



**Pontificia Universidad Javeriana**  
**Instituto de Salud Pública**

Trabajo de grado para optar por el título de  
Magíster en Salud Pública

**Efectos en salud del agua producida de la industria petrolera:  
una revisión de alcance**

Katherine Contreras Acosta

Tutora

Gina Polo Infante, M.V., M.Sc., Ph.D.

Bogotá D. C

2023

## Resumen

**Introducción:** En la industria del petróleo, el agua producida es un flujo residual con altas concentraciones de contaminantes perjudiciales para la salud. **Objetivo:** El objetivo de este trabajo es revisar la literatura existente acerca de los efectos del agua producida en la salud de las poblaciones. **Metodología:** Fue realizada una revisión de alcance en las bases de datos EMBASE (Biomedical Research) y MEDLINE (PubMed) considerando las palabras clave “produced water” AND “oil industry” AND “human health”. Adicionalmente, esta búsqueda fue extendida con los términos (“composition” OR “treatment”) para caracterizar los componentes del agua residual, así como determinar posibles medidas de tratamiento. Se consideraron ensayos clínicos y estudios observacionales publicados entre 2013 y 2023, sin importar las características sociodemográficas de la población o la ubicación geográfica. **Resultados:** Se encontraron 1061 artículos, siendo que 70 cumplieron con los criterios de inclusión. Los principales efectos en salud de las aguas producidas incluyen principalmente efectos óseos, circulatorios, oftalmológicos, gastrointestinales, metabólicos, cardiovasculares, musculares, inmunológicos, deficiencia en el crecimiento en niños, problemas dermatológicos, respiratorios, reproductivos, renales, nerviosos, hormonales, varios tipos de cáncer, así como defectos al nacimiento, bajo peso al nacer y deficiencias en el desarrollo cognitivo. Estos efectos son producidos principalmente por metales pesados, hidrocarburos aromáticos poliaromáticos, BTEX (benceno, etilbenceno, tolueno y xilenos), compuestos orgánicos solubles, sólidos en suspensión, gases disueltos, materiales radiactivos y microorganismos contenidos en las aguas producidas. El tratamiento del agua producida es posible mediante métodos físicos, químicos y biológicos, que potencialmente garantizan la reutilización del agua en actividades productivas como en la agricultura, la industria y la ganadería. **Conclusiones:** Los efectos en salud del consumo de aguas producidas son evidentes dada su composición. Sin embargo, debido al aumento de las actividades industriales y la escasez global de agua dulce, el tratamiento para la reutilización del agua producida se ha convertido en un asunto emergente desde el punto de vista ambiental y sanitario. Por lo tanto, es fundamental generar un sistema de vigilancia que vigile la epidemiología de la intoxicación por aguas producidas, se instauren normativas asociadas al uso/ consumo del agua producida tratada y se exija el cumplimiento de los requisitos de calidad.

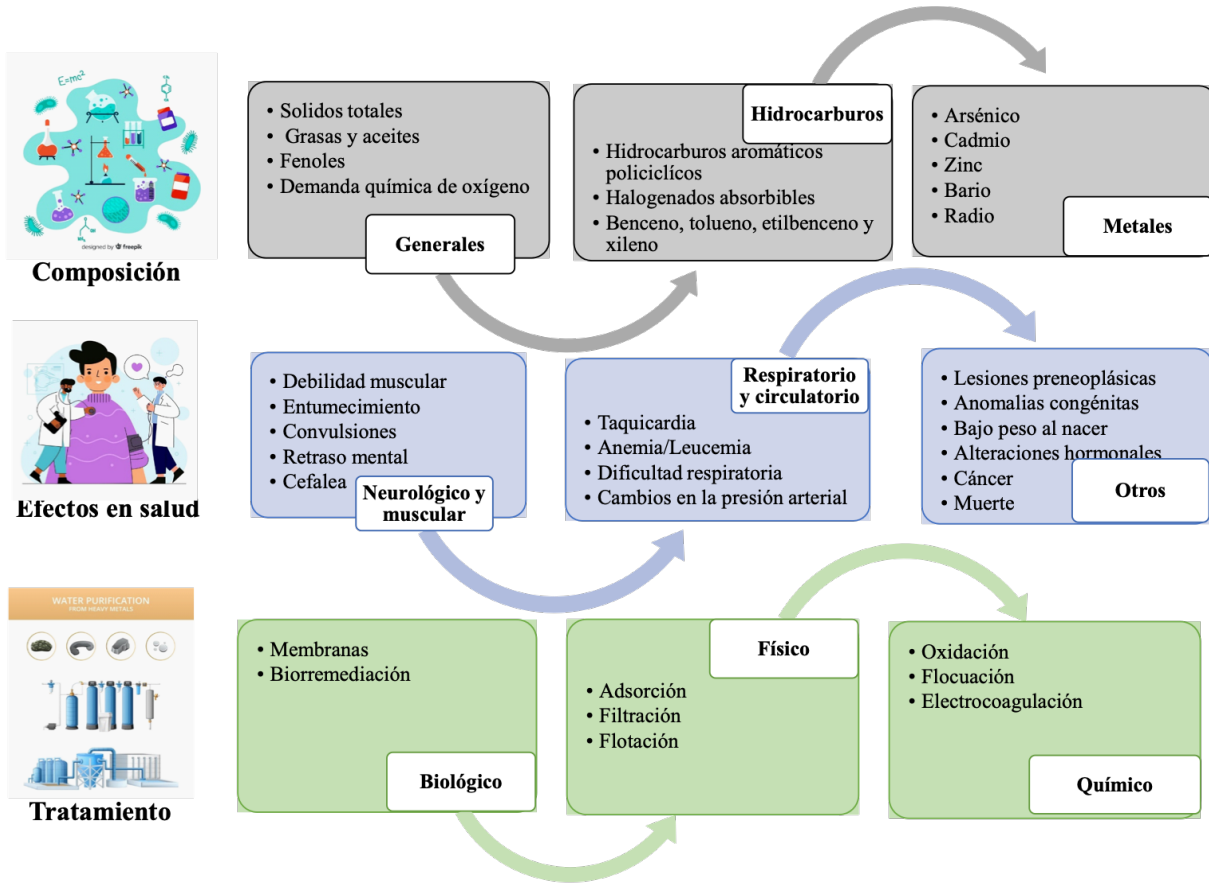
**Palabras clave:** Aguas producidas, industria del petróleo, salud humana, ambiente.

## Abstract

**Introduction:** In the petroleum industry, produced water is a waste flow with high concentrations of contaminants harmful to health. **Objective:** This work's objective is to review the existing literature about the effects of produced water on population health. **Methodology:** A scoping review was carried out in the databases EMBASE (Biomedical Research) and MEDLINE (PubMed) considering the keywords “produced water” AND “oil industry” AND “human health”. Additionally, this search was extended with the terms (“composition” OR “treatment”) to know the composition of the wastewater, as well as possible treatment measures. Clinical trials and observational studies published between 2013 and 2023 were considered, regardless of the sociodemographic characteristics of the population, geographic location or the outcome of the articles. **Results:** 1061 articles were found, with 70 meeting the inclusion criteria. The main health effects of the water produced include neurological, muscular, circulatory and other effects such as hormonal alterations, congenital malformations, cancer and death. These effects are produced mainly by salts, oil, grease, metals, polyaromatic hydrocarbons, benzene, toluene, ethylbenzene, xylenes, soluble organics, suspended solids, dissolved gases, natural radioactive materials and microorganisms contained in the produced waters. Produced water treatment is possible through physical, chemical and biological methods, which could guarantee its reuse in productive activities such as agroindustry and livestock. **Conclusions:** The health effects of consuming produced water are evident given its complex and varied chemical composition. However, due to the increase in industrial activities and the global scarcity of fresh water, the treatment for reuse of produced water has become an emerging issue from an environmental and health point of view.

**Key words:** Produced water, oil industry, human health, environment.

# Resumen gráfico



## Tabla de Contenido

1. Planteamiento del problema .....	7
2. Justificación .....	9
3. Marco teórico.....	12
4. Marco normativo .....	15
5. Objetivos.....	19
6. Métodos .....	20
7. Resultados.....	21
7.1.Composición química de las aguas producidas de la industria petrolera .....	21
7.2.Efectos en salud de las aguas producidas de la industria petrolera .....	26
7.3.Tratamiento de las aguas producidas de la industria petrolera .....	31
8. Discusión .....	50
9. Conclusiones.....	57
10. Bibliografía.....	58
11. Anexo.....	68

## Lista de Tablas

Tabla 1. Incidentes de origen operacional con derrames de hidrocarburos a 1 barril y potencial afectación al medio ambiente (Fuente: Ecopetrol, 2023).....	10
Tabla 2. Parámetros fisicoquímicos a monitorear y sus valores límites máximos en los vertimientos puntuales de aguas residuales no domesticas a cuerpos de aguas superficiales de actividades productivas de hidrocarburos agroindustria, ganadería y bebidas.....	19
Tabla 3. Características de los artículos seleccionados para la ecuación de búsqueda “Produced water” AND “Oil industry” AND “Composition” .....	26
Tabla 4. Características de los artículos seleccionados para la ecuación de búsqueda “Produced water” AND “Oil industry” AND “Human health” .....	32
Tabla 5. Características de los artículos seleccionados para la ecuación de búsqueda “Produced water” AND “Oil industry” AND “Treatment” .....	43

## 1. Planteamiento del problema

En 2010, a través de la Resolución 64/292, la Asamblea General de las Naciones Unidas reconoció el derecho humano al agua y al saneamiento (ONU, 2002); sin embargo, globalmente, una de cada tres personas no tiene acceso a agua potable salubre, dos de cada cinco personas no disponen de una instalación básica destinada a lavarse las manos con agua y jabón y más de 673 millones de personas están obligadas a defecar al aire libre (ONU, 2023). Específicamente, en América Latina solo el 65% de la población tiene acceso a agua potable y el 22% a saneamiento; además, en esta región son comunes los efectos en salud de la contaminación hídrica debida a agentes patógenos (ej., *Escherichia*, *Edwardsiella*, *Enterobacter*, *Klebsiella*, *Serratia*, *Citrobacter*), desechos orgánicos y sustancias químicas (ONU, 2022).

Una de las principales fuentes de contaminación del agua son los desechos industriales, los cuales generan subproductos corrosivos, inflamables, tóxicos o reactivos que requieren plantas especializadas para su tratamiento (Chaudhry & Malik, 2017). Dentro de estas industrias, la industria del petróleo es una de las más contaminantes (Bravo E, 2007). La contaminación del agua por esta industria puede darse en el proceso de producción, momento en el cual, el agua se mezcla con el petróleo en los yacimientos debido a fugas y derrames (Hazardous Substance Research Centers, 2003). No obstante, en Colombia, esta contaminación también ocurre durante el transporte del petróleo, el cual es realizado a través de ecosistemas que comprenden selvas, suelos agrícolas y ríos de los que dependen varias comunidades, como es el caso de los corredores Andes-Amazonía en el Putumayo, con los oleoductos Orito-San Miguel y transandino y de la zona del Catatumbo con el oleoducto Caño Limón Coveñas (Bayona & Moreno, 2017).

En los últimos años, en Colombia se ha visto la biorremediación como solución parcial a los problemas de contaminación generados no sólo por el vertimiento de hidrocarburos del petróleo y plaguicidas, sino también por otros contaminantes tanto en suelo como en agua (Rosero-Garcia, 2020). Asimismo, en el país se utilizan tecnologías convencionales como el desengrasado, la remoción de compuestos orgánicos, la evaporación y tratamientos con membranas (Mesa et al., 2018). No obstante, se ha detectado la necesidad de implementar técnicas más eficientes en el manejo final del agua producida (Mesa et al., 2018). Empero, para proponer nuevas alternativas de

tratamiento es indispensable tener un mayor entendimiento de la composición (compuestos orgánicos e inorgánicos) de las aguas producidas de la industria del petróleo y los efectos en salud que estos compuestos generan.

En este sentido, la pregunta de investigación de este trabajo es amplia y se basa en analizar si las aguas producidas provocan algún tipo de efecto en la salud de las poblaciones humanas contiguas a actividades petroleras. Esta pregunta aborda los conceptos de población, concepto y contexto (PCC) recomendados por la guía PRISMA (*transparent reporting of systematic reviews and meta-analyses*) para revisiones de alcance (*scoping reviews*).

- Población: La población de estudio serán todas aquellas personas que residen en áreas contiguas a actividades petroleras.
- Concepto: Los efectos de las aguas producidas de la industria petrolera en la salud humana.
- Contexto: Uso de agua producida por poblaciones contiguas a las actividades de la industria petrolera de cualquier localización geográfica.

Para responder esta pregunta es esencial revisar previamente la composición de las aguas producidas y surgirá la necesidad de identificar posibles medidas de mitigación de los efectos en salud ocasionados por estas aguas. Esto último fundamentado en que la descontaminación de las aguas es una necesidad global, aún más si se consideran los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la agenda 2030 para el desarrollo sostenible, los cuales establecen como meta para el sexto objetivo "garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos". En este contexto, se tiene que hasta 2030 se debe mejorar la calidad del agua reduciendo la contaminación, eliminando el vertimiento y minimizando la emisión de productos químicos y materiales peligrosos, reduciendo a la mitad el porcentaje de aguas residuales sin tratar y aumentando considerablemente el reciclado y la reutilización sin riesgos (ONU, 2023). En este contexto, responder esta pregunta tiene un mayor sentido desde el punto de vista de salud pública en la medida que permitirá además explorar intervenciones enfocadas en el manejo de aguas producidas de la industria petrolera y servir como guía para la formulación de un sistema de vigilancia en el marco de la intoxicación por aguas contaminadas.

## 2. Justificación

Las enfermedades relacionadas con el agua y el saneamiento siguen siendo las principales causas de fallecimiento de niños menores de cinco años (ONU, 2023); además, alrededor de 1800 millones de personas usan una fuente de agua contaminada con restos fecales y más del 80% de las aguas residuales resultantes de la actividad humana se vierte en ríos o en el mar sin ningún tratamiento previo (ONU, 2023). Según la FAO, cada año se extraen en el mundo unos 3928 km<sup>3</sup> de agua dulce, siendo que el 44% de dicha agua (1716 km<sup>3</sup>) se utiliza principalmente en la agricultura y el 56% restante (2212 km<sup>3</sup>) se libera en el medio ambiente como agua residual en forma de efluentes municipales e industriales (UNESCO, 2017). Para el caso de la industria petrolera, es de conocimiento global que la extracción de petróleo del subsuelo conlleva a una producción conjunta de agua, siendo que se inyectan en promedio 8.6 galones de agua para recuperar un galón de crudo (La et al., n.d.).

A nivel nacional, la industria petrolera está asentada en seis cuencas, siendo las de mayor producción las localizadas en los Llanos Orientales, Valle Medio del Magdalena y Valle Superior del Magdalena (ANH, 2021). En 2023, la producción acumulada de petróleo se concentró principalmente en los departamentos de Meta (87'606.199 Bbl), Casanare (27'275.797 Bbl), Arauca (10'887.375 Bbl), Santander (9'555.049 Bbl), Boyacá (5'636.103 Bbl), Putumayo (5'393.265 Bbl), Cesar (4'591.780 Bbl), Huila (4'184.518 Bbl), Antioquia (3'122.324 Bbl), Bolívar (2'679.246 Bbl) y Tolima (2'048.635) (ANH, 2023). Sin embargo, los incidentes petroleros ocurrieron con mayor frecuencia en Santander (879 casos entre 2015 y 2022), Boyacá, Antioquia, Meta, Casanare, Huila y Putumayo (Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres, 2021). Entre los municipios con más incidentes sobresalen Barrancabermeja (Santander), donde se ubica una refinería de Ecopetrol, Puerto Boyacá (Boyacá), Yondó (Antioquia), Sabana de Torres (Santander), Tibú (Norte de Santander) y Puerto Gaitán (Meta) (ANLA, 2022).

Según la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA), la compañía petrolera con más incidentes operacionales fue Ecopetrol con 1447 casos entre 2015 y 2022, cifra que consolida todos los incidentes con afectación al medio ambiente que incluyen derrames de hidrocarburo u otras sustancias, ocasionados por terceros, es decir, por atentados terroristas o hurto de hidrocarburos

mediante la instalación de válvulas ilícitas (Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres, 2021). En cuanto a incidentes, a Ecopetrol le siguen las empresas Mansarovar Energy Colombia (229 incidentes), Petrosantander (92 incidentes), Frontera Energy (40 incidentes) y Hocol S.A (40 incidentes) entre 2015 y 2022 (Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres, 2021). Según cifras de Ecopetrol (Tabla 1), entre 2011 y 2022 se registraron 145 accidentes de derrames de hidrocarburo (mayores a un barril) por causa operacional, con potencial afectación al medio ambiente (ECOPETROL, 2023), siendo desconocidos los impactos ambientales y sanitarios de estos incidentes.

Tabla 1. Incidentes de origen operacional con derrames de hidrocarburo mayores a un barril y potencial afectación al medio ambiente.

<b>Año</b>	<b>Número de incidentes</b>	<b>Número de barriles derramados</b>
2011	35	2343
2012	20	439
2013	16	85
2014	19	658
2015	7	107
2016	5	166
2017	14	50
2018	11	696
2019	6	142
2020	4	125
2021	5	158
2022	3	64

Fuente: Ecopetrol, 2023.

A manera personal, como habitante de Barrancabermeja, Santander, oficialmente Distrito Especial, Portuario, Biodiverso, Industrial y Turístico de Barrancabermeja, considero que Ecopetrol ha sido fundamental para el desarrollo económico del municipio, pero también ha generado contaminación de los ecosistemas, principalmente de las fuentes hídricas. Además, en este municipio, la población desconoce la ocurrencia de los incidentes, la composición de los desechos

producidos por esta refinería y las consecuencias en la salud que puede conllevar el consumo de estos vertimientos. De hecho, en Barrancabermeja se han reportado eventos en salud asociados con el consumo de agua, pero se desconoce su relación con la industria petrolera. Entre otros, se reportó un aumento de la mortalidad por enfermedad diarreica aguda en menores de cinco años entre el periodo 2006-2015 (6,40 muertes por cada 100.000 menores de cinco años), la cual supera considerablemente la tasa departamental (1,81 muertes por cada 100.000 menores de cinco años); además, se reportó un aumento en las tasas de mortalidad por cáncer gástrico entre los años 2012-2015, registrándose hasta una tasa de 12 muertes por cada 100.000 habitantes (Bueno Torres, 2019).

Los estudios sobre la mala calidad del agua y sus consecuencias en salud, por lo general, se enfocan en el efecto de la potabilización inadecuada y la aparición de brotes diarreicos, siendo pocos los trabajos orientados a caracterizar el grado de exposición y el impacto sobre la salud a otro tipo de compuestos potencialmente transportados por el agua y raramente eliminados en los procesos convencionales de purificación (Alonso, 2021). En este contexto, son varias las tentativas de tratamiento de los recursos hídricos contaminados; sin embargo, cabe resaltar que el tratamiento del agua que comúnmente se realiza en los hogares (métodos pasivos de desinfección y cloración residual de bajo costo) solo mejora la calidad microbiológica, por lo que no son efectivos para tratar compuestos químicos como los hidrocarburos o los metales (Alonso, 2021).

En este contexto, esta investigación pretende aportar conocimiento sobre los posibles efectos de las aguas de producción del petróleo en la salud mediante la caracterización de sus componentes, con lo que se pretende lograr que las empresas dedicadas a la explotación petrolera reconozcan la importancia de comprometerse con el uso de tecnologías que reduzcan los riesgos relacionados con el tratamiento de las aguas producidas y ratifiquen su compromiso social y ambiental. Además, con esta revisión se pretende apoyar a las diferentes instituciones de salud en el fortalecimiento e implementación de un sistema de vigilancia para este evento. Finalmente, este documento servirá como difusor de información que le permita a la comunidad conocer los posibles riesgos que representa el consumo o uso de aguas producidas de la industria petrolera y puedan fortalecer sus capacidades, visión y protagonismo como grupo social, con el fin de impulsar cambios positivos en las comunidades.

### **3. Marco teórico**

El petróleo es una sustancia utilizada y comercializada desde la antigüedad que fue convertida en un recurso energético importante desde finales del siglo XIX (Junta de Castilla y León, 2023). La explotación de petróleo en Colombia surgió a inicios del siglo XX, siendo originada la Empresa Colombiana de Petróleos, Ecopetrol en 1951. En 1983 se descubrió el yacimiento Caño Limón, en 1993 Cupiagua y en 2003 se creó la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH), encargada de la administración integral de las reservas de hidrocarburos de propiedad de la Nación (ANH, 2023).

El petróleo se suele definir como una mezcla compleja de parafinas, nafténicos e hidrocarburos aromáticos, incluido el benceno y una pequeña cantidad de sulfuro, nitrógeno, oxígeno y compuestos metálicos (Alonso, 2021). La explotación de hidrocarburos produce graves daños ambientales (Galván Rico, 2007); por ejemplo, durante las actividades de perforación, extracción, transformación y transporte del petróleo pueden ocurrir derrames, fugas, filtraciones y lodos que contaminan el agua y el suelo (Velásquez, 2017).

La contaminación del suelo se origina tanto por metales pesados que se encuentran en el suelo como por actividades antropogénicas, siendo los principales contaminantes los derrames accidentales de petróleo, la filtración de aguas residuales, el uso de fertilizantes y la irrigación con aguas industriales residuales no tratadas (Rodríguez-Eugenio et al., 2019). Actualmente no son evidentes los efectos directos de la contaminación del suelo en la salud humana; sin embargo, se reconoce que la absorción de metales pesados por las plantas puede causar intoxicación en los seres humanos y que más de doscientas enfermedades están relacionadas con la ingesta de alimentos contaminados (World Health Organization, 2023). Además, la contaminación del suelo por hidrocarburos conduce a un deterioro de la estructura del suelo, pérdida del contenido de materia orgánica y pérdida de nutrientes minerales, tales como potasio, sodio, sulfato, fosfato, y nitrato (Serrano et al., 2013). También, se ha reportado una disminución en la fertilidad y cosechas reducidas debido a los efectos que tiene esta sustancia en la reducción de la retención de humedad y nutrientes, las modificaciones que genera en el pH y su toxicidad (Velásquez, 2017).

No obstante, las repercusiones negativas más exploradas de la explotación de hidrocarburos están relacionadas con las fuentes hídricas, principalmente debido al vertimiento de sus desechos al alcantarillado sin tratamiento previo, los incidentes ambientales y los derrames en cuerpos de agua por ruptura de tuberías (Instituto Universitario de la Paz, 2014). Un ejemplo de ello fue el incidente que ocurrió en el año 2018 en la quebrada La Lizama ocasionada por el daño de un pozo de Ecopetrol ubicado en el corregimiento La Fortuna del municipio de Barrancabermeja (Radio Nacional de Colombia, 2021). Este incidente dejó 873 víctimas, entre pescadores y comerciantes y causó daños importantes en cuerpos de agua, suelo, flora y fauna (Radio Nacional de Colombia, 2021). Así como lo sucedido en Pavillion, Wyoming, donde el suministro de agua contaminada por productos químicos utilizados en el proceso de *fracking* generó deterioro neurológico, pérdida del olfato y dolor crónico en la población (Whitney-Williams Hillary Hoffmann et al., 2015). Es importante resaltar que la contaminación hídrica también puede ser causada por la adición de otras sustancias o microorganismos que alteran la calidad del agua generando riesgos en su consumo (Córdoba et al., 2010), siendo los contaminantes principales agentes patógenos (bacterias, parásitos y virus), desechos orgánicos que requieren oxígeno, sustancias químicas como metales, ácidos, plásticos, plaguicidas, detergentes y sustancias radioactivas (Segura, 2007).

La falta de agua en las regiones áridas y semiáridas, junto con el interés por la seguridad hídrica en zonas donde la demanda de agua supera su disponibilidad, ha provocado que la reutilización del agua se considere una fuente alternativa en estas zonas y ha llevado a las autoridades a pasar del habitual enfoque lineal a una gestión circular de la preservación de los recursos (Fernandes et al., 2023). Además, dado que a nivel mundial los problemas de contaminación ambiental tanto en suelos como en agua y aire se deben principalmente a acciones antropogénicas que incrementan constantemente debido al desarrollo agroquímico e industrial de las poblaciones (Rodríguez-Eugenio et al., 2019), cada día son mayores los esfuerzos en reconocer los determinantes ambientales de la salud (ej., calidad del aire, seguridad de sustancias químicas, factores asociados con el clima y el agua, saneamiento e higiene) y en generar consciencia sobre los efectos de la contaminación en la morbilidad y mortalidad de las poblaciones (OPS, 2022).

En este sentido, existen compromisos globales para disminuir la contaminación del agua, por lo que se han adoptado diferentes mecanismos para tratar las aguas producidas y reutilizarlas

(Alvarado, 2017). La reutilización del agua producida para el riego de cultivos tiene el potencial de potencializar productivamente cuencas agrícolas afectadas por la sequía. Sin embargo, Redmon et al. evaluaron cómo los metales en las aguas producidas de gas y petróleo utilizadas para irrigar los cultivos de California pueden afectar la salud humana, encontrando que, aunque existe un bajo riesgo de ingerir cantidades tóxicas de metales por el consumo de nueces, cítricos, uvas y tubérculos, los vegetarianos o personas que consumen una cantidad significativa de nueces, frutas y tubérculos, podrían tener un mayor riesgo de cáncer asociado con la exposición a metales pesados (Redmon et al., 2021). Otra forma de reutilizar el agua producida tratada es el consumo por los animales de producción (bovinos, porcinos, ovinos, caprinos). La calidad del agua consumida por estos animales suele presentar estándares más bajos que la calidad del agua para consumo humano, ya que los animales presentan mayor tolerancia a los contaminantes (Al-Ghouti et al., 2019a).

#### 4. Marco normativo

A nivel nacional, la legislación colombiana cuenta con una serie de normas que protegen los recursos naturales y garantizan su conservación, restauración y uso sostenible. El principal es el artículo 46 de la Constitución Política de Colombia, el cual enuncia (...) “la atención de la salud y el saneamiento ambiental son servicios públicos a cargo del Estado”, el cual debe “establecer las políticas para la prestación de servicios de salud por entidades privadas y ejercer su vigilancia y control” (Constitución Política de Colombia, 1991).

Además, existe un marco normativo que considera las generalidades de la conservación y uso del agua como recurso natural, contempladas en el Código de Recursos Naturales Renovables de 1974, la Ley 99 de 1993 y en la Política Nacional de Gestión Integral del Recurso Hídrico. También, según el régimen de licencias ambientales en Colombia, se contempla en el título VIII de la Ley 99 de 1993 (reglamentado por el Decreto 2041 de 2014) la compensación obligante para llevar a cabo cualquier tipo de actividad económica, que pueda incurrir en relevante menoscabo medio ambiental, o afectación a los recursos naturales renovables, o notables alteraciones paisajísticas (Ambiente Y Desarrollo Sostenible, n.d.; *Content*, n.d.).

Respecto a la legislación de las aguas producidas de la industria petrolera se encuentra la Resolución 1207 de 2014 que define “reúso” como: “la utilización de las aguas residuales tratadas cumpliendo con los criterios de calidad requeridos para el uso al que se va a destinar” y como “aguas residuales tratadas” a: “aquellas aguas residuales que han sido sometidas a operaciones o procesos unitarios de tratamiento que permiten cumplir con los criterios de calidad requeridos para su reúso . Además, el Decreto 3004 de 2013 expedido por el Ministerio de Minas y Energía, compilado en el Decreto Único Reglamentario del Sector Administrativo de Minas y Energía (Decreto 1073 de 2015) expone los criterios y procedimientos para la exploración y explotación de hidrocarburos en yacimientos no convencionales.

Por otro lado, la resolución 631 de 2015 establece los valores límites máximos que deben cumplir los distintos actores que realizan vertimientos a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público. En el artículo 11 de esta resolución se define que para las

actividades de hidrocarburos que vierten hidrocarburos totales, hidrocarburos aromáticos policíclicos, benceno, tolueno, etilbenceno, xileno y compuestos orgánicos halogenados absorbibles, el límite máximo son 10 mg/L cuando el vertimiento pasa de las redes de alcantarillado industrial a las aguas superficiales. Sin embargo, el primer párrafo de este artículo menciona que si este vertimiento se realiza en un cuerpo de agua superficial que se destine a consumo humano y doméstico el límite máximo es de 0,01mg/L (Resolución 0631 de 2015). Además, el artículo 5 de la resolución 1256 de 2021 establece que el valor límite máximo de hidrocarburos totales permitido para las aguas residuales de uso agrícola es 1.0 mg/L (Resolución 1256 de 2021).

Otras reglamentaciones que han surgido son la Resolución 90341 de 2014 que define los requerimientos técnicos y procedimientos para la exploración de hidrocarburos en yacimientos no convencionales; la Constitución Ecológica que trata de dar una interpretación y contextualización coherente de las referencias ambientales que existen en la Constitución Colombiana (Navas, 2010.); y la Resolución 421 de 2014 que adopta términos de referencia para la elaboración de estudios de impacto ambiental (ANH, 2023). Finalmente, en el Plan Nacional de Desarrollo 2019-2022 posibilita el uso de técnicas no convencionales de extracción de nuevas fuentes de hidrocarburos, dando aval al Gobierno Nacional para desarrollar esta actividad.

Finalmente, ya que se ha considerado al agua producida como una fuente alternativa de agua (tras un tratamiento adecuado) en el marco de la escasez de agua dulce en las comunidades, se han establecido diferentes normativas como la Resolución 631 de 2015 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible para la reutilización del agua tratada en la agricultura, ganadería, consumo humano, control de incendios, usos industriales y generación de energía (Tabla 2). En Colombia mediante el decreto 1575 de 2007 se estableció el sistema para la protección y control de la calidad del agua, con el fin de monitorear, prevenir y controlar los riesgos para la salud humana causados por su consumo, exceptuando el agua embotellada (Ministerio de la Protección Social, 2007). Para tal fin, se creó el Índice de Riesgo de la calidad del Agua para Consumo Humano (IRCA), el cual ayuda en la medición del grado de riesgo de ocurrencia de enfermedades relacionadas con el no cumplimiento de las características físicas, químicas y microbiológicas del agua para consumo humano (Ministerio de la Protección Social, 2007). Los parámetros que este índice mide están sujetos a la resolución 2115 de 2007.

Tabla 2. Parámetros fisicoquímicos por monitorear y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales no domésticas a cuerpos de aguas superficiales de actividades productivas agroindustriales, ganadería y elaboración de bebidas no alcohólicas.

Parámetro	Unidades	Exploración	Agricultura*	Ganadería**	Elaboración de Bebidas No Alcohólicas ***
<b>Generales</b>					
<b>pH</b>	H	6,00 a 9,00	6,00 a 9,00	6,00 a 9,00	6,00 a 9,00
<b>Demanda química de oxígeno</b>	mg/L O2	400,00	3.000,00	900,00	400,00
<b>Demanda bioquímica de oxígeno</b>	mg/L O2	200,00	800,00	450,00	200,00
<b>Sólidos suspendidos totales</b>	mg/L	50,00	10,00	200,00	50,00
<b>Grasas y Aceites</b>	mg/L	15,00	10,00	50,00	20,00
<b>Sólidos sedimentables</b>	mg/L	1,00	5,00	5,00	2,00
<b>Fenoles</b>	mg/L	0,20			0.01
<b>Sustancias activas al azul de metileno</b>	mg/L	0.01			0.01
<b>Hidrocarburos</b>					
<b>Hidrocarburos Totales</b>	mg/L	10,00			
<b>Hidrocarburos aromáticos policíclicos</b>	mg/L	0.01			
<b>BTEX (Benceno, Tolueno, Etilbenceno)</b>	mg/L	0.01			
<b>Compuestos Orgánicos Halogenados adsorbibles (AOX)</b>	mg/L	0.01			
<b>Fósforo Total (P)</b>	mg/L	0.01	0.01	0.01	0.01
<b>Ortofosfatos</b>	mg/L	0.01			0.01
<b>Compuestos de Nitrógeno</b>					
<b>Nitratos (N-N03)</b>	mg/L	0.01		0.01	0.01
<b>Nitrógeno Amoniacal N-NH3</b>	mg/L	0.01		0.01	0.01
<b>Nitrógeno Total</b>	mg/L	10,00	0.01	0.01	

<b>Iones</b>					
<b>Cianuro Total</b>	mg/L	1,00			
<b>Fluoruros (F-)</b>	mg/L	0.01			
<b>Cloruros (Cl-)</b>	mg/L	1.200,00		500,00	600,00
<b>Sulfatos SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>	mg/L	300,00		500,00	500,00
<b>Sulfuros SO<sub>2</sub><sup>2-</sup></b>	mg/L	1,00			
<b>Metales y metaloides</b>					
<b>Arsénico (As)</b>	mg/L	0,1			
<b>Bario (Br)</b>	mg/L	0.01			
<b>Cadmio (Cd)</b>	mg/L	0,1			
<b>Cinc (Zn)</b>	mg/L	3,00			
<b>Cobre (Cu)</b>	mg/L	1,00			
<b>Cromo (Cr)</b>	mg/L	0,5			
<b>Hierro (Fe)</b>	mg/L	3,00			
<b>Níquel (Ni)</b>	mg/L	0,50			
<b>Plata (Au)</b>	mg/L	0.01			
<b>Plomo (Pb)</b>	mg/L	0,2			
<b>Selenio (Se)</b>	mg/L	0,2			
<b>Vanadio (V)</b>	mg/L	1,00			

\* Procesamiento de hortalizas, frutas, legumbres, raíces, tubérculos

\*\* Bovinos, bufalinos, equinos, ovinos, caprinos

\*\*\* Aguas minerales y otras aguas embotelladas.

## **5. Objetivos**

### **General**

Revisar la literatura existente acerca de los efectos de las aguas producidas de la industria petrolera en la salud de las poblaciones.

### **Específicos**

- Discriminar los componentes químicos de las aguas de producción de la industria petrolera.
- Caracterizar los efectos en salud ocasionados por los componentes químicos de las aguas de producción de la industria petrolera
- Identificar las alternativas de tratamiento utilizadas para mitigar los efectos en salud ocasionados por las aguas de producción de la industria petrolera

## 6. Métodos

Para el desarrollo de esta revisión de alcance fue establecida una búsqueda en las bases de datos EMBASE (*Biomedicalresearch*) y MEDLINE (PubMed). La estrategia de búsqueda consideró como palabras clave “produced water” AND “oil industry” AND “human health”. Esta búsqueda fue extendida con los términos (“composition” OR “treatment”) para caracterizar los componentes el agua residual, así como determinar posibles medidas de tratamiento. Inglés y español fueron considerados como posibles idiomas. Los criterios de inclusión consideraron ensayos clínicos y estudios observacionales publicados entre enero de 2013 y julio de 2023, describiendo la composición de aguas producidas de la industria petrolera, sus potenciales efectos en la salud humana, o las alternativas de tratamiento de estas aguas. Fueron considerados todos los artículos independientemente de las características sociodemográficas de la población o ubicación geográfica.

Inicialmente se identificaron y eliminaron los artículos duplicados con ayuda del software de gestión de referencias – COVIDENCE. Para realizar de manera estandarizada esta revisión de alcance fue utilizada la guía PRISMA (*preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses*) para revisiones de alcance (*scoping reviews*) (Anexo 1). La información obtenida de la búsqueda se resumió en una matriz construida en Microsoft Excel ® que incluyó las variables relacionadas con la composición de las aguas producidas de la industria petrolera, efectos en salud y tratamiento: autores, año, título del estudio, país, conflicto de intereses, tipo de estudio, composición, método, tipo de efecto, resultados de efectos en salud, pruebas utilizadas, intervención, resultados de tratamiento. Cuando en el artículo no se reportaba alguna de estas variables, la casilla se rotuló como IND (información no disponible).

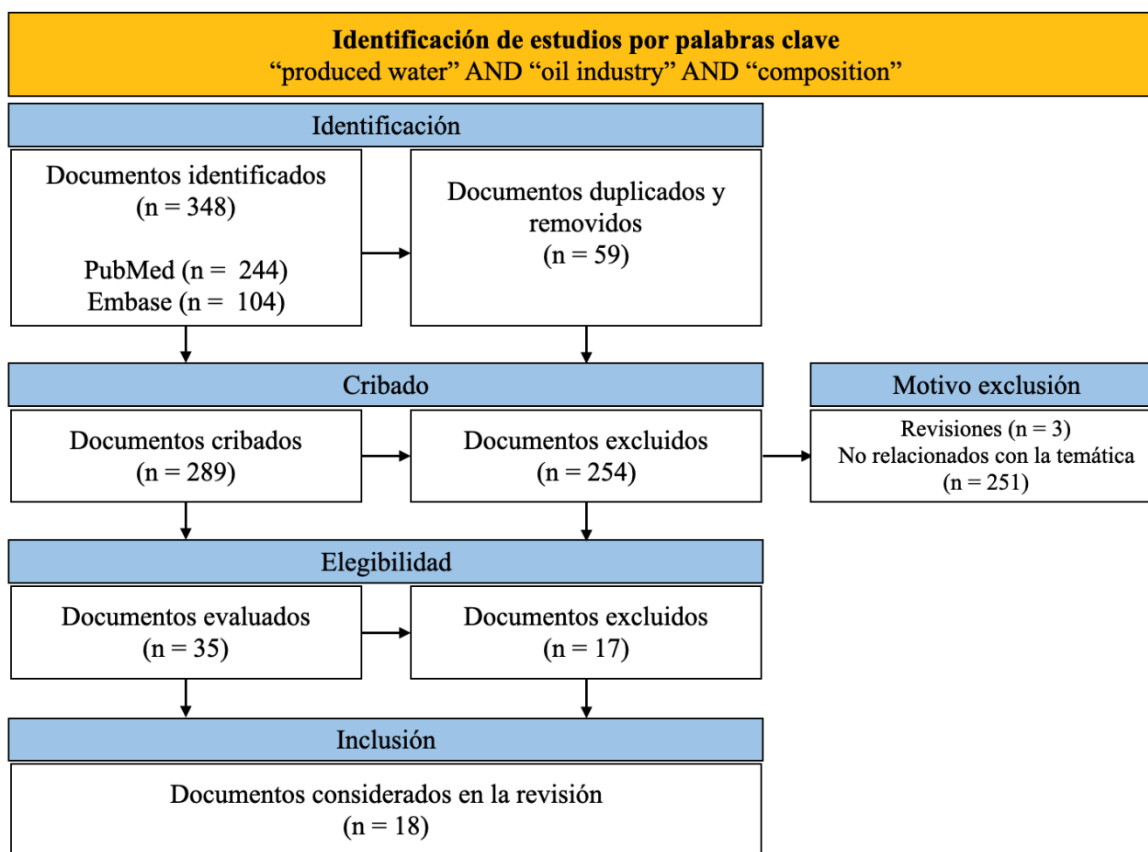
## **7. Resultados**

Fueron identificados 1061 artículos, de los cuales 314 se encontraron en la base de datos EMBASE y 747 en la base de datos PUBMED. De estos, 70 artículos cumplieron con los criterios de inclusión, estando 18 relacionados con la composición química de las aguas producidas, 7 con los efectos en salud generados por estas aguas y 45 con las diferentes medidas de tratamiento.

### **7.1. Composición química de las aguas producidas de la industria petrolera**

Inicialmente se identificaron 348 artículos a partir de las palabras clave “produced water” AND “oil industry” AND “composition”, de los cuales 59 fueron excluidos por encontrarse duplicados. A los 289 artículos restantes se les revisó el título y resumen para determinar elegibilidad, y se excluyeron 254 por ser revisiones sistemáticas o por no relacionarse con la composición química de las aguas producidas de la industria petrolera (Flujograma 1). De los 35 artículos restantes, 18 cumplieron con los criterios de inclusión cuando fue revisado el texto completo (Tabla 3). Estos 18 documentos se originaron en Estados Unidos (55.5%; n=10), China (16.6%; n=3), Brasil (5.5%; n=1), Países Bajos (5.5%; n=1), Nigeria (5.5%; n=1), Arabia Saudita (5.5%; n=1) e Irak (5.5 % n=1). No se encontraron publicaciones que cumplieran los criterios de inclusión para los años 2013, 2014 y 2016. En cambio, el año 2021 destacó con el mayor número de publicaciones, alcanzando un 30% (n=6), seguido por 2019 (20%; n= 4) y 2018 (15%; n= 2).

Como dato adicional, se determinó que de los 18 estudios que cumplieron los criterios de inclusión, 13 (72,2 %) declararon no tener intereses financieros que pudieran haber influido en los resultados del trabajo presentado. Sin embargo, uno de los artículos fue realizado por el equipo científico de riesgos sanitarios de la empresa de hidrocarburos Shell, lo que puede representar un sesgo, pues los investigadores potencialmente podrían estar influenciados para emitir un juicio sobre la composición de las aguas producidas (Soto, 2016). Cuatro artículos (22,2 %) no describieron los conflictos de intereses asociados a la investigación.



Flujograma 1. Identificación de estudios por para la ecuación de búsqueda “produced water” AND “oil industry” AND “composition”.

El agua producida no es un producto único, tiene una composición variable de simple a compleja y se considera una mezcla de sustancias químicas orgánicas e inorgánicas (Al-Ghouti et al., 2019b). Las propiedades químicas y físicas del agua producida varían considerablemente, lo que depende de varios factores que incluyen la ubicación geográfica del campo, la edad, geoquímica y profundidad de la formación geológica, el método de extracción y el tipo de hidrocarburo producido (Al-Ghouti et al., 2019). Generalmente, los principales componentes presentes en el agua producida incluyen: sal, aceite y grasa, hidrocarburos poliaromáticos (HAP), benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos (BTEX), fenoles, ácidos orgánicos, compuestos orgánicos e inorgánicos naturales que causan dureza e incrustaciones (por ejemplo, calcio, magnesio, sulfatos y bario); y aditivos químicos como biocidas e inhibidores de corrosión que se utilizan durante la perforación, fracturación y proceso operativo del pozo (Al-Ghouti et al., 2019).

En esta revisión describiremos los componentes de las aguas de producción de la industria petrolera contemplando diez categorías principales. La primera son los surfactantes, los cuales se utilizan para reducir la tensión superficial y promover la recuperación de fluidos del pozo, y a menudo, se utilizan como mezclas comerciales que consisten en series homólogas de polietoxilatos que incluyen glicoles, etoxilatos de nonilfenol y etoxilatos de alquilo. La segunda categoría son los compuestos orgánicos volátiles los cuales son una gran clase de compuestos que incluyen un subgrupo de sustancias químicas estructuralmente similares, denominadas colectivamente sustancias químicas "BTEX": benceno, etilbenceno, tolueno y todos los xileno, los cuales son de gran preocupación en salud pública (Chittick & Srebotnjak, 2017). La tercera categoría incluye los sólidos totales, conformados por materia orgánica e inorgánica, la cual es procedente de interacciones naturales, aditivos químicos durante la producción de pozos y productos químicos de mantenimiento de pozos, que, además, sin un tratamiento efectivo pueden causar problemas de salud humana y ambiental. Se ha observado que, además, las aguas producidas a partir de pozos de petróleo y gas natural fracturados hidráulicamente contienen frecuentemente un alto contenido de sólidos totales disueltos que pueden reducir o inhibir la degradación biológica del carbono orgánico disuelto. La cuarta categoría son un grupo complejo de moléculas conocidos como hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP). La quinta categoría corresponde a metales con distintos riesgos para la salud humana: antimonio, arsénico, bario, berilio, boro, cadmio, cromo, cobalto, cobre, plomo, litio, mercurio, molibdeno, níquel, selenio, plata, estroncio, talio, vanadio, zinc, uranio (Chittick & Srebotnjak, 2017). La sexta categoría son los componentes radioactivos, siendo radio-226 el radionucleido más predominante en el agua producida (Torres et al., 2018). La séptima categoría son las bacterias, incluidas bacterias degradantes de hidrocarburos, metanógenos hidrogenotróficos y bacterias reductoras de Fe (Y. Zhang et al., 2021). La octava categoría son las sales como el sodio y el cloruro (Luo et al., 2023), además, las sales son de naturaleza muy tóxica y tienen el potencial de causar efectos adversos en la vida acuática; la novena corresponde a los cationes (calcio, magnesio, hierro) y aniones (cloruro, bicarbonato, fosfato y sulfato) (Lutzuluo & Dunford, 2019) y la décima son los biocidas que se aplican antes de la inyección y durante el almacenamiento de fluidos residuales (Hanson et al., 2019) para prevenir el crecimiento bacteriano que puede erosionar las tuberías e interferir con el proceso de fracking (Chittick & Srebotnjak, 2017).

Tabla 3. Características de los artículos seleccionados para la ecuación de búsqueda “produced water” AND “oil industry” AND “composition”

<b>Autor y año</b>	<b>Título</b>	<b>País</b>	<b>Conflicto de interés</b>	<b>Tipo de estudio</b>	<b>Composición</b>
Adeyoye T., et al. (2021)	Optimization of the adsorption of total organic carbon from produced water using functionalized multi-walled carbon nanotubes.	Nigeria	No existen conflictos de intereses	Experimental	Sales disueltas, hidrocarburos, metales pesados, componentes radioactivos naturales. Productos químicos añadidos utilizados en la extracción y separación de petróleo. Compuestos orgánicos e inorgánicos
Bezerra B., et al. (2019)	Development of a Zeolite A/ LDH Composite for Simultaneous Cation and Anion Removal.	Brasil	No existen conflictos de intereses	Experimental	Iones: Al, Cd, Cu, Mn, Ni, Pb y Zn
Chittick E, et al (2017)	An analysis of chemicals and other constituents found in produced water from hydraulically fractured wells in California and the challenges for wastewater management.	Estados Unidos	No existen conflictos de intereses.	Experimental	Benceno, tolueno, etilbenceno y tolueno (conocido como BTEX), hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), metales, no metales.
McDevitt B, et al (2022)	Dissolved organic matter within oil and gas associated wastewaters from U.S. unconventional petroleum plays: Comparisons and consequences for disposal and reuse.	Estados Unidos	No existe conflicto de intereses.	Experimental	Sólidos totales disueltos (materia orgánica e inorgánica).
Dai X, et al (2019)	Enhancement of COD Removal from Oilfield Produced Wastewater by Combination of Advanced Oxidation, Adsorption and Ultrafiltration.	China	ND	Experimental	Emulsión de aceite, grasa, sólidos en suspensión, bacterias, contenido polimérico
Gallegos et al., (2021)	Insights on Geochemical, Isotopic, and Volumetric Compositions of Produced Water from Hydraulically Fractured Williston Basin Oil Wells.	Estados Unidos	Los autores declaran que no existe conflicto de intereses	Experimental	Se observan aumentos en $\delta 2H$ , $\delta 18O$ , salinidad, sólidos disueltos totales (TDS) y (o) conductividad a lo largo del tiempo.
Hanson A J, et al (2019)	High total dissolved solids in shale gas wastewater inhibit biodegradation of alkyl and nonylphenol ethoxylate surfactants.	Estados Unidos	Los autores declararon que no existe conflicto de intereses	Experimental	Sales, metales, radiactivos, materia orgánica presentes naturalmente en la formación geológica, polietoxilatos que incluyen glicoles, etoxilatos de nonilfenol (NPEO) y etoxilatos de alquilo (OEA)

(Harkness et al., 2015)	Iodide, bromide, and ammonium in hydraulic fracturing and oil and gas wastewaters: environmental implications.	Estados Unidos	ND	Experimental	Niveles elevados de salinidad, antropogénico (productos químicos inyectados durante la perforación o fracturación), compuestos orgánicos naturales, metales pesados y materiales radiactivos naturales
Luek et al., (2018)	Temporal dynamics of halogenated organic compounds in Marcellus Shale flowback.	Estados Unidos	ND	Experimental	Ácidos acéticos halogenados, ácido yodometilbutenodioico y varias estructuras aromáticas halogenadas (benzaldehídos halogenados, ácidos benzoicos, fenoles y benzoquinonas).
Luo M, et al (2023)	Coupling iron-carbon micro-electrolysis with persulfate advanced oxidation for hydraulic fracturing return fluid treatment.	China	Los autores declararon que no existe conflicto de intereses	Experimental	Altas concentraciones de SS, contenidos orgánicos y salinidad dominada por sodio y cloruro.
Nawaz et al., (2021)	Investigation of flux stability and fouling mechanism during simultaneous treatment of different produced water streams using forward osmosis and membrane distillation	Arabia Saudita	Los autores declararon que no existe conflicto de intereses	Experimental	Concentraciones de: NaCl, HCO, CaCl <sub>2</sub> , MgCl <sub>2</sub> , SrCl <sub>2</sub> , Glucosa, Coloides de sílice
Sharma et al., (2021)	Understanding controls on the geochemistry of hydrocarbon produced waters from different basins across the US	Estados Unidos	Los autores declararon que no existe conflicto de intereses	Experimental	Sólidos disueltos totales entre 125 mg/L a 346100 mg/L Iones como: CL, Na, concentraciones de isótopos de Estroncio (Sr) rango entre: 0,097 mg L <sup>-1</sup> a 10 300 mg L <sup>-1</sup>
Sumner & Plata, (2020)	A geospatially resolved database of hydraulic fracturing wells for chemical transformation assessment.	Estados Unidos	Los autores declararon que no existe conflicto de intereses	Transversal	Cinamaldehído y persulfato
Torres L, Et al (2018)	Risk assessment of human exposure to Ra-226 in oil produced water from the Bakken Shale	Estados Unidos	Los autores declararon que no existe conflicto de intereses	Experimental (Simulación computacional)	La mediana y la media del Ra-226 simulado fueron de 535 y 518 pCi/L (picocuries por litro)
Waisi B I H, et al (2015)	A study on the quantities and potential use of produced water in southern Iraq	Iraq	ND	Revisión de datos de 5 yacimientos	Sólidos disueltos totales: Rumalia: 246.000-247.000 Zubair: 268000, West Qurna: 300.000 CaCO <sub>3</sub> Oil content: Rumalia: 36-53 Zubair: 66 West Qurna: 57 Carbon organico total Sulfato, Hierro, Manganeso, Calcio, Magnesio, Sodio y Cloro.
Wang N, et al (2019)	Biological Effects of Elevated Major Ions in Surface Water Contaminated by a Produced Water from Oil Production	Estados Unidos	ND	Experimental	Las concentraciones de bromuro y radio fueron hasta 20 y 15 veces mayores. El estroncio, el litio y el boro también estaban sustancialmente elevados

Worden J R, et al (2021)	Application of screening tools for environmental hazard and risk to support assessment and subsequent prioritization of effluent discharges from the oil and gas industry	Países Bajos	Los autores declararon que no existe conflicto de intereses	Experimental	Las medidas de concentración de Microtox en Agua Producida oscilaron entre 0,22% a 15.4%.
Zhang Y, et al (2021)	Chemical characterization of non-volatile dissolved organic matter from oilfield-produced brines in the Nanyishan area of the western Qaidam Basin, China.	China	Los autores declararon que no existe conflicto de intereses	Experimental	Los componentes orgánicos dominantes fueron alifáticos, así como macromoléculas vegetales, algas y bacterias de origen continental lacustre.

## 7.2. Efectos en salud de las aguas producidas de la industria petrolera

Inicialmente fueron identificados 99 artículos considerando las palabras clave “produced water” AND “oil industry” AND “human health”. De estos, trece (12,8%) se encontraban duplicados y de los 86 restantes seleccionados por título y resumen para determinar elegibilidad, siete cumplieron los criterios de inclusión cuando fue revisado el texto completo (Flujograma 2). Estos siete artículos finales se originaron en Estados Unidos (71.4%; n=5), Canadá (14.2%; n=1) y Malasia (14.2%; n=1) en los años 2021 (n=2; 28.5%), 2018 (n=3; 42.8%), 2019 (n=1; 14.2%) y 2020 (n=1; 14.2%). No se encontraron publicaciones que cumplieran los criterios de inclusión para los años 2013 a 2017 (Tabla 4).

Al identificarse los aportes académicos sobre los posibles efectos en la salud humana de las aguas producidas de la industria petrolera, se evidenció alarmantemente, que el radionucleido Ra-226 presente en las aguas de producción puede incorporarse a la cadena alimentaria mediante absorción vegetal y bioacumulación de tejidos animales (Torres et al., 2018). Cuando el agua contaminada, cultivos y animales son consumidos por humanos, existe el riesgo de que Ra-226 entre al cuerpo, el cual se acumula en los huesos y sistémicamente puede provocar anemia, cataratas, fracturas dentales, cáncer óseo e incluso la muerte (Torres et al., 2018). Otros metales pesados han demostrado su toxicidad; por ejemplo, los efectos de la ingestión de bario incluyen alteraciones gastrointestinales, vómitos, calambres abdominales, diarrea, dificultades para respirar, aumento o disminución de la presión arterial, entumecimiento alrededor de la cara y debilidad muscular (Chittick & Srebotnjak, 2017). La exposición crónica a niveles elevados de litio puede afectar la

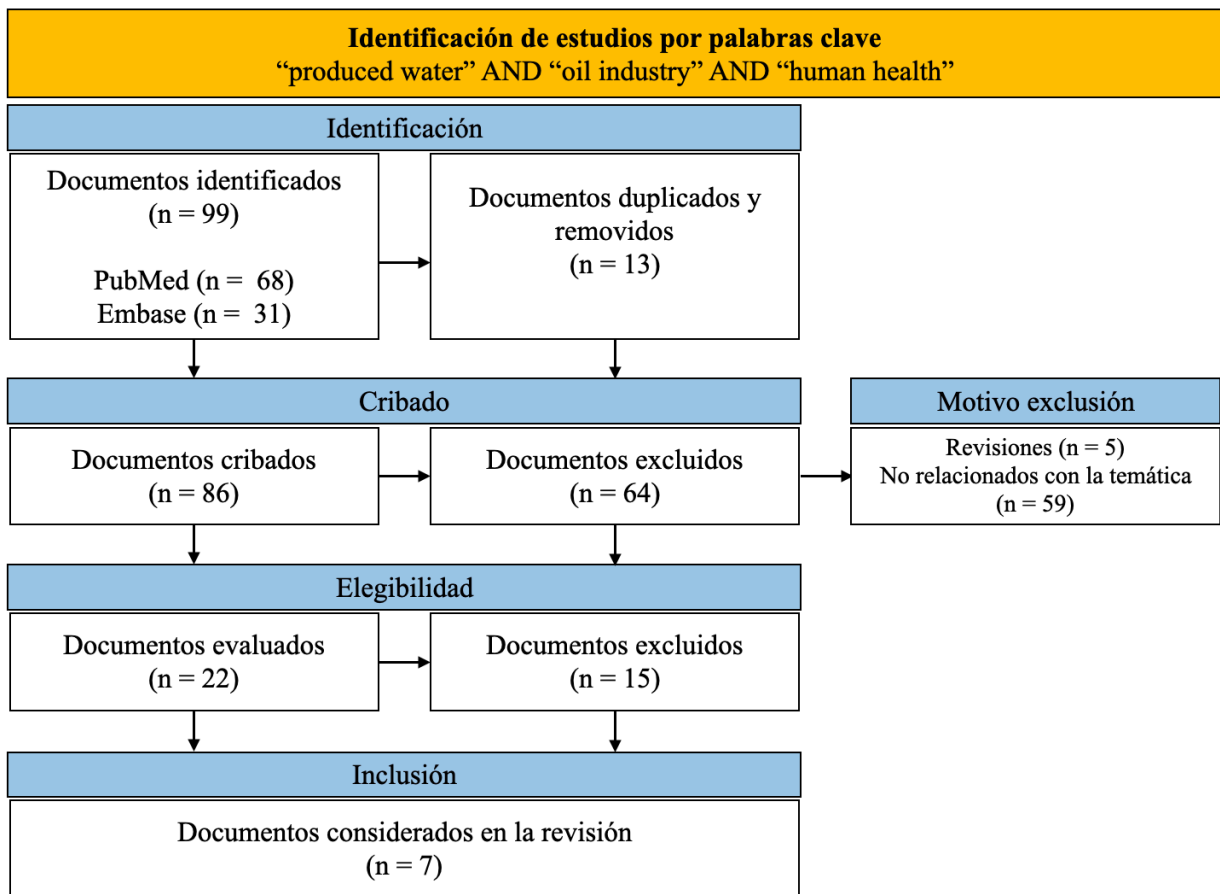
función tiroidea (Chittick & Srebotnjak, 2017) y el estroncio puede afectar el crecimiento óseo en niños (Chittick & Srebotnjak, 2017).

Los compuestos orgánicos volátiles BTEX (benceno, etilbenceno, tolueno y xilenos) son de gran preocupación en salud pública, pues generan irritación de la piel, vómitos, mareos, dolores de cabeza, taquicardia, dificultad respiratoria, anemia, convulsiones, impactos en el sistema inmunológico y nervioso, leucemia, otros cánceres y muerte (Chittick & Srebotnjak, 2017). Los sólidos totales, conformados por materia orgánica e inorgánica, sin un tratamiento efectivo pueden causar problemas de salud humana y ambiental. Se ha observado que, además, las aguas producidas a partir de pozos de petróleo y gas natural fracturados hidráulicamente contienen frecuentemente un alto contenido de sólidos totales disueltos que pueden reducir o inhibir la degradación biológica del carbono orgánico disuelto. Hanson et al. (2019) investigaron el impacto de los sólidos disueltos totales en el agua producida, descubriendo alteraciones en la ruta de degradación de los alquilfenoles etoxilatos, los cuales pueden afectar los sistemas endocrino y esquelético al imitar a los estrógenos, provocando cambios en el tamaño de los órganos reproductivos y una mayor propagación de las células del cáncer de mama (Hanson et al., 2019).

Respecto a los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) en general hay muy poca investigación disponible sobre sus impactos en la salud; sin embargo, la Agencia para el Registro de Sustancias Tóxicas y Enfermedades ha evaluado colectivamente diecisiete de los HAP más comunes y la investigación acumulada los vincula con efectos adversos en la piel, el sistema inmunológico, la fertilidad, el bajo peso al nacer y defectos de nacimiento (Chittick & Srebotnjak, 2017). Además, los HAP generan efectos mutagénicos y cancerígenos en la vida acuática (Alhothali et al., 2021). En los humanos, además, pueden generar cáncer, desórdenes cognitivos, enfermedades renales y daños al sistema nervioso central (Alhothali et al., 2021).

En las aguas producidas también es posible encontrar aditivos químicos orgánicos, como el biocida cloruro de alquildimetilbencilamonio C12-C16, el etilenglicol y el metanol (inhibidor de la corrosión) (Aghababaei et al., 2021). Según la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA), estos aditivos químicos están asociados con toxicidad oral aguda, identificada a través de los

puntos de referencia de salud humana para pesticidas y la base de datos del Sistema Integrado de Información de la EPA (Aghababaei et al., 2021).



Flujograma 2. Identificación de artículos para la ecuación de búsqueda “produced water” AND “oil industry” AND “human health”

En un ensayo *in-vitro* con células de tejido humano se suministraron 23 compuestos químicos provenientes de la extracción de petróleo y obtenidos de concentraciones de aguas superficiales, subterráneas y residuales cercanas a operaciones de extracción de petróleo (Nagel et al., 2020). En este experimento, estos compuestos químicos exhibieron una potente actividad antagonista para los receptores de estrógenos, andrógenos, glucocorticoides, progesterona, tiroxina y triyodotironina (Nagel et al., 2020). Posteriormente, a ratonas gestantes se les administró estos compuestos químicos en agua potable y se evidenció una afectación en las concentraciones de hormonas pituitarias, recuento de espermatozoides en las crías, foliculogénesis, aumento de la densidad de los conductos de la glándula mamaria y lesiones preneoplásicas (Nagel et al., 2020).

Kassotis et al. (2016) evaluaron la actividad de alteración endocrina en aguas superficiales en un sitio de eliminación de pozos de inyección en Virginia Occidental, para determinar las actividades hormonales agonistas y antagonistas de cinco receptores hormonales en ensayos de genes informadores de levaduras y mamíferos. Estos investigadores encontraron que las muestras recolectadas presentaron una actividad antagonista considerable para los receptores de estrógeno, andrógeno, progesterona, glucocorticoides y hormona tiroidea.

En un estudio donde participaron 75 mujeres y hombres residentes de ocho aldeas ubicadas a lo largo de tres ríos (Corrientes, Napo y Pastaza) de la Amazonia Andina a diferentes distancias (0 a 50 km) de una infraestructura petrolera, se examinó la exposición a 1-hidroxipireno (1-OHP) evidenciando una mayor concentración de 1-OHP en la orina de las mujeres (Webb et al., 2018). Las mujeres que usaron agua del río o de un arroyo tenían cerca del doble de 1-OHP en la orina en comparación con mujeres cuya agua procedía de un pozo, un manantial o la lluvia. Los hombres que informaron tener actividades de pesca y consumo frecuente de pescado presentaron el doble de 1-OHP en la orina que los hombres que informaron otro tipo de alimentación (Webb et al., 2018).

Otro estudio analizó una cohorte donde se evaluó la asociación entre la exposición a la extracción de petróleo y las anomalías congénitas, utilizando datos de las estadísticas vitales del Departamento de Servicios de Salud del Estado de Texas. Como resultado se observó que las exposiciones relacionadas con la perforación dentro de los 5 km de una residencia donde ocurrió un nacimiento de petróleo se asocian con mayores probabilidades de ocurrencia de anomalía congénitas en los recién nacidos, así como defectos cardíacos y circulatorios (Willis et al., 2023).

Por último, Kassotis et al., caracterizaron el impacto en la actividad adipogénica de varios fluidos relacionados con las operaciones de petróleo. Como resultado se obtuvo que para la actividad adipogénica, 23 productos químicos utilizados en las operaciones de petróleo promovieron la acumulación de triglicéridos. En conjunto, estos resultados sugirieron que las aguas residuales de extracción de petróleo y gas tienen el potencial de afectar la salud metabólica en concentraciones ambientalmente relevantes (Kassotis et al., 2018).

Tabla 4. Características de los artículos seleccionados para la ecuación de búsqueda “produced water” AND “oil industry” AND “human health”.

Autor y año	Título	País	Método	Tipo de efecto	Resultados de efectos en salud
Torres L, et al (2018)	Risk assessment of human exposure to Ra-226 in oil produced water from the Bakken Shale	Estados Unidos	Simulaciones para determinar la concentración de actividad de Ra-226 en agua producida.	Potencial efecto radioactivo	Cuando el agua contaminada, cultivos y animales son consumidos por humanos, existe el riesgo de que Ra-226 entre al cuerpo, el cual se acumula en los huesos y sistémicamente puede provocar anemia, cataratas, fracturas dentales, cáncer óseo e incluso la muerte
Aghababaei M, et al (2021)	Toxicity of hydraulic fracturing wastewater from black shale natural-gas wells influenced by well maturity and chemical additives.	Estados Unidos	La toxicidad aguda de amplio espectro se evaluó mediante un ensayo de inhibición de la bioluminiscencia que emplea la bacteria halotolerante <i>Aliivibrio fischeri</i> , mientras que la citotoxicidad predictiva se evaluó mediante un ensayo de reactividad de tiol de N-acetilcisteína.	Toxicidad	Biocida cloruro de alquildimetilbencilamonio C12-C16, el etilenglicol rompedor y el inhibidor de corrosión metanol. Estos compuestos están asociados con toxicidad oral aguda.
Alhothali A, et al (2021)	Optimization of Micro-Pollutants' Removal from Wastewater Using Agricultural Waste-Derived Sustainable Adsorbent.	Malasia	Uso del biocarbón de cáscara de palmiste (PKSB) (obtenido de desechos agrícolas) para la eliminación de HAP de aguas residuales industriales.	Cancerígeno	Los hidrocarburos demuestran tener efectos mutagénicos y cancerígenos en la vida acuática, los seres humanos y el medio ambiente. Los HAP causan daños al sistema nervioso, retraso mental, cáncer y enfermedades renales
Nagel SC, et al (2020)	Developmental exposure to a mixture of unconventional oil and gas chemicals: A review of experimental effects on adult health, behavior, and disease.	Estados Unidos	Ensayo <i>in-vitro</i> de sustancias de extracción de petróleo y gas en receptores hormonales, evaluación de presencia de bioactividades endocrinas.	Antagonista receptores hormonales	Potente actividad antagonista para los receptores de estrógenos, andrógenos, glucocorticoides, progesterona y hormonas tiroideas.
Webb J, et al (2018)	Levels of 1-hydroxypyrene in urine of people living in an oil producing region of the Andean Amazon (Ecuador and Peru).	Canadá	Observacional de tipo transversal	Intoxicaciones.	Son contaminantes con efectos cancerígenos. Fue mayor el nivel de intoxicación en hombres pescadores.

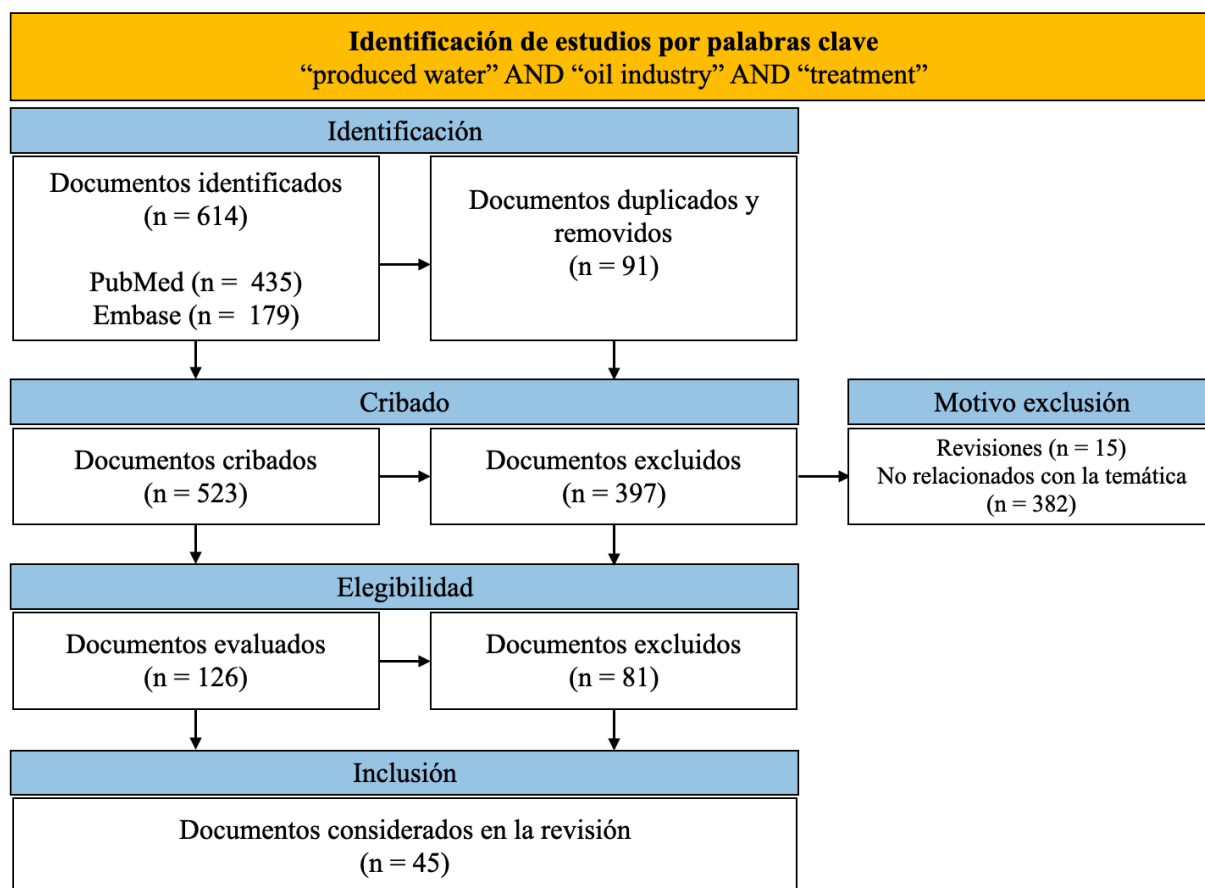
Willis MD, et al (2023)	Congenital anomalies associated with oil and gas development and resource extraction: a population-based retrospective cohort study in Texas	Estados Unidos	Estudio de cohorte retrospectivo	Se evaluó la influencia del sitio de perforación activo más cercano en la ocurrencia de anomalías congénitas.	Anomalías cardíacas y circulatorias. Asociaciones entre distancia al sitio de perforación y anomalías congénitas, oculares, otorrinolaringológicas, gastrointestinales, genitourinarias y cromosómicas.
Kassotis, et al (2018)	Unconventional oil and gas chemicals and wastewater-impacted water samples promote adipogenesis via PPAR $\gamma$ -dependent and independent mechanisms in 3T3-L1 cells.	Estados Unidos	Ensayo clínico	Metabólica	Actividad adipogénica potente.

### 7.3. Tratamiento de las aguas producidas de la industria petrolera

Inicialmente fueron identificados 614 artículos considerando las palabras clave “produced water” AND “oil industry” AND “treatment” (Flujograma 3). De estos artículos, 91 se excluyeron por repetirse y los 523 restantes se seleccionaron por título y resumen, siendo 126 seleccionados para determinar elegibilidad (Tabla 5). Al final, 45 documentos cumplieron los criterios de inclusión cuando fue revisado el texto completo. Los 45 artículos finales se produjeron en Brasil (20%; n=9), China (17.8%; n=8), Estados Unidos (15.6%; n=7), Irán (6.7% n=3), Canadá (4.4% n=2), Colombia (4.4% n=2), India (4.4% n=2), Emiratos Árabes Unidos (4.4% n=2), Turquía (4.4% n=2), Francia (2.2% n=1), Pakistán (2.2% n=1), Reino Unido (2.2% n=1), Alemania (2.2% n=1), Arabia Saudita (2.2% n=1), Catar (2.2% n=1), Egipto (2.2% n=1), España (2.2% n=1).

Para esta ecuación de búsqueda, se agruparon los artículos que cumplieron con criterios de inclusión de acuerdo a tres categorías: biológicas (tratamiento de membranas, biorremediación), físicas (filtración, flotación, adsorción) y químicas (oxidación, floculación, electrocoagulación). Según Arthur (2011), el tratamiento del agua producida debe eliminar aceite y grasa dispersos y libres, orgánicos solubles, sólidos en suspensión y gases disueltos, materiales radiactivos naturales, sales y microorganismos; por lo que resulta difícil elegir un único tipo de sistema de tratamiento para

el agua producida. El tratamiento del agua producida consta de tres fases principales: pretratamiento, tratamiento principal y pulido final. El pretratamiento se realiza para eliminar residuos grandes de petróleo, partículas gruesas y burbujas de gas para reducir los contaminantes dispersos. El tratamiento consiste en una etapa primaria en la que se eliminan pequeñas gotas y partículas de aceite, y una segunda etapa donde se eliminan gotas y partículas de petróleo mucho más pequeñas mediante flotación. La etapa de pulido suele emplearse para eliminar gotas y partículas ultra pequeñas e hidrocarburos dispersos mediante técnicas como filtros y membranas (Al-Ghouti et al., 2019).



Flujograma 3. Identificación de artículos para la ecuación de búsqueda “produced water” AND “oil industry” AND “treatment”.

## **Tratamiento biológico**

El tratamiento biológico se considera uno de los menos costosos para la eliminación de contaminantes en aguas producidas (Ozgun et al., 2013; Al-Ghouti et al., 2019). En este proceso, algas, hongos y bacterias (generalmente presentes en el agua producida) utilizan los contaminantes como fuente de nutrientes para su crecimiento.

### *Tratamiento con membranas*

Los sistemas de tratamiento de membranas se utilizan en condiciones aeróbicas para eliminar residuos orgánicos del agua producida y ayudar al proceso de oxidación bioquímica. En el estudio de Ozgun et al. se evaluaron diferentes alternativas de pretratamiento (biorreactor de membrana y sistemas de microfiltración y ultrafiltración presurizados) antes de aplicar un sistema de membrana de ósmosis inversa. Según los resultados, las máximas eficiencias de eliminación de conductividad y demanda química de oxígeno se obtuvieron mediante la combinación de un biorreactor de membrana y sistemas de ósmosis inversa (Ozgun et al., 2013).

Coday et al. confirmaron los impactos del tratamiento de membranas (triacetato de celulosa) en la desalinización del agua y la filtración de contaminantes orgánicos e inorgánicos, (Coday et al., 2015). Por otra parte, empleando membranas cerámicas de microfiltración y ultrafiltración para la separación de aceite durante el tratamiento del agua producida, se evidenció que las membranas cerámicas logran una eficiencia de recuperación de petróleo de hasta el 98% con menos de 1,0 ppm de petróleo residual en la corriente de permeado, cumpliendo con las normas ambientales para descarga de la mayoría de los países (Ebrahimi et al., 2020). Liden et al. evaluaron en una serie de experimentos el desempeño de la ósmosis directa con membranas de fibra como una opción de remediación para el agua producida con altos niveles totales de sólidos disueltos en la Cuenca Pérmica, concluyendo que la ósmosis directa se puede utilizar para extraer agua de yacimientos petrolíferos de alta salinidad (Liden et al., 2019).

Elshorafa et al. presentaron un nuevo tipo de membrana inorgánica altamente resistente compuesta de nanofibras de titanato y gel particulado de SiO<sub>2</sub>. Esta membrana mostró una eficiencia de separación de aceite/agua superior al 99.5% con un contenido de aceite en el efluente tratado inferior a los estándares de descarga ambiental de Estados Unidos (Elshorafa et al., 2020). Jin et al. demostraron el rendimiento de una membrana “SPEEK” hecha con polietersulfona y poliéter éter cetona sulfonada en la reutilización de aguas residuales de la industria de petróleo y gas (Jin et al., 2017).

### *Biorremediación*

Actualmente, la ecotecnología es un nuevo enfoque introducido para los procesos de tratamiento del agua producida. Calderón-Delgado et al. evaluaron los efectos enzimáticos y fisiológicos de *Chlorella vulgaris* y su potencial de biorremediación después de la exposición al agua producida. Los resultados evidenciaron que *Chlorella vulgaris* puede adaptarse fácilmente al agua contaminada y tener una alta actividad antioxidante. Además, los resultados de la disminución de hidrocarburos y fenoles muestran el potencial de estas algas para degradar xenobióticos (Calderón-Delgado et al., 2019).

Al evaluar el potencial de la sinergia bacteriana y vegetal en el tratamiento eficiente de las aguas residuales, Rehman et al. inocularon especies de *Brachiaria mutica* y *Phragmites australis* con bacterias degradantes de hidrocarburos: *Bacillus subtilis* cepa LORI66, *Klebsiella sp.* cepa LCRI87, *Acinetobacter junii* cepa TYRH47, y LCRH81 de *Acinetobacter sp.* Ambas plantas eliminaron con éxito los contaminantes orgánicos e inorgánicos de las aguas residuales, pero el bioaumentado de *P. australis* mejoró significativamente la eficiencia en la reducción del contenido de aceite, demanda biológica de oxígeno y la demanda química de oxígeno (Rehman et al., 2018). Rahbari-Sisakht et al. utilizaron biorreactores de membrana continua y procesos de biolodos para tratar el agua producida y el lodo aceitoso, demostrando alta efectividad en los parámetros de demanda biológica de oxígeno y la demanda química de oxígeno. En el caso del lodo aceitoso, el contenido se redujo en un 31,2% después de la biorremediación durante 90 días (Rahbari-Sisakht et al., 2017).

Silva et al. cultivaron tres cepas de *Pseudomonas* sp. en medios de bajo costo hechos con melaza y licor de maíz y crearon un biosurfactante que demostró aplicabilidad en condiciones ambientales específicas y pudo eliminar entre 80 y 90 % del aceite en agua producida (Silva et al., 2017). Zhang et al. utilizaron cuatro cepas aisladas con el fin de mejorar la biodegradación de contaminantes orgánicos, evidenciando altas tasas de eliminación de los contaminantes orgánicos extraíbles totales, alcanos e hidrocarburos poliaromáticos (Zhang et al., 2016)

Paixão y Balaban usaron goma guar para tratar aguas contaminadas con aceites y grasas. Los resultados de esta investigación evidenciaron que la goma guar es altamente eficaz en aguas oleosas sintéticas, siendo que el porcentaje de eliminación de aceite fue superior al 90% (Paixão y Balaban, 2018). Lutz et al. examinaron el tratamiento con cianobacterias y algas verdes, demostrando una reducción de más del 65% del total de sólidos disueltos, del 100% de nitrato y de más del 95% de boro en el agua (Lutz & Dunford, 2019). Jaén-Gil et al. probaron una tecnología de microalgas a escala de laboratorio para la biotransformación de cloruro de benzalconio (un tensioactivo que se aplica en la industria del petróleo para proporcionar una barrera contra la corrosión). De las ocho cepas de microalgas seleccionadas, *Tetraselmis suecica* mostró la mayor efectividad en la biotransformación de cloruro de benzalconio (Jaén-Gil et al., 2020).

Con el objetivo de minimizar los niveles de  $\text{Ca}^{2+}$  presentes en aguas producidas, Hu et al. emplearon por primera vez la precipitación de calcita inducida microbianamente, como una técnica de biomineralización emergente mediada por bacterias ureolíticas. Este estudio demostró que a muy bajo costo es posible eliminar  $\text{Ca}^{2+}$  de las aguas residuales hipersalinas a gran escala. Semai et al. aislaron una cepa bacteriana del género *Serratia* denominada 'Tan611', escogida por su potencial para degradar hidrocarburos del petróleo y su capacidad para emulsionar el petróleo crudo, identificando que su capacidad de degradar el 73,8% de los n-alcanos del petróleo crudo y consiguiendo una reducción porcentual del contenido de aceite hasta en un 97,10% (Semai et al., 2021)

Nie et al. desarrollaron biopelículas de *P. aeruginosa* y poliuretano para el tratamiento de agua producida. Al finalizar el experimento, los investigadores midieron las propiedades de agua producida antes y después de la intervención, encontrando que esta biopelícula fue eficaz para

eliminar aceite y sólidos suspendidos en el agua producida (Nie et al., 2020). De manera similar, el experimento llevado a cabo por Cabrera et al., en el cual se probaron baterías bacterianas, demostró un alto desempeño en la remoción de contaminantes, demanda química de oxígeno, sólidos disueltos totales, sulfatos y densidad (Cabrera et al., 2022). El estudio realizado por Sudmalis et al. investigó la posibilidad de biodegradación de N-alcanos y producción de lípidos neutros en una corriente concentrada de agua producida con *A. borkumensis* SK2, encontrando una eficiencia de eliminación de N-alcano de hasta el 99,6% (Sudmalis et al., 2018). Finalmente, Shargui et al. emplearon bacterias halófilas en el tratamiento de aguas producidas con alta salinidad (Sharghi et al., 2013).

Dos estudios utilizaron sistemas bioelectroquímicos para el tratamiento de agua producida, los cuales pueden convertir la energía química almacenada en los desechos en electricidad mediante un proceso electroquímico. Jain et al., (2016) estudiaron el sistema bajo potencial catódico elevado, en el cual se intentó mejorar el rendimiento del cátodo del sistema para mejorar la capacidad de liberación de electrones del ánodo a través de la oxidación de agua producida. La elevación del potencial del cátodo mostró un impacto positivo significativo en la eficiencia de eliminación de demanda química de oxígeno del sistema (Jain et al., 2016). El segundo estudio, realizado por Mousa et al. buscó la eficiencia de los métodos electrobioquímicos híbridos en la eliminación simultánea de hidrocarburos totales y sulfatos de agua producida, para los cuales se utilizaron dos electrodos de óxido metálico mixto a base de Ti y un biofiltro (Mousa, 2016). En este estudio, se encontró que los procesos electroquímicos son muy eficientes en la degradación de contaminantes orgánicos y en la descomposición de hidrocarburos totales en los casos de las aguas producidas con alto contenido de sólidos totales, iones cloruro y sulfatos (Mousa, 2016).

## **Tratamiento físico**

### *Filtración*

La filtración es una técnica sencilla utilizada en el tratamiento de las aguas residuales, que se basa en el uso de medios filtrantes porosos (arena, piedra triturada y carbón activado) que permiten solo el paso del agua, pero no de las impurezas (Al-Ghouti et al., 2019). Kose-Mutlu et al.,

investigaron el efecto de procesos híbridos utilizando carbón activado y membranas de nanofiltración y ósmosis inversa para tratar agua producida en campos mixtos de petróleo y gas. En este sentido, como pretratamiento se aplicaron combinaciones de unidades de microfiltración y sistemas de carbón activado en polvo o carbón activado granular, antes de los procesos de nanofiltración y ósmosis inversa (Kose-Mutlu et al., 2017). Estos autores demostraron que el carbón activado aumenta la demanda química de oxígeno y la eficiencia de eliminación la conductividad y la materia orgánica debido a su capacidad de adsorción de iones (Kose-Mutlu et al., 2017).

Marzouk et al. recubrieron membranas cerámicas comerciales de TiO<sub>2</sub> con nanopartículas de sílice (SiO<sub>2</sub>) en diferentes concentraciones, demostrando su efectividad en el tratamiento de aguas producidas (Marzouk et al., 2021). Adicionalmente, Rangel-Muñoz et al. combinaron biomoléculas y nanomateriales para la separación y el tratamiento simultáneo de emulsiones y de aceite en agua producida (Rangel-Muñoz et al., 2020).

Verma et al. modificaron una membrana de microfiltración de polipropileno mediante el recubrimiento de la superficie con sericina (proteína obtenida en el capullo de *Bombyx mori* en el proceso de producción de la seda) para impartir mejores propiedades antiincrustantes. La hidrofiliidad de la membrana mejoró significativamente después del recubrimiento con sericina, así como la turbidez y el volumen de agua purificada (Verma & Subbiah, 2019). Por último, Hedayatipour et al. analizaron el efecto de diferentes variables operativas, incluida la temperatura, el pH y la presión transmembrana sobre el rendimiento del proceso de una membrana de nanofiltración para eliminar Ba, Ni, Cr, NaCl y sólidos totales de las aguas producidas, logrando eficiencia de eliminación entre 56.3-85,3% (Hedayatipour et al., 2017).

### *Flotación*

En este método, se utilizan burbujas finas de gas para separar las partículas en suspensión que no pueden eliminarse por sedimentación. En este proceso se inyecta gas en el agua a tratar, lo que genera que las partículas en suspensión y las gotas de aceite se adhieran a las burbujas de aire y

luego suban a la superficie para formar una espuma que posteriormente es eliminada. Este proceso puede realizarse utilizando aire, nitrógeno u otros tipos de gases inertes (Al-Ghouti et al., 2019).

Da Silva et al. investigaron las técnicas de flotación en el desempeño de la remoción de petróleo del agua producida en yacimientos petrolíferos. Los resultados de la conjugación de los procesos de flotación por aire inducido permitieron cumplir con los límites de aguas residuales establecidos por las legislaciones (Silva et al., 2015). Por otra parte, Chaprão et al. describieron la formulación de un biosurfactante producido a partir de *Bacillus methylotrophicus* para su aplicación en un prototipo de flotación. El biosurfactante formulado demostró buena estabilidad en ambos métodos de conservación, con tolerancia a un amplio rango de pH, salinidad y altas temperaturas (Chaprão et al., 2018). Los hallazgos demostraron, además, que el biosurfactante de *B. methylotrophicus* puede ayudar en la mitigación y gestión de efluentes industriales, contribuyendo a la reducción de la contaminación ambiental causada por hidrocarburos (Chaprão et al., 2018).

Nonato et al. realizaron un estudio que tuvo como objetivo evaluar la eficiencia de la combinación del proceso de electroflotación y filtración granular de flujo descendente en el tratamiento de aguas residuales contaminadas con petróleo. El rendimiento del sistema se determinó mediante la eliminación del contenido de aceite y grasa en el efluente tratado y se obtuvo una remoción inicial de aceite y grasa superior al 98% (Nonato et al., 2018).

### *Adsorción*

La adsorción se considera una de las mejores técnicas de tratamiento para conseguir una mejor calidad del agua, ya que puede reducir la concentración del contaminante a niveles muy bajos (Al-Ghouti et al., 2019). Según Spellman et al. mediante el proceso de adsorción se puede recuperar casi el 100% del agua producida y eliminar el 85% de los metales pesados. Se ha demostrado también que varios adsorbentes eliminan manganeso, hierro, benceno, tolueno, etilbenceno y xileno, petróleo y metales del agua producida (Spellman et al., 2003).

Bezerra et al. usaron un método de adsorción compuesto por zeolita A y un hidróxido doble estratificado, eliminando de 85% a 100% los cationes y de 56% a 99,7% los aniones (Bezerra et al., 2019). Liaqat et al. realizaron una investigación sobre la adsorción de aceite de agua producida utilizando perlas de alginato de arcilla cargadas con líquidos iónicos, indicando que las perlas de alginato de sodio tienen una superficie porosa, que es eficiente para la adsorción de aceite con una eficiencia de eliminación del 71,8% (Liaqat et al., 2022).

## **Tratamiento químico**

### *Oxidación*

La oxidación se utiliza normalmente para la eliminación de demanda biológica de oxígeno y demanda química de oxígeno, olor, color y compuestos orgánicos e inorgánicos del agua producida (Al-Ghouti et al., 2019). Generalmente, se pueden descomponer múltiples contaminantes utilizando varios oxidantes como cloro, ozono, peróxido y oxígeno. Sun et al. evaluaron la capacidad de los electrodos de grafito para oxidar selectivamente bromuro en agua producida del suroeste de Pensilvania, mostrando una alta efectividad y creando una alternativa para la protección ambiental y la recuperación de recursos (Sun et al., 2013).

### *Electrocoagulación*

La electrocoagulación es un proceso químico que consiste en suministrar una corriente eléctrica, lo que permite aglomerar las partículas coloidales y por flotación, estas se depositan en la superficie. Aunque se ha demostrado ser una tecnología prometedora para el tratamiento de agua producida eliminando sulfuro y ánodos de hierro (Chow & Pham, 2019), otros autores reportan que no es un tratamiento efectivo en aguas con alta concentración de materia orgánica; a pesar de ser efectiva en la eliminación de carbono orgánico total, dureza, Ba, Sr y B (Esmaeilirad et al., 2015).

Por otra parte, un estudio tuvo como objetivo optimizar las condiciones experimentales para la máxima degradación oxidativa de materia orgánica mediante coagulación, obteniendo una eliminación del material orgánico disuelto (Ge, 2018). Además, en otro estudio, se realizó una técnica de electrocoagulación con electrodos de aluminio para separar el petróleo del agua aceitosa sintética, logrando hasta el 98% de eliminación de aceite después de 20 minutos de procesamiento (Gobbi et al., 2018). Lobo et al. presentaron un nuevo proceso para integrar la electrocoagulación con biocarbón granular para reducir drásticamente el uso de energía y la pasivación de electrodos y, al mismo tiempo, lograr una alta eficiencia del tratamiento. Los resultados mostraron una disminución de la turbidez del 99%, siendo que la cantidad de biocarbón añadido se correlacionó positivamente con el ahorro de energía (Lobo et al., 2016).

### *Floculación*

Ottaviano et al. desarrollaron un método basado en fluorescencia para demostrar la eficiencia de un sistema floculante polimérico-micro encapsulante en la descontaminación de pireno. Las concentraciones óptimas de floculante utilizadas para eliminar pireno se determinaron mediante espectroscopía, siendo que los tiempos de floculación y sedimentación fueron rápidos (<1 min). También se demostró una rápida eliminación de petróleo crudo de una muestra de agua producida en un yacimiento petrolífero con una eficiencia de descontaminación del 98,1% (Ottaviano et al., 2014). Santos et al., investigaron la recuperación mejorada de petróleo mediante polímeros y poliacrilamida semihidrolizada para aumentar el efecto de la separación de agua y aceite. Los autores concluyeron que la poliacrilamida semihidrolizada es capaz de aumentar la viscosidad del sistema, la tensión interfacial aceite-agua y la viscoelasticidad de las gotas de aceite (Santos et al., 2020).

Tabla 5. Características de los artículos seleccionados para la ecuación de búsqueda “produced water” AND “oil industry” AND “treatment”.

<b>Autores</b>	<b>Título</b>	<b>País</b>	<b>Conflicto de interés</b>	<b>Tipo de estudio</b>	<b>Pruebas utilizadas</b>	<b>Intervención</b>	<b>Resultado</b>
Bezerra, et al. (2019)	Development of a Zeolite A/LDH Composite for Simultaneous Cation and Anion Removal.	Brasil	Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.	Experimental	El material compuesto preparado se caracterizó mediante análisis térmico diferencial y termogravimétrico	Tres muestras, tratadas con Zeolita A.	La Zeolita A eliminó todos los cationes, pero no los aniones.
Nawas, et al. (2021)	Investigation of flux stability and fouling mechanism during simultaneous treatment of different produced water streams using forward osmosis and membrane distillation	Arabia Saudita	Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.	Experimental	17 experimentos basados en: membrana por osmosis directa, destilación de membrana, concentraciones de EDTA a la solución.	Se compararon entre sí para identificar la comparación de mayor rendimiento	Los experimentos híbridos de membranas hidrofílicas mostraron una alta calidad.
Nonato, et al. (2018)	Combination of electroflotation process and down-flow granular filtration to treat wastewater contaminated with oil	Brasil	ND	Experimental	Electroflotación + filtración granular de flujo descendente	Combinación del proceso de electroflotación y la filtración granular de flujo descendente para eliminar aceite y grasa.	La combinación utilizada resultó en una eficiencia de más del 98 %.
Ottavian, et al. (2014)	Assessing the decontamination efficiency of a three-component flocculating system in the treatment of oilfield-produced	Canadá	ND	Experimental	Tecnología floculante de microencapsulación.	Los floculantes se agregaron a alícuotas de solución de agua producida	Se eliminó el 98% del petróleo crudo presente en el agua producida.
Ozgun, et al. (2013)	Effects of the pre-treatment alternatives on the treatment of oil-gas field produced water by nanofiltration and reverse osmosis membranes	Turquía	ND	Experimental	Pruebas de nanofiltración y osmosis inversa	No menciona el número exacto de experimentos	Las mejores eficiencias de remoción se obtuvieron mediante la combinación bioreactor de membrana + membrana de osmosis inversa.

Da Silva, et al. (2015)	Oil removal from produced water by conjugation of flotation and photo-Fenton processes.	Brasil	ND	Experimental	Se combinaron los procesos de flotación por aire inducida y foto-Fenton para tratar el agua producida en yacimientos petrolíferos.	La mejor condición experimental encontrada para los procesos integrados fue 10 minutos de flotación seguidos de 45 minutos de foto-Fenton.	Se encontró una reducción general del 99% en el efluente tratado.
Liaqat, et al. (2022)	Clay-Alginate Beads Loaded with Ionic Liquids: Potential Adsorbents for the Efficient Extraction of Oil from Produced Water.	Emiratos Árabes Unidos	Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.	Experimental	Adsorción de aceite utilizando perlas de alginato de arcilla cargadas con líquidos iónicos	10 mg de perlas en una solución de 10 ml del PW.	La capacidad de adsorción se logró con las perlas de arcilla-alginato-IL.
Cabrera, et al. (2022)	Novel continuous up-flow MFC for treatment of produced water: Flow rate effect, microbial community, and flow simulation	China	Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.	Experimental	Pilas de combustible microbianas	Se probaron 4 caudales de pilas de combustible microbianas con una membrana de interior catiónico.	Eficiencia de remoción de contaminantes y producción de electricidad.
(Calderón-Delgado et al., 2019)	Physiological and enzymatic responses of <i>Chlorella vulgaris</i> exposed to produced water and its potential for bioremediation	Colombia	Los autores declaran que no tienen ningún conflicto de intereses.	Experimento	Se evaluaron los efectos enzimáticos y fisiológicos en <i>Chlorella vulgaris</i> y su potencial de biorremediación después de la exposición al agua producida (PW)	La evaluación de la actividad antioxidante de <i>C. vulgaris</i> se llevó a cabo por exposición al agua recolectada en el vertedero generado por dos pozos petroleros	El uso de algas para degradar componentes del agua producida y el petróleo crudo podría considerarse una técnica de biorremediación.
Chow, et al. (2019)	Effective removal of silica and sulfide from oil sands thermal in-situ produced water by electrocoagulation	Canadá	ND	Experimental	Experimentos de electrocoagulación con corriente constante.	Las muestras de agua residual se dividieron en dos partes. En la primera se analizaron sílice, sulfuro, Ca <sup>2+</sup> y Mg <sup>2+</sup> en el filtrado. En la segunda parte, se disolvieron todos los precipitados mediante HCl.	La electrocoagulación fue eficaz en la eliminación de sílice, Ca <sup>2+</sup> y Mg <sup>2+</sup> .

Coday, et al. (2015)	Forward osmosis desalination of oil and gas wastewater: Impacts of membrane selection and operating conditions on process performance	Estados Unidos	No descrito	Experimental	Se investigaron membranas para la desalinización del agua producida.	1. Membrana de triacetato de celulosa 2. membrana a base de poliamida 3. membrana a base de poliamida de compuesto de película delgada	Se observó un rechazo superior al 94% de cationes por parte de la membrana de triacetato. Las concentraciones de aniones (bromuro, fluoruro, sulfato, nitrato y fosfato) estuvieron por debajo del límite.
(Dai et al., 2019)	Enhancement of COD Removal from Oilfield Produced Wastewater by Combination of Advanced Oxidation, Adsorption and Ultrafiltration	China	Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.	Experimental	Oxidación Fenton, asentamiento, adsorción de carbón activado y ultrafiltración (UF)	Planta convencional existente que incluye oxidación Fenton, asentamiento y adsorción de carbón activado.	La ultrafiltración reduce la demanda química de oxígeno.
Ebrahimi, et al. (2020)	Innovative Optical-Sensing Technology for the Online Fouling Characterization of Silicon Carbide Membranes during the Treatment of Oily Water	Alemania	Los autores declaran no tener conflictos de intereses.	Experimental	Probar un sensor de aceite en agua en línea basado en el principio de dispersión de la luz para la medición de las concentraciones de aceite.	Medición de las concentraciones de aceite durante la filtración de flujo cruzado para optimizar los parámetros del proceso.	Idoneidad de los monitores para la supervisión y control de los procesos de tratamiento aguas producidas.
Elshorafa et al. (2020)	Efficient oil/saltwater separation using a highly permeable and fouling-resistant all-inorganic nanocomposite membrane	Catar	ND	Experimental	Membrana nanocompuesta inorgánica para la separación de aceite y agua salada, compuesta de nanofibras de titanato y gel de nanopartículas de sílice.	Filtración con membranas nanoestructuradas totalmente inorgánicas.	La nueva membrana muestra una alta eficiencia de separación de aceite/agua superior al 99,5%.
Esmailira, et al. (2015)	Influence of softening sequencing on electrocoagulation treatment of produced water.	Estados Unidos	ND	Experimental	Evaluación de la combinación y secuencia de métodos de ablandamiento y electrocoagulación.	Evaluación de la combinación y secuencia de métodos para tratar el flujo de retorno de fracturación hidráulica y el agua producida.	Ninguno de los métodos tuvo éxito en el tratamiento de las muestras debido a la alta concentración de materia orgánica.

Ge, et al. (2018)	Combined treatment of organic material in oilfield fracturing wastewater by coagulation and UV/H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /ferrioxalate complexes process.	China	No descrito	Experimental	Se aplico degradación de material oxidativo por coagulación y por complejos UV/H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /Ferroxalato a agua producida	Aplicación en cinco muestras.	El proceso de coagulación y complejos UV/H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> / podría eliminar eficientemente el material orgánico disuelto en agua producida.
Gobbi, et al. (2018)	Electrocoagulation with polarity switch for fast oil removal from oil in water emulsions	Brasil	ND	Experimental	Técnica de electrocoagulación que utiliza un reactor de 3,5 L, con electrodos de aluminio en una disposición monopolar	Ocho experimentos evaluando técnica de electrocoagulación para separar el petróleo del agua aceitosa sintética-	Se logró hasta el 98% de eliminación de aceite.
Hedayatipour, et al. (2017)	Removal optimization of heavy metals from effluent of sludge dewatering process in oil and gas well drilling by nanofiltration	Irán	Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.	Experimental	Nanofiltración optimizada mediante método de Taguchi.	16 pruebas para determinar las condiciones óptimas para evaluar la eliminación de NaCl.	El método Thaguchi mostró eficiencias máximas de remoción del Ni, Cr, NaCl y TDS.
(Hu et al., 2021)	Biomining of hypersaline produced water using microbially induced calcite precipitation	Estados Unidos	Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.	Experimental	Consorcio bacteriano ureolítico aclimatado a partir de lodos activados para biomineralizar el Ca <sup>2+</sup> y metales pesados.	Tres configuraciones experimentales por lotes a diferentes niveles de salinidad de agua residual.	Altas eficiencias de eliminación de Ca <sup>2+</sup> , contaminantes orgánicos y metales pesados.
Jaén-Gil, et al. (2020)	Sustainable microalgae-based technology for biotransformation of benzalkonium chloride in oil and gas produced water: A laboratory-scale study	España	Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.	Experimental	Explorar las capacidades de las microalgas para el tratamiento de agua reducida.	Las cepas de microalgas <i>Rhodomonas salina</i> , <i>Nannochloropsis oculata</i> , <i>Emiliania huxleyi</i> , <i>Dunaliella tertiolecta</i> , <i>Isochrysis galbana</i> , <i>Tetraselmis suecica</i> , <i>Dunaliella salina</i> y <i>Phaeodactylum tricornutum</i> s).	<i>Tetraselmis suecica</i> proporcionó el mejor desempeño. La biotransformación fue el principal mecanismo de eliminación identificado.

Jain, et al. (2016)	Bio-electro catalytic treatment of petroleum produced water: Influence of cathode potential upliftment.	India	ND	Experimental	Sistema bioelectroquímico bajo potencial catódico elevado	Varios experimentos, el control es el sistema bioelectroquímico o sin elevar el potencial catódico	La elevación del potencial del cátodo mostró un impacto positivo significativo en la eficiencia de eliminación de demanda química de oxígeno.
Jin, et al. (2017)	The role of the surfactant sodium dodecyl sulfate to dynamically reduce mass transfer resistance of SPEEK coated membrane for oil-in-water emulsion treatment	China	ND	Experimental	La membrana se preparó recubriendo fibras huecas comerciales de polietilensulfona con una capa de poliéter éter cetona sulfonada.	Filtración de agua emulsionada en aceite mediante una membrana recubierta con una capa de poliéter éter cetona sulfonada.	Fuerte correlación entre la cantidad de dodecil sulfato de sodio atrapada en la red polimérica y el flujo de agua.
Kose, et al. (2017)	Influence of powdered and granular activated carbon system as a pre-treatment alternative for membrane filtration of produced water	Turquía	ND	Experimental	Efecto de los procesos híbridos de carbón activado por membrana.	Tecnología de membrana de nanofiltración y ósmosis inversa que tratan el agua producida en campos de petróleo.	El proceso de carbón activado aumentó la demanda química de oxígeno.
Liden, et al. (2019)	Forward osmosis remediation of high salinity Permian Basin produced water from unconventional oil and gas development	Estados Unidos	ND	Experimental	Uso de ósmosis directa con membranas de fibra.	5 experimentos para evaluar la factibilidad del uso de ósmosis directa.	La osmosis se puede utilizar para extraer agua de salmueras de campos petrolíferos de alta salinidad.
Lobo et al., (2016)	Low-energy hydraulic fracturing wastewater treatment via AC powered electrocoagulation with biochar.	Estados Unidos	ND	Experimental	Integrar la electrocoagulación alimentada por CA con biocarbón granular.	Seis condiciones para evaluar la efectividad	El sistema de electrocoagulación fue capaz de eliminar alrededor del 99 % de la turbidez.
Lutzu, et al. (2019)	Algal treatment of wastewater generated during oil and gas production using hydraulic fracturing technology.	Estados Unidos	Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.	Experimental	Potencial de crecimiento de cepas de microalgas nativas de Oklahoma en agua de refluo recolectada de un pozo.	13 cepas de microalgas de cinco filos: <i>Ochrophyta</i> , <i>Chlorodendrophyceae</i> , <i>Cyanophyceae</i> , <i>Chlorophyceae</i> y <i>Bacillariophyceae</i> .	Eliminación de contaminantes mediante el cultivo de algas y la recolección de biomasa en las aguas residuales.

Marzouk, et al. (2021)	Preparation of TiO <sub>2</sub> /SiO <sub>2</sub> ceramic membranes via dip coating for the treatment of produced water	Emiratos Arabes Unidos	Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.	Experimental	Membranas se recubiertas con sílice (SiO <sub>2</sub> ).	Se consideraron diferentes concentraciones de 0,25, 0,50, 0,75 y 1,0 %.	La hidrofiliidad de las membranas mejoró drásticamente con una mayor concentración de SiO <sub>2</sub> .
Mousa, et al. (2016)	Total petroleum hydrocarbon degradation by hybrid electrobiochemical reactor in oilfield produced water	Egipto	ND	Experimental	Funcionamiento de la celda de flujo EBC a escala de laboratorio.	Cuatro muestras clasificadas por salinidad y ph	La celda biológica electrolítica mostró un mejor rendimiento de descomposición de hidrocarburos totales de petróleo en los casos de las aguas de alto sólidos disueltos totales con alto contenido de iones cloruro y sulfato.
Nie, et al. (2020)	Biological treatment of high salinity and low pH produced water in oilfield with immobilized cells of <i>P. aeruginosa</i> NY3 in a pilot-scale.	China	Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.	Prueba piloto	Biopelículas reciclables para el tratamiento de aguas residuales a partir de las células de <i>P. Aeruginosa</i> .	Se midieron las propiedades de agua producida antes y después de la intervención	<i>P. aeruginosa</i> se utilizó con éxito para eliminar aceite y SS.
Paixão, et al. (2018)	Application of guar gum in brine clarification and oily water	Brasil	No descrito	Experimental	El gel de goma guar se preparó in situ en el agua producida, después del efecto de salado, el aceite quedó aprisionado en los intersticios del gel colapsado.	Aplicación de goma guar en la clarificación de salmuera y tratamiento de aguas aceitosas	Los geles de goma guar fueron altamente efectivos para reducir el contenido de aceite y grasa.
(Parnian et al., 2021)	Water purification plantations for oil and gas industries in Iran.	Reino Unido	Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.	Experimental	Se llevó a cabo un proceso de: filtración primaria, coagulación & floculación, sedimentación, nuevamente filtración y finaliza con desinfección	La solución se trató químicamente con coagulantes y floculantes	El rendimiento del sistema fue óptimo para absorbancia UV 254, Carbono orgánico disuelto y turbidez.

Rahbari, et al. (2017)	Biosurfactant production for enhancing the treatment of produced water and bioremediation of oily sludge under the conditions of Gachsaran oil field	Iran	ND	Experimental	En la primera etapa, se evaluó la capacidad del GACH-1 para degradar petróleo. En la segunda etapa, se utilizó un biorreactor de membrana continua para reducir los contaminantes de hidrocarburos del agua producida,	Pruebas con surfactante químico, biosurfactante y sin surfactante	La mezcla de biosurfactante producida aumentó significativamente la solubilidad de los compuestos orgánicos hidrófobos de los lodos.
Rangel-Muñoz, et al. (2020)	Novel Bionanocompounds: Outer Membrane Protein A and Lacase Co-Immobilized on Magnetite Nanoparticles for Produced Water Treatment.	Colombia	Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.	Experimental	Al co-inmovilizar el biosurfactante y una biorremediación en nanopartículas magnéticas es posible separar emulsiones y reducir algunos de los compuestos nocivos.	No especifica el número de pruebas	En presencia de los bionanocompuestos se observaron eficiencias de degradación.
Rehma, et al. (2018)	Inoculation with bacteria in floating treatment wetlands positively modulates the phytoremediation of oil field wastewater.	Pakistán	ND	Experimental	Potencial de la sinergia vegetal-bacteriana para la remediación eficiente de aguas residuales contaminadas con petróleo crudo.	Vegetación de <i>Phragmites australis</i> , <i>P. australis</i> y bacterias, <i>Brachiaria mutica</i> , <i>B. mutica</i> y bacterias, y solo bacterias.	La calidad de las aguas residuales mejoró hasta el punto de poder descargarlas al medio ambiente sin riesgos.
Santos, et al. (2020)	Influence of molar mass of partially hydrolyzed polyacrylamide on the treatment of produced water from enhanced oil recovery	Brasil	Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.	Experimental	Influencia de poliacrilamida semihidrolizada para aumentar el efecto de los floculantes en la separación de agua y aceite.	6 experimentos con distintas concentraciones de poliacrilamida	Mecanismo efectivo en el tratamiento de aguas reducidas.
Semai, et al. (2021)	Characterization of hydrocarbon degradation, biosurfactant production, and biofilm formation in <i>Serratia</i> sp. Tan611: a new strain isolated from industrially contaminated environment in Algeria.	Francia	Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.	Experimental	Se aisló una nueva cepa bacteriana de aguas residuales contaminadas industrialmente.	Biopelículas con <i>Serratia</i> .	<i>Serratia</i> sp. tiene la capacidad de reducir el contenido de aceite hasta un 97%.

Sharghi, et al. (2013)	The biological treatment of high salinity synthetic oilfield produced water in a submerged membrane bioreactor using a halophilic bacterial consortium	Irán	ND	Experimento	Se empleó un consorcio bacteriano halófilo para el tratamiento de alta salinidad.	Tratamiento de PW sintético de alta salinidad en un biorreactor de membrana.	El aceite y la grasa en el efluente del biorreactor de membrana estuvo consistentemente por debajo de los estándares internacionales.
Silva, et al. (2017)	Production of Biosurfactants by <i>Pseudomonas</i> Species for Application in the Petroleum Industry.	Brasil	ND	Experimental	Producción de biosurfactantes por bacterias del género <i>Pseudomonas</i> utilizando un compuesto diseñado para obtener biomoléculas con potencial aplicación en la remediación de productos derivados del petróleo.	Se cultivaron tres cepas de <i>Pseudomonas</i> en un medio de bajo costo que contenía melaza y licor de maceración de maíz como sustratos.	El caldo con el surfactante crudo exhibió una excelente capacidad de eliminación de un contaminante hidrofóbico
Sudmalis, et al. (2018)	Biological treatment of produced water coupled with recovery of neutral lipids	Países bajos	ND	Experimental	Biodegradación simultánea de n-alcenos y producción de lípidos neutros en una corriente	Se inocularon dos reactores de tanque de agitación continua sin retención de lodos conectados en serie con <i>A. Borkumensis</i> .	La biodegradación eficiente de n-alcenos es posible con <i>A. borkumensis</i> .
Sun, et al. (2013)	Selective oxidation of bromide in wastewater brines from hydraulic fracturing	Estados Unidos	ND	Experimental	Capacidad de los electrodos de grafito sólido para oxidar selectivamente bromuro a bromo en agua producida	Se midió la eliminación de bromuro de salmuera sintética de bromuro y diferentes concentraciones de cloruro para determinar el efecto de la concentración de cloruro en la oxidación del bromuro.	La presencia de altas concentraciones de cloruro y otros componentes desconocidos en la salmuera disminuye la tasa de eliminación de bromuro.
Verma, et al. (2019)	Fouling resistant sericin-coated polymeric microfiltration	India	ND	Experimento	Modificación de la membrana de microfiltración de polipropileno mediante el recubrimiento de la superficie con sericina.	7 muestras. La solución de sericina se hizo pasar a través de la membrana del PP-HFMM	La membrana recubierta de sericina eliminó el >65% de turbidez durante la filtración.

Zhang, et al. (2015)	Treatment of oilfield produced water using Fe/C micro-electrolysis assisted by zero-valent copper and zero-valent aluminium.	China	ND	Experimento	Sistemas de microelectrólisis interna Fe/Cu/C y Fe/Al/C para tratar el agua producida en campos petrolíferos.	Varias dosis de hierro y carbón activo a un pH inicial de 4,0	El sistema Fe/C ME con la adición de Cu o Al posee una capacidad oxidativa y es una buena alternativa para el tratamiento de compuestos orgánicos acuosos.
Zhang, et al. (2016)	A field pilot-scale study of biological treatment of heavy oil-produced water by biological filter with airlift aeration and hydrolytic acidification system	China	ND	Planta de tratamiento a escala	Capacidad de los microorganismos inmovilizados para degradar el petróleo y los productos químicos utilizando un filtro biológico de acidificación hidrolítica.	Se aislaron dos cepas de bacterias degradadoras de hidrocarburos de petróleo y se identificaron como <i>Bacillus thuringiensis</i> , <i>Bacillus licheniformis</i> , <i>Citrobacter freundii</i> y <i>Pseudomonas aeruginosa</i> .	El HA-BFAA es eficaz para la eliminación de demanda química de oxígeno y contaminantes orgánicos.

## 8. Discusión

En esta revisión se describió la composición de las aguas producidas por la industria petrolera, sus posibles efectos en la salud humana, así como las alternativas de tratamiento para usar estas aguas; dada la creciente población, la intensificación de las presiones antropogénicas, la variabilidad climática, el aumento de las demandas sobre los recursos hídricos disponibles y la necesidad de reutilización del agua en áreas con estrés hídrico.

En cuanto a los resultados del efecto del agua producida en la salud humana, en esta revisión se encontró que el radio puede tener principalmente efectos óseos (cáncer, fracturas óseas y dentales), anemia y cataratas. Otros metales pesados como el bario, estroncio o el litio generan efectos en la tiroides, gastroenterológicos, cardiovasculares, musculares (debilidad, entumecimiento) y deficiencia en el crecimiento óseo en niños. Los BTEX a su vez, comúnmente generan problemas dermatológicos (irritación de la piel), gastrointestinales (vómitos), respiratorios y cardiovasculares (anemia, leucemia). De manera similar, los HAP pueden producir problemas dermatológicos, inmunológicos, reproductivos, renales, nerviosos, así como defectos al nacimiento, bajo peso al nacer y deficiencias en el desarrollo cognitivo.

La evidencia de los efectos carcinogénicos de los compuestos de las aguas producidas es conocida y se encuentran en el Grupo 1 del Centro Internacional de Investigaciones sobre el Cáncer (Wollin et al., 2020). Como mostrado en esta revisión, McDevitt et al. (2022), quienes se enfocaron en la caracterización de materia orgánica disuelta en aguas de producción de seis yacimientos petroleros encontraron altas concentraciones de compuestos nocivos para la salud humana y ambiental como el metilmercurio, elementos como nitrógeno y fósforo, ácidos orgánicos con anillos aromáticos, aminoácidos, carbohidratos, péptidos, proteínas y ácidos nucleicos complejos en cantidades variables (McDevitt et al., 2022).

Respecto al consumo de metilmercurio (MeHg) reportado por McDevitt y col. (2022), aunque no se encontraron hallazgos adicionales con los criterios de búsqueda establecidos, González-Estecha et al. reportaron que la ingesta excesiva de metilmercurio proveniente del consumo de pescado contaminado genera efectos neurológicos afectando a la función cognitiva, la

memoria, la función visual-motora y el lenguaje. Cabe resaltar que, en la intoxicación de Minamata se observó que los efectos del MeHg en los cerebros de los niños incluían procesos de formación de microtúbulos, migración neuronal y división celular (González-Estecha et al., 2014). En los cerebros en desarrollo, el tiempo de inicio de la exposición al tóxico se correlacionó con la severidad de los efectos inducidos, es decir cuánto más temprana se producía la exposición, mayores eran los efectos observados en el cerebro (González-Estecha et al., 2014). Los niños afectados intraútero presentaban un cuadro análogo a una parálisis cerebral grave, con un importante retraso en el desarrollo, ceguera, sordera, y alteraciones del tono muscular y de los reflejos tendinosos profundos (González-Estecha et al., 2014). Es importante establecer que en Colombia, el MeHg no solamente puede encontrarse en las aguas producidas de la industria petrolera sino que también se ha reportado su presencia en aguas residuales de las actividades auríferas artesanales (Rodríguez-Villamizar et al., 2015), siendo su principal vía de exposición el consumo de peces carnívoros contaminados, afectando principalmente niños, adolescentes, pescadores y mujeres gestantes (Rodríguez-Villamizar et al., 2015; Palma-Parra et al., 2019).

La investigación de Torres et al., (2018) discutió el consumo de radio en los habitantes de Dakota del Norte a través de consumo de agua y peces. Sin embargo, en este caso pueden tardar años en aparecer algunos efectos debidos a la radiación gamma emitida por el radio, el cual puede desplazarse por el aire a distancias largas. Tran et al, (2020) realizaron un estudio de cohorte retrospectivo considerando aproximadamente tres millones nacimientos de madres que vivían dentro de un radio de 10 km de al menos un pozo de producción de petróleo, reportando que la exposición durante el embarazo a pozos petroleros se asoció con mayores probabilidades de bajo peso al nacer y nacimientos pequeños para la edad gestacional (Tran et al., 2020).

En las aguas producidas también es posible encontrar aditivos químicos orgánicos, como el biocida cloruro de alquildimetilbencilamonio C12-C16, el etilenglicol y el metanol (inhibidor de la corrosión). Aunque no fue encontrado en esta revisión considerando los criterios de búsqueda establecidos, según Alcalá (2002) la intoxicación por metanol se caracteriza por el desarrollo de tres estadios progresivos: 1) disminución de la actividad del sistema nervioso central, debilidad, sensación vertiginosa y náuseas; 2) acidosis metabólica que se caracteriza por vómitos, dolor abdominal, desorientación y alteraciones visuales con fotofobia, visión borrosa, midriasis bilateral

arreactiva a la luz y ceguera ocasional; 3) lesión neuronal, con necrosis retiniana y de los ganglios basales del encéfalo.

Los resultados de esta investigación refieren un vacío de conocimiento en el país con respecto a los posibles efectos en salud generados por las aguas producidas en poblaciones que residen en áreas contiguas a actividades petroleras. La mayoría de estos estudios epidemiológicos se basaron en la proximidad residencial para calibrar la magnitud de la exposición, en este sentido se requieren estudios que generen esta información en Colombia. Adicionalmente, no se evalúa el estado de salud de trabajadores de la industria del petróleo lo cual, podría informar más sobre las implicaciones de las actividades petroleras en la salud.

Ninguno de los estudios relacionados con efectos en salud encontrados fue desarrollado en Colombia o en América Latina, con excepción de un artículo canadiense que evaluó los niveles de 1-hidroxipireno en orina de personas que vivían en una región productora de petróleo localizada en la Amazonía Andina (Ecuador y Perú) (Webb et al., 2018). Además, según esta revisión de alcance, se desconocen los efectos de cada compuesto en las aguas producidas, siendo necesario para crear medidas de prevención, diagnóstico y tratamientos que ayuden a mitigar los efectos en salud de las actividades petroleras. No se encontraron estudios con enfoque de género aun conociendo los efectos a nivel hormonal generados por algunos compuestos contenidos en estas aguas, los cuales puede originar actividad antagonista para los receptores de estrógenos, hormona que es relevante en el desarrollo sexual y reproductivo de las mujeres (Nagel et al., 2020).

Por lo revisado en este trabajo, la intoxicación por agua producida de la industria petrolera es un problema de salud pública que se encuentra desatendido, complicado además por la falta de evidencia local sobre los efectos en salud generados por estas aguas. Se espera, que esta investigación genere un interés por parte de la comunidad académica nacional que permita el desarrollo de investigaciones relacionadas con este evento de interés pública para el país, pero sobre todo para las poblaciones que viven en áreas contiguas a estas actividades.

El interés en reutilizar el agua de la industria petrolera va en aumento debido a los posibles beneficios ambientales y la reducción de costos para las compañías petroleras. Además, la

reutilización del agua es compatible con el concepto de economía circular y constituye una estrategia importante para aliviar los impactos adversos de las presiones excesivas sobre los recursos hídricos (Tzanakakis et al., 2023). Además, un mejor tratamiento de las aguas residuales y un aumento de la reutilización, como se indica en la meta seis de los objetivos de desarrollo sostenible (agua limpia y saneamiento) apoyarían la transición global hacia una economía circular y afectaría otros Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), como el ODS 2 “hambre cero”, el ODS 7 “energía limpia y asequible”, el ODS 12 “consumo responsable” el ODS13 “acción por el clima”. Sin embargo, actualmente, sólo el 1% del total del agua producida recuperada se recicla para su reutilización y el resto se vierte al medio ambiente (Patni & Raguathan, 2023). En 2003 se descargaron 800 millones de metros cúbicos de agua producida al océano aumentando la preocupación debido a los posibles daños a largo plazo en los ecosistemas (Lee & Neff, 2011).

Los avances recientes en el tratamiento de aguas producidas pueden generar una oportunidad para aumentar el acceso a agua potable en un futuro cercano. Sin embargo, es importante destacar que el establecimiento de criterios de calidad es fundamental para prevenir impactos indeseables en los seres humanos y el medio ambiente. La experiencia en el tratamiento de aguas producidas ha sido monitoreada durante varios años en el humedal más grande del mundo construido en los campos petroleros de Omán (Rial y González, 2020). Demostrando que los humedales artificiales son una alternativa económica, de bajo consumo energético y eficiente ecológicamente (Rial y González, 2020). En Colombia, se ha realizado una valiosa contribución diseñando un humedal para el tratamiento de las aguas producidas de un campo petrolero en los llanos de la Orinoquia (Rial y González, 2020). Esta alternativa, podría, además, restaurar otros ecosistemas cercanos y recargar los acuíferos por lo que los beneficios se extenderían directamente a la flora, la fauna, los pescadores, los pequeños agricultores y las comunidades (Rial & González, 2020).

Históricamente, el riego agrícola ha sido y sigue siendo el mayor uso de las aguas producidas tratadas, sin embargo, otros usos han sido cada día más considerados como el riego paisajístico, uso recreativo y ambiental, uso industrial, usos residenciales (lavado de pisos, carros, desagüe), consumo de animales de producción o hasta consumo humano (Angelakis et al., 2018). Respecto al uso del agua producida en agricultura, puede considerarse en cultivos alimentarios comerciales o no comerciales destinados a consumo humano o a consumo de animales de producción o no destinados

a consumo como pastos, forrajes, plantas ornamentales o silvicultura; reduciendo los costos asociados a la importación de agua dulce y creando un suministro local (EPA, 2023). En este contexto, los minerales de las aguas producidas ( $K^+$ ,  $Ca^{+2}$ ,  $Mg^{+2}$ ,  $Na^+$ ,  $Zn^{+2}$ ,  $Cu^{+2}$ ,  $SO_4$ ) puede resultar benéficos para la nutrición de las plantas a partir, además de la interacción de iones esenciales con otros componentes orgánicos e inorgánicos presentes en el agua producida (Martel-Valles et al., 2016).

El uso de esta agua en cultivos para consumo humano debe ir acompañado de análisis de minerales, metales pesados o metaloides tóxicos, compuestos orgánicos y elementos radiactivos, según las directrices ambientales nacionales e internacionales (Martel-Valles et al., 2013, 2014). A manera de ejemplo, Jackson y Myers (2002) utilizaron agua producida en una combinación de hidroponía y acuicultura y encontraron que la producción de tomate y lechuga era menor cuando se usaba agua producida, por lo que se recomienda un estudio previo de la composición del agua antes de su implementación. Adicionalmente, la variabilidad de los compuestos químicos de las aguas producidas puede afectar a los alimentos, pero se han realizado pocas investigaciones sobre este aspecto. Sin embargo, Martel-Valles et al. (2016) utilizaron agua producida diluida con agua de riego para regar tomates en invernaderos y evaluaron la respuesta morfológica y composición de raíces, tallos, hojas y frutos, concluyendo que el agua producida no provoca efectos perjudiciales en la calidad y productividad de las plantas (Martel-Valles et al., 2016). En Estados Unidos, dado que la mayoría de las actividades de la industria petrolera se desarrollan en regiones semiáridas y áridas cercanas a la producción agrícola, el agua producida tratada ya ha sido utilizado en actividades de riego. En este escenario, Pica et al., (2017) evaluaron los efectos del agua producida en dos especies de pastos, siendo que el agua de riego con la mayor salinidad y concentración de carbono orgánico total tuvo un efecto negativo en el rendimiento de biomasa y en los parámetros fisiológicos de ambas especies (Pica et al., 2017).

Otro uso que se le puede dar a al agua producida es el de la producción de algas, siendo previamente demostrada una alta tasa de crecimiento, productividad, rendimiento de biomasa y producción de lípidos en cultivos realizados en aguas producidas (Al-Ghouti et al., 2019a). Godfrey realizó el estudio más completo sobre el uso del agua producida como medio para cultivar microalgas con el objetivo de producir lípidos para la conversión de biocombustibles, donde se

concluyó que reemplazar los medios de crecimiento con agua producida suplementada solo con nutrientes esenciales de nitrógeno y fósforo es más lógico desde el punto de vista ambiental y económico porque se pueden lograr productividades similares de lípidos y biomasa con un costo menor sin necesidad de agua dulce (Al-Ghouti et al., 2019a).

Finalmente, las aguas producidas de menor calidad pueden utilizarse en la generación de agua artificiales para la vida silvestre y proporcionar hábitat a peces y aves acuáticas, en industrias, generación de energía y la extinción de incendios (Patni et al., 2023). La calidad del agua consumida por el ganado suele tener estándares más bajos que la calidad del agua para consumo humano (Al-Ghouti et al., 2019). Sin embargo, se ha encontrado que una cantidad alta de sólidos totales disueltos puede generar enfermedades gastrointestinales (Veil et al., 2004). En un estudio de AGROSAVIA (Corporación colombiana de investigación agropecuaria) entre 2011 y 2015, se evaluó la viabilidad de utilizar aguas de producción tratadas para consumo de bovinos; siendo que los resultados indicaron que el consumo de aguas producidas tratadas no afectó el desarrollo de los animales estudiados (Almansa et al., 2020). Jackson y Myers (2002) utilizaron aguas producida tratada para cultivar tilapia, siendo que los peces alcanzaron pesos mayores en comparación con los del grupo control (agua no tratada). Sin embargo, los autores informaron sobre muertes de algunos peces en los tanques de agua producida, aunque no especificaron las causas, ni la composición y concentración de sal del agua.

Un estudio realizado en Colombia donde se analizó el efecto del consumo de las aguas producidas en aves especializadas en la producción de huevo, obtuvo como resultado que la evaluación macroscópica post-mortem de las aves no reveló cambios significativos en el aspecto de los tejidos que permitieran inferir sobre un efecto del agua producida. (Almansa et al., 2020.). Además, la evaluación microscópica no proporcionó información que definiera situaciones que afectaran la salud debido al consumo de este tipo de agua. En otras palabras, tanto la observación a simple vista de los tejidos como el examen microscópico no mostraron evidencia de alteraciones que pudieran ser atribuidas al consumo de agua producida (Almansa et al., 2020.).

Un estudio centrado en el pez *Aequidens metae* expuesto a hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), encontró que este pez es un bioindicador adecuado para monitorear la presencia de HAP en ecosistemas acuáticos (Corredor-Santamaría et al., 2023). Un hallazgo destacado fue que

el fenantreno, en concentraciones subletales, exhibió un efecto genotóxico mayor que el benzo[a]pireno, lo cual es significativo y puede tener implicaciones importantes para la evaluación de riesgos ambientales (Corredor-Santamaría et al., 2023). Estos resultados subrayan la importancia de la monitorización continua de los niveles de HAP en ecosistemas acuáticos y la necesidad de implementar medidas de gestión ambiental para mitigar los posibles efectos adversos.

Esta revisión de alcance tiene algunas limitaciones. Entre ellas, no se incluyó literatura gris, limitando la búsqueda de artículos, ensayos clínicos y estudios observacionales que estuvieran disponibles en la web. Además, no se realizó una síntesis de resultados de manera cuantitativa sino informativa.

## 9. Conclusiones

Son evidentes los efectos en salud del agua producida, los cuales incluyen efectos neurológicos, musculares, circulatorios y otros como alteraciones hormonales, malformaciones congénitas, cáncer y muerte. Estos efectos son producidos principalmente por las sales, aceite, grasa, metales, hidrocarburos poliaromáticos, benceno, tolueno, etilbenceno, xilenos, orgánicos solubles, sólidos en suspensión, gases disueltos, materiales radiactivos naturales y microorganismos contenidos en las aguas producidas. Por lo tanto, es fundamental que se instauren normativas asociadas al uso y consumo del agua residual tratada y que las autoridades competentes exijan el cumplimiento a cabalidad de cada uno de los requisitos de calidad.

El tratamiento y reutilización del agua producida es una necesidad global dada la presión antropogénica y la escasez de agua dulce derivada principalmente de condiciones climáticas. Aunque en su forma cruda el agua producida tiene una gran cantidad de desechos tóxicos, su tratamiento y manejo adecuados la podrían hacer beneficiosa para una variedad de aplicaciones. Como ningún tratamiento de agua residual puede garantizar características adecuadas de potabilidad, se recomienda usar dos o más sistemas de tratamiento en serie. Además, es importante mencionar que el tipo de tratamiento dependerá del origen del agua producida, su composición, propiedades químicas y espacio disponible. Las tecnologías de membranas son algunos de los mejores métodos de tratamiento de aguas residuales y su eficiencia se puede mejorar aún más reduciendo la contaminación de las membranas y la generación de desechos secundarios. Según la disponibilidad de productos químicos y las consideraciones económicas, se pueden adoptar técnicas químicas y físicas más sofisticadas.

## 10. Bibliografía

1. Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades. (1990, December). Resúmenes de Salud Pública - Radio (Radium).
2. Aghababaei, M., Luek, J. L., Ziemkiewicz, P. F., & Mouser, P. J. (2021). Toxicity of hydraulic fracturing wastewater from black shale natural-gas wells influenced by well maturity and chemical additives. *Environ Sci Process Impacts*, 23(4), 621–632. <https://doi.org/10.1039/d1em00023c>
3. Al-Ghouti, M. A., Al-Kaabi, M. A., Ashfaq, M. Y., & Da'na, D. A. (2019a). Produced water characteristics, treatment and reuse: A review. In *Journal of Water Process Engineering* (Vol. 28, pp. 222–239). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.02.001>
4. Alhothali, A., Haneef, T., Mustafa, M. R. U., Moria, K. M., Rashid, U., Rasool, K., & Bamasag, O. O. (2021). Optimization of Micro-Pollutants' Removal from Wastewater Using Agricultural Waste-Derived Sustainable Adsorbent. *Int J Environ Res Public Health*, 18(21). <https://doi.org/10.3390/ijerph182111506>
5. Alonso. (2021, May 12). Hidrocarburos aromáticos. <https://www.alonsoformula.com/organica/aromaticos.htm>
6. Alvarado, M. (2017). La aplicación del principio de responsabilidades comunes pero diferenciadas en el tránsito del protocolo de Kioto al acuerdo de París: Análisis crítico de la nueva estructura internacional en materia climática y sus implicaciones para Colombia. <https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/34139>
7. Ambiente Y Desarrollo Sostenible, M. DE. (n.d.). • 2 REPÚBLICA DE COLOMBIA. ANH. (2021). Informe de gestión 2021.
8. Angelakis, A. N., Asano, T., Bahri, A., Jimenez, B. E., & Tchobanoglous, G. (2018). Water reuse: from ancient to modern times and the future. *Frontiers in Environmental Science*, 26.
9. Bezerra, B. G. P., Bieseki, L., da Silva, D. R., & Pergher, S. B. C. (2019). Development of a zeolite A/LDH composite for simultaneous cation and anion removal. *Materials*, 12(4). <https://doi.org/10.3390/ma12040661>
10. Bravo E. (2007). LOS IMPACTOS DE LA EXPLOTACION PETROLERA EN ECOSISTEMAS TROPICALES Y LA BIODIVERSIDAD.
11. Bueno Torres, M. (2019). Plan de Salud Territorial Distrito de Barrancabermeja.
12. Cabrera, J., Dai, Y., Irfan, M., Li, Y., Gallo, F., Zhang, P., Zong, Y., & Liu, X. (2022). Novel continuous up-flow MFC for treatment of produced water: Flow rate effect, microbial community, and flow simulation. *Chemosphere*, 289. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.133186>
13. Calderón-Delgado, I. C., Mora-Solarte, D. A., & Velasco-Santamaría, Y. M. (2019). Physiological and enzymatic responses of *Chlorella vulgaris* exposed to produced water and its potential for

- bioremediation. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191(6). <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7519-8>
14. Chaprão, M. J., da Silva, R. de C. F. S., Rufino, R. D., Luna, J. M., Santos, V. A., & Sarubbo, L. A. (2018). Production of a biosurfactant from *Bacillus methylotrophicus* UCP1616 for use in the bioremediation of oil-contaminated environments. *Ecotoxicology*, 27(10), 1310–1322. <https://doi.org/10.1007/s10646-018-1982-9>
15. Chittick, E. A., & Srebotnjak, T. (2017). An analysis of chemicals and other constituents found in produced water from hydraulically fractured wells in California and the challenges for wastewater management. *Journal of Environmental Management*, 204, 502–509. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.09.002>
16. Chow, H., & Pham, A. L. T. (2019). Effective removal of silica and sulfide from oil sands thermal in-situ produced water by electrocoagulation. *Journal of Hazardous Materials*, 380. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.120880>
17. Coday, B. D., Almaraz, N., & Cath, T. Y. (2015). Forward osmosis desalination of oil and gas wastewater: Impacts of membrane selection and operating conditions on process performance. *Journal of Membrane Science*, 488, 40–55. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2015.03.059>
18. Constitución Política de Colombia, (July 7, 1991). content. (n.d.).
19. Córdoba, M., Del Coco, V., & Basualdo, J. (2010). Agua y salud humana. *Química Viva*, 9(3), 105–119. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=86315692002>
20. da Silva, S. S., Chiavone-Filho, O., de Barros Neto, E. L., & Foletto, E. L. (2015). Oil removal from produced water by conjugation of flotation and photo-Fenton processes. *Journal of Environmental Management*, 147, 257–263. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.08.021>
21. Dai, X., Fang, J., Li, L., Dong, Y., & Zhang, J. (2019). Enhancement of COD removal from oilfield produced wastewater by combination of advanced oxidation, adsorption and ultrafiltration. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(17). <https://doi.org/10.3390/ijerph16173223>
22. Ebrahimi, M., Schmidt, A. A., Kaplan, C., Schmitz, O., & Czermak, P. (2020). Innovative optical-sensing technology for the online fouling characterization of silicon carbide membranes during the treatment of oily water. *Sensors (Switzerland)*, 20(4). <https://doi.org/10.3390/s20041161>
23. ECOPETROL. (2023). Comportamiento histórico de incidentes.
24. Elshorafa, R., Saththasivam, J., Liu, Z., & Ahzi, S. (2020). Efficient oil/saltwater separation using a highly permeable and fouling-resistant all-inorganic nanocomposite membrane. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(13), 15488–15497. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-08021-x>
25. Esmailirad, N., Carlson, K., & Omur Ozbek, P. (2015). Influence of softening sequencing on electrocoagulation treatment of produced water. *Journal of Hazardous Materials*, 283, 721–729. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.10.046>

26. Gallegos, T. J., Doolan, C., Caldwell, R., Engle, M. A., Varonka, M., Birdwell, J., Jolly, G., Coplen, T. B., & Oliver, T. (2021). Insights on Geochemical, Isotopic, and Volumetric Compositions of Produced Water from Hydraulically Fractured Williston Basin Oil Wells. *Environmental Science and Technology*, 55(14), 10025–10034. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c06789>
27. Galván Rico, L. (2007). *LOS MACROPROCESOS DE LA INDUSTRIA PETROLERA Y SUS CONSECUENCIAS AMBIENTALES*. Scielo.
28. Ge, D. (2018). Combined treatment of organic material in oilfield fracturing wastewater by coagulation and UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/ferrioxalate complexes process. *Water Science and Technology*, 77(4), 909–919. <https://doi.org/10.2166/wst.2017.606>
29. Gobbi, L. C. A., Nascimento, I. L., Muniz, E. P., Rocha, S. M. S., & Porto, P. S. S. (2018). Electrocoagulation with polarity switch for fast oil removal from oil in water emulsions. *Journal of Environmental Management*, 213, 119–125. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.01.069>
30. González-Estecha, M., Bodas-Pinedo, A., Rubio-Herrera, M. Án., Martell-Claros, N., Trasobares-Iglesias, E. M., Ordóñez-Iriarte, J. M., Guillén-Pérez, J. J., Herráiz-Martínez, M. Án., García-Donaire, J. A., Farré-Rovira, R., Calvo-Manuel, E., Martínez-Álvarez, J. R., Llorente-Ballesteros, M. T., Sáinz-Martín, M., Martínez-Astorquiza, T., Martínez-García, M. J., Lesmes, I. B., Cuadrado-Cenzual, M. Án., Prieto-Menchero, S., ... Calle-Pascual, A. (2014). Efectos sobre la salud del metilmercurio en niños y adultos; estudios nacionales e internacionales. In *Nutricion Hospitalaria* (Vol. 30, Issue 5, pp. 989–1007). Grupo Aula Medica S.A. <https://doi.org/10.3305/nh.2014.30.5.7728>
31. Hanson, A. J., Luek, J. L., Tummings, S. S., McLaughlin, M. C., Blotevogel, J., & Mouser, P. J. (2019). High total dissolved solids in shale gas wastewater inhibit biodegradation of alkyl and nonylphenol ethoxylate surfactants. *Science of the Total Environment*, 668, 1094–1103. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.041>
32. Harkness, J. S., Dwyer, G. S., Warner, N. R., Parker, K. M., Mitch, W. A., & Vengosh, A. (2015). Iodide, bromide, and ammonium in hydraulic fracturing and oil and gas wastewaters: Environmental implications. *Environmental Science and Technology*, 49(3), 1955–1963. <https://doi.org/10.1021/es504654n>
33. Hazardous Substance Research Centers. (2003, June). *Environmental Impact of the Petroleum Industry*. [https://cfpub.epa.gov/ncer\\_abstracts/index.cfm/fuseaction/display/files/fileID/14522](https://cfpub.epa.gov/ncer_abstracts/index.cfm/fuseaction/display/files/fileID/14522)
34. Hedayatipour, M., Jaafarzadeh, N., & Ahmadmoazzam, M. (2017). Removal optimization of heavy metals from effluent of sludge dewatering process in oil and gas well drilling by nanofiltration. *Journal of Environmental Management*, 203, 151–156. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.07.070>

35. Hu, L., Wang, H., Xu, P., & Zhang, Y. (2021). Biomineralization of hypersaline produced water using microbially induced calcite precipitation. *Water Research*, 190. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116753>
36. Instituto Universitario de la Paz. (2014). Estudio de potencialidades del territorio para la identificación de brechas que orienten la nueva oferta educativa de la UNIPAZ. <https://unipaz.edu.co/assets/documento-estudio-de-potencialidades2.pdf>
37. Jaén-Gil, A., Ferrando-Climent, L., Ferrer, I., Thurman, E. M., Rodríguez-Mozaz, S., Barceló, D., & Escudero-Oñate, C. (2020). Sustainable microalgae-based technology for biotransformation of benzalkonium chloride in oil and gas produced water: A laboratory-scale study. *Science of the Total Environment*, 748. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141526>
38. Jain, P., Srikanth, S., Kumar, M., Sarma, P. M., Singh, M. P., & Lal, B. (2016). Bio-electro catalytic treatment of petroleum produced water: Influence of cathode potential upliftment. *Bioresource Technology*, 219, 652–658. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.08.048>
39. Jin, T., Song, J., Zhu, J., Nghiem, L. D., Zhao, B., Li, X. M., & He, T. (2017). The role of the surfactant sodium dodecyl sulfate to dynamically reduce mass transfer resistance of SPEEK coated membrane for oil-in-water emulsion treatment. *Journal of Membrane Science*, 541, 9–18. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2017.06.079>
40. Johnson, M. R., Conrad, B. M., & Tyner, D. R. (2023). Creating measurement-based oil and gas sector methane inventories using source-resolved aerial surveys. *Communications Earth and Environment*, 4(1). <https://doi.org/10.1038/s43247-023-00769-7>
41. Junta de Castilla y León. (2023). Historia del petróleo. <https://energia.jcyl.es/web/es/biblioteca/historia-petroleo.html>
42. Kassotis, C. D., Nagel, S. C., & Stapleton, H. M. (2018). Unconventional oil and gas chemicals and wastewater-impacted water samples promote adipogenesis via PPAR $\gamma$ -dependent and independent mechanisms in 3T3-L1 cells. *Science of the Total Environment*, 640–641, 1601–1610. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.030>
43. Kose-Mutlu, B., Ersahin, M. E., Ozgun, H., Kaya, R., Kinaci, C., & Koyuncu, I. (2017). Influence of powdered and granular activated carbon system as a pre-treatment alternative for membrane filtration of produced water. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 92(2), 283–291. <https://doi.org/10.1002/jctb.4996>
44. La, A., De Alcala, U., La, Y. A., Rey, U., & Carlos, J. (n.d.). AGRADECIMIENTOS.
45. Liaqat, S., Ibrahim, T. H., Khamis, M. I., Nancarrow, P., & Abouleish, M. Y. (2022). Clay-Alginate Beads Loaded with Ionic Liquids: Potential Adsorbents for the Efficient Extraction of Oil from Produced Water. *Polymers*, 14(20). <https://doi.org/10.3390/polym14204440>
46. Liden, T., Carlton, D. D., Miyazaki, S., Otoyoy, T., & Schug, K. A. (2019). Forward osmosis remediation of high salinity Permian Basin produced water from unconventional oil and gas

- development. *Science of the Total Environment*, 653, 82–90. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.325>
47. Lobo, F. L., Wang, H., Huggins, T., Rosenblum, J., Linden, K. G., & Ren, Z. J. (2016). Low-energy hydraulic fracturing wastewater treatment via AC powered electrocoagulation with biochar. *Journal of Hazardous Materials*, 309, 180–184. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.02.020>
48. Luek, J. L., Harir, M., Schmitt-Kopplin, P., Mouser, P. J., & Gonsior, M. (2018). Temporal dynamics of halogenated organic compounds in Marcellus Shale flowback. *Water Research*, 136, 200–206. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.02.055>
49. Luo, M., Yang, H., Wang, K., Song, F., He, Y., Zhang, Y., & Zhong, C. (2023). Coupling iron-carbon micro-electrolysis with persulfate advanced oxidation for hydraulic fracturing return fluid treatment. *Chemosphere*, 313. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.137415>
50. Lutz, G. A., & Dunford, N. T. (2019). Algal treatment of wastewater generated during oil and gas production using hydraulic fracturing technology. *Environmental Technology (United Kingdom)*, 40(8), 1027–1034. <https://doi.org/10.1080/09593330.2017.1415983>
51. Marcela, L., & Moreno, B. (n.d.). GESTIÓN DE RIESGOS AMBIENTALES PARA OLEODUCTOS EN COLOMBIA.
52. Marzouk, S. S., Naddeo, V., Banat, F., & Hasan, S. W. (2021). Preparation of TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> ceramic membranes via dip coating for the treatment of produced water. *Chemosphere*, 273. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.129684>
53. McDevitt, B., Jubb, A. M., Varonka, M. S., Blondes, M. S., Engle, M. A., Gallegos, T. J., & Shelton, J. L. (2022). Dissolved organic matter within oil and gas associated wastewaters from U.S. unconventional petroleum plays: Comparisons and consequences for disposal and reuse. *Science of the Total Environment*, 838. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156331>
54. Mesa, S. L., Orjuela, J. M., Ortega Ramírez, A. T., & Sandoval, J.-A. (2018). Revisión del panorama actual del manejo de agua de producción en la industria petrolera colombiana. *Gestión y Ambiente*, 21(1), 87–98. <https://doi.org/10.15446/ga.v21n1.69792>
55. Resolución 0631 de 2015, (2015).
56. Resolución 1256 de 2021, (November 23, 2021).
57. Montoya-Domínguez, E., & Rojas-Robles, R. (2019). Water Regulations in Colombia democratization or privatization? *Revista Luna Azul*, 49, 126–145. <https://doi.org/10.17151/luaz.2019.49.7>
58. Mousa, I. E. (2016). Total petroleum hydrocarbon degradation by hybrid electrobiochemical reactor in oilfield produced water. *Marine Pollution Bulletin*, 109(1), 356–360. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.05.053>
59. Nagel, S. C., Kassotis, C. D., Vandenberg, L. N., Lawrence, B. P., Robert, J., & Balise, V. D. (2020). Developmental exposure to a mixture of unconventional oil and gas chemicals: A review

- of experimental effects on adult health, behavior, and disease. *Mol Cell Endocrinol*, 513, 110722. <https://doi.org/10.1016/j.mce.2020.110722>
60. Navas, A. (n.d.). OSCAR DARIÓ LA CONSTITUCION ECOLOGICA DE COLOMBIA ANALISIS COMPARATIVO CON EL SISTEMA CONSTITUCIONAL LATINOAMERICANO UNIVERSIDAD EXTERNADO DE COLOMBIA.
61. Nawaz, M. S., Son, H. S., Jin, Y., Kim, Y., Soukane, S., Al-Hajji, M. A., Abu-Ghdaib, M., & Ghaffour, N. (2021). Investigation of flux stability and fouling mechanism during simultaneous treatment of different produced water streams using forward osmosis and membrane distillation. *Water Research*, 198. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117157>
62. Nie, H., Nie, M., Diwu, Z., Wang, L., Yan, H., Lin, Y., Zhang, B., & Wang, Y. (2020). Biological treatment of high salinity and low pH produced water in oilfield with immobilized cells of *P. aeruginosa* NY3 in a pilot-scale. *Journal of Hazardous Materials*, 381. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121232>
63. Nonato, T. C. M., Schöntag, J. M., Burgardt, T., Alves, A. A. de A., Broock, W. F., Dalsasso, R. L., & Sens, M. L. (2018). Combination of electroflotation process and down-flow granular filtration to treat wastewater contaminated with oil. *Environmental Technology (United Kingdom)*, 39(6), 717–724. <https://doi.org/10.1080/09593330.2017.1310306>
64. ONU. (2002). El derecho humano al agua y al saneamiento.
65. ONU. (2022). Más de 2000 millones de personas no tienen acceso a agua potable ni saneamiento básico.
66. ONU. (2023a). AGUA LIMPIA Y SANEAMIENTO. <http://www.un.org/>
67. ONU. (2023b). Objetivo 6: Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos.
68. OPS. (2022). Determinantes ambientales de la salud.
69. Ottaviano, J. G., Cai, J., & Murphy, R. S. (2014). Assessing the decontamination efficiency of a three-component flocculating system in the treatment of oilfield-produced water. *Water Research*, 52, 122–130. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.01.004>
70. Ozgun, H., Ersahin, M. E., Erdem, S., Atay, B., Kose, B., Kaya, R., Altinbas, M., Sayili, S., Hoshan, P., Atay, D., Eren, E., Kinaci, C., & Koyuncu, I. (2013). Effects of the pre-treatment alternatives on the treatment of oil-gas field produced water by nanofiltration and reverse osmosis membranes. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 88(8), 1576–1583. <https://doi.org/10.1002/jctb.4007>
71. Paixão, M. V. G., & Balaban, R. de C. (2018). Application of guar gum in brine clarification and oily water treatment. *International Journal of Biological Macromolecules*, 108, 119–126. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.11.166>

72. Palma-Parra, M., Muñoz-Guerrero, M. N., Pacheco-García, O., Ortiz-Gómez, Y., & Díaz, S. M. (2019). Niños y adolescentes expuestos ambientalmente a mercurio, en diferentes municipios de Colombia. *Revista de la Universidad Industrial de Santander. Salud*, 51(1), 43-52.
73. Parnian, A., Furze, J. N., Parnian, A., & Mayad, E. H. (2021). Water purification plantations for oil and gas industries in Iran. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(45), 64193–64198. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-15819-w>
74. Patni, H., & Rangunathan, B. (2023). Recycling and re-usage of oilfield produced water – A review. *Materials Today: Proceedings*, 77, 307–313. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.11.372>
75. Radio Nacional de Colombia. (2021, August). Ecopetrol aceptó responsabilidad por derrame de crudo en Barrancabermeja en 2018. <https://www.radionacional.co/actualidad/judicial/ecopetrol-acepto-responsabilidad-por-derrame-de-crudo-en-barrancabermeja-en#:~:text=Para%20aquel%20tiempo%20la%20mancha,sobre%20la%20quebrada%20La%20Lizama>.
76. Rahbari-Sisakht, M., Pouranfard, A., Darvishi, P., & Ismail, A. F. (2017). Biosurfactant production for enhancing the treatment of produced water and bioremediation of oily sludge under the conditions of Gachsaran oil field. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 92(5), 1053–1064. <https://doi.org/10.1002/jctb.5081>
77. Rangel-Muñoz, N., González-Barrios, A. F., Pradilla, D., Osma, J. F., & Cruz, J. C. (2020). Novel bionanocompounds: Outer membrane protein a and lacasse co-immobilized on magnetite nanoparticles for produced water treatment. *Nanomaterials*, 10(11), 1–22. <https://doi.org/10.3390/nano10112278>
78. Redmon, J. H., Kondash, A. J., Womack, D., Lillys, T., Feinstein, L., Cabrales, L., Weinthal, E., & Vengosh, A. (2021). Is Food Irrigated with Oilfield-Produced Water in the California Central Valley Safe to Eat? A Probabilistic Human Health Risk Assessment Evaluating Trace Metals Exposure. *Risk Analysis*, 41(8), 1463–1477. <https://doi.org/10.1111/risa.13641>
79. Rehman, K., Imran, A., Amin, I., & Afzal, M. (2018). Inoculation with bacteria in floating treatment wetlands positively modulates the phytoremediation of oil field wastewater. *Journal of Hazardous Materials*, 349, 242–251. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.02.013>
80. Rodríguez-Eugenio, N., McLaughlin, M., & Pennock, D. (2019). La contaminación del suelo: una realidad oculta.
81. Rodríguez-Villamizar, L. A., Jaimes, D. C., Manquián-Tejos, A., & Sánchez, L. H. (2015). Irregularidad menstrual y exposición a mercurio en la minería artesanal del oro en Colombia. *Biomédica*, 35(SPE), 38-45.
82. Rosero-García, D. A. (2020). La biorremediación en Colombia y sus aplicaciones. *Hechos Microbiológicos*, 10(1–2), 39–48. <https://doi.org/10.17533/udea.hm.v10n1a05>
83. Santos, A. S., Marques, A. M. T., Palermo, L. C. M., & Mansur, C. R. E. (2020). Influence of molar mass of partially hydrolyzed polyacrylamide on the treatment of produced water from

- enhanced oil recovery. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 584. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2019.124042>
84. Semai, A., Plewniak, F., Charrié-Duhaut, A., Sayeh, A., Gil, L., Vandecasteele, C., Lopez-Roques, C., Leize-Wagner, E., Bensalah, F., & Bertin, P. N. (2021). Characterisation of hydrocarbon degradation, biosurfactant production, and biofilm formation in *Serratia* sp. Tan611: a new strain isolated from industrially contaminated environment in Algeria. *Antonie van Leeuwenhoek, International Journal of General and Molecular Microbiology*, 114(4), 411–424. <https://doi.org/10.1007/s10482-021-01527-5>
85. Serrano, M., Torrado, L., & Pérez, D. (2013). Impacto de los derrames de crudo en las propiedades mecánicas de suelos arenosos. *Revista Colombiana de Estudios Militares y Estratégicos*, 11(12).
86. Sharghi, E. A., Bonakdarpour, B., Roustazade, P., Amoozegar, M. A., & Rabbani, A. R. (2013). The biological treatment of high salinity synthetic oilfield produced water in a submerged membrane bioreactor using a halophilic bacterial consortium. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 88(11), 2016–2026. <https://doi.org/10.1002/jctb.4061>
87. Sharma, S., Agrawal, V., Akondi, R. N., Wang, Y., & Hakala, A. (2021). Understanding controls on the geochemistry of hydrocarbon produced waters from different basins across the US. In *Environmental Science: Processes and Impacts* (Vol. 23, Issue 1, pp. 28–47). Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/d0em00388c>
88. Silva, M. A. M., Silva, A. F., Rufino, R. D., Luna, J. M., Santos, V. A., & Sarubbo, L. A. (2017). Production of Biosurfactants by *Pseudomonas* Species for Application in the Petroleum Industry. *Water Environment Research*, 89(2), 117–126. <https://doi.org/10.2175/106143016x14609975746280>
89. Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres. (2021). PLAN NACIONAL DE CONTINGENCIA frente a pérdidas de contención de hidrocarburos y otras sustancias peligrosas.
90. Sudmalis, D., Da Silva, P., Temmink, H., Bijmans, M. M., & Pereira, M. A. (2018). Biological treatment of produced water coupled with recovery of neutral lipids. *Water Research*, 147, 33–42. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.09.050>
91. Sumner, A. J., & Plata, D. L. (2020). A geospatially resolved database of hydraulic fracturing wells for chemical transformation assessment. *Environmental Science: Processes and Impacts*, 22(4), 945–955. <https://doi.org/10.1039/c9em00505f>
92. Sun, M., Lowry, G. V., & Gregory, K. B. (2013). Selective oxidation of bromide in wastewater brines from hydraulic fracturing. *Water Research*, 47(11), 3723–3731. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.04.041>
93. Torres, L., Yadav, O. P., & Khan, E. (2018). Risk assessment of human exposure to Ra-226 in oil produced water from the Bakken Shale. *Science of the Total Environment*, 626((Torres L.)

Department of Civil and Environmental Engineering, North Dakota State University, Fargo, ND, United States(Yadav O.P.) Department of Industrial and Manufacturing Engineering, North Dakota State University, Fargo, ND, United States(Khan E., eak), 867–874. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.171>

94. Tran, K. V., Casey, J. A., Cushing, L. J., & Morello-Frosch, R. (2020). Residential proximity to oil and gas development and birth outcomes in California: A retrospective cohort study of 2006–2015 births. *Environmental Health Perspectives*, 128(6). <https://doi.org/10.1289/EHP5842>
95. Tzanakakis, V. A., Capodaglio, A. G., & Angelakis, A. N. (2023). Insights into Global Water Reuse Opportunities. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 15, Issue 17). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/su151713007>
96. UNESCO. (2017). Informe Mundial sobre el desarrollo de los recursos hídricos de las Naciones Unidas 2017: Las aguas residuales: el recurso desaprovechado, cifras y datos.
97. Veil, J. A., Puder, M. G., & Elcock, D. (2004). A white paper describing produced water from production of crude oil, natural gas, and coal bed methane (No. ANL/EA/RP-112631). Argonne National Lab., IL (US).
98. Velásquez, J. (2017). Contaminación de suelos y aguas por hidrocarburos en Colombia. Análisis de la fitorremediación como estrategia biotecnológica de recuperación. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 8(1), 151–167. <https://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/riaa/article/view/1846/2227>
99. Verma, V. K., & Subbiah, S. (2019). Fouling resistant sericin-coated polymeric microfiltration membrane. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 94(11), 3637–3649. <https://doi.org/10.1002/jctb.6169>
100. Webb, J., Coomes, O. T., Mergler, D., & Ross, N. A. (2018). Levels of 1-hydroxypyrene in urine of people living in an oil producing region of the Andean Amazon (Ecuador and Peru). *Int Arch Occup Environ Health*, 91(1), 105–115. <https://doi.org/10.1007/s00420-017-1258-3>
101. Whitney-Williams Hillary Hoffmann, H. M., Whitney-Williams, H., Hoffmann, H. M., & Hoffmann, H. M. (2015). Fracking in Indian Country: The Federal Trust Relationship, Tribal Sovereignty, and the Beneficial Use of Produced Water. In *Yale Journal on Regulation Article* (Vol. 32, Issue 2). <http://digitalcommons.law.yale.edu/yjreghttp://digitalcommons.law.yale.edu/yjreg/vol32/iss2/7>
102. Willis, M. D., Carozza, S. E., & Hystad, P. (2023). Congenital anomalies associated with oil and gas development and resource extraction: a population-based retrospective cohort study in Texas. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, 33(1), 84–93. <https://doi.org/10.1038/s41370-022-00505-x>
103. Wollin, K. M., Damm, G., Foth, H., Freyberger, A., Gebel, T., Mangerich, A., Gundert-Remy, U., Partosch, F., Röhl, C., Schupp, T., & Hengstler, J. G. (2020). Critical evaluation of human health risks due to hydraulic fracturing in natural gas and petroleum production. In *Archives of*

- Toxicology (Vol. 94, Issue 4, pp. 967–1016). Springer. <https://doi.org/10.1007/s00204-020-02758-7>
104. World Health Organization. (2023). Food safety. [https://www.who.int/health-topics/food-safety#tab=tab\\_1](https://www.who.int/health-topics/food-safety#tab=tab_1)
105. Zhang, M., Wang, J., Zhang, Z., Song, Z., Zhang, Z., Zhang, B., Zhang, G., & Wu, W. M. (2016). A field pilot-scale study of biological treatment of heavy oil-produced water by biological filter with airlift aeration and hydrolytic acidification system. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(5), 4919–4930. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-5721-y>
106. Zhang, Y., Yang, K., Dong, Y., Nie, Z., & Li, W. (2021). Chemical characterization of non-volatile dissolved organic matter from oilfield-produced brines in the Nanyishan area of the western Qaidam Basin, China. *Chemosphere*, 268. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128804>
107. Manrique, É. F. A., Penagos, J. G. V., Parrado, S. L. G., Yzquierdo, G. A. R., Rodríguez, R. G. G., & Montoya, J. A. P. (2020). Uso de aguas de producción tratadas de la industria petrolera en sistemas agrícolas y agropecuarios.

## 11. Anexo

### Lista de verificación para revisiones de alcance (PRISMA-ScR).

SECTION	ITEM	PRISMA-ScR CHECKLIST ITEM	REPORTED ON PAGE #
<b>TITLE</b>			
Title	1	Identify the report as a scoping review.	1
<b>ABSTRACT</b>			
Structured summary	2	Provide a structured summary that includes (as applicable): background, objectives, eligibility criteria, sources of evidence, charting methods, results, and conclusions that relate to the review questions and objectives.	2-4
<b>INTRODUCTION</b>			
Rationale	3	Describe the rationale for the review in the context of what is already known. Explain why the review questions/objectives lend themselves to a scoping review approach.	7-18
Objectives	4	Provide an explicit statement of the questions and objectives being addressed with reference to their key elements (e.g., population or participants, concepts, and context) or other relevant key elements used to conceptualize the review questions and/or objectives.	19
<b>METHODS</b>			
Protocol and registration	5	Indicate whether a review protocol exists; state if and where it can be accessed (e.g., a Web address); and if available, provide registration information, including the registration number.	NA
Eligibility criteria	6	Specify characteristics of the sources of evidence used as eligibility criteria (e.g., years considered, language, and publication status), and provide a rationale.	20
Information sources*	7	Describe all information sources in the search (e.g., databases with dates of coverage and contact with authors to identify additional sources), as well as the date the most recent search was executed.	20
Search	8	Present the full electronic search strategy for at least 1 database, including any limits used, such that it could be repeated.	20
Selection of sources of evidence†	9	State the process for selecting sources of evidence (i.e., screening and eligibility) included in the scoping review.	20
Data charting process‡	10	Describe the methods of charting data from the included sources of evidence (e.g., calibrated forms or forms that have been tested by the team before their use, and whether data charting was done independently or in duplicate) and any processes for obtaining and confirming data from investigators.	20

Data items	11	List and define all variables for which data were sought and any assumptions and simplifications made.	20
Critical appraisal of individual sources of evidence§	12	If done, provide a rationale for conducting a critical appraisal of included sources of evidence; describe the methods used and how this information was used in any data synthesis (if appropriate).	20
Synthesis of results	13	Describe the methods of handling and summarizing the data that were charted.	21
<b>RESULTS</b>			
Selection of sources of evidence	14	Give numbers of sources of evidence screened, assessed for eligibility, and included in the review, with reasons for exclusions at each stage, ideally using a flow diagram.	22 - 49
Characteristics of sources of evidence	15	For each source of evidence, present characteristics for which data were charted and provide the citations.	22 - 49
Critical appraisal within sources of evidence	16	If done, present data on critical appraisal of included sources of evidence (see item 12).	22 - 49
Results of individual sources of evidence	17	For each included source of evidence, present the relevant data that were charted that relate to the review questions and objectives.	22 - 49
Synthesis of results	18	Summarize and/or present the charting results as they relate to the review questions and objectives.	22 - 49
<b>DISCUSSION</b>			
Summary of evidence	19	Summarize the main results (including an overview of concepts, themes, and types of evidence available), link to the review questions and objectives, and consider the relevance to key groups.	50-56
Limitations	20	Discuss the limitations of the scoping review process.	56
Conclusions	21	Provide a general interpretation of the results with respect to the review questions and objectives, as well as potential implications and/or next steps.	57
<b>FUNDING</b>			
Funding	22	Describe sources of funding for the included sources of evidence, as well as sources of funding for the scoping review. Describe the role of the funders of the scoping review.	NA

NA: No aplica