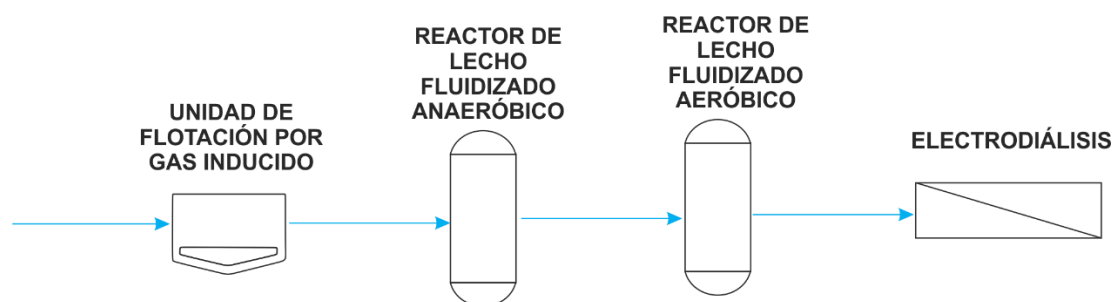
¹⁴³ Ibid.

¹⁴⁴ HUSSAIN, A., et al. Op. Cit.

¹⁴⁵ INTERSTATE OIL AND GAS COMPACT COMMISSION. A Guide to Practical Management of Produced Water from Onshore Oil and Gas Operations in the United States. USA, 2006.

costo de operación de la unidad de ED aumenta a medida que la remoción de STD aumenta. La **Tabla 7** muestra la eficiencia de remoción de los contaminantes utilizando este tren de tratamiento¹⁴⁶.

Figura 14. Esquema del sistema de tratamiento empleado en el campo Lysite, Wyoming.



Fuente: Modificado de INTERSTATE OIL AND GAS COMPACT COMMISSION. A Guide to Practical Management of Produced Water from Onshore Oil and Gas Operations in the United States. USA, 2006.

Tabla 7. Resultados obtenidos en un tren de tratamiento de agua producida donde se emplea la ED.

PARAMETRO	INFLUENTE (mg/L)	EFFLUENTE (mg/L)	% DE REMOCIÓN
Aceite y grasa	90	4	95.5
DBO	330	51	84.5
BTEX	11	0.1	99.1
STD	9,100	1,000	88.9

DBO = Demanda Bioquímica de Oxígeno. BTEX = Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xileno. STD = Sólidos Totales Disueltos.

Fuente: INTERSTATE OIL AND GAS COMPACT COMMISSION. A Guide to Practical Management of Produced Water from Onshore Oil and Gas Operations in the United States. USA, 2006.

8.4. CAMPO JONAH, WYOMING.

B.C. Technologies Ltd., la Universidad de Dakota del Norte, El Centro de Investigación del Medio Ambiente y El Instituto de Investigación de Gas participaron en un proyecto comercial desarrollado en el campo Jonah en la cuenca del Rio Verde al suroeste de Wyoming. El proyecto que comercial que involucra la congelación y descongelación se inició a finales de 1998 (Ver **Figura 15**). La planta de fue exitosa al operarse a temperaturas inferiores a -20° F y el agua tratada fue

¹⁴⁶ Ibid.

de una calidad apropiada para usos beneficiosos. Se evaporaron 23,500 bbls de agua¹⁴⁷.

Figura 15. Congelación y descongelación Campo Jonah en 1998.



Fuente: BOYSEN, J.E., et al. The Current Status Of Commercial Deployment Of The Freeze Thaw Evaporation Treatment Of Produced Water. SPE/EPA Exploration and Production Environmental Conference, Austin, Texas, 1-3 March, [en línea] 1999. SPE-52700-MS. Disponible en One Petro

La **Tabla 8** resume los resultados de una serie de análisis realizados al agua tratada en este proyecto. En noviembre de 1998 se adicionaron dos estanques de salmuera y una nueva modalidad de congelación se inició en diciembre de 1998. El costo de disposición en este campo cuando se utiliza el proceso de congelación y descongelación es de aproximadamente \$1.00/bbl. El costo varía en función de las tasas de disposición que generalmente se utilizan para mantener la instalación y la distancia necesaria para transportar el agua producida desde el lugar de producción hasta la instalación de almacenamiento. Las condiciones climáticas también contribuyen a los gastos de transporte¹⁴⁸.

¹⁴⁷ BOYSEN, J.E., et al. The Current Status Of Commercial Deployment Of The Freeze Thaw Evaporation Treatment Of Produced Water. SPE/EPA Exploration and Production Environmental Conference, Austin, Texas, 1-3 March, [en línea] 1999. SPE-52700-MS. Disponible en One Petro

¹⁴⁸ Ibit.

Tabla 8. Resumen de los resultados obtenidos al emplear congelación y descongelación en el campo Jonah

PARAMETRO	AGUA DE ALIMENTO	AGUA TRATADA 1	AGUA TRATADA 2
STD (mg/L)	29,600	1,320	250
Alcalinidad Total (mg/L)	491	60.6	36
Benceno (µg/L)	3,000	8	< 5
Tolueno (µg/L)	6,000	11	< 5
Xileno (µg/L)	3,000	5,8	< 5
Fenol (µg/L)	7.000	180	<10

STD = Sólidos Totales Disueltos.

Fuente: BOYSEN, J.E., et al. The Current Status Of Commercial Deployment Of The Freeze Thaw Evaporation Treatment Of Produced Water. SPE/EPA Exploration and Production Environmental Conference, Austin, Texas, 1-3 March, [en línea] 1999. SPE-52700-MS. Disponible en One Petro

8.5. CUENCA DEL RÍO POWDER, WYOMING.

Un nuevo proceso de tratamiento que utiliza DOWEX G-26 (resina ácida de intercambio catiónico fabricada por DOW Chemical Company) ha sido desarrollado en la cuenca del río Powder, Wyoming. La resina G-26 tiene un grupo ácido sulfónico (SO_3H^+) que intercambia iones Na^+ , Ba^+ , Ca_2^+ , Mg_2^+ , etc, con iones H^+ . El proceso de intercambio iónico se lleva a cabo en un Higgins Loop (bucle cilíndrico vertical que contiene un lecho de relleno de resina de intercambio iónico). La operación Higgins Loop es seguida por la adición de calcio para ajustar el pH, el balance de la relación de adsorción de sodio (SAR) y el aumento de la concentración de calcio¹⁴⁹.

La cuenca del río Powder es una zona de importancia estratégica de producción de gas. El desarrollo de las reservas de yacimientos gas natural asociado a mantos de carbón en esta zona produce aguas asociados con diferentes niveles de sodio y otros cationes. Por esta razón, se deben utilizar varios métodos para manejar estas aguas. El tratamiento es un método de gestión clave para satisfacer las diversas limitaciones de descarga permitidas¹⁵⁰.

Desde su creación en 2002, se han tratado más de 180.000.000 de barriles de agua producida asociada a mantos de carbón. El proceso de tratamiento emplea un Sistema De Intercambio Iónico Contracorriente Continuo para eliminar los cationes

¹⁴⁹ ARTHUR, J. Daniel, et al. Op. Cit.

¹⁵⁰ BEAGLE, Douglas. CBM - Produced Water Management in the Powder River Basin of Wyoming and Montana. USA, 2009.

del agua (a menos de 1% del volumen de agua tratada) y concentrarlos en salmueras de NaCl¹⁵¹.

En la **Tabla 9** se muestran los resultados de un ensayo de campo para el tratamiento del agua producida en la cuenca del río Powder. El proceso se centró en la eliminación de iones de sodio y la reducción de SAR mediante la combinación de Higgins Loop y la adición de calcio¹⁵².

Tabla 9. Resultados del tratamiento de Higgins Loop para un ensayo de campo en la cuenca del río Powder en Wyoming.

COMPONENTE	AFLUENTE DE AGUA PRODUCIDA	AGUA TRATADA	% REMOCIÓN
Na, (mg/L)	486	12	97.53
Ca, (mg/L)	22.2	113	-409
Mg, (mg/L)	13.2	<1	>93
K, (mg/L)	13.5	<1	>93
Ba, (mg/L)	0.72	No Detectable	100
Carbonato, (mg/L)	<1	<1	-
Bicarbonato, (mg/L)	1430	311	78.52
Cloruro, (mg/L)	18	42	-133.33
Sulfato, (mg/L)	1	1.1	-10
SAR	20.2	0.3	98.51
pH	8.1	6.5	19.75

Fuente: ARTHUR, J. Daniel, et al. Technical summary of oil & gas produced water treatment technologies. ALL CONSULTING, LLC. Tulsa, 2005.

El incremento en los niveles de calcio, cloruro y sulfato se presentaron por la adición de químicos durante el ajuste de SAR. El ensayo de campo se llevó a cabo con un rendimiento de 200 GPM. El costo del tratamiento oscila entre \$0,05 a \$0,20 por barril de agua tratada en función de la composición del afluente, SAR y la disponibilidad de recursos. El agua tratada por intercambio iónico puede entonces ser descargado al medio ambiente y el residuo desecharse¹⁵³.

¹⁵¹ Ibid.

¹⁵² ARTHUR, J. Daniel, et al. Op. Cit.

¹⁵³ Ibid.

9. CONCLUSIONES

- El agua asociada a la producción de hidrocarburos es nociva para los seres humanos y los ecosistemas, pues dentro de sus componentes se encuentran elementos letales y con tendencias carcinogénicos. Además, algunos de sus constituyentes pueden crear condiciones que interfieren en el normal crecimiento de las plantas.
- En Colombia se inyecta aproximadamente el 65% del agua producida, pero el 35% restante es vertido a la superficie. La toxicidad y el volumen de agua descargada convierten el tratamiento de agua producida en una alternativa indispensable para minimizar los impactos ambientales que esta puede causar.
- Las regulaciones ambientales relacionadas con los vertimientos se han hecho más estrictas con el tiempo. Algunos países están trabajando en una política de cero descargas. Esto se ha dado como consecuencia de la escasez de agua, las preocupaciones ambientales y la contaminación que se ha evidenciado a lo largo del tiempo.
- La nueva norma Colombiana de vertimientos redujo significativamente los límites permisibles para algunos constituyentes del agua producida. Sin embargo, no define la concentración máxima de ciertos contaminantes que se consideran altamente tóxicos, lo que se identificó como su principal falencia.
- A pesar de que el tratamiento convencional de agua producida consta de tres etapas, cada una con un principio de separación diferente, solo se puede lograr la remoción de aceite disperso y sólidos suspendidos. Las unidades empleadas en este tipo de tratamiento permiten el paso de componentes tóxicos como metales pesados, materiales radiactivos de origen natural (NORM) e hidrocarburos de bajo peso molecular que se encuentran disueltos en el agua producida.
- Nuevas tecnologías para el tratamiento del agua producida han sido desarrolladas como respuesta a las nuevas restricciones ambientales. Su principal propósito es generar efluentes compatibles con las normas de calidad de agua para vertimiento y reúso. De esta forma se minimiza la captación de agua dulce para usos industriales y se contribuye a la protección del medio ambiente.

- Para generar un efluente que cumpla con las concentraciones máximas establecidas en la Resolución 0631 de 2015, es necesario implementar una configuración de tratamiento de agua producida que además del tratamiento convencional, también involucre las tecnologías modernas.
- El potencial de las tecnologías de filtración por membrana para el tratamiento de agua producida se ha demostrado con éxito en varios estudios de campo. Facilidades a gran escala ya han instalado tecnologías de filtración por membrana para tratar y reutilizar el agua producida. Los trenes de tratamiento suelen ser una combinación de diferentes tecnologías de membrana con otras tecnologías convencionales de tratamiento.

BIBLIOGRAFÍA

AERA ENERGY. San Ardo [en línea]. [citado 21 de septiembre de 2016]. Disponible en Internet: <http://www.aeraenergy.com/san-ardo.asp>

AGENCIA PARA SUSTANCIAS TÓXICAS Y EL REGISTRO DE ENFERMEDADES (ATSDR). Resúmenes de Salud Pública [en línea]. [citado 30 de agosto de 2016]. Disponible en Internet: <https://www.atsdr.cdc.gov/es/>

AHMADUN, Fakhru'l-Razi., et al. Review of technologies for oil and gas produced water treatment. Elsevier [en línea], 2009, vol.170 no.2-3. Disponible en Science Direct

ALLEY, Bethany, et al. Chemical and physical characterization of produced waters from conventional and unconventional fossil fuel resources. Elsevier, [en línea], 2011, vol.85, no.1. Disponible en Science Direct.

AL-MAAMARI, Rashid S., et al. Flotation, Filtration, and Adsorption: Pilot Trials for Oilfield Produced-Water Treatment. Oil and Gas Facilities [en línea], 2014, vol.3, no.02. Disponible en One Petro.

AL-MANHAL. Oil & water (produced-treatment and disposal).. Emiratos Árabes, 2003.

ARNOLD, Ken, y STEWART, Maurice. Surface Production Operations, Design of Oil-Handling Systems and Facilities Vol.1. 2 ed. Houston, 1989. ISBN: 978-0-88415-821-9

ARTHUR, J. Daniel, et al. Technical summary of oil & gas produced water treatment technologies. ALL CONSULTING, LLC. Tulsa, 2005.

ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE PETRÓLEO (ACP) Y ECOPETROL. Informe de Gestión Ambiental del Sector Hidrocarburos. Bogotá, 2014.

AZETSU-SCOTT, Kumiko, et al. Precipitation of heavy metals in produced water: influence on contaminant transport and toxicity. Elsevier [en línea], 2007, vol.63, no.2. Disponible en Science Direct.

BEAGLE, Douglas. CBM - Produced Water Management in the Powder River Basin of Wyoming and Montana. USA, 2009.

BOYSEN, J.E., et al. The Current Status Of Commercial Deployment Of The Freeze Thaw Evaporation Treatment Of Produced Water. SPE/EPA Exploration and Production Environmental Conference, Austin, Texas, 1-3 March, [en línea] 1999. SPE-52700-MS. Disponible en One Petro

BRASIL, CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução 357 (17 de Marzo de 2005). Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências.

BUFFAGNI, Melania, et al. Environmental Risk Management of E&P Operations in the Barents Sea: environmental indicators and thresholds levels. SPE International Conference on Health, Safety and Environment in Oil and Gas Exploration and Production, Rio de Janeiro, Brazil, 12-14 April [en línea] 2010. SPE-126710-MS. Disponible en One Petro.

BYBEE, Karen. A Process Option to Comply with Zero-Harmful-Discharge Legislation in Norwegian Waters. Journal of Petroleum Technology [en línea], 2009, vol.61, no.04. Disponible en One Petro.

CENTRO CANADIENSE DE SEGURIDAD Y SALUD OCUPACIONAL (CCSSO). Environment and Climate Change Canada [en línea]. [citado 26 de agosto de 2016]. Disponible en Internet: <http://www.ccsso.ca/>

CLARK, C.E. y VEIL, J.A. Produced Water Volumes and Management Practices in the United States. USA, 2009.

COLOMBIA, CONGRESO DE LA REPÚBLICA. Ley 9 de 1979 (24 de enero de 1979). Medidas Sanitarias.

COLOMBIA, MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE (MADS). Resolución 1207 de 2014, (25 de julio de 2014). Disposiciones relacionadas con el uso de aguas residuales tratadas.

COLOMBIA, MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE (MADS). Resolución 0631 de 2015 (17 de marzo de 2015). Parámetros y límites

máximos permisibles es los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público.

COLORADO SCHOOL OF MINES. Technical assessment of produced water treatment technologies. USA, 2009.

DEGRÉMONT INDUSTRY. Water treatment for upstream oil and gas industry [en línea]. [citado 2 de agosto de 2016]. Disponible en Internet: <http://www.degremont-industry.com/en/your-industrial-sector/oil-and-gas-industry/>

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PLANEACIÓN (2002). Acciones prioritarias y lineamientos para la formulación del plan nacional de manejo de aguas residuales. CONPES, 3177. Bogotá, 2002.

FAKSNESS, Liv-Guri, et al. Partitioning of semi-soluble organic compounds between the water phase and oil droplets in produced water. Elsevier [en línea], 2004, vol.48, no.7-8. Disponible en Science Direct.

FEDERACIÓN DE COMUNIDADES NATIVAS DEL CORRIENTES (FECONACO). Características y calidad del agua de reinyección [en línea]. [citado 26 de agosto de 2016]. Disponible en Internet: http://feconaco.org/documentos/teoria_reinyeccion.htm#calidad

FULLER, Rick. API Separator [en línea]. [citado 27 de marzo de 2016]. Disponible en Internet: http://waterfacts.net/Unit_Processes/Gravity_Separators/API_Separator/api_separator.html

GRINI, P.G., et al. Choosing Produced Water Treatment Technologies Based on Environmental Impact Reduction. SPE International Conference on Health, Safety and Environment in Oil and Gas Exploration and Production, Kuala Lumpur, Malaysia, 20-22 March, [en línea] 2002. SPE-74002-MS. Disponible en One Petro.

HANSEN, BR. y DAVIES, SR. Review of potential technologies for the removal of dissolved components from produced water. Elsevier [en línea], 1994, vol.72. Disponible en Science Direct.

HUSSAIN, A., et al. Advanced Technologies for Produced Water Treatment. International Petroleum Technology Conference, Doha, Qatar, 19-22 January, [en línea] 2014. IPTC-17394-MS. Disponible en One Petro.

IFP ENERGIES NOUVELLES. Water in fuel production Oil production and refining. Lyon, 2011.

IGUNNU, Ebenezer T. y CHEN, George Z. Produced water treatment technologies. Oxford University Press, 2012.

IGWE, Chibunna Onyems, et al. Optimal Options for Treatment of Produced Water in Offshore Petroleum Platforms. Nantes, 2013.

INTERSTATE OIL AND GAS COMPACT COMISSION. A Guide to Practical Management of Produced Water from Onshore Oil and Gas Operations in the United States. USA, 2006.

KAUR, Guneet, et al. Control of sulfidogenic bacteria in produced water from the Kathloni oilfield in northeast India. Elsevier [en línea], 2009, vol.63 no.2. Disponible en Science Direct.

KNOL, Maaïke. The uncertainties of precaution: zero discharges in the Barents Sea. Elsevier [en línea], 2011, vol.35, no.3. Disponible en Science Direct.

LENNTECH. Efectos sobre la salud [en línea]. [citado 25 de agosto de 2016]. Disponible en internet: <http://www.lenntech.es/periodica/salud/efectos-salud.htm>

LONDOÑO PÉREZ, Rubén Darío y PARRA MARTÍNEZ, Yanneth. Manejo de vertimientos y desechos en Colombia. Una visión general. Universidad de La Salle. Bogotá, 2007.

MÉXICO, SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES. Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996 (1 de junio de 1997). Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.

MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE (MADS). Instrumentación Ambiental. Respuestas a los comentarios presentados por actores externos a propuestas normativas. Bogotá, 2015b.

MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE (MADS). Minambiente presenta nueva Norma de Vertimientos que permitirá mejorar la

calidad del agua del país [en línea]. Bogotá, 18 de marzo de 2015a. Disponible en Internet: <https://goo.gl/o0nQ1b>

MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE. Evaluación y manejo de la contaminación urbana: memorias. Bogotá, 1997.

MUNIRASU, Selvaraj, et al. Use of membrane technology for oil field and refinery produced water treatment-A review. Elsevier [en línea], 2016, vol.100. Disponible en Science Direct.

NEFF, Jerry M. Bioaccumulation in Marine Organisms: Effect of Contaminants from Oil Well Produced Water. Elsevier, 2002. ISBN: 978-0-08-043716-3

NEW LOGIC RESEARCH. Using VSEP to Treat Produced Water: An effective and economical solution. USA, 2016.

O'HARA, Patrick D. y MORANDIN, Lora A. Effects of sheens associated with offshore oil and gas development on the feather microstructure of pelagic seabirds. Elsevier [en línea], 2010, vol.60, no.5. Disponible en Science Direct.

PRESIDENCIA DE LA REPUBLICA DE COLOMBIA. Decreto 1594 de 1984 (26 de junio de 1984). Usos del agua y residuos líquidos.

PRESIDENCIA DE LA REPUBLICA DE COLOMBIA. Decreto 2811 de 1974 (18 de diciembre de 1974). Código nacional de recursos naturales renovables y de protección al medio ambiente.

PRESIDENCIA DE LA REPUBLICA DE COLOMBIA. Decreto 3930 de 2010 (25 de octubre de 2010). Gestión integral del recurso hídrico.

PRIATNA, Rachmat, et al. Phenol Compound in Produced Water. SPE Health, Safety and Environment in Oil and Gas Exploration and Production Conference, Jakarta, Indonesia, 25-27 January, [en línea] 1994. SPE-27134-MS. Disponible en One Petro.

ROBINSON, David. Oil and gas: Treatment and discharge of produced waters offshore. Londres, 2013.

STANIC, Jelena. Unconventional Oil and Gas Production Drives Trends in Water Management and Treatment. Global Water Intelligence, 2014.

STEPHENSON, M.T. Components of Produced Water: A Compilation of Industry Studies. Journal of Petroleum Technology, 1992.

STRØMGREN, T., et al. Acute toxic effects of produced water in relation to chemical composition and dispersion. Elsevier [en línea], 1995, vol.40, no.2. Disponible en Science Direct.

TECH ALIVE. Michigan Environmental Education Curriculum. Drinking Water Treatment–Filtration [en línea]. [citado 10 de octubre de 2016]. Disponible en Internet: <http://techalive.mtu.edu/meec/module03/Sources-Groundwater.htm>

TELLEZ, Gilbert T., et al. Performance evaluation of an activated sludge system for removing petroleum hydrocarbons from oilfield produced water. Elsevier [en línea], 2002, vol.6, no.4. Disponible en Science Direct.

UAT VENEZUELA. Tratamiento de aguas mediante tecnologías de membranas. Caracas, 2016.

UKPOHOR, T.O. Produced Water: Environmental Issues/ Technological Solution Of The Nigeria Depletion Era. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, Louisiana, 30 September-3 October [en línea] 2001. SPE-71437-MS. Disponible en One Petro.

UNITED NATIONS EDUCATIONAL, SCIENTIFIC AND CULTURAL ORGANIZATION (UNESCO). Water, a shared responsibility. Changing natural systems. París, 2006. ISBN UNESCO: 92-3-104006-5.

US ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). EPA Information Sheet: Regulating Petroleum Industry Wastewater Discharges in US and Norway. USA, 2011.

VEIL, John A., et al. A White Paper Describing Produced Water from Production of Crude Oil, Natural Gas and Coal Bed Methane. USA, 2004.

VENEZUELA, PRESIDENCIA DE LA REPÚBLICA. Ley Orgánica de Ambiente, Decreto 883 (11 de Octubre de 1995). Normas para la Clasificación y el Control de la Calidad de los Cuerpos de Agua y Vertidos o Efluentes Líquidos.

VEOLIA^a. Chevron, San Ardo Produced Water Treatment [en línea]. [citado 21 de septiembre de 2016]. Disponible en Internet: http://www.veoliawatertech.com/en/news-resources/case-studies/opus_technology_aquifer.htm

VEOLIA^b. Produced Water Facility at South-ern California Oil Field Features the First-Ever Installation of OPUS® [en línea]. [citado 21 de septiembre de 2016]. Disponible en Internet: <http://www.veolianorthamerica.com/en/san-ardo-refinery>.

VEOLIA^c. Fighting resource scarcity, one battle at a time [en línea]. [citado 21 de septiembre de 2016]. Disponible en Internet: <http://www.veoliawatertechnologies.com/en/media/articles/fighting-resource-scarcity-one-battle-time>.

VEOLIA^d. PXP Selects OPUS® II [en línea]. [citado 21 de septiembre de 2016]. Disponible en Internet: <http://www.veoliawatertech.com/en/news-resources/articles-technical-papers/PXPselectsopusII.htm>.

WALSH, John Michael y GEORGIE, Wally John. Produced Water Treatment Systems: Comparison of North Sea and Deepwater Gulf of Mexico. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, Texas, USA, 8-10 October, [en línea] 2012. SPE-159713-MS. Disponible en One Petro.

ZHENG, Jisi., et al. Offshore produced water management: A review of current practice and challenges in harsh/Arctic environments. Elsevier [en línea], 2016, vol.104, no.1-2. Disponible en Science Direct.