

DISEÑO DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUA DE PRODUCCIÓN DEL  
CAMPO RUBIALES PARA DISPOSICIÓN EN RIEGO

YURLENI FERNANDA ARCILA GÓMEZ  
LAURA MARCELA VARGAS DÍAZ

Proyecto Integral de grado para optar el título de  
Ingeniero Químico

Directora de proyecto:  
Angie Tatiana Ortega Ramírez  
Ingeniera química  
Ingeniera de petróleos

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS  
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BOGOTA D.C

2021

**NOTA DE ACEPTACIÓN**

---

---

---

---

---

---

---

Dra. Angie Tatiana Ramírez Ortega

---

Dr. Iván Ramírez

---

Dra. Diana Cuesta

Bogotá D.C., febrero de 2021

## **DIRECTIVOS DE LA UNIVERSIDAD**

Presidente de la Universidad y Rector del Claústro

**Dr. MARIO POSADA GARCÍA-PEÑA**

Consejero Institucional

**Dr. LUIS JAIME POSADA GARCÍA-PEÑA**

Vicerrectora Académica y de Investigaciones

**Dra. MARIA CLAUDIA APONTE GONZÁLEZ**

Vicerrector Administrativo y Financiero

**Dr. RICARDO ALFONSO PEÑARANDA CASTRO**

Secretaria General

**Dra. ALEXANDRA MEJÍA GUZMÁN**

Decano de la Facultad de Ingeniería

**Ing. JULIO CÉSAR FUENTES ARISMENDI**

Director de Programa Ingeniería Química

**Ing. NUBIA LILIANA BECERRA OSPINA**

## DEDICATORIA

Quiero agradecer primeramente a Dios y a la Virgen por sostenerme en todo este camino. Dedico este proyecto a toda mi familia, en especial a mis padres Gildardo Arcila y Rosario Gómez, también a mi hermano Kevin Arcila quienes Dios sabe el esfuerzo tan grande que han hecho para acompañarme, soportarme y poderme dar todo el apoyo que siempre necesité, por ser mi sustento día a día, los amo. De paso quiero agradecer a mi compañera de tesis y amiga Laura por ser mi aliento durante este año, siempre te lo dije: “No sé qué hubiera hecho sin ti”, a los amigos y casi hermanos que conocí en estos cinco años de carrera, agradezco a cada una de las personas con las que me encontré en este camino y de las que aprendí cosas increíbles, de cada uno me llevo un pedazo que siempre tendré en mi corazón.

También quiero agradecer a ese amigo incondicional que fue testigo de todo mi proceso y siempre me hacía compañía en las noches de estrés, siempre estaré para ti.

Gracias por impulsarme, por apoyarme, por acompañarme, por ayudarme a crecer cada día y enseñarme a valorar cada momento y cada persona. Los amo a todos.

- *Yurleni Fernanda Arcila Gómez*

Dedico este trabajo de grado a mis padres, mis hermanas y a toda mi familia por apoyarme en todos mis proyectos y sueños, porque gracias a ellos me he convertido en una gran mujer y una gran profesional. A mi compañera y amiga Ferchis por toda su dedicación, compromiso, comprensión, fé y apoyo emocional e incondicional.

A una persona muy especial por estar siempre a mi lado en los momentos difíciles y por darme todo su amor siempre. A Milú por alegrarme en los días complicados. A todos mis amigos con los cuales he vivido maravillosos momentos.

Finalmente, esto no hubiera sido posible sin mi mayor pasión, “la música” que me llena de felicidad en la vida y me ha llevado a ser la persona que hoy soy.

- *Laura Marcela Vargas Díaz*

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradecemos a todos los docentes de la Fundación Universidad de América por transmitirnos sus conocimientos y especialmente a la ingeniera Angie Tatiana Ortega Ramírez por apoyarnos y guiarnos durante todo este proceso, gracias por la paciencia y la dedicación que nos brindó para la conclusión de este proyecto de grado.

Al ingeniero Josué Romanos por confiar en nosotras, brindarnos una oportunidad y darnos todo el apoyo técnico para poder concluir de la mejor manera este proceso.

Al ingeniero Luis Figueroa y Harvey Arévalo por su tiempo y dedicación en el desarrollo de este proyecto.

Al ingeniero Fernando Cortés y Mauricio Goyeneche por su apoyo a lo largo de todo este proceso.

Y en general a todas las personas e ingenieros que fueron partícipes en este proyecto de grado. Muchas gracias a todos.

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

## TABLA DE CONTENIDO

	pág.
RESUMEN	15
INTRODUCCIÓN	16
OBJETIVOS	18
1.MARCO TEÓRICO	19
1.1. Agua de producción	19
1.2. Propiedades fisicoquímicas del agua de producción	20
1.2.1. Salinidad e iones inorgánicos.	21
1.2.2. Carbono orgánico total	21
1.2.3. Ácidos orgánicos	21
1.2.4. Hidrocarburos de petróleo.	22
1.2.5. Metales	23
1.2.6. Radioisótopos.	24
1.2.7. Aditivos o productos químicos	24
1.3. Tratamiento de agua de producción	28
1.3.1. Tratamiento físico	28
1.3.2. Tratamiento químico	31
1.3.3. Tratamiento biológico	35
1.3.4. Tratamiento de membrana	36
1.4. Agua de riego	37
1.5. Marco legal	38
1.5.1. Resolución 1207 del 2014	38
1.5.2. Decreto 3930 de 2010	41
1.5.3. Decreto 1076 de 2015	41
1.5.4. Ley 373 de 1997	42
2. DIAGNÓSTICO DEL PROCESO ACTUAL DEL TRATAMIENTO DEL AGUA DE PRODUCCIÓN DEL CAMPO RUBIALES	43
2.1. Generalidades del campo Rubiales	43
2.1.1. Historia del campo Rubiales	43
2.1.2. Localización geográfica	44
2.2. Volúmenes de producción	45
2.3. Características del agua de producción del campo Rubiales	45
2.4. Sistema de tratamiento actual	49

	pág.
2.4.1. Descripción general del tratamiento de agua de producción	49
2.5. Disposición actual del agua de producción del campo Rubiales	58
2.5.1. Inyección a formación no productora o sin efecto de recobro	58
2.5.2. Vertimiento superficial	58
2.5.3. Reutilización y reúso	58
3. DESARROLLO DE LA MATRIZ MULTICRITERIO PARA LA SELECCIÓN DE PROCESOS	60
3.1. Generalidades de una matriz multicriterio	60
3.2. Tipos de análisis de matriz multicriterio	62
3.3. Desarrollo del análisis multicriterio	666
3.3.1. Proceso analítico jerárquico (AHP)	666
3.3.2. Parámetros de la matriz	69
3.4. Identificación de las alternativas (tecnología de tratamiento)	733
3.4.1. Osmosis inversa	744
3.4.2. Oxidación avanzada foto fenton	744
3.4.3. Electrodiálisis	744
3.4.4. Humedales artificiales	755
3.4.5. Filtros de carbón activado	755
3.5. Selección de la tecnología de tratamiento mediante el uso del software superdecisions	777
4. SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO SELECCIONADO PARA EL CAMPO RUBIALES	900
4.1. Unidad de celda de flotación por aire inducido	900
4.1.1. Validación unidad celda de flotación	103
4.2. Unidad de filtro cáscara nuez	106
4.2.1. Validación unidad filtro cáscara nuez	111
4.3. Unidad de decantación	1122
4.3.1. Validación unidad de decantación	115
4.4. Sistema de osmosis inversa	117
4.4.1. Pretratamientos	1177
4.4.2. Unidad de ósmosis inversa	120
5. EVALUACIÓN DEL COSTO DE LA ALTERNATIVA SELECCIONADA	126
5.1. Costos de equipos	126



	pág.
5.2. Costos operacionales	127
5.2.1. Costos energéticos	127
5.2.2. Mano de obra y mantenimiento	128
5.2.3. Costos totalizados	128
6. CONCLUSIONES	130
BIBLIOGRAFÍA	1322
ANEXOS	151

## LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura No. 1. Esquema de un reservorio típico	19
Figura No. 2. Localización del campo Rubiales	45
Figura No. 3. Sistema de skim tanks y bombeo de agua	50
Figura No. 4. Diagrama del proceso de los trenes de tratamiento 1, 2 y 3	52
Figura No. 5. Diagrama del proceso de los trenes de tratamiento 4, 5, 6 y 7	54
Figura No. 6. Diagrama del proceso de los trenes de tratamiento 8, 9, 10, 11, 12, 13 y 14	56
Figura No. 7. Diagrama del proceso de los trenes de tratamiento 15, 16, 17 y 18	57
Figura No. 8. Disposición final actual del agua de producción del campo Rubiales	59
Figura No. 9. Esquema de un problema de decisión	61
Figura No. 10. Construcción de jerarquías	67
Figura No. 11. Jerarquización de elementos de la matriz de decisión multicriterio	83
Figura No. 12. Entorno software Superdecisions	84
Figura No. 13. Pestaña de juicios del software Superdecisions	84
Figura No. 14. Calificación de las tecnologías en el subcriterio de porcentaje de remoción de iones	85
Figura No. 15. Calificación de las tecnologías en el subcriterio de porcentaje de remoción de metales pesados	86
Figura No. 16. Resultado de la priorización de alternativas según matriz multicriterio	87
Figura No. 17. Resultado priorización de alternativas según los expertos	88
Figura No. 18. Ponderación final de las alternativas de tratamiento	89
Figura No. 19. Entorno inicial de la simulación de la celda de flotación	98
Figura No. 20. Ingreso de parámetros de operación iniciales	99
Figura No. 21. Resultados de la simulación de la celda de flotación por aire inducido	102
Figura No. 22. Desviación estándar del tiempo de residencia celda de flotación	104
Figura No. 23. Desviación estándar del porcentaje de remoción celda de flotación	106

	pág.
Figura No. 24. Resultados de la simulación de la unidad de filtro cáscara nuez	110
Figura No. 25. Desviación estándar del porcentaje de remoción filtro cáscara nuez	112
Figura No. 26. Simulación del decantador en Aspen Hysys	114
Figura No. 27. Desviación estándar porcentaje de remoción del separador trifásico	116
Figura No. 28. Pestaña de análisis del agua de ingreso	122
Figura No. 29. Configuración del sistema de osmosis inversa	123

## LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla No. 1. Componentes presentes en el agua de producción	25
Tabla No. 2. Lista de los procesos de oxidación avanzada	34
Tabla No. 3. Criterios para uso agrícola según normativa	39
Tabla No. 4. Características del agua de producción de campo Rubiales	46
Tabla No. 5. Tipos de análisis de matriz multicriterio	62
Tabla No. 6. Escala de Saaty	68
Tabla No. 7. Recopilación bibliográfica de los subcriterios cuantitativos para cada tecnología	75
Tabla No. 8. Recopilación bibliográfica de capacidad por tecnología	76
Tabla No. 9. Información de los expertos encuestados	77
Tabla No. 10. Valoración de los criterios	78
Tabla No. 11. Valoración de priorización de alternativas	80
Tabla No. 12. Calificación de impactos a los criterios ambientales	80
Tabla No. 13. Valoración de expertos a criterios sociales	82
Tabla No. 14. Dimensiones y especificaciones de la celda de flotación	93
Tabla No. 15. Datos de diseño de la celda de flotación calculados	95
Tabla No. 16. Eficiencia total de la celda de flotación	96
Tabla No. 17. Recopilación de datos de tiempo de residencia para la celda de flotación	103
Tabla No. 18. Recopilación de datos de porcentaje de remoción para la celda de flotación	105
Tabla No. 19. Datos de diseño del filtro cáscara nuez calculados	108
Tabla No. 20. Recopilación de datos de porcentaje de remoción para el filtro cáscara nuez	111
Tabla No. 21. Composición agua de retrolavado	113
Tabla No. 22. Composición de las corrientes de salida del decantador	114
Tabla No. 23. Recopilación de datos eficiencia para un separador trifásico	115
Tabla No. 24. Información general membrana de ósmosis inversa	120
Tabla No. 25. Parámetros de operación de la membrana	121
Tabla No. 26. Parámetros del sistema de ósmosis	122
Tabla No. 27. Especificaciones por etapa	123
Tabla No. 28. Resultados de la simulación	124

	pág.
Tabla No. 29. Costo de equipos de la unidad de ósmosis inversa	126
Tabla No. 30. Costos energéticos de la unidad de ósmosis inversa	127
Tabla No. 31. Costo de mano de obra para la unidad de ósmosis inversa	128
Tabla No. 32. Costos totales anualizados de la unidad de ósmosis inversa	1288

## LISTA DE ABREVIATURAS

<b>BTEX:</b>	Benceno, tolueno, etilbenceno y xileno
<b>COD:</b>	Demanda química de oxígeno
<b>CPF:</b>	Central process facilities
<b>DBO:</b>	Demanda biológica de oxígeno
<b>DQO:</b>	Demanda química de oxígeno
<b>ECw:</b>	Conductividad eléctrica
<b>ED:</b>	Electrodialisis
<b>EDR:</b>	Electrodialisis inversa
<b>HAP:</b>	Hidrocarburos aromáticos policíclicos
<b>KBWPD:</b>	Kilo barriles de agua por día
<b>LSI:</b>	Índice de saturación Langelier
<b>NORM:</b>	Material radiactivo natural
<b>POA:</b>	Procesos de oxidación avanzada
<b>ppb:</b>	Partes por billón
<b>PRTLGV:</b>	Plan de reconversión a tecnologías limpias en gestión de vertimientos
<b>RO:</b>	Ósmosis inversa
<b>SAR:</b>	Relación de adsorción de sodio
<b>SDI:</b>	Índice de densidad de sedimentos
<b>TDS:</b>	Sólidos disueltos totales
<b>TOC:</b>	Carbono orgánico total
<b>US:</b>	Ultrasonido
<b>UV:</b>	Ultravioleta
<b>WOR:</b>	Relación agua/petróleo

## RESUMEN

En este proyecto investigativo se desarrolla una propuesta para el sistema de tratamiento actual del CPF-2 del campo Rubiales. Cuyo propósito es obtener agua de producción tratada, que cumpla con los parámetros de calidad establecidos en la Resolución 1207 del 2014 para uso en actividad agrícola. Para la selección de la alternativa de tratamiento de pulido se realiza una matriz de decisión multicriterio AHP la cual evalúa las alternativas con respecto a criterios de tipo técnico, económico, ambiental y social, adicionalmente se considera un componente subjetivo dado por un grupo de expertos y una revisión bibliográfica robusta, obteniendo como la opción más favorable la ósmosis inversa. Posteriormente se realiza una simulación cuantitativa estacionaria que busca validar el sistema de tratamiento actual y diseñar una propuesta para la unidad de ósmosis inversa. Los resultados obtenidos a la salida de la ósmosis inversa presentan una composición de calidad óptima para la disposición del agua en riego. Finalmente se realiza una evaluación del costo anual del sistema de ósmosis inversa considerando el costo de inversión en equipos, la mano de obra y el costo energético.

**PALABRAS CLAVE:** Agua de producción, ósmosis inversa, simulación, tratamiento de agua, riego.

## INTRODUCCIÓN

La industria del petróleo actualmente produce una alta cantidad de agua durante la extracción de hidrocarburos, aproximadamente más de 300 millones de barriles de agua se producen diariamente a nivel mundial [1]. En promedio se generan de 3 a 5 barriles de agua por cada barril de petróleo, correspondiente a un corte de más del 60% del agua, sin embargo, en pozos considerados como maduros esta cifra puede aumentar hasta una relación entre 10 y 14 barriles de agua [2] [3] En el año 2019 la cantidad de agua de producción generada por la empresa Ecopetrol fue de 398,24 millones de metros cúbicos (2504 millones de barriles), donde aproximadamente el 43,7% equivale al agua producida en el campo Rubiales [4] Generalmente esta contiene aceites y compuestos orgánicos solubles y no solubles, sólidos suspendidos y disueltos, metales pesados y varias sustancias químicas utilizados para el proceso de producción de petróleo [5]. En el 2019 el volumen total de efluentes generado por las operaciones de Ecopetrol fue de 429,14 millones de metros cúbicos (2699 millones de barriles), los cuales incluyen: agua de producción (92,8%) y agua residual industrial (7,2%) (Ecopetrol, 2019). Las alternativas actuales de gestión de estos efluentes son: inyección para recobro mejorado (71,01 millones de metros cúbicos, es decir, 446 millones de barriles de agua), inyección a formación no productora o sin efecto de recobro (249,6 millones de metros cúbicos, que equivalen a 1569 millones de barriles de agua), vertimiento superficial (90,05 millones de metros cúbicos, es decir, 755 millones de barriles), reutilización (17,62 millones de metros cúbicos, equivalente a 110 millones de barriles de agua) y finalmente reúso (1,2 millones de metros cúbicos, es decir, 7 millones de barriles de agua)

El alto volumen de agua de producción generado a diario en el Campo Rubiales aproximadamente de 476962 metros cúbicos por día [4] (3 millones de barriles) ha llevado a optar por las alternativas de gestión mencionadas previamente. Sin embargo, los problemas de este tipo de alternativas están asociados a la falta de aprovechamiento sostenible del recurso hídrico.

Por este motivo el presente proyecto de investigación propone el diseño de un sistema de tratamiento de agua de producción del campo Rubiales para uso en riego, con el fin de ofrecer a la empresa una oportunidad para la utilización del alto volumen de agua de producción generado a diario en este campo, dándole al agua producida un valor agregado para la industria, que pueda ayudar a reducir el estrés hídrico de la



región Orinoquía en periodos de sequía [6], promoviendo la conservación de fuentes de agua dulce y generando un beneficio económico para la empresa.

## OBJETIVOS

### **Objetivo general:**

Diseñar un sistema de tratamiento de agua de producción del campo Rubiales para disposición en riego.

### **Objetivos específicos:**

1. Diagnosticar el proceso actual del tratamiento del agua de producción del campo Rubiales.
2. Establecer un sistema de tratamiento de agua de producción del campo Rubiales mediante una matriz de selección de procesos.
3. Simular los procesos y variables del sistema de tratamiento de agua de producción seleccionado mediante una simulación cuantitativa con modelo estacionario.
4. Evaluar el costo de la alternativa seleccionada.

## 1. MARCO TEÓRICO

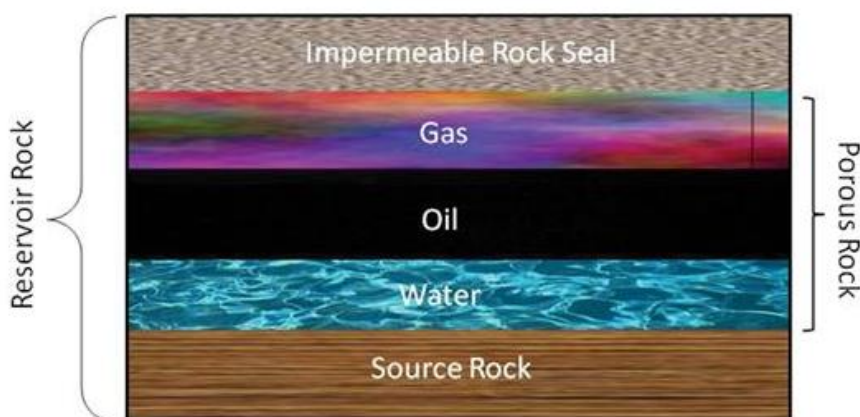
En este capítulo se presentan temáticas pertinentes para la contextualización y desarrollo del trabajo de grado, entre ellos, la descripción teórica del agua de producción y sus propiedades fisicoquímicas, además de esto los tipos de tratamiento y tecnologías convencionales y no convencionales de tipo físico, químico, biológico y de membranas, finalmente se concluye con la descripción del agua de riego y el marco legal referente al estudio del caso.

### 1.1. Agua de producción

El agua de producción, también denominada de formación es aquella que se produce junto con el petróleo y el gas [7], esta suele ser agua dulce o de mar ligeramente ácida y se encuentra debajo de los hidrocarburos en los medios de depósito geológicos que consisten en una formación de roca sedimentaria porosa entre capas de roca impermeable dentro de la corteza terrestre, como se ilustra en la Figura No. 1.

#### Figura No. 1.

*Esquema de un reservorio típico*



**Nota.** Imagen en la cual se ilustra la ubicación del agua de producción en un reservorio. Tomado de: I. Ebenezer-T. y G. Z. Chen, Produced water treatment technologies, International Journal of Low-Carbon Technologies, Vol 9, (3), pp 157–177, 2014. [En línea] Disponible en: <https://academic.oup.com/ijlct/article/9/3/157/807670?keytype=ref&ijkey=e6u2Aot0TtUML26> DOI: <https://doi.org/10.1093/ijlct/cts049>

El agua dulce, el agua de mar / salmuera y los productos químicos de producción a veces se inyectan en un depósito para mejorar tanto las tasas de recuperación como la seguridad de las operaciones y estas aguas superficiales y productos químicos a veces penetran en la zona de producción y se recuperan con petróleo y gas durante la producción [8]

Los depósitos de petróleo comúnmente contienen mayores volúmenes de agua que los depósitos de gas, esto se debe principalmente a la mayor capacidad de compresión y sorción del gas [9]

Podemos encontrar dos tipos de agua de producción:

- Agua de producción “buena”: Esta es aquella que se produce en el pozo a una tasa inferior del límite económico de la relación agua/petróleo (WOR). Es una consecuencia inevitable y no se puede cortar sin perder reservas. Este tipo de agua se genera cuando el flujo de petróleo y agua se mezcla a través de la matriz de formación.
- Agua de producción “mala”: Se define como aquella que se produce en el pozo y no produce petróleo o no el suficiente para pagar el costo del manejo de esta, es decir, se produce por encima del límite económico WOR. [10]

## **1.2. Propiedades fisicoquímicas del agua de producción**

Como el agua de producción ha estado en contacto con formaciones que contienen hidrocarburos, suele ser una mezcla compleja que consta de componentes orgánicos polares y no polares, cationes inorgánicos (como, por ejemplo, magnesio, calcio y hierro) y aniones (como carbonatos y sulfato de bromuro) y además de esto algunas otras sustancias como metales pesados (bario, uranio, cadmio, cromo y plomo) [11].

Las propiedades físicas y químicas del agua de producción varían dependiendo de la edad geológica, profundidad y la geoquímica de la formación, así como también de la composición química de las fases de petróleo y gas en el pozo. Debido a que no se encuentran dos tipos de agua de producción iguales, se deben realizar estudios específicos de la región para abordar los riesgos ambientales asociados a su descarga [8].

Los componentes presentes en el agua de producción son:

### **1.2.1. Salinidad e iones inorgánicos**

La concentración de sal en el agua de producción, puede variar entre unas partes por mil hasta en algunos casos alcanzar un valor similar al de una salmuera saturada [8]. Se debe tener en cuenta que cuando la fuente de agua tiene una alta cantidad de sales, existe un mayor potencial de daño por sal a niveles más bajos de SAR. Dada la naturaleza salina del agua de producción con alto contenido de sodio, el SAR y el EC<sub>w</sub> son parámetros importantes que se deben monitorear antes de reutilizar, esto se debe a que, a mayores concentraciones de sal, la actividad biológica del sistema disminuye en consecuencia a los efectos tóxicos asociados a la acumulación de sales [12]. Los iones inorgánicos más abundantes en el agua producida con alta salinidad son, en orden de abundancia relativa, sodio, cloruro, calcio, magnesio, potasio, sulfato, bromuro, bicarbonato y yoduro [8]

### **1.2.2. Carbono orgánico total**

El carbono orgánico total (TOC) es la cantidad de carbono orgánico presente en una roca fuente expresado como un porcentaje en peso. Es un indicador de la cantidad total de materia orgánica presente en el sedimento y se utiliza como indicador de la riqueza de la fuente con respecto a la cantidad de hidrocarburos que puede generar ese sedimento [13], en el agua de producción esta composición varía de menos de 0,1 a más de 11000 mg/L y es muy variable de un pozo a otro [8].

### **1.2.3. Ácidos orgánicos**

Los ácidos orgánicos en el agua producida son ácidos mono y di-carboxílicos (COOH) de hidrocarburos saturados (alifáticos) y aromáticos. Gran parte del TOC en el agua de producción consiste en una mezcla de ácidos carboxílicos de bajo peso molecular, como los ácidos fórmico, acético, propanoico, butanoico, pentanoico y hexanoico. El ácido orgánico presente en mayor proporción generalmente es el ácido fórmico o acético y su abundancia generalmente disminuye con el aumento del peso molecular. Los ácidos orgánicos de bajo peso molecular son fácilmente biosintetizados y biodegradados por bacterias, hongos y plantas, y por lo tanto representan nutrientes para el crecimiento del fitoplancton y zooplancton. Los ácidos orgánicos se producen por pirólisis hidratada o degradación microbiana de hidrocarburos [8]

#### **1.2.4. Hidrocarburos de petróleo**

Los hidrocarburos de petróleo, son compuestos orgánicos que consisten en una composición solo de carbono e hidrógeno, suelen ser los químicos de mayor preocupación ambiental en el agua de producción. Los hidrocarburos de petróleo se clasifican en dos grupos principales: hidrocarburos saturados e hidrocarburos aromáticos. La solubilidad de los hidrocarburos de petróleo en el agua disminuye a medida que aumenta su peso molecular. Los hidrocarburos aromáticos son más solubles en agua que los hidrocarburos saturados del mismo peso molecular, además, suelen aparecer en forma de aceites disueltos y dispersos, como gotas de aceite. A continuación, se realizará una descripción más detallada de los hidrocarburos presentes en el agua de producción.

**1.2.4.i. BTEX.** En [8] los hidrocarburos más abundantes en el agua de producción son los hidrocarburos aromáticos de un anillo, es decir, benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos e hidrocarburos saturados de bajo peso molecular. Los compuestos BTEX pueden estar presentes en el agua de producción no tratada con concentraciones tan altas como 600 mg/L. Además de esto, el agua de producción también contiene pequeñas cantidades de bencenos C3 y C4. El benceno generalmente es más abundante y la concentración disminuye con el aumento de la alquilación. Debido a que los BTEX son extremadamente volátiles, se pierden rápidamente durante el tratamiento realizado al agua.

**1.2.4.ii. Hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP).** Son hidrocarburos que contienen dos o más anillos aromáticos fusionados. Para [8] estos son los hidrocarburos de mayor preocupación ambiental debido a su toxicidad y persistencia en los ecosistemas marinos. Estos consisten principalmente en congéneres más solubles en agua, los HAP de 2 y 3 anillos, como naftaleno, fenantreno y sus homólogos de alquilo, los HAP de mayor peso molecular, es decir, de 4 a 6 anillos, rara vez se detectan en el agua de producción después de un tratamiento adecuado. Debido a sus bajas solubilidades se encuentran como aceite disperso.

**1.2.4.iii. Fenoles.** En [15] se expresa que los fenoles son el resultado de varias reacciones químicas. En el agua de producción los fenoles más abundantes son el fenol, metilfenol y dimetilfenol. La abundancia de alquilfenoles generalmente disminuye logarítmicamente con el aumento del número de carbonos de alquilo. Los

alquilfenoles de cadena larga con siete a nueve carbonos de alquilo son los fenoles más tóxicos exhibiendo una fuerte alteración endocrina. Como lo expresa [16] fenoles son de gran relevancia en la disposición final del agua de producción debido a que su presencia en el medio ambiente representa un riesgo importante para la biota acuática, pues es un compuesto muy persistente y letal a bajas concentraciones (5 - 25 mg/L), lo que representa un riesgo para la salud humana.

### **1.2.5. Metales**

El agua de producción puede contener varios metales en forma disuelta o microparticulada. El tipo, concentración y especies químicas de metales presentes en el agua de producción de las diferentes fuentes son variables, dependen de la edad y geología de las formaciones a partir de las cuales se producen el petróleo y el gas, además de esto también de la cantidad y la composición química inorgánica del agua inyectada en el pozo. Algunos metales pueden estar presentes en el agua de producción en diferentes concentraciones, aunque estos suelen estar en proporciones sustancialmente más altas que las de un agua de mar natural limpia. Los metales encontrados en mayor abundancia incluyen bario, hierro, manganeso, mercurio y zinc. Cuando el agua de producción con un alto contenido de hierro y manganeso (anóxica) es llevada a la superficie y expuesta a la atmósfera, estos metales precipitan como oxihidróxidos de hierro y manganeso. Otros metales presentes en el agua producida pueden coprecipitarse con hierro y manganeso y dispersarse, adsorberse o incluso formarse complejos con óxidos de Fe y Mn hidratados [8]. La concentración de los metales pesados en el agua de producción es a menudo más alta que en la de mar, y su toxicidad es menor que la de los compuestos orgánicos no polares [3]. Los metales pesados con mayor presencia Na, Ca, Mg, Fe, Sr, Cr, As y Hg, entre otros, representan un problema cuando se intenta reinyectar el agua de producción, debido a que pueden causar taponamiento de los poros del yacimiento y ocasionar daños a la formación [17]. La presencia de metales pesados en el agua de producción que se descarga en medios marinos generalmente no tiene un impacto negativo [18], sin embargo, la presencia de estos en agua de riego representa un riesgo importante para la agricultura y salud humana, debido a su carácter no biodegradable, la toxicidad y su biodisponibilidad [19]

### **1.2.6. Radioisótopos**

El material radiactivo natural (NORM) está presente en el agua de producción, los radionucleidos NORM más abundantes en el agua son los elementos radiactivos naturales, radio-226 y radio-228 ( $^{226}\text{Ra}$  y  $^{228}\text{Ra}$ ). El radio se deriva de la desintegración radiactiva del uranio-238 y el torio-232 asociado con ciertas rocas y arcillas en el depósito de hidrocarburos. La concentración de radionúclidos, como el radio, en medios ambientales se mide como la tasa de desintegración radiactiva (número de desintegraciones por minuto) [8]

### **1.2.7. Aditivos o productos químicos**

En el agua de producción según [8] se encuentran disponibles altas cantidades de aditivos especiales, también llamados, productos químicos de tratamiento, estos son usados en el sistema de producción de un pozo con el fin ayudar en el proceso de recuperación y bombeo de hidrocarburos, protegiendo el sistema de la corrosión, además de esto, facilitan la separación de petróleo, gas y agua y previenen la formación de hidrato de metano (“hielo”) en los sistemas de producción de gas. Normalmente, estos incluyen biocidas, inhibidores de incrustaciones, rompedores de emulsión y productos químicos para el tratamiento de gases. Muchos de estos químicos son más solubles en aceite que en agua, por lo tanto, permanecen en la fase aceitosa. Otros son solubles en agua y se eliminan en el tratamiento. La mayoría de los aditivos o productos químicos se encuentran en bajas concentraciones en el agua de producción.

En la Tabla No. 1, se recopilan los componentes principales presentes en el agua de producción junto con sus concentraciones:



**Tabla No. 1.***Componentes presentes en el agua de producción*

<b>COMPONENTE</b>	<b>CONCENTRACIÓN (mg/L)</b>
Sodio (Na)	0 - 150000
Cloro (Cl)	0 - 250000
Bario (Ba)	0 - 850
Estroncio (Sr)	0 - 6250
Anión sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ )	0 - 15000
Bicarbonato ( $\text{HCO}_3$ )	0 - 15000
Calcio (Ca)	0 - 74000
Potasio (K)	24 - 4300
Anión sulfito ( $\text{SO}_3^{2-}$ )	10
Magnesio (Mg)	8 - 6000
Hierro (Fe)	0,1 - 100
Aluminio (Al)	310 - 410
Boro (B)	5 - 95
Cromo (Cr)	0,02 - 1,1
Litio (Li)	3 - 50
Manganeso (Mn)	0,004 - 175
Titanio (Ti)	0,01 - 0,7
Zinc (Zn)	0,01 - 35
Arsénico (As)	0,005 - 0,3

**Tabla No. 1.** Continuación

Plomo (Pb)	0,008 - 0,88
Sólidos disueltos totales (TDS)	100 - 400000
Demanda química de oxígeno (COD)	1220 - 2600
Sólidos suspendidos totales (TSS)	1,2 - 1000
Carbono orgánico total (TOC)	0 - 1500
Total O&G	2 - 560
Hidrocarburos saturados	17 - 30
Total BTEX	0,73 - 24,1
Benceno	0,032 - 14,97
Tolueno	0,058 - 5,86
Etilbenceno	0,086 - 0,57
m - xileno	0,258 - 1,29
p - xileno	0,074 - 0,34
o - xileno	0,221 - 1,06
Total NPD	0,766 - 10,4
Naftaleno	0,194 - 0,841
C1 - Naftalenos	0,309 - 2,9
C2 - Naftalenos	0,145 - 3,21
C3 - Naftalenos	0,056 - 2,08
Fenantreno	0,009 - 0,27
C1 - Fenantrenos	0,017 - 0,32

**Tabla No. 1.** Continuación

C2 – Fenantrenos	0,014 - 0,365
C3 - Fenantrenos	0,009 - 0,27
Dibenzotiofeno	0,001 - 0,023
C1 - Dibenzotiofeno	0,006 - 0,103
C2 - Dibenzotiofeno	0,004 - 0,12
C3 - Dibenzotiofeno	0,003 - 0,089
Total 16 EPA NAH	0,0058 - 0,129
Fluoreno	0,0041 - 0,067
Acenafteno	0,0003 - 0,015
Criseno	0,006 - 0,015
Nitrógeno amoniacal	10 - 300
Fenoles	0,009 - 23
Ácidos orgánicos totales	0,001 - 10000
Ácido fórmico	26 - 584
Ácido acético	8 - 5735
Ácido propanoico	36 - 98
Ácido butanoico	ND - 46
Ácido pentanoico	ND - 33
Ácido oxálico	ND - 495
Ácido malónico	ND - 1540
Ácidos alifáticos	1,8 - 120

**Tabla No. 1.** Continuación

Ácido benzoico	0,13 - 16
C1 - Ácido benzoico	0,089 - 16
C2 - Ácido benzoico	0,043 - 3.8

**Nota.** En esta tabla se muestran los componentes presentes en el agua de producción junto con sus concentraciones. Tomado de: S. Jiménez et al, "State of the art of produced water treatment," Chemosphere, vol. 192, pp. 186-208, 2018. [En línea] Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045653517317241> DOI: 10.1016/j.chemosphere.2017.10.139

### **1.3. Tratamiento de agua de producción**

Los requerimientos para el tratamiento del agua de producción, dependen específicamente de su origen, su condición y la alternativa de descarga final [20]. Para cumplir con los objetivos de eliminación y disminución de los compuestos mencionados previamente, es necesaria la aplicación de tratamientos de tipo físico, biológico y químico independientes o híbridos para la gestión del agua producida [9].

Los tratamientos convencionales incluyen separadores de agua libre, separadores de tres fases, tanques desnatadores, interceptores de placas paralelas, celdas de flotación, coalescedores e hidrociclones [20]. En cuanto a los tratamientos de pulido se comprenden sistemas modulares de carbón activado granular, torre compacta con aire burbujeante, membranas poliméricas de nanofiltración y ósmosis inversa, irradiación por lámparas UV, oxidación con ozono y/o peróxido de hidrógeno [13].

#### **1.3.1. Tratamiento físico**

Estos tratamientos son aquellos en los que no se generan sustancias nuevas, sino que se concentran los contaminantes al evaporar el agua o filtrar sólidos de un tamaño considerable [21]. A continuación, se describen los procesos de tratamiento físico utilizados actualmente en la industria y algunas nuevas tecnologías.

**1.3.1.i. Adsorción.** La adsorción puede considerarse como uno de los tratamientos que puede alcanzar la calidad del agua adecuada, logrando concentraciones de ppb e inclusive, menores. Este tratamiento se utiliza para eliminar compuestos como el manganeso, hierro, TOC, BTEX, petróleo y más del 80% de los metales pesados presentes en el agua de producción. [13] Existen una gran variedad de adsorbentes, tales como carbón activado, alúmina activada, organoarcilla, copolímeros, resinas y zeolitas [9] [3] Los costos de instalación y mantenimiento de los sistemas de adsorción son los principales inconvenientes de este tipo de tecnología, puesto que se requieren muchas veces de un recipiente para contener los medios y bombas, esto con el fin de implementar retrolavados periódicos que eliminan las partículas atrapadas en el vacío. Sin embargo, hay tecnologías un poco más económicas como adsorción con cáscara de nuez, la cual permite que el proceso sea más competitivo. Las principales limitaciones de estos métodos son las partículas suspendidas que pueden obstruir los medios adsorbentes [13], adicional a esto los rendimientos de estos se ven afectados por factores como la temperatura, el pH, las bajas concentraciones de metales pesados y el complejo orgánico-metal y la alta salinidad, reduciendo la eficiencia de eliminación [3]

**1.3.1.ii. Ciclones.** Un ciclón, utiliza la aceleración centrífuga para reducir o aumentar mecánicamente, según los objetivos del proceso, la concentración de una fase dispersa (agregados, partículas, gotas, etc) dentro de un medio dispersante [13] Los hidrociclones usan un método físico para separar los sólidos de los líquidos en función de la densidad de los sólidos a separar. Están hechos de metales, plásticos o cerámicos y generalmente tienen una tapa cilíndrica y una base cónica sin partes móviles. Los hidrociclones pueden eliminar partículas en el rango de 5–15  $\mu\text{m}$  y su rendimiento está determinado por el ángulo de su sección cónica [9]. Algunas de las ventajas de este tipo equipos son su larga vida útil y el no requerimiento de productos químicos o pretratamiento del agua de alimentación. Sin embargo, una desventaja importante de esta tecnología es la generación de grandes suspensiones de residuos sólidos concentrados [9].

**1.3.1.iii. Evaporación.** La evaporación se propone como un tratamiento para aguas residuales salinas que contienen componentes de aceite [13]. Su robustez permite evitar otro procedimiento físico o químico posterior, ya que mediante la adición de calor latente al agua de alimentación se genera vapor que se condensa en agua pura. Los evaporadores de tubo vertical son los más usados porque tienen mayor coeficiente de transferencia de calor, ahorran costos energéticos y disminuyen la posibilidad de incrustaciones en la tubería [19].

**1.3.1.iv. Flotación mejorada.** La flotación por aire disuelto es un proceso de separación sólido-líquido muy eficaz utilizado en el tratamiento del agua, como alternativa a la sedimentación, para reducir las concentraciones de sólidos antes de la filtración granular [22]. Este proceso utiliza finas burbujas de aire para separar las partículas suspendidas que no son fácilmente separadas por sedimentación [9]. Cuando se inyecta gas en el agua producida, las partículas suspendidas y las gotas de aceite se unen a las burbujas de aire, a medida que se eleva esto da como resultado la formación de espuma en la superficie del agua [9] que se elimina en el proceso de desnatado, mientras que el agua clarificada es recogida en el fondo de la zona flotación, este tratamiento se utiliza para la eliminación de gotas y/o emulsiones de aceite, grasas, materia orgánica natural, compuestos orgánicos volátiles y pequeñas partículas del agua producida [13] [9] y puede eliminar partículas tan pequeñas como 25  $\mu\text{m}$  e incluso contaminantes de hasta 3  $\mu\text{m}$  de tamaño si se agrega coagulación como pretratamiento [9].

**1.3.1.v. Congelación - Descongelación/Evaporación.** Es un proceso que utiliza cambios naturales de temperatura para congelar y descongelar alternativamente el agua producida, concentrando sólidos disueltos y creando volúmenes relativamente grandes de agua limpia adecuada para varios usos beneficiosos [3].

Alrededor del 50% del agua puede recuperarse de este proceso durante el invierno, pero en otras estaciones, no se recupera agua porque el proceso funciona como un estanque de evaporación convencional, mediante este pueden eliminarse más del 90% de metales pesados, TDS, orgánicos volátiles y semivolátiles, sólidos suspendidos totales e hidrocarburos de petróleo recuperables totales en agua producida. La eliminación de desechos es esencial cuando se utiliza este tipo de

tecnología porque genera una cantidad significativa de salmuera concentrada y aceite [9].

**1.3.1.vi. Electrodiálisis.** La electrodiálisis (ED) y ED reversa (EDR) son tecnologías maduras de desalinización impulsadas electroquímicamente. Estos procesos implican la separación de iones disueltos del agua a través de membranas de intercambio iónico [9]. Las sales disueltas en el agua de producción son cationes y aniones, estos iones pueden unirse a electrodos específicos con una carga opuesta [10], esto quiere decir que, si la membrana está cargada positivamente, sólo los aniones pueden pasar a través de ella, del mismo modo, las membranas cargadas negativamente permiten que solo los cationes pasen a través de ellas [9]. Este método es adecuado para la recuperación de agua producida con bajas concentraciones de TDS, pero es poco probable que sea rentable para el tratamiento de aguas producidas concentradas [3].

### **1.3.2. Tratamiento químico**

En los tratamientos de tipo químico, se generan nuevas sustancias mediante reacciones químicas que permiten la disminución de compuestos contaminantes presentes en el agua de producción [21]. A continuación, se presenta una breve descripción de los tratamientos químicos implementados actualmente en la industria y algunas nuevas tecnologías.

**1.3.2.i. Precipitación química.** La precipitación química se usa para eliminar los componentes iónicos del agua mediante la adición de contraiones para reducir la solubilidad de estos [23]. Actualmente una alternativa para la precipitación química es el uso de FMA, un polímero polinuclear de metal mixto inorgánico (Fe, Mg y Al). Este compuesto fue útil en el tratamiento de agua de producción con altos niveles de sólidos suspendidos debido a sus propiedades de desaceitado, coagulación e inhibición de incrustaciones. Los sólidos suspendidos y el aceite presentes se eliminaron a niveles entre 92% y 97%, respectivamente. [13]

**1.3.2.ii. Procesos electroquímicos.** En este proceso el agua de producción pasa a través de una celda de electrólisis bastante similar a la utilizada para la producción de hipoclorito. Dependiendo del material de los electrodos, su disposición

(vertical u horizontal) y la diferencia de potencial aplicada, las reacciones generadas producen los productos químicos necesarios para los procesos de purificación, aguas abajo la mezcla fluye hacia un recipiente de clarificación que actúa como tanque de contacto para la desinfección [24]. Este proceso está basado en la mejora de las reacciones químicas que implican la generación o el uso de electricidad, la electroquímica es una tecnología verde relativamente económica en comparación con otros tratamientos actuales aplicados al agua de producción. Esta no genera desechos secundarios, ni requiere el uso de productos químicos adicionales y ofrece un agua de producción tratada de mejor calidad para usos beneficiosos [13] Casi el 90% de la DBO y DQO podrían eliminarse de esta en poco tiempo (aproximadamente 6 minutos) utilizando un metal activo y grafito como ánodo y hierro como cátodo. [25]

**1.3.2.iii. Demulsificantes.** La demulsificación es un proceso de ruptura de emulsiones, los métodos disponibles para la demulsificación pueden clasificarse ampliamente como químicos, eléctricos y mecánicos. La demulsificación química es el método más utilizado para tratar las emulsiones de agua en aceite y aceite en agua e implica el uso de aditivos químicos para acelerar el proceso de ruptura de la emulsión [26]. Los demulsificantes son agentes tensioactivos que son efectivos para interrumpir los efectos emulsionantes naturales presentes en el aceite [3], mediante la reducción de la tensión interfacial entre agua y aceite y el potencial zeta en las superficies de las gotas de aceite [13] En la mayoría de los aceites crudos, los sólidos tales como los sulfuros de hierro, limos, arcilla, lodo de perforación, parafina, etc., complican el proceso de demulsificación [3]

**1.3.2.iv. Intercambio iónico.** El intercambio iónico es una tecnología especialmente útil en la eliminación de iones y metales monovalentes y divalentes tales como arsénico, metales pesados, nitratos, radio, sales y uranio presentes en el agua de producción mediante el uso de resinas [3] [13] Las resinas pueden fabricarse de forma natural como zeolitas o resinas orgánicas producidas sintéticamente. El proceso de intercambio iónico intercambia cationes o aniones presentes en el agua de producción por iones con carga similar presentes dentro de la resina [13] Esta tecnología cuenta con una vida útil de aproximadamente 8 años y requiere opciones de pretratamiento para la eliminación de sólidos y el uso de productos químicos para



la regeneración y desinfección de resinas [9]. El costo operativo representa más del 70% del costo total de esta tecnología [13].

**1.3.2.v. Oxidación química.** La oxidación química es una tecnología conocida y útil para el tratamiento de efluentes con compuestos refractarios [27], además de eliminar el color, olor, DQO, DBO, compuestos orgánicos y algunos compuestos inorgánicos del agua de producción [13]. Este proceso ocurre mediante la transferencia de electrones de un reactivo oxidante a una especie química que se oxida [28]. Los oxidantes comúnmente utilizados con el peróxido de hidrógeno, ozono, permanganato, oxígeno y cloro [13], el oxidante se mezcla con los contaminantes y hace que estos se descompongan. La velocidad de oxidación de esta tecnología depende de la dosis química, el tipo de oxidante utilizado, la calidad del agua cruda y el tiempo de contacto entre los oxidantes y el agua [9].

**1.3.2.v.a. Con peróxido de hidrógeno.** El peróxido de hidrógeno ( $H_2O_2$ ) es un oxidante fuerte que puede reaccionar directamente con los compuestos orgánicos presentes en el agua de producción. Este se vuelve aún más efectivo cuando se usa en combinación con otra energía o reactivos (oxidación avanzada), capaces de disociar el peróxido en un radical hidroxilo que actuará como agente oxidante [13].

**1.3.2.v.b. Con ozono.** En el proceso de ozonización se producen reacciones de oxidación directa e indirecta; el  $O_3$  puede reaccionar lenta y directamente con un sustrato orgánico debido a su alto potencial de reducción, cuando se genera en la reacción indirecta para la producción de radicales hidroxilo puede considerarse como una oxidación avanzada. La desventaja principal del uso de  $O_3$  en el tratamiento de aguas de producción es el alto costo debido a que es un oxidante a que requiere un gran consumo de energía para ser producido, además de esto, la eficiencia depende de la transferencia de masa gas-líquido, la cual se ve obstaculizada por la baja solubilidad de este en solución acuosa.

**1.3.2.vi. Oxidación avanzada.** Los procesos de oxidación avanzada (POA) son técnicas que se basan en la producción de radicales hidroxilos, que debido a su reactividad y alta selectividad tienen la capacidad de transformar diversos compuestos orgánicos y de inhibir la posterior generación de residuos tóxicos. Por tanto, son una alternativa atractiva que no genera residuos concentrados al transferir los contaminantes de una fase a otra, como en el caso de técnicas convencionales (intercambio iónico, adsorción, precipitación) [19].

La mayoría de ellos, excepto la ozonización simple ( $O_3$ ), utilizan una combinación de oxidantes fuertes, radiación ultravioleta (UV), ultrasonido (US) o haz de electrones y catalizadores, etc. [27] La Tabla No. 2 enumera los sistemas POA típicos actualmente reportados en la literatura:

**Tabla No. 2.**

*Lista de los procesos de oxidación avanzada*

<b>Sistemas homogéneos</b>		<b>Sistemas heterogéneos</b>	
Con radiación	Sin radiación	Con radiación	Sin radiación
$O_3$ / Ultravioleta (UV) $H_2O_2$ / UV Haz de electrones Ultrasonido (US) $H_2O_2$ / US UV / US $H_2O_2$ / $Fe^{2+}$ / UV (Fotofenton)	$O_3$ / $H_2O_2$ $O_3$ / $OH^-$ $H_2O_2$ / $Fe^{2+}$ (Fenton)	$TiO_2$ / $O_2$ / UV $TiO_2$ / $H_2O_2$ / UV	Electrofenton

**Nota.** En la tabla se enumeran los sistemas de oxidación avanzada, donde se dividen en procesos homogéneos y heterogéneos, en los cuales puede o no, incluirse la radiación. Tomado de: S. Renou, J. G. Givaudan, S. Poulain, F. Dirassouyan, y P. Moulin, "Landfill Leachate Treatment: Review and Opportunity," vol. 150, pp. 468–93, 2008. [En línea]. Disponible en:

### **1.3.3. Tratamiento biológico**

Por lo general, los métodos físicos y químicos para el tratamiento de agua de producción son eficientes en la eliminación de sólidos, así como de petróleo libre y disperso. Sin embargo, estos métodos no logran un alto nivel de eficiencia para la eliminación de contaminantes disueltos. Los tratamientos biológicos son extremadamente efectivos en el tratamiento de varios tipos de moléculas disueltas, incluidos los hidrocarburos de petróleo, y por lo tanto son muy útiles para reducir los niveles de contaminación orgánica en el agua producida [29].

En la oxidación biológica, los compuestos orgánicos disueltos y el amoníaco son convertidos en agua, CO<sub>2</sub> y nitratos/nitritos, respectivamente, por microorganismos como bacterias, algas, hongos y protozoos. Los principales mecanismos de oxidación biológica de los hidrocarburos son la biodegradación y la biofloculación. En la biodegradación, las bacterias descomponen los hidrocarburos en moléculas más pequeñas mientras usan la energía liberada para su metabolismo. La biooxidación de componentes orgánicos simples, por ejemplo, alcanos, es más fácil que el de las moléculas complejas y grandes. [13]. El método biológico más común se conoce como lodo activado, este tratamiento funciona porque los contaminantes disueltos son consumidos por los microorganismos dentro del tanque para formar una masa biológica adicional (lodo), posterior a esto el agua y el lodo se eliminan del biorreactor y se introducen en un clarificador [29]

Una de las alternativas más innovadoras actualmente para el tratamiento del agua de producción es el uso de humedales artificiales, donde mediante diferentes tipos de plantas, vegetales marinos, y microorganismos adaptados a las condiciones del agua a tratar, se depura el agua, eliminando grandes cantidades de materia orgánica, sólidos en suspensión, nitrógeno, fósforo e incluso productos tóxicos; estas son zonas construidas por el hombre en las que de forma controlada, se reproducen mecanismos de eliminación de contaminantes presentes en aguas residuales, que se dan en los humedales naturales mediante procesos físicos, biológicos y químicos [30]

#### **1.3.4. Tratamiento de membrana**

Las membranas son barreras físicas que permiten la separación de dos fluidos, haciendo posible el movimiento de diferentes componentes a través de dicha barrera por algún método selectivo, posibilitando que algún componente o componentes pasen a través de ella, y restringiendo el paso de otros componentes.

Los procesos de separación por membrana pueden dividirse en dos categorías: Impulsada por presión y no impulsada por presión [31] El proceso impulsado por presión, se basa en el tamaño de poro de la membrana [3] en donde se genera un gradiente de presión, denominado presión transmembrana [31], esto con el fin de separar los contaminantes presentes en la corriente de alimentación. Los procesos de separación por membrana impulsados por presión incluyen microfiltración (MF), ultrafiltración (UF), ósmosis inversa (RO) y nanofiltración (NF).

**1.3.4.i. Microfiltración (MF).** La microfiltración es la más antigua de las cuatro tecnologías de membrana actuadas por presión y tiene el tamaño de poro más grande (0,1 - 3  $\mu\text{m}$ ) y se usa generalmente para la eliminación de sólidos suspendidos y la reducción de la turbidez [9] [32]. Su diseño es una unidad compacta y fácilmente transportable. Está constituida por dos unidades de membrana microporosa de fibra hueca de polipropileno. El flujo de agua es normal a la disposición de las membranas [33].

**1.3.4.ii. Ultrafiltración (UF).** Es una de las tecnologías de membranas más efectivas para el tratamiento de agua de producción, en comparación con los métodos convencionales mencionados anteriormente. Su alta eficiencia de eliminación de aceite, sin necesidad de productos químicos, los bajos costos de energía y el pequeño espacio requerido son algunas de sus ventajas [10] Los tamaños de poros están entre 0,01 y 0,1  $\mu\text{m}$ . Son empleados para remover color, olor, virus y materia orgánica coloidal [9]

**1.3.4.iii. Nanofiltración (NF).** Es una tecnología robusta para ablandar el agua y eliminar metales contaminantes tan pequeños como 0,001  $\mu\text{m}$ , gracias a este pequeño diámetro de poro se pueden remover moléculas de alto peso molecular tales como ácidos y ciertas sales. Es aplicable para el tratamiento de agua de producción que contiene concentraciones de sólidos totales disueltos en el rango de 500 a 25000 ppm [13] Esto permite producir agua libre de parásitos y sólidos sin tener que recurrir a productos químicos [34]

**1.3.4.iv. Ósmosis inversa (RO).** Esta tecnología puede eliminar contaminantes más pequeños que el resto de membranas y se obtienen efluentes de alta calidad. Tienen una vida útil entre 3 y 7 años. Sin embargo, las incrustaciones de membrana y el escalado son un punto crítico en este proceso, junto con un alto costo de requisitos de presión y capital [13] [34]

#### **1.4. Agua de riego**

La utilización del agua en la agricultura representa como mínimo dos tercios de su consumo global [35], el uso de agua regenerada en agricultura permite aliviar la presión ejercida sobre los sistemas de abastecimiento de agua dulce y conservarlos para un fin de mayor valor económico y social, y al mismo tiempo, los agricultores reciben un suministro de agua fiable y rico en nutrientes [36]

El riego es una práctica agrícola tan antigua como importante, donde los cultivos bajo riego son menos dependientes de los efectos climáticos. Al regar, si el agua utilizada contiene sales, se hará un aporte extra de las mismas al sistema, que deberá ser eliminado por lavado.

En un inicio además de conocer la disponibilidad del recurso, habrá que conocer:

- La calidad del agua que se va a aplicar
- El cultivo al que se va a aplicar
- El sistema de riego utilizado
- Las condiciones climáticas de la zona
- El sistema de producción utilizado
- Tipo de suelo sobre el que se aplicará el agua de riego

Se debe tener en cuenta que la calidad queda definida por su composición y el conocimiento de los efectos que puede causar cada uno de los componentes, solo o en conjunto, permitiendo de esta forma establecer posibilidades de utilización. La

“calidad” es una característica determinada para cada zona, donde se tuvieran en cuenta los sistemas de riego a usar, los suelos y las aguas presentes en cada región, es decir, parámetros de uso adaptado a cada situación específica.

Entre los parámetros químicos más importantes se encuentran los sólidos totales, cationes, aniones e iones tóxicos específicos, para los físicos se evalúa la turbidez, color, olor, sabor y temperatura [37], estos parámetros deben cumplir con la normativa acordada para cada país.

## **1.5. Marco legal**

Debido a que se abarca el tratamiento de un agua residual para su posterior reutilización, se debe tener en cuenta la normativa colombiana vigente, la cual presenta los parámetros y límites permisibles para la disposición de este tipo de efluente en riego.

### **1.5.1. Resolución 1207 del 2014**

La presente resolución tiene por objeto establecer las disposiciones relacionadas con el uso del agua residual tratada y no aplica para su empleo como fertilizante o acondicionador de suelos. Presenta los límites permisibles para la reutilización del agua residual tratada para usos agrícolas como riego.

Criterios de calidad. El uso de agua residual tratada deberá cumplir previamente los siguientes criterios de calidad:

- Uso agrícola:
  - Cultivos de pastos y forrajes para consumo animal.
  - Cultivos no alimenticios para humanos o animales.
  - Cultivos de fibras celulósicas y derivados.
  - Cultivos para la obtención de biocombustibles (biodiesel y alcohol carburante) incluidos lubricantes.
  - Cultivos forestales de madera, fibras y otros no comestibles.
  - Cultivos alimenticios que no son de consumo directo para humanos o animales y que han sido sometidos a procesos físicos o químicos.

**Tabla No. 3.***Crterios para uso agrcola segun normativa.*

<b>Variable</b>	<b>Unidad de medida</b>	<b>Valor máximo permisible</b>
<b>Físicos</b>		
pH	Unidades de pH	6,0 - 9,0
Conductividad	$\mu\text{S} / \text{cm}$	1500
<b>Microbiológicos</b>		
Coliformes termotolerantes	NMP / 100 mL	$1 \times 10^5$
Enterococos fecales	NMP / 100 mL	$1 \times 10^2$
Helmintos parásitos humanos	Huevos y larvas / L	1,0
Protozoos parásitos humanos	Quistes / L	1,0
Salmonella sp	NMP / 100 mL	1,0
<b>Químicos</b>		
Fenoles totales	mg / L	1,5
Hidrocarburos totales	mg / L	1,0
<b>Iones</b>		
Cianuro libre	mg $\text{CN}^- / \text{L}$	0,2
Cloruro	mg $\text{Cl}^- / \text{L}$	300
Fluoruros	mg $\text{F}^- / \text{L}$	1,0
Sulfatos	mg $\text{SO}_4^{2-} / \text{L}$	500
<b>Metales</b>		

**Tabla No. 3.** Continuación

Aluminio (Al)	mg Al / L	5,0
Berilio (Be)	mg Be / L	0,1
Cadmio (Cd)	mg Cd / L	0,01
Cinc (Zn)	mg Zn / L	3,0
Cobalto (Co)	mg Co / L	0,05
Cobre (Cu)	mg Cu / L	1,0
Cromo (Cr)	mg Cr / L	0,1
Hierro (Fe)	mg Fe / L	5,0
Mercurio (Hg)	mg Hg / L	0,002
Litio (Li)	mg Li / L	2,5
Manganeso (Mn)	mg Mn / L	0,2
Molibdeno (Mo)	mg Mo / L	0,07
Níquel (Ni)	mg Ni / L	0,2
Plomo (Pb)	mg Pb / L	5,0
Sodio (Na)	mg Na / L	200
Vanadio (V)	mg V / L	0,1
<b>Metaloides</b>		
Arsénico (As)	mg As / L	0,1
Boro (B)	mg B / L	0,4
<b>No metales</b>		
Selenio (Se)	mg Se / L	0,02



**Tabla No. 3.** Continuación

<b>Otros parámetros</b>		
Cloro total residual (con mínimo 30 minutos de contacto)	mg Cl <sub>2</sub> / L	Menor a 1,0
Nitratos (NO <sub>3</sub> -N)	mg / L	5,0

**Nota.** En esta tabla se describen los límites máximos permisibles por compuesto presentes en el agua de producción para ser dispuesta en riego según la Resolución 1207 del 2014.

#### **1.5.2. Decreto 3930 de 2010**

"Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9 de 1979, así como el Capítulo 11 del Título VI-Parte 11I- Libro 11 del Decreto - Ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos y se dictan otras disposiciones" Este decreto establece las disposiciones relacionadas con los usos del recurso hídrico, el Ordenamiento del Recurso Hídrico y los vertimientos al recurso hídrico, al suelo y a los alcantarillados. La Autoridad Ambiental Competente deberá realizar el Ordenamiento del Recurso Hídrico con el fin de realizar la clasificación de las aguas superficiales, subterráneas y marinas, fijar en forma genérica su destinación a los diferentes usos de que trata el artículo 9 del presente decreto y sus posibilidades de aprovechamiento.

#### **1.5.3. Decreto 1076 de 2015**

"Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible." Definición del reúso y lo promueve a través de los PRTLGV Plan de reconversión a tecnologías limpias en gestión de vertimientos, como reducir y minimizar la carga contaminante por unidad de producción, antes del sistema de tratamiento o antes de ser mezclada con aguas residuales domésticas o reutilizar o reciclar subproductos o materias primas, por unidad de producción o incorporar a los procesos de producción materiales reciclados, relacionados con la generación de vertimientos.

**1.5.4. Decreto 50 de 2018**

"Por el cual se modifica parcialmente el Decreto 1076 de 2015, Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible en relación con los Consejos Ambientales Regionales de la Macrocuencas (CARMAC), el Ordenamiento del Recurso Hídrico y Vertimientos y se dictan otras disposiciones"

**1.5.5. Ley 373 de 1997**

"Por la cual se establece el programa para el uso eficiente y ahorro del agua."  
ARTÍCULO 5o. REÚSO OBLIGATORIO DEL AGUA. Las aguas utilizadas, sean éstas de origen superficial, subterráneo o lluvias, en cualquier actividad que genere afluentes líquidos, deberán ser reutilizadas en actividades primarias y secundarias cuando el proceso técnico y económico así lo ameriten y aconsejen según el análisis socio-económico y las normas de calidad ambiental.

## **2. DIAGNÓSTICO DEL PROCESO ACTUAL DEL TRATAMIENTO DEL AGUA DE PRODUCCIÓN DEL CAMPO RUBIALES**

A partir de los objetivos planteados para el diseño de un sistema de tratamiento de agua de producción es importante recopilar información acerca de las características del campo de estudio, con el fin de comprender el estado actual del proceso de tratamiento de agua producida y a partir de este poder realizar un análisis inicial en función del cumplimiento del objetivo general del proyecto investigativo

### **2.1. Generalidades del campo Rubiales**

En este apartado se realizará una descripción de las principales características del campo Rubiales:

#### **2.1.1. Historia del campo Rubiales**

El campo Rubiales fue descubierto en el año 1981 por la empresa Exxon con la perforación del pozo exploratorio Rubiales-1, el objetivo del pozo era comprobar la existencia de hidrocarburos en la formación carbonera, el cual arrojó un resultado positivo, bajo el mismo contrato en 1982 se perforó el pozo Rubiales-2 y posteriormente durante el contrato Vichada-Provincia Petroleum Corp, Intercol realizó la perforación del Pozo Rubiales-3 en el mismo año. Debido a los bajos precios del petróleo y los altos precios de producción, se decide detener los trabajos de perforación por su baja rentabilidad y en su lugar, se continúa con la definición, delimitación y potencial del yacimiento. [39]

En 1988 se firma el contrato de Solo Riesgo Rubiales entre Ecopetrol y las compañías Astralstake, Tethys Petroleum y Tumsector. En 1989 Texas Petroleum Company perforó el Pozo Rubiales-4 dentro del Contrato Rubiales. Entre los años de 1990 y 1993 la compañía Tuskar Colombia LTDA fue operadora del campo, los cuales realizaron la perforación de 6 pozos bajo los contratos de participación de Riesgo y Asociación Pirirí [39]. En 1995 se inicia la explotación de Campo Rubiales por las empresas asociadas bajo la modalidad de Solo Riesgo hasta 1997, en este mismo año la empresa Coplex Colombia LTDA perfora los pozos rubiales 23 y 24, a finales de este mismo año se cierra el campo debido a problemas de orden público [40] [41] Desde los años 2001 a 2003 Tethys Petroleum Company LTDA perfora 11 pozos bajo los contratos previos [36], En 2002 se declara la comercialidad del Campo y se realiza la primera perforación horizontal gracias al apoyo de los grupos inversionistas Elliot y

Synergy los cuales entregaron el cargo de operadora única del campo a la empresa Tethys Petroleum [35] A finales del año 2003 Meta Petroleum Corp y Pacific Stratus Energy Colombia Corp. (filiales de Pacific E&P) asumen la operación del Campo Rubiales bajo los contratos de Asociación Pirirí, hasta el 2016 [41].

En el 2006 Ecopetrol entra a ser parte de la operación de Rubiales, finalizando la etapa “Solo Riesgo”, decretada por el Ministerio de Minas en 1997 para los contratos de Asociación Pirirí [40].

En 2008 la fusión de Petro Rubiales Energy y Pacific Stratus Energy da origen a Pacific Rubiales Energy Corporation, el mismo año un grupo de ex empleados de la empresa Venezolana Petróleos De Venezuela S.A. (PDVSA) ve la oportunidad de desarrollar crudos pesados en el Campo [38]

Pacific Rubiales Energy se dedicó a la perforación de pozos hasta el año 2015, perforando alrededor de 1224 pozos, en su mayoría horizontales, y alcanzó la máxima producción histórica del Campo, 212115 BOPD, en 2013 [40].

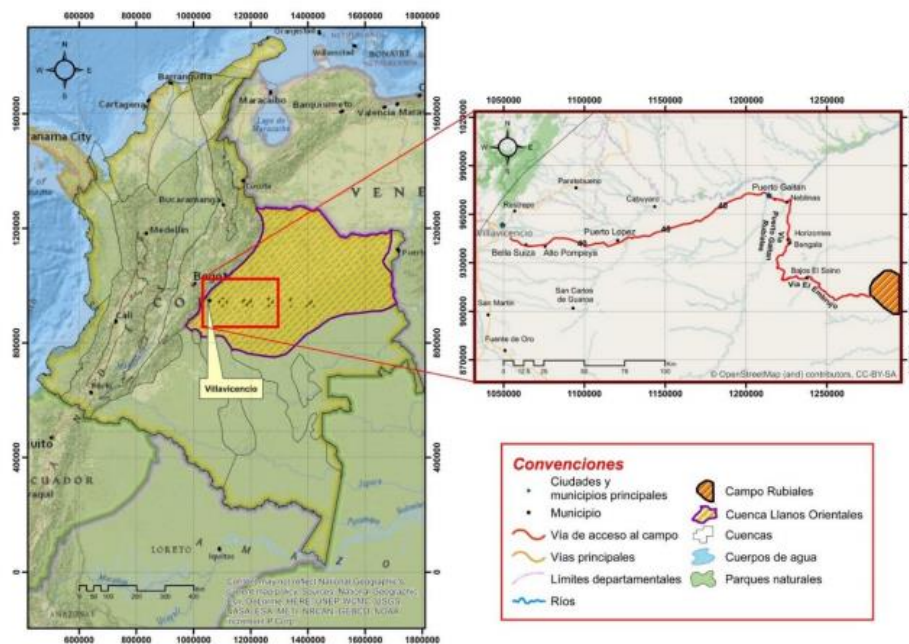
Finalmente, para el año 2016 finaliza el contrato de Asociación Pirirí en el cual la participación de Ecopetrol y Meta petroleum corp. era del 57% y 43% respectivamente y Ecopetrol pasa a ser el único operador del campo, el área del campo correspondía a 569 km<sup>2</sup>, con la adquisición del activo la compañía incrementó la producción en unos 60000 BPD [41].

### **2.1.2. Localización geográfica**

El Campo Rubiales se encuentra ubicado en Colombia, en el Sureste de la cuenca de los llanos orientales, en el Departamento del Meta, dentro del Municipio de Puerto Gaitán, a 365 km al este de la Ciudad de Villavicencio y a 482 km al sureste de la Ciudad de Bogotá [39] Como se presenta en la Figura No. 2

**Figura No. 2.**

Localización del campo Rubiales



Nota: La coordenadas estan representadas en tipo Magna - Sirgas Colombia

**Nota.** En esta figura se ilustra el campo Rubiales en el mapa de Colombia, junto con sus convenciones de vías de acceso, ríos, entre otras. Tomado de: D. A. Puentes-Alvarez y J. S. Velasco-Garcia. “Evaluación de la viabilidad de aplicación de la tecnología radio corto para la perforación de un pozo en el campo Rubiales”, tesis pre. Facultad de ingenierías, Fundación Universidad de América, Bogotá, Colombia, 2018

## 2.2. Volúmenes de producción

Actualmente se están produciendo aproximadamente 4000 KBWPD los cuales son tratados paralelamente en los sistemas de tratamiento del CPF1 y CPF2 [42]

## 2.3. Características del agua de producción del campo Rubiales

Las variables a considerar en el agua de producción del campo Rubiales según la Resolución 1207 del 2014 se muestran en la Tabla No. 4, sin embargo, es importante aclarar que esta normativa es general para cualquier tipo de agua residual, por tanto, esta considera parámetros que no corresponden netamente a la composición precisa de un agua de producción, en esta tabla podemos encontrar parámetros que no

fueron medidos a la hora de realizar la caracterización, como es el caso de los parámetros microbiológicos y además, algunos iones y metales. Por otra parte, los microorganismos de importancia en salud pública y medio ambiental que usualmente contempla la normativa, (en su mayoría corresponden a contaminación de tipo fecal), no corresponden a las actividades de explotación de hidrocarburos.

La caracterización a la salida de la piscina 831 fue entregada por Ecopetrol. El muestreo fue hecho el día 13 de septiembre del 2019 en Puerto Gaitán - Dpto Meta, los laboratorios encargados del análisis fueron SERAMBIENTE S.A.S, SGS COLOMBIA S.A.S y CHEMILAB.

**Tabla No. 4.**

Características del agua de producción de campo Rubiales

<b>Variable</b>	<b>Unidad de medida</b>	<b>Valor salidas de piscina</b>	<b>Valor máximo permisible según resolución 1207 del 2014</b>	<b>Apto / no apto según normativa</b>
<b>Físicos</b>				
pH	Unidades de pH	7,63-8,06	6,0 - 9,0	Apto
Conductividad	µS / cm	1195-1350	1500	Apto
<b>Microbiológicos</b>				
Coliformes termotolerantes	NMP / 100 mL	No medido	1x10 <sup>5</sup>	
Enterococos fecales	NMP / 100 mL	No medido	1x10 <sup>2</sup>	

**Tabla No. 4.** Continuación

Helminthos parásitos humanos	Huevos y larvas / L	No medido	1,0	
Protozoos parásitos humanos	Quistes / L	No medido	1,0	
Salmonella sp	NMP / 100 mL	No medido	1,0	
<b>Químicos</b>				
Fenoles totales	mg / L	0,1	1,5	Apto
Hidrocarburos totales	mg / L	0,329	1,0	Apto
<b>Iones</b>				
Cianuro libre	mg CN <sup>-</sup> / L	No medido	0,2	
Cloruro	mg Cl <sup>-</sup> / L	181	300	Apto
Fluoruros	mg F <sup>-</sup> / L	6,21	1,0	No apto
Sulfatos	mg SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> / L	10	500	Apto
<b>Metales</b>				
Aluminio (Al)	mg Al / L	0,140	5,0	Apto
Berilio (Be)	mg Be / L	0,011	0,1	Apto
Cadmio (Cd)	mg Cd / L	0,007	0,01	Apto
Cinc (Zn)	mg Zn / L	No medido	3,0	
Cobalto (Co)	mg Co / L	0,048	0,05	Apto

**Tabla No. 4.** Continuación

Cobre (Cu)	mg Cu / L	0,0560	1,0	Apto
Cromo (Cr)	mg Cr / L	0,01	0,1	Apto
Hierro (Fe)	mg Fe / L	2,617	5,0	Apto
Mercurio (Hg)	mg Hg / L	0,017	0,002	No apto
Litio (Li)	mg Li / L	0,178	2,5	Apto
Manganeso (Mn)	mg Mn / L	0,079	0,2	Apto
Molibdeno (Mo)	mg Mo / L	0,003	0,07	Apto
Níquel (Ni)	mg Ni / L	0,0250	0,2	Apto
Plomo (Pb)	mg Pb / L	0,052	5,0	Apto
Sodio (Na)	mg Na / L	No medido	200	
Vanadio (V)	mg V / L	No medido	0,1	
<b>Metaloides</b>				
Arsénico (As)	mg As / L	0,0050	0,1	Apto
Boro (B)	mg B / L	0,137	0,4	Apto
<b>No metales</b>				
Selenio (Se)	mg Se / L	0,01	0,02	Apto
<b>Otros parámetros</b>				
Cloro total residual (con mínimo 30 minutos de contacto)	mg Cl <sub>2</sub> / L	No medido	Menor a 1,0	



**Tabla No. 4.** Continuación

Nitratos (NO <sub>3</sub> -N)	mg / L	1,1391	5,0	Apto
-------------------------------	--------	--------	-----	------

**Nota.** En esta tabla se comparan los compuestos presentes en el agua de producción del Campo Rubiales a la salida del sistema actual de tratamiento del CPF-2, con respecto a los valores máximos permisibles establecidos por la resolución 1207 del 2014.

#### **2.4. Sistema de tratamiento actual**

En este capítulo se presenta la descripción del proceso del sistema de tratamiento actual del agua de producción y disposición en el CPF2 del campo Rubiales

##### **2.4.1. Descripción general del tratamiento de agua de producción**

El sistema de tratamiento y disposición de agua de producción para el CPF2 cuenta con un sistema de skim tanks, sistemas de bombeo de agua, dieciocho trenes de tratamiento con una capacidad total de 2550 KBWPD de agua, conformados por celdas de flotación, filtros cáscara nuez/cascarilla de palma y decantadores, también cuenta con piscinas de agua de retrolavado (sumideros y sistemas de bombeo), piscinas de agua tratada (sumideros y sistemas de bombeo), una piscina de contingencia y torres de enfriamiento, a continuación se realizará una descripción detallada de cada uno de los sistemas de tratamiento de agua presentes en el CPF2.

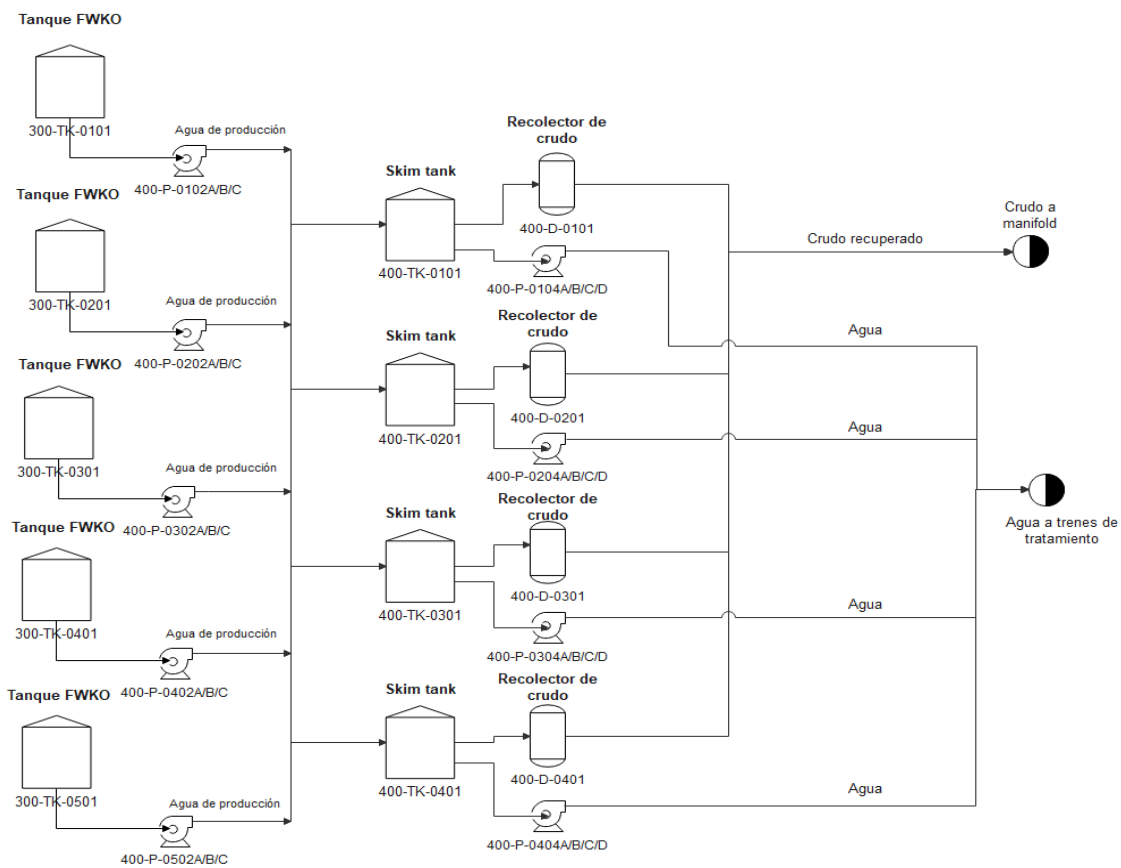
**2.4.1.i. Sistema Skim Tanks 400-TK-0101/0201/0301/0401 y Sistemas de Bombeo de Agua.** El agua proveniente de los tanques FWKO 300-TK-0101/0201/0301/0401/0501, es direccionada mediante las bombas de agua separada 400-P-0102/0202/0302/0402A/B/C (tipo centrífuga) y de las bombas 400-P-0503A/B/C también de tipo centrífuga, hacia los skim tanks 400-TK-0101/0201/0301/0401. Con el fin de cuidar la integridad mecánica de las bombas, las líneas de succión de los equipos de bombeo cuentan con filtros de tipo canasta, los cuales se encargan de retener los sólidos presentes en el fluido. Previo al ingreso del agua de producción a los skim tanks se inyecta Floctreat 12085 clariant como rompedor inverso de emulsión.

En los skim tanks se realiza la separación de crudo y agua mediante los principios de coalescencia, en donde las gotas de crudo ascienden a la superficie del equipo, formando una interfase crudo-agua. El agua separada pasa de un contenido crudo de 600 ppm a 150 ppm. Posteriormente, el agua de producción obtenida es enviada a los trenes de tratamiento, mediante las bombas de agua a tratamiento 400-P-0104/0204/0304/0404-A/B/C/D (tipo centrífuga) que cuentan también con filtros tipo canasta instalados.

El proceso se muestra en la Figura No. 3

**Figura No. 3.**

*Sistema de skim tanks y bombeo de agua*



**Nota.** En este diagrama se muestra el proceso inicial del sistema de tratamiento de agua de producción en el campo Rubiales, correspondiente a los sistemas skim tanks y bombeo de agua.

**2.4.1.ii. Trenes de tratamiento de agua 1, 2 y 3.** Estos trenes operan en paralelo, cuentan con una capacidad de tratamiento de 100 KBWPD cada uno y están compuestos por una celda de flotación por aire inducido (IAF), dos filtros cáscara nuez, cuatro decantadores y bombas tanto de recuperación de crudo como de agua de alimentación a filtros. Debido a que los trenes tienen la misma configuración, se hará la descripción del tren 1, obviando los trenes 2 y 3. Inicialmente, el agua de producción ingresa a la celda de flotación 400-DAF-0120 donde se retiran del agua las gotas de crudo y partículas sólidas con tamaños superiores a 50  $\mu\text{m}$ . El agua a la salida de las celdas se direcciona a uno de los filtros cáscara nuez 400-F-0102A/B mediante las bombas de alimentación a filtros 400-P-0123A/B, se debe tener en cuenta que al operar en paralelo uno de los filtros se encuentra en la secuencia de operación y el otro filtro estará en un proceso de retrolavado o stand-by. En el sistema de filtración se retiene el aceite en los lechos, obteniendo agua filtrada con una concentración de hidrocarburos inferior a 3 ppm, cumpliendo así con los requerimientos para el proceso de inyección de agua a formación no productora o sin efecto de recobro como disposición final. Por último, esta es enviada hacia la piscina de agua tratada 400-PIS-0002 y de contingencia 400-PIS-0003. Conforme al transcurso del tiempo de operación es necesario que se lleve a cabo la secuencia de retrolavado del filtro cáscara nuez, la cual consta de las siguientes siete etapas:

1. Barrido de la cámara del sello de la bomba de alimentación a filtros
2. Descompactación
3. Fluidización 1
4. Descarga
5. Fluidización 2
6. Asentamiento
7. Normalización

Las válvulas de corte automáticas se abren o cierran dependiendo la etapa del proceso. Al efluente generado en el proceso de retrolavado se le inyectan agentes químicos (coagulantes y floculantes), para ser enviado a los decantadores de fondo cónico. Por cada filtro se cuentan con dos decantadores 400-DEC-0120A/B o 400-DEC-0120C/D, comunicados de forma que operan como si fueran uno solo. En los decantadores se separan los lodos y sólidos suspendidos del agua por el principio de coalescencia, estos primeros son enviados junto con las natas recuperadas al

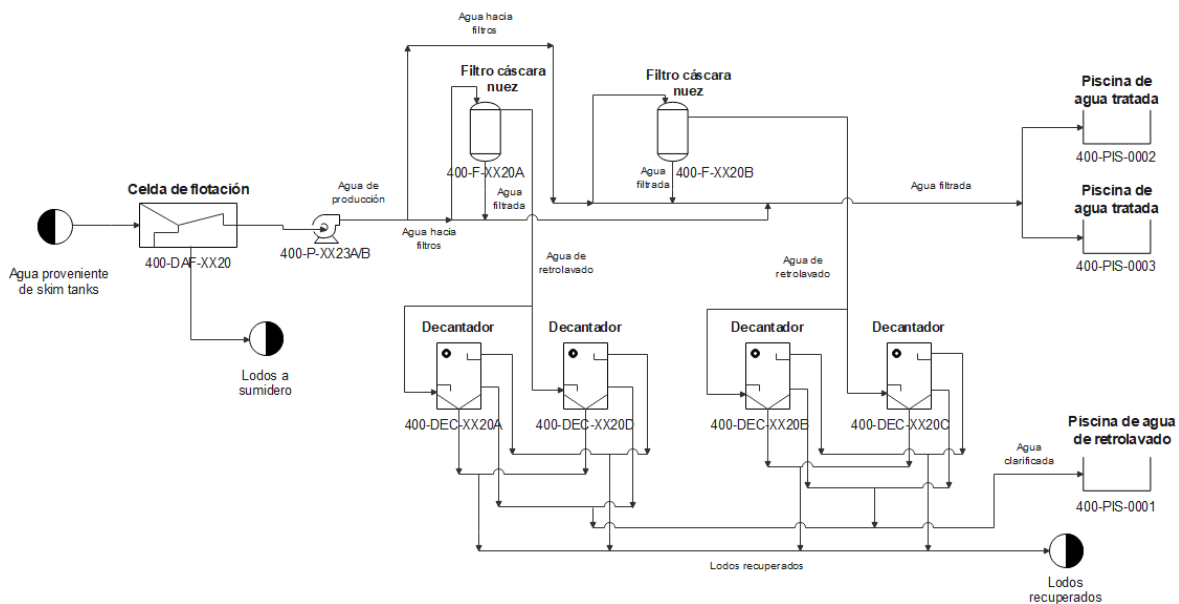
sumidero de la piscina de agua de retrolavado 400-PIS-0001 y el agua clarificada se direcciona por presión residual hacia la piscina de agua de retrolavado 400-PIS-0001.

Terminado el proceso de purga del filtro en retrolavado, las válvulas automáticas vuelven a su posición normal para la operación de filtración y para las siete etapas de retrolavado.

Este proceso se muestra en la Figura No. 4.

**Figura No. 4.**

*Diagrama del proceso de trenes de tratamiento 1, 2 y 3*



TREN	CELDA	BOMBAS A FILTROS	FILTROS	DECANTADORES
1	400-DAF-0120	400-P-0123A/B	400-F-0120A/B	400-DEC-0120A/B/C/D
2	400-DAF-0220	400-P-0223A/B	400-F-0220A/B	400-DEC-0220A/B/C/D
3	400-DAF-0320	400-P-0323A/B	400-F-0320A/B	400-DEC-0320A/B/C/D

**Nota.** En el diagrama se presenta el proceso descrito previamente para los trenes de tratamiento 1, 2 y 3

**2.4.1.iii. Trenes de tratamiento de agua 4, 5, 6 y 7.** Estos trenes operan en paralelo y cuentan con una capacidad de tratamiento de 150 KBWPD cada uno, están compuestos por una celda de flotación de aire inducido (IAF), tres filtros de cascarilla de palma africana, seis decantadores y bombas de recuperación de crudo y de alimentación de agua a filtros. Debido a que los trenes tienen la misma configuración, se hará la descripción del tren 4, obviando los trenes 5, 6 y 7. El agua de producción ingresa a la celda de flotación 400-DAF-0420 donde se retiran del agua las gotas de crudo y partículas sólidas con tamaños superiores a 50  $\mu\text{m}$ , el agua proveniente de la celda es direccionada a través de las bombas de alimentación 400-P-0423A/B/C a uno de los filtros de cascarilla de palma 400-F-0420A/B/C se debe tener en cuenta que al igual que en los trenes de tratamiento 1, 2 y 3 al operar en paralelo uno de los filtros se encuentra en la secuencia de operación y el otro estará en un proceso de retrolavado o stand-by. En el sistema de filtración se retiene el aceite en los lechos, obteniendo agua filtrada con una concentración de hidrocarburos inferior a 3 ppm, cumpliendo así con los requerimientos para el proceso de inyección de agua a formación no productora o sin efecto de recobro como disposición final, por último, esta es enviada hacia la piscina de agua tratada 400-PIS-0002 y de contingencia 400-PIS-0003. En consecuencia, a la saturación con crudo y sólidos suspendidos en el filtro conforme transcurre el tiempo de operación es necesario que se lleve a cabo la secuencia de retrolavado del filtro cascarilla de palma, la cual consta de las mismas siete etapas mencionadas en el apartado de los trenes de tratamiento 1, 2 y 3.

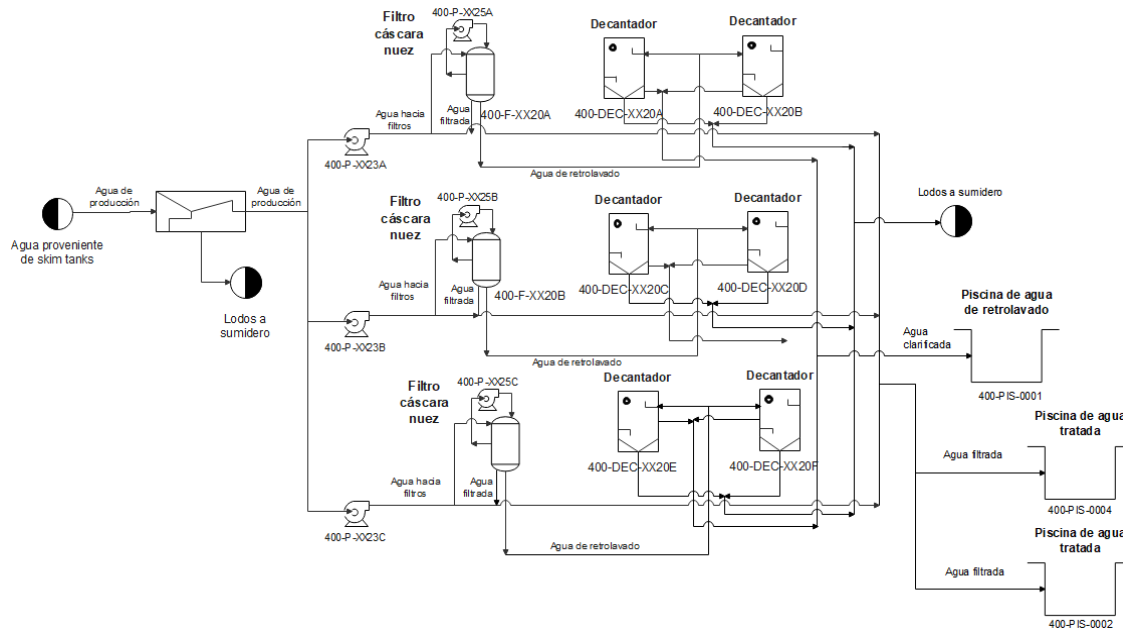
Al efluente generado en el proceso de retrolavado se le inyectan agentes químicos (coagulantes y floculantes), para ser enviado a los decantadores de fondo cónico. Por cada filtro se cuentan con dos decantadores 400-DEC-0420A/B, 400-DEC-0420C/D y 400-DEC-0420E/F, comunicados de forma que operan como si fueran uno solo. En los decantadores se separan los lodos y sólidos suspendidos del agua por el principio de coalescencia, estos primeros son enviados junto con las natas recuperadas al sumidero de la piscina de agua de retrolavado 400-PIS-0001 y el agua clarificada se direcciona por presión residual hacia la piscina de agua de retrolavado 400-PIS-0001.

Terminado el proceso de purga del filtro en retrolavado, las válvulas automáticas vuelven a su posición normal para la operación de filtración y para las siete etapas de retrolavado.

Este proceso se ilustra en la Figura No. 5

**Figura No. 5.**

*Diagrama del proceso de los trenes de tratamiento 4, 5, 6 y 7*



**Nota.** En este diagrama se muestra el proceso descrito para los trenes de tratamiento 4, 5, 6 y 7

**2.4.1.iv. Trenes de tratamiento de agua 8, 9, 10, 11, 12, 13 y 14.** Estos trenes operan en paralelo y cuentan con una capacidad de tratamiento de 150 KBWPD cada uno, están compuestos por una celda de flotación de aire inducido (IAF), tres filtros de cascarilla de palma africana, seis decantadores y bombas de recuperación de crudo y de alimentación de agua a filtros. Debido a que estos trenes tienen la misma configuración, se hará la descripción del tren 4, obviando los trenes 9, 10, 11, 12, 13 y 14. El agua de producción ingresa a la celda de flotación 400-DAF-0820 donde se retiran del agua las gotas de crudo y partículas sólidas con tamaños superiores a 50  $\mu\text{m}$ , el agua proveniente de la celda es direccionada a través de las bombas de alimentación 400-P-0823A/B/C/D a uno de los filtros de cascarilla de palma 400-F-0820A/B/C se debe tener en cuenta que al igual que en los trenes de tratamiento mencionados en los apartados previos, al operar en paralelo uno de los filtros se encuentra en la secuencia de operación y el otro estará en un proceso de retrolavado o stand-by. En el sistema de filtración se retiene el aceite en los lechos, obteniendo agua filtrada con una

concentración de hidrocarburos inferior a 3 ppm, cumpliendo así con los requerimientos para el proceso de inyección de agua a formación no productora o sin efecto de recobro como disposición final, el agua filtrada se envía por presión residual hacia la piscina de agua tratada 400-PIS-0004, sin embargo, existe la facilidad para enviar esta hacia la piscina de agua tratada 400-PIS-0002 y de contingencia 400-PIS-0003. En consecuencia, a la saturación con crudo y sólidos suspendidos en el filtro conforme transcurre el tiempo de operación es necesario que se lleve a cabo la secuencia de retrolavado del filtro cascarilla de palma, la cual consta de las mismas siete etapas mencionadas en el apartado de los trenes de tratamiento 1, 2 y 3.

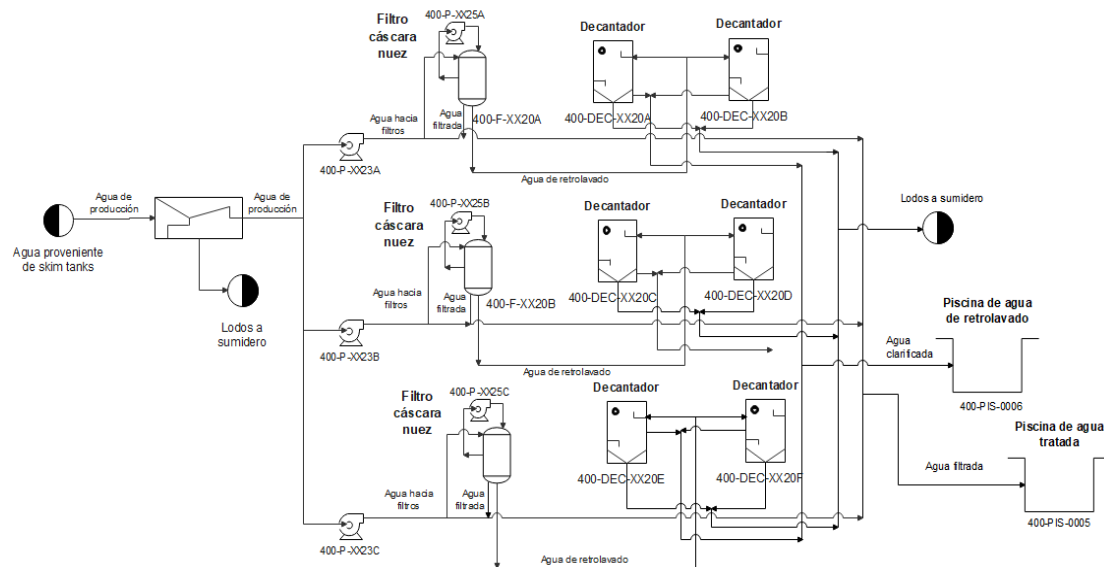
Al efluente generado en el proceso de retrolavado se le inyectan agentes químicos (coagulantes y floculantes), para ser enviado a los decantadores de fondo cónico. Por cada filtro se cuentan con dos decantadores 400-DEC-0820A/B, 400-DEC-0820C/D y 400-DEC-0820E/F, comunicados de forma que operan como si fueran uno solo. En los decantadores se separan los lodos y sólidos suspendidos del agua por el principio de coalescencia, estos primeros son enviados junto con las natas recuperadas al sumidero de la piscina de agua de retrolavado 400-PIS-0001 y el agua clarificada se direcciona por presión residual hacia la piscina de agua de retrolavado 400-PIS-0001.

Terminado el proceso de purga del filtro en retrolavado, las válvulas automáticas vuelven a su posición normal para la operación de filtración y para las siete etapas de retrolavado.

El proceso se muestra en la Figura No. 6.

**Figura No. 6.**

*Diagrama del proceso de los trenes de tratamiento 8, 9, 10, 11, 12, 13 y 14*



**Nota.** En esta figura se ilustra el diagrama del proceso descrito para los trenes de tratamiento 8, 9, 10, 11, 12, 13 y 14

**2.4.1.v. Trenes de tratamiento 15, 16, 17 y 18.** Estos trenes operan en paralelo y cuentan con una capacidad de tratamiento de 150 KBWPD cada uno, están compuestos por una celda de flotación de aire inducido (IAF), tres filtros de cascarilla de palma africana, seis decantadores y bombas de recuperación de crudo y de alimentación de agua a filtros. Debido a que estos trenes tienen la misma configuración, se hará la descripción del tren 15, obviando los trenes 16, 17 y 18. El agua de producción ingresa a la celda de flotación 400-DAF-1520 donde se retiran del agua las gotas de crudo y partículas sólidas con tamaños superiores a 50  $\mu\text{m}$ , el agua proveniente de la celda es direccionada a través de las bombas de alimentación 400-P-1523A/B/C/D a uno de los filtros de cascarilla de palma 400-F-1520A/B/C se debe tener en cuenta que al igual que en los trenes de tratamiento mencionados en los apartados previos, al operar en paralelo uno de los filtros se encuentra en la secuencia de operación y el otro estará en un proceso de retrolavado o stand-by. En el sistema de filtración se retiene el aceite en los lechos, obteniendo agua filtrada con una concentración de hidrocarburos inferior a 3 ppm, cumpliendo así con los requerimientos para el proceso de inyección de agua a formación no productora o sin efecto de



recobro como disposición final, el agua filtrada se envía por presión residual hacia la piscina de agua tratada 400-PIS-0005. En consecuencia, a la saturación con crudo y sólidos suspendidos en el filtro conforme transcurre el tiempo de operación es necesario que se lleve a cabo la secuencia de retrolavado del filtro cascarilla de palma, la cual consta de las mismas siete etapas mencionadas en el apartado de los trenes de tratamiento 1, 2 y 3.

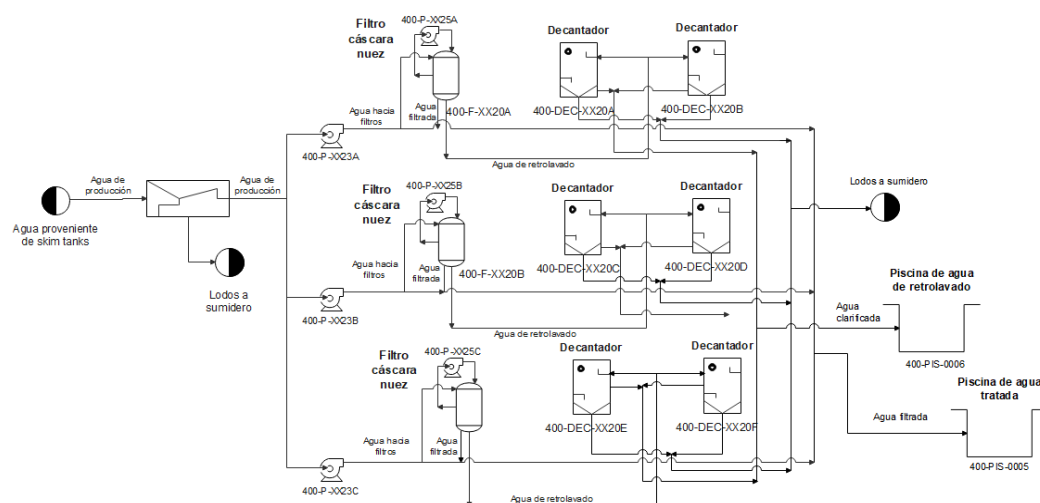
Al efluente generado en el proceso de retrolavado se le inyectan agentes químicos (coagulantes y floculantes), para ser enviado a los decantadores de fondo cónico. Por cada filtro se cuentan con dos decantadores 400-DEC-1520A/B, 400-DEC-1520C/D y 400-DEC-1520E/F, comunicados de forma que operan como si fueran uno solo. En los decantadores se separan los lodos y sólidos suspendidos del agua por el principio de coalescencia, estos primeros son enviados junto con las natas recuperadas al sumidero de la piscina de agua de retrolavado 400-PIS-0006 y el agua clarificada se direcciona por presión residual hacia la piscina de agua de retrolavado 400-PIS-0006.

Terminado el proceso de purga del filtro en retrolavado, las válvulas automáticas vuelven a su posición normal para la operación de filtración y para las siete etapas de retrolavado.

El proceso descrito se ilustra en la Figura No. 7

**Figura No. 7.**

*Diagrama del proceso de los trenes de tratamiento 15, 16, 17 y 18*



**Nota.** En este diagrama se muestra el proceso descrito anteriormente para los trenes de tratamiento 15, 16, 17 y 18

## **2.5. Disposición actual del agua de producción del campo Rubiales**

En este apartado se describe la disposición actual del recurso hídrico en el campo Rubiales.

### **2.5.1. Inyección a formación no productora o sin efecto de recobro**

Esta alternativa de gestión consiste en inyectar a pozos por debajo de los 600 metros o 2000 pies, en formaciones que estén aisladas de la zona productora. El riesgo de contaminación de las capas freáticas poco profundas y del agua potable subterránea aumenta si se inyecta el agua a profundidades muy bajas [43]

Esta alternativa tiene como propósito disminuir el volumen vertido a cuerpos de agua superficiales mediante la inyección de agua de producción en su propia formación o en otras. En esta opción a menudo se requiere el transporte de agua y tratamiento para reducir el ensuciamiento y el crecimiento bacteriano [4] [9].

Actualmente el caudal inyectado es de 1915 KBWPD (PADS 2, 3, 4, 5, 6 y 7), cumpliendo con el límite establecido por la autoridad ambiental para la disposición final mediante la inyección a pozos sin efecto de recobro que es de 3650 KBWPD [42]

### **2.5.2. Vertimiento superficial**

El vertimiento de aguas residuales se realiza mediante la descarga a acuíferos y es la última alternativa utilizada por Ecopetrol para la gestión de sus efluentes para esto se cuenta con puntos de vertimientos otorgados por las autoridades ambientales competentes, quienes determinan las condiciones que se deben ser cumplidas para que la descarga no afecte las características naturales de los cuerpos receptores [4] El caudal dispuesto actualmente para el vertimiento superficial es de 588 KBWPD [43]

### **2.5.3. Reutilización y reúso**

El reúso del agua es definido como la disposición final de un agua regenerada, la cual previamente debe ser sometida a diversos tratamientos establecidos en la correspondiente normativa, con el fin de alcanzar la calidad requerida en función de los usos externos a los que se va a destinar [44] como, por ejemplo, uso en actividades agrícolas, pecuarias y en el riego de cultivos de porte forestal. Por otro

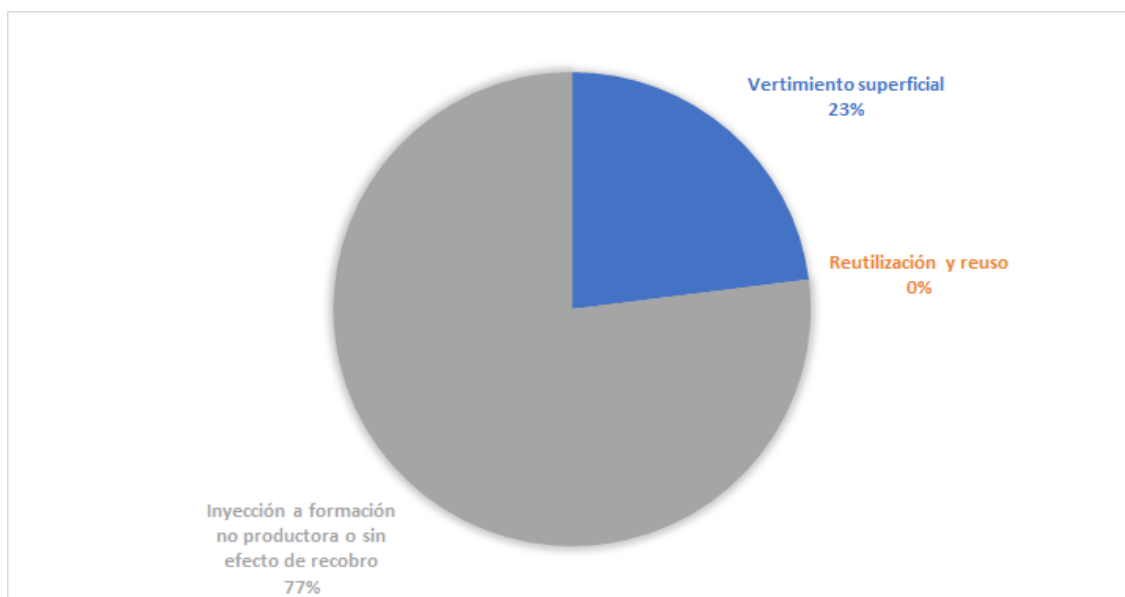
lado, la reutilización está encaminada a la reincorporación del efluente en procesos productivos de la empresa, tales como, elaboración de lodos de perforación, lavado de equipos, agua de refrigeración de bombas y procesos industriales [4]

Actualmente el campo Rubiales no cuenta con reutilización y reúso para gestión alternativa del agua de producción.

En la Figura No. 8 se muestra la gráfica correspondiente a cada porcentaje de volumen de agua dispuesto según su uso final

### Figura No. 8.

*Disposición final actual del agua de producción del campo Rubiales*



**Nota.** En el diagrama presentado se ilustran las relaciones porcentuales del flujo de agua de producción según su disposición final, donde se puede observar que actualmente el 77% del agua de producción se inyecta a formación no productora o sin efecto de recobro y el porcentaje restante se vierte superficialmente, vale aclarar que actualmente el campo no dispone de ningún porcentaje de agua para su reutilización ni reúso.

### **3. DESARROLLO DE LA MATRIZ MULTICRITERIO PARA LA SELECCIÓN DE PROCESOS**

De acuerdo con la caracterización del agua de producción a la salida del sistema de tratamiento actual del CPF2 del campo Rubiales, se determinó que hay parámetros que aún no cumplen con los límites establecidos por la Resolución, tales como, fluoruros y mercurio. Estos parámetros serán considerados como variables críticas en el desarrollo de la matriz, la cual tiene como objetivo, seleccionar la tecnología más apropiada para obtener un agua de producción tratada que cumpla con los parámetros establecidos en la Resolución 1207 del 2014. Por lo cual en este capítulo se elabora y desarrolla la matriz multicriterio para la selección de esta tecnología.

#### **3.1. Generalidades de una matriz multicriterio**

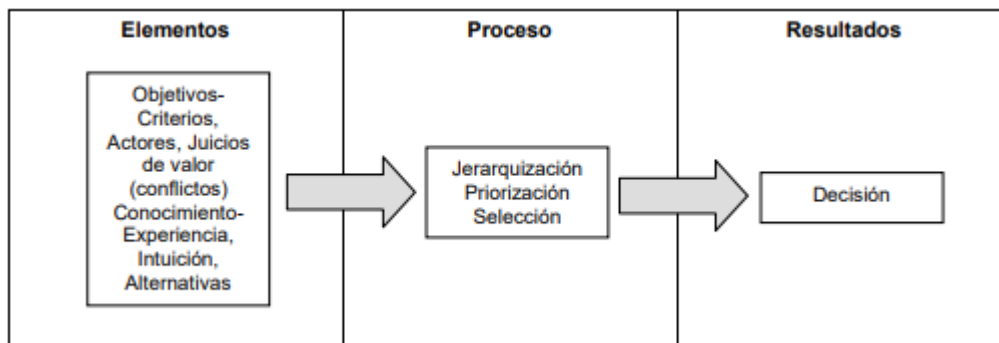
Las técnicas de decisión multicriterio (MCDM) son un campo avanzado dentro de la investigación de operaciones y representan un modelo y una herramienta metodológica para afrontar problemas de ingeniería complejos [45]

El proceso de decisión implica, necesariamente, la comparación entre varias alternativas, el hecho de comparar elementos se traduce en la necesidad de realizar mediciones que permitan aplicar los criterios de comparación y de este modo establecer preferencias entre ellos [46]

Los procesos de toma de decisiones han sido analizados y modelados matemáticamente para dotar a las personas encargadas de tomar decisiones, de herramientas que les permitan contar con una mejor visualización de los factores que intervienen en los procesos, así como de las preferencias existentes [45]. De acuerdo con [47] los factores que constituyen un problema de decisión se presentan en la Figura No. 9.

**Figura No. 9.**

*Esquema de un problema de decisión*



**Nota.** En esta figura se muestran los factores necesarios para el desarrollo de la matriz multicriterio, dividiéndose en elementos, proceso y resultados. Tomado de: J. F. Pacheco y E. Contreras, "Manual metodológico de evaluación multicriterio para programas y proyectos" 2008. [En línea]. Disponible en: <https://www.dii.uchile.cl/wp-content/uploads/2011/06/manual58-llpes.pdf>

Para el desarrollo de una matriz multicriterio es importante contar con la mayor cantidad de elementos de análisis y utilizar el proceso más adecuado para esto. El sistema indica unos input (elementos) y output del proceso (decisión) [47], los cuales se describen detalladamente a continuación:

### **3.1.1. Elementos**

Este factor está compuesto por los objetivos, criterios, actores involucrados, juicios de valor, conocimiento, experiencia, intuición, alternativas, entre otros. Los elementos que participan en un proceso de decisión, pueden estar dados bajo diferentes escalas, por tanto, es necesario transformar estas unidades a una unidad válida para todas las escalas [47].

### **3.1.2. Proceso**

Está integrada por la jerarquización y priorización:

**3.1.2.i. Jerarquización.** Relación según orden de prioridad entre las alternativas dadas, para esto se requiere un modelo de decisión [47]

**3.1.2.ii. Priorización.** Razón de proporcionalidad, es decir, que tan buena es una alternativa con respecto a otra, para esto se requiere un proceso de evaluación [47]

**3.1.3. Resultado**

Es la decisión sobre la selección de una alternativa, jerarquización o priorización del proceso [47].

**3.2. Tipos de análisis de matriz multicriterio**

**Tabla No. 5.**

*Tipos de análisis de matriz multicriterio*

<b>Método</b>	<b>Descripción</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Teoría de la utilidad multiatributo (MAUT)	Como lo indica su nombre, es una teoría de la utilidad esperada que puede decidir el mejor curso de acción en un problema dado asignando una utilidad a todas las consecuencias posibles y calculando el mejor resultado posible [48]	Tiene en cuenta la incertidumbre; puede incorporar preferencias, cualidad que no se ve en muchos MCDM Simplicidad en la resolución de problemas y brinda abundante libertad de acción para tomar la decisión [49]	Necesita mucha información de entrada; las preferencias deben ser precisas. [48]

**Tabla No. 5.** Continuación

<p>Proceso de jerarquía analítica (AHP)</p>	<p>Es un método utilizado para seleccionar una alternativa mediante el uso de comparación por pares de las alternativas basadas en su rendimiento relativo con respecto a los criterios [45] El proceso requiere que quien toma las decisiones proporcione evaluaciones subjetivas respecto a la importancia relativa de cada uno de los criterios y que, después especifique su preferencia con respecto a cada una de las alternativas de decisión y para cada criterio [50].</p>	<p>Fácil de usar; escalable; la estructura jerárquica se puede ajustar fácilmente para adaptarse a problemas de cualquier tamaño; no requiere de muchos datos [48], además de esto se puede analizar el efecto de los cambios superior sobre el nivel inferior [51]</p>	<p>Problemas debidos a la interdependencia entre criterios y alternativas; puede dar lugar a inconsistencias entre criterios de juicio y clasificación; cuenta con un rango de inversión [48]</p>
<p>Razonamiento basado en casos (CBR)</p>	<p>Este método recupera casos similares a un problema de una base de datos con datos existentes y propone una solución a un problema basado en la toma de decisiones con respecto a los casos más similares [48], es decir, permite resolver un problema mediante el empleo de problemas resueltos en el pasado [52]</p>	<p>No requiere de muchos datos; puede mejorar en tiempo extraordinario, además de presentar una adaptación a los cambios en el medio ambiente [48], también presenta una flexibilidad respecto a la representación [53]</p>	<p>Presenta sensibilidad a datos inconsistentes y requiere de muchos casos [47], también puede haber una tendencia a usar los casos previos ciegamente sin validarlos [53]</p>

**Tabla No. 5.** Continuación

<p>Análisis envolvente de datos (DEA)</p>	<p>Es una técnica de programación lineal para medir las eficiencias relativas de las alternativas. Califica las eficiencias de las alternativas entre sí; la alternativa más eficiente tiene una calificación de 1 y todas las demás son menores a este valor [48]</p>	<p>Es capaz de manejar múltiples entradas y salidas; la eficiencia se puede analizar y cuantificar [48], además de esto, no se requiere una hipótesis de relación funcional entre las entradas y salidas [54]</p>	<p>No tiene en cuenta datos imprecisos y se asume que todas las entradas y salidas son conocidas [48]</p>
<p>Técnica simple de clasificación de atributos múltiples (SMART)</p>	<p>Es un método compensatorio de toma de decisiones con múltiples criterios, en el cual se asignan calificaciones de alternativas directamente, en escalas naturales según los criterios [55]</p>	<p>Es una técnica sencilla, permite la asignación de peso a cualquier criterio, genera menos esfuerzo por parte de quienes toman las decisiones [48]</p>	<p>El procedimiento puede no ser conveniente [48]</p>
<p>Programación por objetivos (GP)</p>	<p>Es una metodología útil para la resolución de determinados problemas de programación multiobjetivo [56], este método permite elegir entre un número infinito de alternativas [48]</p>	<p>Puede aplicarse en problemas de gran escala y puede generar un número infinito de alternativas, puede presentar una ventaja significativa sobre algunos otros métodos [48]</p>	<p>Normalmente debe ser utilizado en combinación con otros MCDM [47]</p>



**Tabla No. 5.** Continuación

<p>ELECTRE</p>	<p>El método ELECTRE comprende dos procedimientos principales: el primero es la construcción de una o varias relaciones superiores, donde se compara de manera integral cada par de acciones; el segundo es un procedimiento de explotación, en este se elaboran recomendaciones a partir de los resultados obtenidos en la primera fase [57]</p>	<p>Tiene en cuenta la incertidumbre y vaguedad de las relaciones superiores [48]</p>	<p>Su proceso y resultado puede ser difícil de explicar en términos simples; el rango superior provoca las fortalezas y debilidades de las alternativas [48]</p>
<p>PROMETHEE</p>	<p>Esta técnica trata de establecer mediante la evaluación en función de k criterios, una ordenación jerarquizada en un conjunto de alternativas [58] Cuenta con 6 versiones [48]</p>	<p>Es simple en su concepción y aplicación [59], además, no requiere suposición de criterios [48]</p>	<p>No proporciona un método claro por el cual asignar pesos a los criterios [48]</p>
<p>Ponderación aditiva simple (SAW)</p>	<p>Es una función de valor que se establece en base a una suma de puntajes que representan el logro de la meta bajo cada criterio, multiplicado por los pesos de cada uno [48]</p>	<p>Capacidad de compensación entre criterios y el cálculo es simple, no requiere de softwares complejos [48]</p>	<p>Las estimaciones reveladas no siempre reflejan la situación real, en algunos casos el resultado obtenido puede que no sea lógico [48]</p>

**Nota.** En esta tabla se recopila información bibliográfica sobre los tipos de matrices multicriterio, realizando una pequeña descripción, además de ventajas y desventajas de cada una.

A partir de la información recopilada y mostrada en la Tabla No. 5 con respecto a los diferentes métodos de decisión multicriterio, se selecciona el proceso de análisis jerárquico (AHP) por su facilidad de ejecución y análisis, además de esto el método permite de una manera eficiente y gráfica organizar la información respecto al problema dado, facilitando la selección de la alternativa más adecuada para el objetivo planteado.

### **3.3. Desarrollo del análisis multicriterio**

En este apartado del documento se describe de forma detallada la matriz de decisión multicriterio seleccionada y la metodología llevada a cabo para el desarrollo de la misma.

#### **3.3.1. Proceso analítico jerárquico (AHP)**

El Proceso Analítico Jerárquico (AHP) es un método de decisión multicriterio propuesto por Tomas L. Saaty (1980) el cual se basa en la evaluación de diferentes criterios que permiten jerarquizar un proceso y su objetivo final consiste en optimizar la toma de decisiones [60] Este método utiliza una modelización jerárquica y una comparación por pares de las alternativas basadas en su rendimiento relativo con respecto a los criterios [45]. Algunas de las ventajas de este método sobre otros son la posibilidad de trabajar con aspecto intangibles y la de evaluar la consistencia de los juicios emitidos por el decisor [61]. Según [62] este método se fundamenta en:

- La estructuración del modelo jerárquico (representación del problema mediante identificación de meta, criterios, subcriterios y alternativas)
- Priorización de los elementos del modelo jerárquico
- Comparaciones binarias entre los elementos
- Evaluación de los elementos mediante asignación de “pesos”
- Ranking de las alternativas de acuerdo con los pesos dados
- Síntesis
- Análisis de sensibilidad

El AHP es una herramienta metodológica que ha sido aplicada en varios países para incorporar las preferencias de actores involucrados en un conflicto y/o proceso participativo de toma de decisión [63]

Para comprender más a fondo el fundamento sobre el cual se establece del AHP, es importante conocer los principios y axiomas de esta metodología:

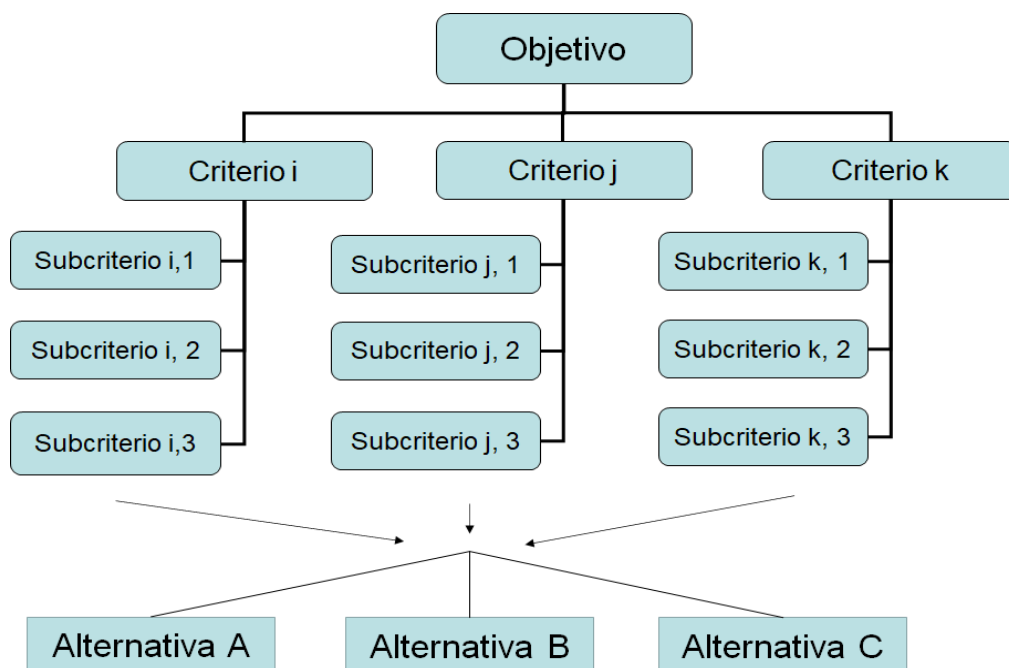
### 3.3.1.i. Principios.

3.3.1.i.a. Construcción de jerarquías. Los sistemas complejos pueden ser mejor comprendidos mediante su descomposición en elementos constituyentes (objetivo, criterios, subcriterios y alternativas), la estructuración de dichos elementos jerárquicamente, y la composición o sintetización de juicios, de acuerdo con la importancia relativa de los elementos de cada nivel de la jerarquía.

El objetivo global hace referencia al problema que se espera resolver, los criterios son los elementos que definen el objetivo global, por otro lado, los subcriterios definen el criterio debajo del cual se encuentran y finalmente las alternativas son las diferentes soluciones al objetivo principal.

**Figura No. 10.**

*Construcción de jerarquías*



**Nota.** En esta figura se presenta la jerarquización de los elementos constituyentes de un sistema complejo. Tomado de: Cepal.

“Metodología multicriterio” 2007

**3.3.1.i.b.** Establecimiento de prioridades. En este principio se perciben las relaciones entre los elementos que describen una situación, pueden realizar comparaciones a pares con respecto a diferentes criterios y de esta manera expresar la preferencia de uno sobre otro. Para este proceso se cuenta con la escala de Saaty mostrada en la Tabla No. 6

**Tabla No. 6.**

*Escala de Saaty*

Intensidad	Definición	Explicación
1	De igual importancia	Los dos criterios contribuyen de igual forma al objetivo
3	Importancia moderada	La experiencia y el juicio favorecen levemente a un criterio sobre el otro
5	Importancia fuerte	La experiencia y el juicio favorecen fuertemente a un criterio sobre el otro
7	Muy fuerte o demostrada	Un criterio es mucho más favorecido que el otro
9	Extrema	La evidencia que favorece un criterio sobre el otro, es absoluta y totalmente clara
2, 4, 6, 8	Valores intermedios	Cuando se necesita un compromiso de las partes entre valores adyacentes
Recíprocos	$a_{ij}=1/a_{ji}$	Hipótesis del método

**Nota.** En esta tabla se define la ponderación o valores a tener en cuenta para la matriz multicriterio según Saaty. Tomado de: Cepal. “Metodología multicriterio” 2007

Según [63] los tipos de comparaciones pareadas pueden ser de:

- Importancia: Este es apropiado en la comparación de criterios.
- Preferencia: Este es pertinente cuando se comparan alternativas

- Más probable: Utilizado cuando se compara probabilidad de los resultados, ya sea con criterios o alternativas.

“La manera de realizar estas comparaciones en forma ordenada es a través de la matriz de comparaciones a pares. Esta es una matriz que agrupa los criterios del mismo nivel de tal manera que se pueden comparar unos con respecto a otros y determinar la importancia relativa de cada uno” [64]. El desarrollo de esta matriz se abordará más adelante.

**3.3.1.i.c.** Consistencia lógica. Dada la ausencia de valores exactos para esta escala, es necesario realizar una verificación con el fin de evitar que la decisión sea incoherente. El AHP mide la inconsistencia global de los juicios mediante la proporción de consistencia, el valor de esta proporción debe ser inferior al 10% (esto depende del tamaño de la matriz de la comparación de pares). El índice de consistencia está dado por la Ecuación No. 1.

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \text{ Ecuación No. 1}$$

Donde:

$n$  =Tamaño de la matriz

$\lambda_{max}$  =Es el máximo valor propio de la matriz de comparaciones a pares

**3.3.1.ii. Axiomas.**

**3.3.1.ii.a.** Axioma recíprocal. Si frente a un criterio, una alternativa A es  $n$  veces mejor que B, entonces B es  $1/n$  veces mejor que A. Esto garantiza que el análisis se haga de manera bidireccional [65].

**3.3.1.ii.b.** Axioma de homogeneidad. Los elementos que son comparados deben ser del mismo orden de magnitud [60]

**3.3.1.ii.c.** Axioma de la síntesis. “Los juicios acerca de las prioridades de los elementos en una jerarquía no dependen de los elementos del nivel más bajo. Este axioma es rebatible y en algunos análisis no se aplica puesto que puede ser posible que exista dependencia de la importancia de un objetivo con el nivel más bajo” [65]

**3.3.2. Parámetros de la matriz**

A continuación, se establece el paso a paso para la estructuración del modelo jerárquico

**3.3.2.i. Definición del objetivo.** El objetivo de la matriz es seleccionar la alternativa de tratamiento de agua de producción más apropiada para cumplir con los parámetros de calidad establecidos en la Resolución 1207 del 2014 para la disposición final del agua de producción tratada en riego.

**3.3.2.ii. Identificación de criterio y subcriterios.** Después de definir el objetivo principal, la primera etapa para el desarrollo de la matriz multicriterio es la identificación de los criterios de evaluación y sus respectivos subcriterios, sobre los cuales estará definida la selección de la alternativa apropiada. En esta etapa se deben incluir aspectos vitales tanto cuantitativos como cualitativos a tener en cuenta en la toma de decisión.

En la selección de la alternativa de tratamiento de agua de producción se deben considerar criterios de tipo ambiental, técnico, social y económico, por tanto, con el fin de identificar cada uno de los criterios de decisión a evaluar, se les asignará una letra que permita facilitar el diseño y comprensión de la matriz multicriterio.

Estos criterios se enfocan en las variables críticas (fluoruros y mercurio) del agua de producción de salida del proceso actual de tratamiento que no cumplen con los límites dados en la Resolución 1207 del 2014.

Los criterios y subcriterios que se describen a continuación, se definen a partir de un concepto brindado por asesores expertos en el tema y se complementa con componente obtenido a partir de revisión bibliográfica.

## **CRITERIOS TÉCNICOS (T)**

**Viabilidad técnica (T1):** Este subcriterio hace referencia a la ubicación de la tecnología, su facilidad de transporte, la accesibilidad a la zona de operación, el tamaño de la tecnología, además del espacio que este ocupará y finalmente la facilidad de mantenimiento y operación de esta. Este subcriterio se evaluará cualitativamente.

**Eficiencia de remoción de iones (T2):** Este subcriterio hace referencia a la capacidad que tienen las tecnologías de remover los iones presentes en el agua de producción, estos suelen ser cianuros libres, sulfuros, cloruros, fluoruros y sulfatos. La importancia de tratar esta variable recae en que la alta concentración de sales en

la solución del suelo hace que el cultivo tenga que hacer un consumo extra de energía para poder absorber el agua del suelo [66] Este es un efecto similar al generado por el estrés hídrico el cual reduce la actividad fotosintética, el desarrollo vegetativo y el potencial productivo del cultivo [67]. Este subcriterio se evaluará cuantitativamente.

**Eficiencia de remoción de BTEX (T3):** Este subcriterio hace referencia a la capacidad que tienen las tecnologías de remover los compuestos BTEX. Estos son los hidrocarburos aromáticos de un anillo, es decir, benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos, e hidrocarburos saturados de bajo peso molecular. La exposición a estos compuestos en los organismos marinos puede causar narcosis y alteración en las membranas celulares. En particular, en las branquias, causando inflamación [67] Adicional a esto en cuanto a los impactos negativos en la salud humana, la exposición a estos compuestos puede ocurrir por ingestión, inhalación, o absorción a través de la piel y tiene efectos cancerígenos [45]. El contenido de BTEX no se especifica como variable en la resolución 1207 del 2014, pero se ha considerado debido a los efectos e impactos negativos mencionados previamente. Este subcriterio se evaluará cuantitativamente.

**Eficiencia de remoción de HAP (T4):** Este subcriterio hace referencia a la capacidad que tienen las tecnologías de remover los compuestos HAP. Estos son compuestos orgánicos formados por dos o más anillos aromáticos condensados, entre ellos se encuentran el naftaleno, benzo(a)pireno, fenantreno, entre otros [68]. La importancia de la remoción de estos es debido a que se ha demostrado que este tipo de compuestos tienen efectos negativos en la salud humana de tipo carcinogénico, genotóxico y/o mutagénicos [69]. El contenido de HAP tampoco está contemplado en la resolución 1207 del 2014, pero se consideran debido a los efectos negativos mencionados previamente. Este subcriterio se evaluará cuantitativamente.

**Eficiencia de remoción de metales pesados (T5):** Este subcriterio hace referencia a la capacidad que tienen las tecnologías de remover los metales y metaloides presentes en el agua de producción. Algunos de estos son, el plomo, cadmio, mercurio, níquel, entre otros. La remoción de estos compuestos son de gran importancia debido a que son capaces de acumularse en los suelos agrícolas, afectando la alcalinidad del suelo, cuando se encuentran en altas concentraciones, además son peligrosos por la toxicidad que tienen en los diferentes cultivos [69]. En

la salud humana genera un impacto negativo, pues estos pueden causar una lesión celular, originando enfermedades como esclerosis, pérdida de habilidades cognitivas, entre otras [71]. Este subcriterio se evaluará cuantitativamente.

**Madurez de la tecnología (T6):** Este criterio hace referencia a la trayectoria y confiabilidad de la tecnología, es decir, el tiempo de desarrollo desde la investigación básica hasta su implementación industrial. Este subcriterio se evaluará cualitativamente.

#### **CRITERIOS ECONÓMICOS (E):**

**Costo de capital (E1):** Hace referencia a la inversión inicial para la compra o alquiler de la tecnología. Este subcriterio se evaluará cuantitativamente.

**Costo de operación y mantenimiento (E2):** Son los costos asociados al funcionamiento del equipo como, el consumo y costo energético, utilización de químicos, mantenimiento y sistema de monitoreo remoto. Este subcriterio se evaluará cuantitativamente.

#### **CRITERIOS AMBIENTALES (A):**

**Emisiones de gases de efecto invernadero (A1):** Este subcriterio determina la contribución al efecto invernadero por parte de la tecnología, basándose en la cantidad de gases de efecto invernadero generados. Este subcriterio se evaluará cualitativamente,

**Residuos (A2):** Este subcriterio hace referencia a las corrientes resultantes de tipo sólido o líquido generadas por la tecnología. Es importante resaltar que la generación de estas, puede ocasionar la adición de etapas posteriores para el tratamiento y correcta disposición de las mismas. Este subcriterio se evaluará cualitativamente.

**Disposición final (A3):** Este subcriterio hace referencia a la manera en que se dispone la tecnología una vez haya cumplido su vida útil, para este factor la calificación se dará de acuerdo con la facilidad de disposición, es decir, entre mayor sea la cantidad de mecanismos de disposición, tendrá un mayor puntaje en la evaluación. Este subcriterio se evaluará cualitativamente.

#### **CRITERIOS SOCIALES (S):**



**Efectos en la salud humana (S1):** Este subcriterio hace referencia a los impactos negativos o daños a la salud que pueden ser propiciados por el uso de la tecnología, teniendo en cuenta que entre mayor sea el contacto directo (inhalación, ingestión, radiación o contacto con la piel) con los fluidos del proceso (contaminantes) por parte del operador tendrá una menor calificación en la evaluación. Este subcriterio se evaluará cualitativamente.

**Contaminación auditiva (S2):** Este subcriterio se enfoca en la cantidad de ruido provocado por la tecnología, es necesario considerar que si la tecnología genera altas cargas auditivas no es apropiado ubicarlo en una zona aledaña o cercana a poblaciones por las implicaciones a la salud que conlleva, es por esta razón que entre mayor sea la generación de ruido, menor será la calificación en la evaluación. Este subcriterio se evaluará cualitativamente.

**Generación de olores (S3):** Este subcriterio tiene en cuenta la producción de olores por parte de la tecnología, se evaluará cualitativamente.

**Riesgos de accidentes (S4):** Este subcriterio hace referencia a los accidentes que pueden generarse por la tecnología tales como, derrames, fugas, fallas en la estructura, fallos de control, fallos eléctricos y neumáticos, entre otros. Este subcriterio se evaluará cualitativamente.

### **3.4. Identificación de las alternativas (tecnología de tratamiento)**

La selección de las tecnologías candidatas para el sistema de tratamiento de agua de producción, se justifica a partir de los antecedentes del proyecto, en los cuales se cuentan con documentos de revisión de diferentes tecnologías de tratamiento de pulido tanto convencionales como no convencionales del agua de producción y documentos de tesis en los cuales se realizaron propuestas para la selección de tecnologías en proyectos similares. De esta forma se priorizan las alternativas de acuerdo con las ventajas ofrecidas, teniendo en cuenta criterios técnicos, ambientales, sociales y económicos.

A continuación, se realiza una descripción cualitativa de las tecnologías o alternativas seleccionadas

### **3.4.1. Osmosis inversa**

Esta es una de las alternativas consideradas, debido a que es una de las técnicas más utilizadas en la industria del tratamiento de agua, específicamente cuando se desean alcanzar altos parámetros de calidad en el efluente de salida. Una de las ventajas de la ósmosis inversa es un eficiencia en la eliminación de compuestos orgánicos solubles de bajo peso molecular, en comparación con otros tratamientos como la nanofiltración, principalmente esta tecnología se utiliza para desalinización del agua salobre y de mar, aunque actualmente se ha considerado que puede ser una alternativa para el tratamiento de aguas residuales municipales con un alto potencial para el tratamiento de agua proveniente de la industria petrolera, adicional a esto proyectos de tipo piloto han demostrado la posibilidad de transformar el agua de producción en agua dulce para uso agrícola y potable, sin embargo, algunas de las desventajas de esta técnica son los elevados costos de operación y mantenimiento [72] Finalmente, la ósmosis inversa ofrece un alto grado de ablandamiento y desmineralización, pero no asegura la remoción de los compuestos orgánicos tóxicos.

### **3.4.2. Oxidación avanzada foto fenton**

Esta alternativa fue seleccionada debido a que es un proceso económico y eficiente, algunas ventajas de esta tecnología son el uso de energía renovable en lugar de energía eléctrica, lo cual elimina los costos energéticos, la maximización de las tasas de reacción de AOP generando un mayor rendimiento y asimismo menores costos de capital debido a que el tamaño de la planta requerido es más pequeño y el uso de reactivos no tóxicos y fáciles de manipular [73]

### **3.4.3. Electrodiálisis**

Esta alternativa fue considerada debido a que es una de las tecnologías emergentes que ha demostrado ser exitosa a escala piloto, adicionalmente es una solución energéticamente eficiente y rentable para la reducción de sales disueltas en el agua de producción, además de esto, cuenta con una vida útil mayor que la de otras tecnologías de membrana como la ósmosis inversa y un ahorro en costos energéticos en comparación con los métodos convencionales de desalinización [72]

#### **3.4.4. Humedales artificiales**

Esta alternativa fue seleccionada ya que esta ha demostrado ser capaz de eliminar los contaminantes presentes en el agua de producción de los campos petrolíferos; si bien el tratamiento con humedales artificiales requiere de terrenos con grandes áreas, esta posee beneficios económicos y ambientales significativos. Los avances en el diseño de los humedales han mejorado la eficiencia del tratamiento y también han ayudado en la reducción del área requerida para el tratamiento de contaminantes a gran escala. Pueden incorporarse en la recuperación de tierras y no deben producir un flujo de desechos que requiera de un tratamiento posterior [75].

#### **3.4.5. Filtros de carbón activado**

Esta tecnología fue considerada gracias a la capacidad que tiene de retener contaminantes poco polares, covalentes y no disociados los cuales suelen ser de origen orgánico, sin embargo, es preferible aplicar este tratamiento en una etapa terciaria (pulido) ya que, en términos técnico-económicos, es más competitiva respecto a otros procesos, permitiendo llevar los niveles de contaminantes orgánicos de “relativamente bajos” a “muy bajos” [74]

Adicionalmente se realiza una recopilación bibliográfica a partir de estudios realizados por diversos autores, donde se cuantifican los rendimientos de cada tecnología con respecto a los subcriterios cuantitativos dados, estos se resumen en la Tabla No. 7 para cada una de las tecnologías propuestas.

**Tabla No. 7.**

*Recopilación bibliográfica de los subcriterios cuantitativos para cada tecnología*

<b>Subcriterio</b>	<b>Tecnología</b>	<b>Osmosis inversa</b>	<b>Oxidación solar foto fenton</b>	<b>Electrodiálisis</b>	<b>Humedales artificiales</b>	<b>Filtros de carbón activado</b>
T2	Eficiencia de remoción de iones (TDS) (fluoruros)	83-100% [72]	-	94-96% [45]	82% [75]	-

**Tabla No. 7. Continuación**

T3	Eficiencia de remoción de BTEX	Benceno 27-37% Tolueno 67-89% Xileno 94-98% Fenoles 99% [72]	75% [13]	95% [76]	60% [77]	95%-100% [72]
T4	Eficiencia de remoción de HAP	59-72% [78]	92.7-96.2% [77]	90-100% [80]	98% [81]	99% [82]
T5	Eficiencia de remoción de metales pesados (mercurio)	98-99% [83]	-	45.2-99.5% [84]	63.7% [85]	45-90% [86]
E1	Costo de capital en US\$/bbl	165 [45]	150 [87]	175 [45]	36-159 [88]	75-120 [89]
E2	Costo de operación y mantenimiento en US\$/bbl	0,03 [45]	0,739-0,85	0,02-0,64 [3]	0,001-2,00 [3]	0,086 [3]

**Nota.** Cabe resaltar que al momento de seleccionar las tecnologías candidatas para el tratamiento de agua de producción, se considera como un factor importante la capacidad de agua de tratar, la cual fue de 10 KBWPD, a partir de esto, se realiza la Tabla No. 8 en esta presenta la capacidad promedio para cada alternativa.

**Tabla No. 8.**

*Recopilación bibliográfica de capacidad por tecnología*

<b>Tecnología</b>	<b>Capacidad (KBWPD)</b>
Osmosis inversa	15 [45]
Oxidación avanzada foto fenton	N/A
Electrodiálisis	10 [45]
Humedales artificiales	Se adapta a la capacidad que se desee [30]
Filtros de carbón activado	0,07536 – 905,712 [90]

**Nota.** En esta tabla se recopila la información de la capacidad de tratamiento de cada tecnología seleccionada en unidades de barriles de agua por día.

### 3.5. Selección de la tecnología de tratamiento mediante el uso del software superdecisiones

Para el desarrollo de la matriz de selección de la alternativa, se elaboró una encuesta dirigida a siete (7) expertos en el área de tratamiento de agua de producción, con el fin de obtener evaluaciones subjetivas con respecto a la importancia relativa de cada uno de los subcriterios planteados. El formato de la encuesta se presenta en el Anexo 2, en esta encuesta se anexó la recopilación bibliográfica (Tabla No. 7) realizada para los subcriterios cuantitativos, la cual será primordial en la evaluación de cada una de las alternativas con respecto a cada subcriterio cuantitativo.

En adición a esto, para la evaluación de los criterios sociales se elaboró una encuesta adicional, la cual fue dirigida a tres (3) expertos. Esta encuesta es mostrada en el Anexo 3.

En la Tabla No. 9, se presenta la información de los expertos encuestados.

**Tabla No. 9.**

*Información de los expertos encuestados*

<b>Expertos</b>		
<b>Número</b>	<b>Perfil profesional</b>	<b>Empresa</b>
Experto 1	Líder de ingeniería de proyectos Gerencia de ingeniería Vicepresidencia de proyectos y perforación	Ecopetrol S.A
Experto 2	Profesional senior proyectos	Frontera Energy Corp
Experto 3	Líder ingeniería Activo Caño Sur Gerencia de ingeniería Vicepresidencia de proyectos y perforación	Ecopetrol S.A
Experto 4	Ingeniero químico, MSc en Ingeniería química	Industrias Proton Ltda
Experto 5	Ingeniera química y de proceso Ingeniera Senior proyectos	Frontera Energy Corp

**Tabla No. 9.** Continuación

Experto 6	Ingeniero de procesos Senior	Ecopetrol S.A
Experto 7	Ingeniero de procesos Senior	Ecopetrol S.A
Experto 8	Docente departamento Energías	Universidad de América

**Nota.** Se contó con el apoyo de 8 expertos en total, para el diligenciamiento de las 2 encuestas realizadas.

Los resultados del primer apartado de la Encuesta 1 (Anexo 2) se presentan en la Tabla No. 10, la escala de calificación (0-10) se definió en base a la matriz AHP; esta realiza una comparación por pares, la cual es mucho más exacta cuando la escala es mayor debido a que se puede identificar con mayor facilidad la relevancia de un subcriterio frente a otro en términos de la escala de Saaty.

**Tabla No. 10.***Valoración de los criterios*

Criterios	Subcriterios	Valoración dada por el encuestado						
		Experto 1	Experto 2	Experto 3	Experto 4	Experto 5	Experto 6	Experto 7
T É C N I C O S	Viabilidad técnica	2	8	9	8	6	6	10
	Eficiencia de remoción de iones	8	7	8	10	10	10	10
	Eficiencia de remoción de BTEX	7	3	10	9	10	10	10
	Eficiencia de remoción de HAP	0	5	10	9	10	10	10
	Eficiencia de remoción de metales pesados	9	8	9	9	10	10	10
	Madurez de la tecnología	8	10	9	8	6	8	10

**Tabla No. 10.** Continuación

E C O N Ó M I C O S	Costo de capital	10	10	6	10	7	8	8
	Costo de operación y mantenimiento	10	9	7	10	9	6	8
A M B I E N T A L E S	Emisiones de gases de efecto invernadero	4	8	8	0	10	7	8
	Residuos	9	8	8	10	10	7	8
	Disposición final	2	6	8	3	10	7	2
S O C I A L E S	Efectos en la salud humana	1	9	9	8	10	10	10
	Contaminación auditiva	1	9	8	8	8	4	0
	Generación de olores	1	8	8	0	6	4	7
	Riesgos por accidentes	1	9	9	10	8	6	5

**Nota.** La calificación de los criterios se realizó en orden de importancia, donde (1) es poco importante y (10) es muy importante. Si el encuestado consideraba que alguno de los criterios no debía ser tenido en cuenta en la selección de la tecnología, le asignaba un valor de (0) a tal criterio.

Los resultados obtenidos en el segundo apartado de la Encuesta 1 (Anexo 2), se presentan en la Tabla No. 11, para definir la escala de calificación (1-5), se consideró el número de alternativas seleccionadas, esto con el fin de facilitar al experto la jerarquización de las tecnologías propuestas.

Este apartado se adiciona con el propósito de obtener juicios subjetivos a partir de la experiencia de los encuestados y de esta forma realizar una comparativa con respecto

a los resultados obtenidos del software Superdecisions en base a los datos bibliográficos recopilados.

**Tabla No. 11.**

*Valoración de priorización de alternativas*

Encuestado	Valoración de priorización de tecnología				
	Ósmosis inversa	Solar foto fenton	Electrodiálisis	Humedales artificiales	Filtros de carbón activado
Experto 1	3	2	1	5	4
Experto 2	5	1	3	4	2
Experto 3	5	3	4	2	1
Experto 4	5	1	1	2	2
Experto 5	5	3	4	2	1
Experto 6	5	4	3	1	2
Experto 7	4	1	3	2	5

**Nota.** Se solicitó a los encuestados, que a partir de su experiencia y las características del efluente a tratar (mercurio y fluoruros fuera de límites establecidos por la normativa), priorizaran las tecnologías con una valoración de 1 a 5, donde 5 era la más apropiada y 1 es la menos apropiada, para el sistema de tratamiento de agua de producción.

Los resultados obtenidos del tercer apartado de la Encuesta 1 (Anexo 2), se presentan en la Tabla No. 12, esta escala de calificación se define debido a que el impacto ambiental se cuantifica de manera cualitativa.

**Tabla No. 12.**

*Calificación de impactos a los criterios ambientales*

Experto	Tecnologías	Emisiones de gases de efecto invernadero	Residuos	Disposición
1	Ósmosis inversa	1	4	2
	Solar foto fenton	1	1	1
	Electrodiálisis	1	3	1



**Tabla No. 12.** Continuación

	Humedales artificiales	2	1	1
	Filtros de carbón activado	1	1	2
2	Osmosis inversa	2	2	3
	Solar foto fenton	2	2	2
	Electrodiálisis	3	3	2
	Humedales artificiales	1	1	1
	Filtros de carbón activado	2	2	3
3	Osmosis inversa	1	2	4
	Solar foto fenton	1	2	4
	Electrodiálisis	1	3	2
	Humedales artificiales	1	2	2
	Filtros de carbón activado	1	3	3
4	Osmosis inversa	1	3	1
	Solar foto fenton	1	4	4
	Electrodiálisis	1	3	3
	Humedales artificiales	1	1	1
	Filtros de carbón activado	1	3	3
5	Osmosis inversa	2	2	3
	Solar foto fenton	2	3	3
	Electrodiálisis	1	2	1
	Humedales artificiales	1	1	3
	Filtros de carbón activado	1	2	3
6	Osmosis inversa	4	3	3
	Solar foto fenton	4	2	3
	Electrodiálisis	2	3	3
	Humedales artificiales	4	1	2
	Filtros de carbón activado	4	3	3
7	Osmosis inversa	2	4	4
	Solar foto fenton	1	3	4
	Electrodiálisis	4	2	2
	Humedales artificiales	1	3	1
	Filtros de carbón activado	1	3	3

**Nota.** En la tabla se presenta la calificación de los criterios ambientales, estos fueron calificados mediante una evaluación cualitativa de acuerdo al impacto negativo que pueden ser generados por cada tecnología; la escala lingüística utilizada fue Bajo,

Medio, Alto y Muy Alto a los cuales se les asoció un valor cuantitativo de 1, 2, 3 y 4, respectivamente.

Los resultados obtenidos de la Encuesta 2 (Anexo 3), se presentan en la Tabla No. 13 esta escala de calificación se define debido a que el impacto social también se cuantifica de manera cualitativa.

**Tabla No. 13.**

*Valoración de expertos a criterios sociales*

Experto	Tecnologías	Efectos en la salud humana	Contaminación auditiva	Generación de olores	Riesgos de accidentes
1	Osmosis inversa	1	1	1	1
	Solar foto fenton	1	2	2	1
	Electrodialisis	1	1	1	2
	Humedales artificiales	1	1	3	1
	Filtros de carbón activado	1	1	1	1
3	Osmosis inversa	2	4	3	1
	Solar foto fenton	4	2	3	1
	Electrodialisis	1	4	3	2
	Humedales artificiales	3	1	4	2
	Filtros de carbón activado	1	4	3	2
8	Osmosis inversa	2	2	2	2
	Solar foto fenton	1	1	1	1
	Electrodialisis	1	1	1	1
	Humedales artificiales	1	1	1	1
	Filtros de carbón activado	1	2	2	2

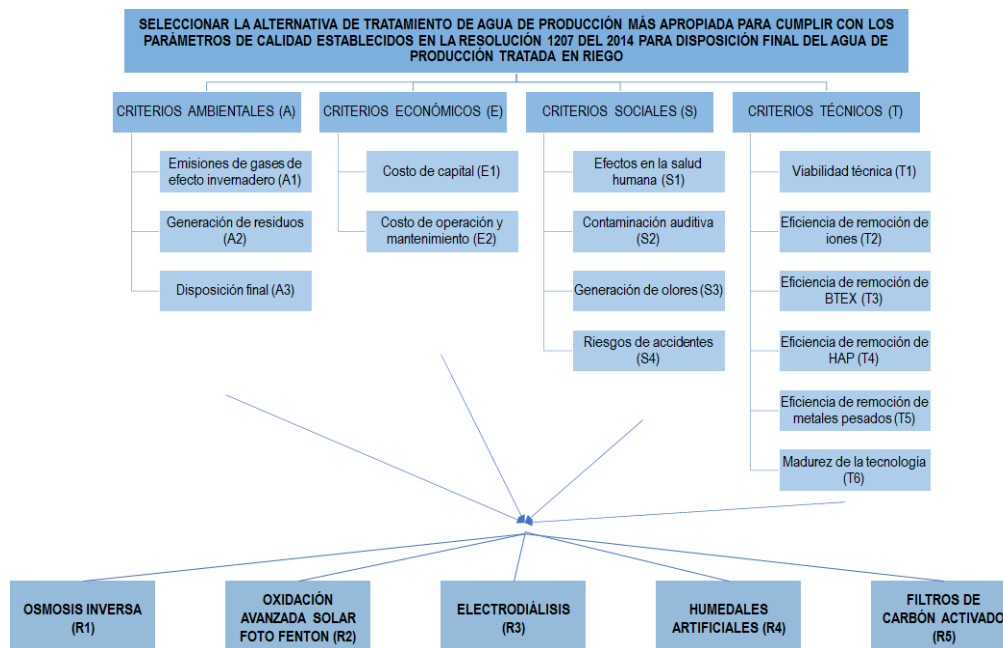
**Nota.** En la tabla se presenta la calificación de los criterios sociales, estos fueron calificados mediante la misma evaluación cualitativa que los criterios ambientales.

A partir de la información recopilada en las encuestas, se procedió a realizar la matriz de decisión multicriterio AHP mediante el software superdecisions, el cual proporciona herramientas para administrar el modelo AHP, ingresar los juicios, obtener resultados y además permite realizar un análisis de sensibilidad a los resultados obtenidos.

Inicialmente, se añadieron los elementos del sistema: El objetivo, los criterios, subcriterios y alternativas; posteriormente se realizó la jerarquización de cada uno de estos y su vinculación a la matriz, como se presenta en la Figura No. 11

**Figura No. 11.**

*Jerarquización de elementos de la matriz de decisión multicriterio*



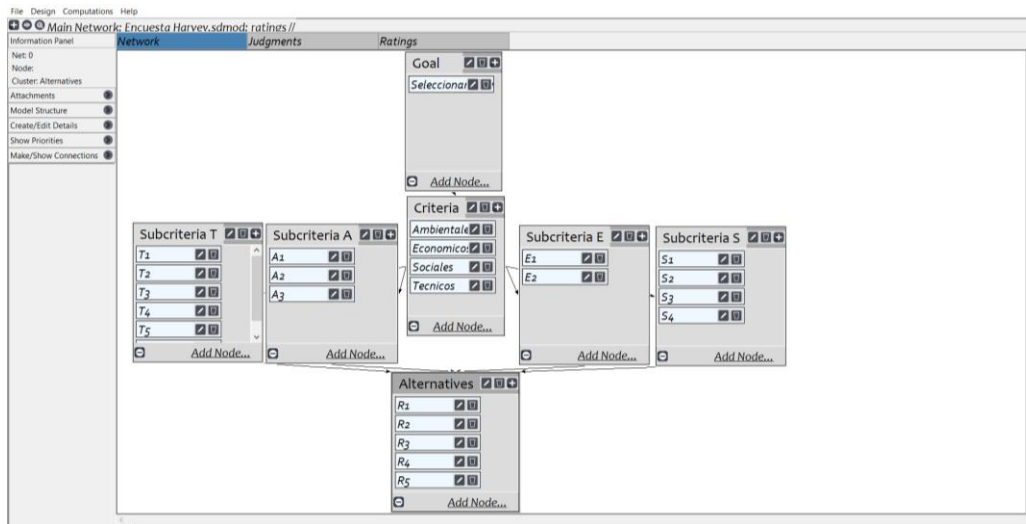
**Nota.** Elementos ingresados en la matriz de decisión multicriterio realizado mediante el software superdecisions

Después de esto se ingresaron los juicios de cada uno de los expertos en valores de la escala de Saaty, y a partir de estos se ponderaron los subcriterios y se seleccionó la alternativa más adecuada de acuerdo a los juicios emitidos.

En la Figura No. 12 se muestra el entorno del software superdecisions:

**Figura No. 12.**

*Entorno software Superdecisions*

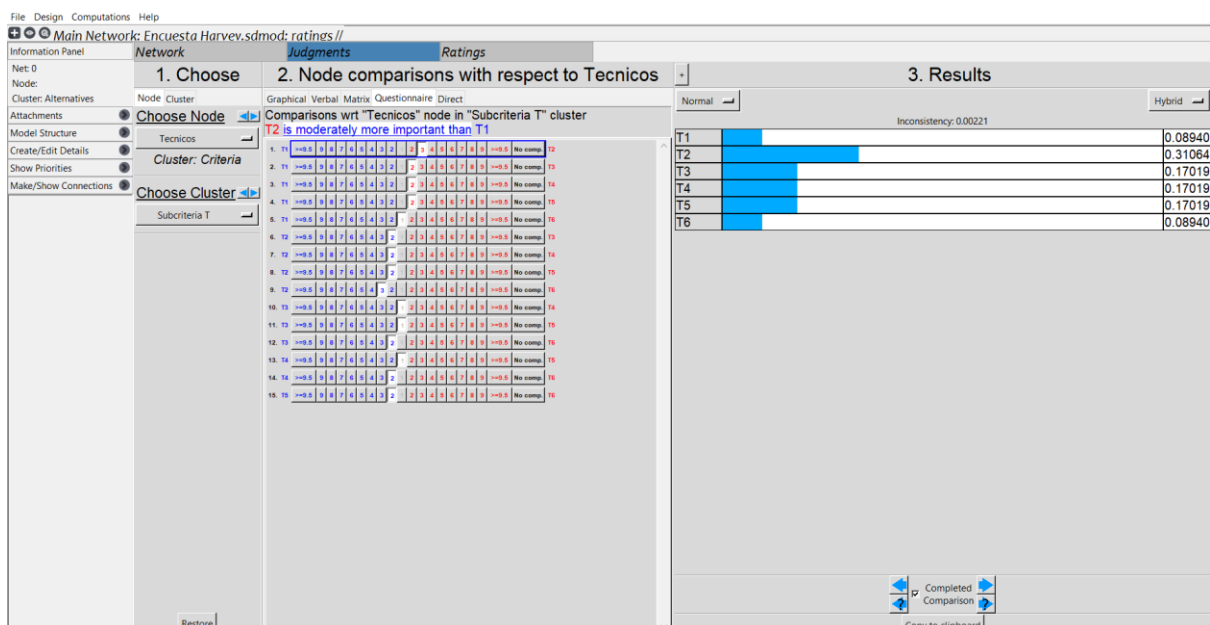


**Nota.** El objetivo, criterios, subcriterios y alternativas se adicionan al entorno de trabajo de superdecisions y se organizan jerárquicamente

En la pestaña judgements se ingresan los valores Saaty según los juicios entregados por los expertos y los determinados a partir de la revisión bibliográfica, como se muestra en la Figura No. 13.

**Figura No. 13.**

*Pestaña de juicios del software Superdecisions*

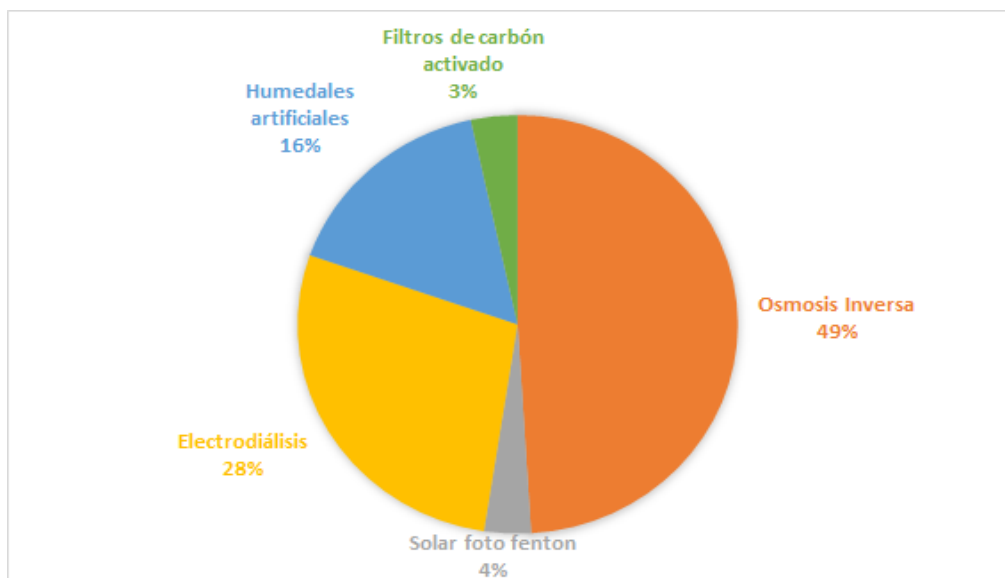


**Nota.** Este juicio se realiza para cada uno de los criterios, subcriterios y alternativas dadas. En el ítem choose node se puede seleccionar el criterio o subcriterio a evaluar. Los resultados representan los pesos y la importancia de un subcriterio respecto a otro, entre mayor sea el porcentaje mayor importancia tendrá.

Es importante mencionar que los subcriterios, % de remoción de iones y % de remoción de metales pesados, poseen gran relevancia para los expertos debido a que estas fueron consideradas variables críticas, ya que los fluoruros y mercurio, exceden los límites permisibles por la normativa para reúso del agua de producción tratada en riego. Por esta razón la tecnología que sea seleccionada debe ser competente en la remoción de estos componentes. Para identificar cuál de las alternativas seleccionadas posee una mayor capacidad de remoción de compuestos como fluoruros y mercurio, se realiza una ponderación cuantitativa a partir de la información tomada de la Tabla No. 7 de recopilación bibliográfica. Para este fin se ingresan los estimados al software Superdecisiones y los resultados entregados se presentan en la Figura No. 14 y 15

**Figura No. 14.**

*Calificación de las tecnologías en el subcriterio de porcentaje de remoción de iones*

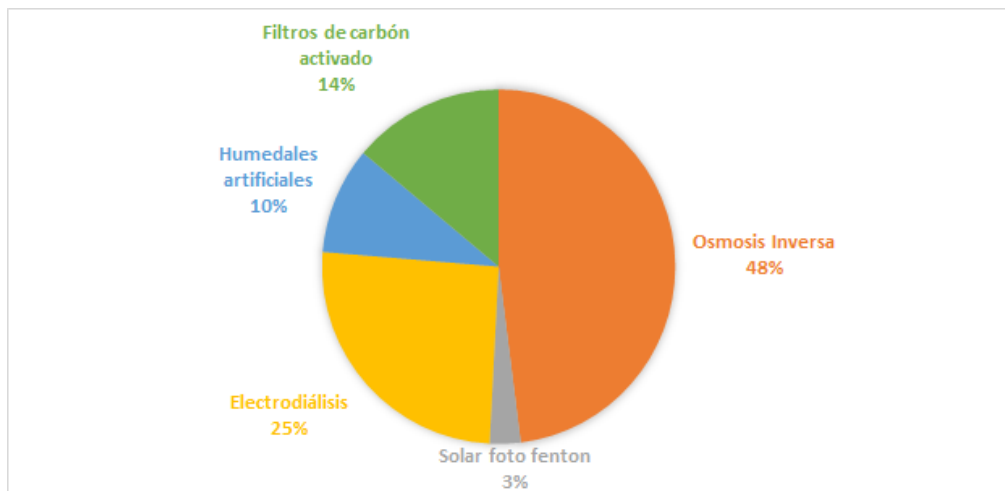


**Nota.** En este diagrama se presenta la calificación de las tecnologías en el subcriterio porcentaje de remoción de iones, la cual se realizó teniendo en cuenta la información bibliográfica mostrada en la Tabla No.

7. Se puede evidenciar que la ósmosis inversa, presenta una ventaja considerable frente a las otras alternativas evaluadas.

**Figura No. 15.**

*Calificación de las tecnologías en el subcriterio de porcentaje de remoción de metales pesados*



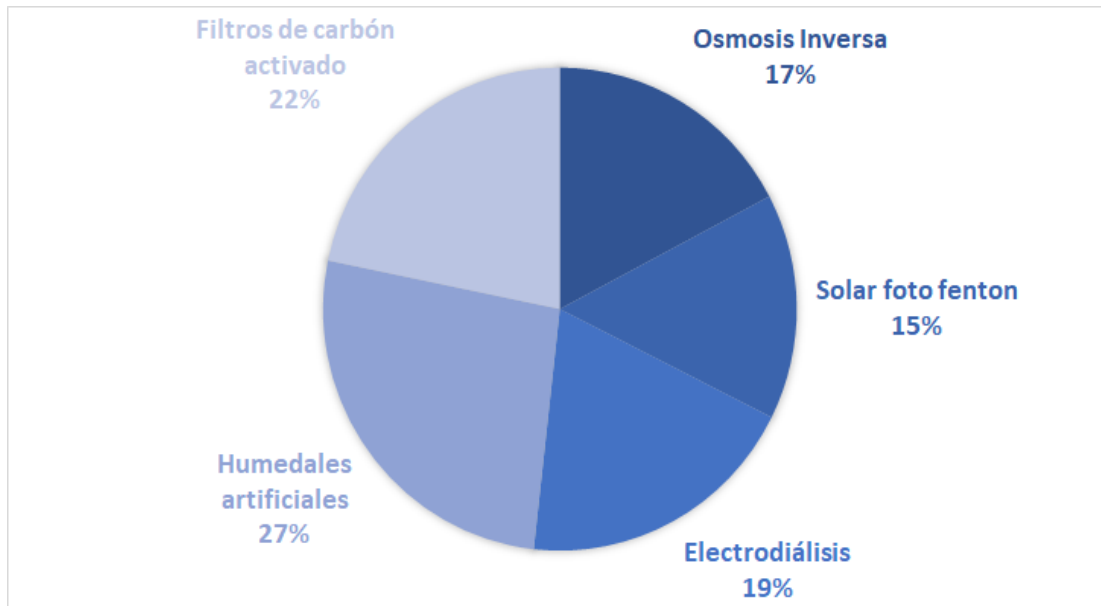
**Nota.** En este diagrama se presenta la calificación de las tecnologías en el subcriterio porcentaje de remoción de metales, la cual también se realizó teniendo en cuenta la información bibliográfica recolectada en la Tabla No. 7. Se puede evidenciar que la ósmosis inversa, presenta una ventaja considerable frente a las otras alternativas evaluadas.

Finalmente, para la selección de la alternativa más adecuada se consideran tanto los resultados obtenidos a partir de la matriz de decisión multicriterio, soportados con la información bibliográfica recopilada en la Tabla No. 7; como también los juicios entregados por los expertos presentados en la priorización de las tecnologías en la Tabla No. 11

Los resultados obtenidos de cada factor considerado se muestran en las siguientes figuras:

**Figura No. 16.**

*Resultado de la priorización de alternativas según la matriz multicriterio*

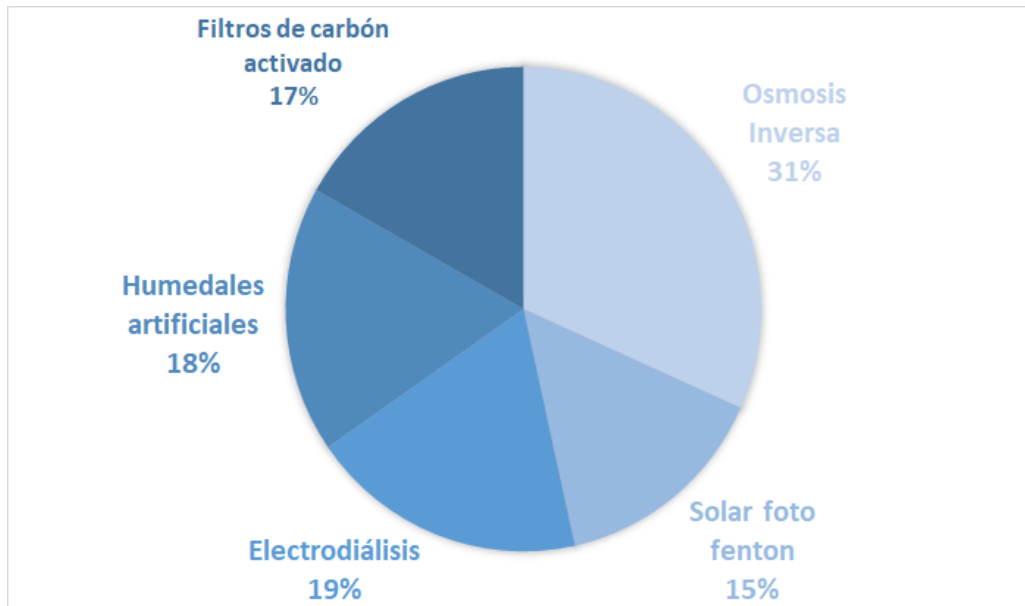


**Nota.** La gráfica presenta los resultados obtenidos por la matriz multicriterio mediante el software Superdecisions, donde los porcentajes representan la ponderación de las tecnologías propuestas, siendo humedales artificiales la opción más apropiada con un 27%, seguida de filtros de carbón activado con un 22%, electrodiálisis en tercer lugar con 19%, precedida de osmosis inversa con un 17% y en último lugar solar foto fenton con un 15%.

Como se mencionó anteriormente, se considera de gran importancia el componente subjetivo dado por los expertos en la valoración de cada tecnología. A partir de los cuales se obtienen los resultados normalizados que se muestran en la Figura No. 17

**Figura No. 17.**

*Resultado priorización de alternativas según los expertos.*



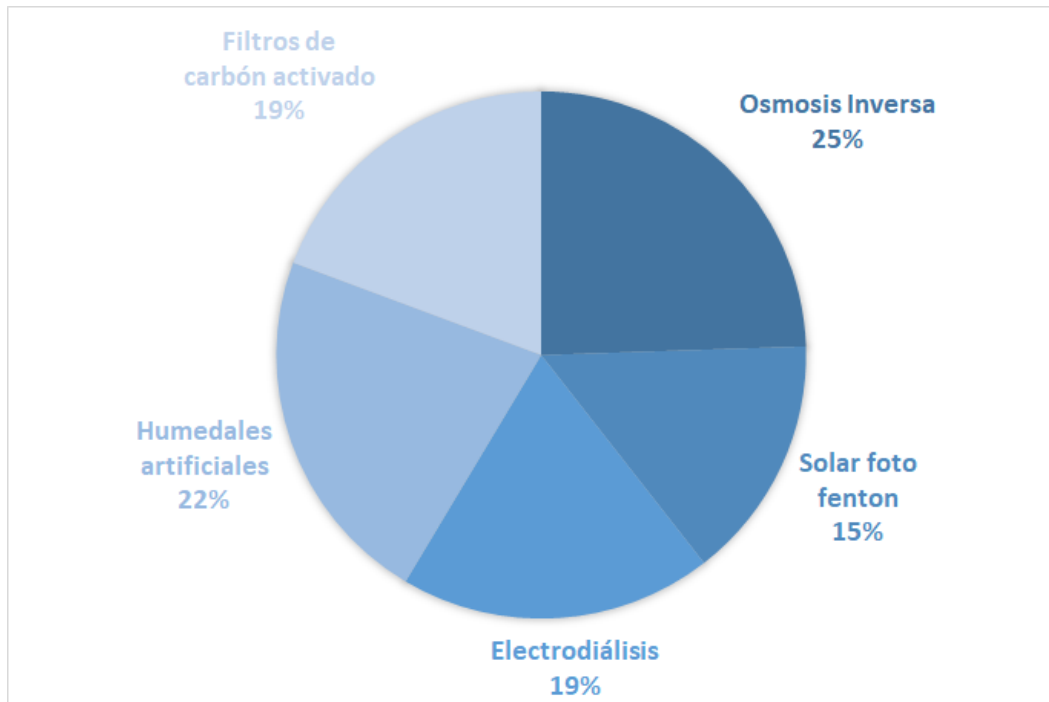
**Nota.** La gráfica presenta los resultados obtenidos en la valoración dada por los expertos, a partir de la cual se puede observar que la tecnología considerada más apropiada es la ósmosis inversa con un 31%, seguida de la electrodiálisis con 19%, humedales artificiales en tercer lugar con un 18%, precedida de filtros de carbón activado con 17% y finalmente solar foto fenton 15% .

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en la Figura 16 y 17, se obtiene la ponderación final para las tecnologías, mostrada en la Figura No. 18. Se le atribuye un 50% del peso de la ponderación final a los juicios entregados por los expertos; pues estos se basan en la experiencia y conocimiento dado a partir de la aplicación y trabajo en escenarios reales con este tipo de alternativas y el otro 50% corresponde a los resultados arrojados por el software Superdecisions, los cuales se soportan en información bibliográfica y datos cuantitativos.



**Figura No. 18.**

*Ponderación final de las alternativas de tratamiento.*



**Nota.** La gráfica presenta la ponderación final de las tecnologías consideradas, esta se obtiene promediando los resultados de la Figura 16 y 17 definiendo así la ósmosis inversa como la mejor opción para el sistema de tratamiento.

Finalmente, después de todo el análisis efectuado a partir de las encuestas de expertos y la realización de la matriz multicriterio se selecciona la ósmosis inversa como la tecnología a trabajar para el siguiente capítulo del proyecto investigativo.

#### 4. SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO SELECCIONADO PARA EL CAMPO RUBIALES

En este capítulo se realiza una validación del sistema de tratamiento actual y el diseño de la unidad de ósmosis inversa seleccionada previamente en la matriz de decisión multicriterio, mediante una simulación en conjunto con los programas excel, Aspen Hysys y LewaPlus®. Para la unidad de la celda de flotación y filtro cáscara nuez se utiliza excel, la simulación del decantador en Aspen Hysys y finalmente la ósmosis inversa en LewaPlus®. A continuación, se describe la metodología usada por equipo para la simulación:

##### 4.1. Unidad de celda de flotación por aire inducido

El modelo de la celda de flotación se rige bajo las mismas leyes del sistema de sedimentación, el cual está dado por la Ley de Stokes, esta es utilizada para calcular la tasa de aumento de las burbujas, la agregación de burbuja-aceite y el movimiento vertical de una partícula esférica a través de un fluido [91]. La ley de Stokes está dada por la ecuación 1:

**Ecuación 1. Ley de Stokes**

$$V_t = \frac{gD^2(\rho_w - \rho_B)}{18\mu}$$

Donde:

$V_t$ : Velocidad terminal de ascenso, m/s.

$g$ : constante gravitacional = 9.8 m/s<sup>2</sup>

$D$ : Diámetro de la burbuja, m.

$\rho_w$ : Densidad del agua, Kg/m<sup>3</sup>.

$\rho_B$ : Densidad de la burbuja de aire, Kg/m<sup>3</sup>.

$\mu$ : Viscosidad de la fase acuosa, Pa/s.

La celda de flotación IAF utiliza como tipo de gas, aire; según [91] el rango para el tamaño de burbuja en celdas de aire inducido (mezcla mecánica) se encuentra entre

los valores de 100 a 1000  $\mu\text{m}$ . El valor de la viscosidad dinámica de la fase acuosa a la temperatura de 71, 7°C es de  $4,538 \times 10^{-4}$  Pa/s y la densidad del agua es de 976  $\text{Kg/m}^3$ , datos obtenidos a partir de información suministrada por la empresa. Según [92] la densidad de la burbuja de aire a 1 atm y 71,1°C es  $1,02485 \text{ Kg/m}^3$

Al aplicarse la ecuación 1 se obtiene la velocidad de ascenso de las partículas en la celda de flotación,  $V_t = 1,17 \text{ m/s}$

Posterior a esto, se analiza la relación gas-sólidos y aceite, la cual define la cantidad de masa de aire que se precipita por unidad de masa de sólidos y aceite del agua de producción [91] Este factor es de gran importancia debido a que la cantidad de aire ingresada a la celda define la eficiencia en la remoción de sólidos y aceites, por otro lado, cabe resaltar que la correcta determinación de este valor evita el desperdicio energético, relacionado con los impulsores mecánicos, este parámetro está dado por la Ecuación 2

**Ecuación 2. Relación Gas - Sólidos y aceite**

$$\frac{G}{S} = 1,3 * P_{Sat} * \frac{(F * P - 1)}{[S]}$$

*Nota.* Tomado de: M. A. Riera and N. A. G. Chavez, "Diseño de una unidad de flotación con aire disuelto para la remoción de contaminantes de las aguas residuales generadas en una empresa manufacturera," Revista Digital De Investigación Y Postgrado, vol. 5, (2), pp. 2, 2015.

Donde,

G/S: Relación gas- sólidos y aceite, mg/mg.

$P_{Sat}$ : Presión de saturación del aire en el agua, ml/L\*atm.

[S]: Concentración de sólidos y aceite total, mg/L.

F: Fracción de aire disuelto en el agua.

P: Presión de entrada de aire a la corriente de agua, atm

Según [94] la presión de saturación del aire en el agua es de 16,588 ml/L\*atm, el valor de fracción de aire disuelto en el agua es típicamente 0,8 [91], la presión de entrada

del aire a la corriente de agua es de 1,87 atm según información brindada por la empresa y finalmente, la concentración de sólidos y aceite total fue tomada a partir de la caracterización del fluido entregada por la empresa, el cual es de 1396 mg/L. Al aplicarse la ecuación 2 se obtiene la relación gas- sólidos y aceite la cual equivale a  $7,66 \times 10^{-3}$  mg/mg.

A continuación, se realiza el cálculo de la cantidad de aire despresurizada en la celda mediante la ecuación 3.

**Ecuación 3.** *Cantidad de aire despresurizada en la celda*

$$G_s = S_a * \left( \frac{F * P}{P_a} - 1 \right)$$

Donde,

G<sub>s</sub>: Cantidad de aire despresurizado en la celda, ml/L.

S<sub>a</sub>: Solubilidad del aire a presión atmosférica, ml/L.

P: Presión de saturación, KPa.

P<sub>a</sub>: Presión atmosférica, KPa.

A partir de [95] la solubilidad del aire a presión atmosférica y a la temperatura de operación (71,1°C) es de 6,48 ml/L, la presión de saturación es 275790 Pa [91] y el valor de la presión atmosférica en campo Rubiales es de 100883,33 Pa

Al aplicarse la ecuación 3 se obtiene que la cantidad de aire despresurizado en la celda es de 7,69 ml/L.

Las dimensiones y especificaciones de la celda de flotación para el tren de tratamiento 1 en el campo Rubiales se muestran a continuación en la Tabla No. 14:

**Tabla No. 14.**

*Dimensiones y especificaciones de la celda de flotación*

<b>Criterio</b>	<b>Valor</b>
Altura (m)	2,18
Longitud (m)	7,31
Ancho (m)	4,1
Caudal diario (m <sup>3</sup> /día)	15898,76
Presión de diseño (Pa)	100883,33
Temperatura de diseño (°C)	85
Presión de operación (Pa)	100883,33
Temperatura de operación (°C)	71,1
Número de compartimientos	4
Tiempo de residencia (min)	4

**Nota.** En la tabla se muestran las especificaciones de diseño y operación de la celda de flotación que se encuentra en funcionamiento actualmente en el tren de tratamiento 1 del CPF2 del campo Rubiales.

Para realizar la validación de la unidad de flotación se realiza inicialmente el cálculo de su área superficial, la cual es la superficie horizontal donde se da el contacto entre las burbujas y el fluido. Esta se calcula mediante la ecuación 4.

**Ecuación 4.** *Área superficial de la celda de flotación*

$$A_s = \text{Longitud de la celda} * \text{Ancho de la celda}$$

**Nota.** Tomado de: M. Riera and N. Graterol, "DESIGN OF A UNIT DISSOLVED AIR FLOTATION FOR REMOVAL OF POLLUTANTS OF THE WASTEWATER GENERATED IN A MANUFACTURING COMPANY," vol. 55, pp. 777–796, 2015.

Se continúa calculando el volumen total o capacidad nominal de la celda, este valor se calcula a partir de la ecuación 5.

**Ecuación 5. Volumen total o capacidad nominal de la celda**

$$Volumen\ total\ de\ la\ celda = As * Altura\ de\ la\ celda\ de\ flotación$$

**Nota.** Tomado de: M. Riera and N. Graterol, “DESIGN OF A UNIT DISSOLVED AIR FLOTATION FOR REMOVAL OF POLLUTANTS OF THE WASTEWATER GENERATED IN A MANUFACTURING COMPANY,” vol. 55, pp. 777–796, 2015.

El volumen operativo de la celda hace referencia al espacio donde se da la separación del agua y el aceite, este se calcula a partir de la ecuación 6.

**Ecuación 6. Volumen operativo de la celda**

$$Volumen\ operativo = As * Altura\ efectiva\ de\ la\ celda\ de\ flotación$$

**Nota.** Tomado de: M. Riera and N. Graterol, “DESIGN OF A UNIT DISSOLVED AIR FLOTATION FOR REMOVAL OF POLLUTANTS OF THE WASTEWATER GENERATED IN A MANUFACTURING COMPANY,” vol. 55, pp. 777–796, 2015.

La altura efectiva del fluido corresponde al 85% de la altura de la celda de flotación.

El tiempo de residencia en una celda de flotación tipo IAF comúnmente oscila entre 3 y 5 min, esto depende principalmente de las características del agua de proceso y el rendimiento de la la unidad, Adicionalmente, este tipo de celda cuenta con una gran superficie en un pequeño volumen, lo cual se ve reflejado en sus cortos tiempos de residencia [91].

El tiempo de residencia en la celda de flotación se puede calcular a partir de la ecuación 7.

**Ecuación 7. Tiempo de residencia**

$$Tr = 1440 * \frac{W}{Q}$$

**Nota.** Tomado de: D. García and P. Vivas, “Ampliación de la capacidad del sistema de tratamiento de agua de producción mediante el dimensionamiento conceptual de nuevos equipos en la estación jaguar ubicada en el bloque caracara.,” Fundación Universidad de América, 2016.

donde,

Tr: Tiempo de residencia en la celda de flotación, min.

W: Capacidad de operación de la celda de flotación, m<sup>3</sup>.

Q: Caudal, m<sup>3</sup>/día.

En la Tabla No.15 se presentan los datos de diseño calculados previamente.

**Tabla No. 15.**

*Datos de diseño de la celda de flotación calculados*

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Área superficial (m <sup>2</sup> )	30,26
Volumen total (m <sup>3</sup> )	66,03
Volumen operativo (m <sup>3</sup> )	56,13
Tiempo de residencia (min)	5,08

**Nota.** La tabla muestra los datos de diseño de la celda de flotación calculados a partir de la simulación

Posteriormente, se procede a realizar el cálculo de la eficiencia de la celda de flotación utilizando la ecuación 8.

**Ecuación 8.** *Eficiencia de la celda de flotación*

$$Et = 1 - [1 - E]^n$$

**Nota.** Tomado de: H. Rawlins, "Experimental Study on Oil and Solids Removal in Nutshell Filters for Produced Water Treatment," 2018 [En línea]. Disponible en: <http://eprocess-tech.com/wp-content/uploads/2016/10/SPE-190108-MS.pdf>

donde,

Et: Eficiencia total de la celda de flotación.

E: Eficiencia por compartimiento.

n: Número de compartimientos.

La eficiencia por compartimiento se determina a partir de datos heurísticos del proceso. En la tabla No. 16 se presentan los datos de eficiencia total de la celda de flotación.

**Tabla No. 16.**

*Eficiencia total de la celda de flotación.*

Número de Compartimientos	Eficiencia total (Et)
1	0,50
2	0,75
3	0,87
4	0,94
5	0,97

**Nota.** Tomado de: M. Stewart and K. Arnold, Part 1 - Produced Water Treating Systems. Boston: Gulf Professional Publishing, 2011, pp. 1–134 [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781856179843000018>

Los datos de eficiencia total de la celda fueron calculados para una eficiencia de diseño del 50% por compartimiento utilizando la ecuación 8.

El dato de eficiencia correspondiente para la celda de flotación estudiada, la cual cuenta con 4 compartimientos es de 0,94.

Continuamente con el valor de eficiencia total de la celda, se calcula la remoción de la celda de flotación estudiada, mediante la ecuación 9.

**Ecuación 9.** *Remoción de la celda de flotación*

$$\text{Remoción de la celda de flotación} = Et * [S]$$

Donde

Et: Eficiencia total de la celda de flotación

[S]: Concentración de sólidos y aceite total, mg/L



La remoción de la celda de flotación es de 1308,75 mg/L de sólidos y aceite y la concentración restante en la corriente de agua a la salida de la celda de flotación es de 87,25 mg/L. Esta cantidad es validada con las especificaciones de remoción del equipo entregadas por la empresa, donde la carga de sólidos y aceite a la salida de la celda debe ser menor a 120 mg/L.

Finalmente se calcula el % de remoción de la celda, a partir de la ecuación 10.

**Ecuación 10. % de remoción de la celda de flotación**

$$\% \text{ de remoción de la celda de flotación} = \frac{\text{Remoción de la celda de flotación}}{[S]} * 100\%$$

Donde,

[S]: Concentración de sólidos y aceite total, mg/L

De esta forma se obtiene un % de remoción del 93,75% de la celda de flotación, el cual se valida a partir de bibliografía, donde el % de remoción para sistemas IAF oscila entre 93-96% [91]

La simulación de la celda de flotación se realizó mediante una programación con visual basic en excel. En la figura No. 19 se presenta el entorno inicial de la simulación.

## Figura No. 19.

### Entorno inicial de la simulación de la celda de flotación

**POR FAVOR TENGA EN CUENTA LAS SIGUIENTES RECOMENDACIONES:**

En este documento se generó un algoritmo teniendo en cuenta los fenómenos de cada una de las unidades representadas y necesarias para el sistema de tratamiento de agua de producción del campo Rubiales, por tal motivo se cuentan con unas restricciones para el uso de este documento

- 1 La simulación solo aplica para sistemas que usan aire en la celda de flotación por aire inducido
- 2 Para sistemas de flotación con aire inducido el diámetro de burbuja debe estar entre los 100 y 1000 micrómetros
- 3 Por favor ingrese correctamente los parámetros solicitados para la correcta convergencia de la simulación
- 4 Para el parámetro de compartimientos de la celda de flotación este debe ser un valor entre 1 y 5 para el cálculo adecuado de la eficiencia

INGRESO DE PARÁMETROS PARA LA SIMULACIÓN

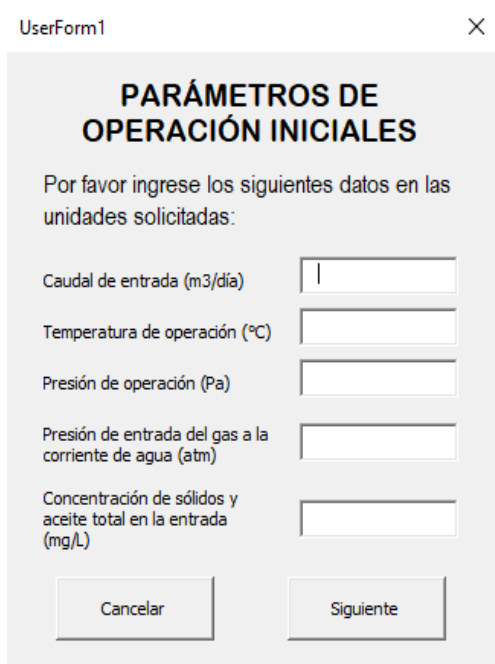
**PARA INICIAR LA SIMULACIÓN DÉ  
CLICK EN EL BOTÓN DE INGRESO DE  
PARÁMETROS**

**Nota.** Previo al ingreso de parámetros para la simulación el programa presenta unas recomendaciones asociadas al diseño realizado, las cuales deben tenerse en cuenta para la correcta convergencia de la simulación

Cuando se selecciona el botón de ingreso de parámetros para la simulación el programa genera una ventana en la cual solicita al usuario las condiciones iniciales del proceso, como se presenta en la Figura No. 20

## Figura No. 20.

### *Ingreso de parámetros de operación iniciales*



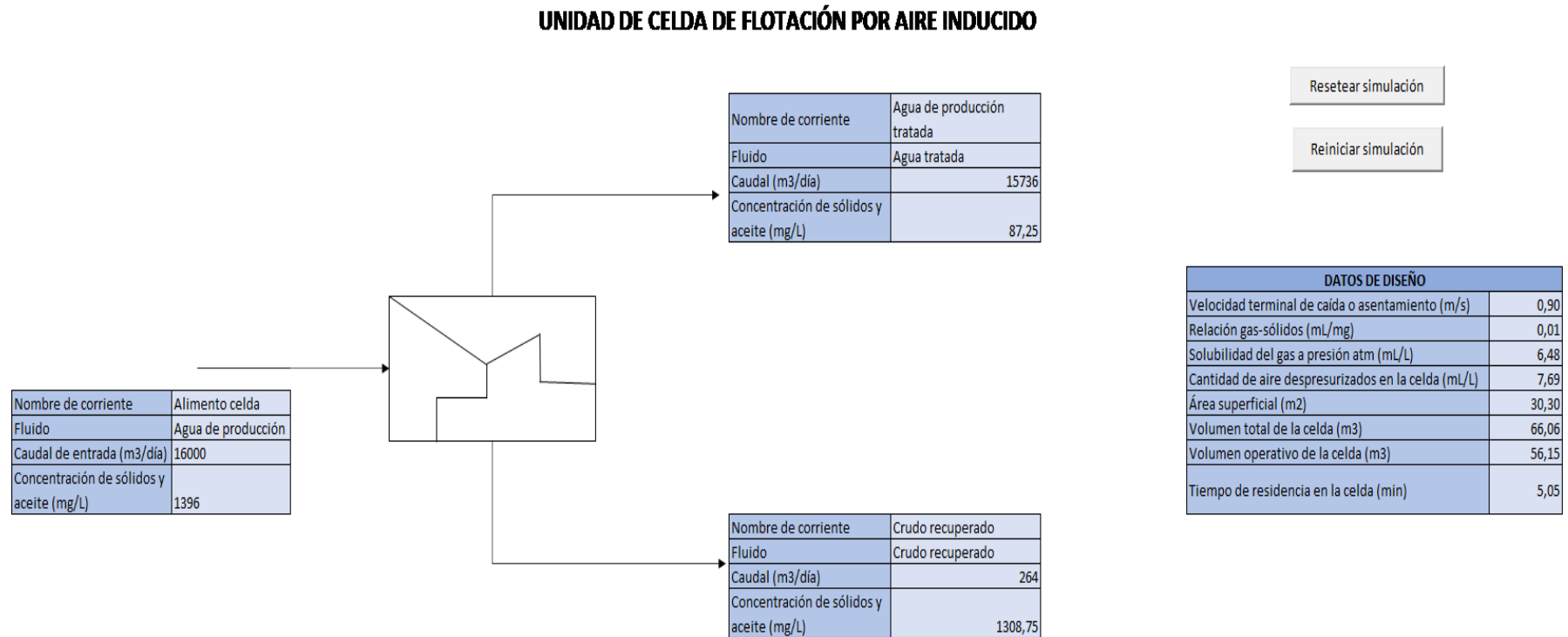
The screenshot shows a window titled "UserForm1" with a close button (X) in the top right corner. The main heading is "PARÁMETROS DE OPERACIÓN INICIALES". Below the heading, there is a prompt: "Por favor ingrese los siguientes datos en las unidades solicitadas:". There are five input fields, each with a label to its left: "Caudal de entrada (m3/día)", "Temperatura de operación (°C)", "Presión de operación (Pa)", "Presión de entrada del gas a la corriente de agua (atm)", and "Concentración de sólidos y aceite total en la entrada (mg/L)". At the bottom of the form, there are two buttons: "Cancelar" on the left and "Siguiente" on the right.

**Nota.** El usuario debe ingresar todos los parámetros solicitados en las unidades que se especifican para obtener una simulación congruente.

Los resultados arrojados por la simulación de la celda de flotación se muestran en la Figura No. 21

**Figura No. 21.**

*Resultados de la simulación de la celda de flotación por aire inducido*



**Nota.** La simulación entrega los resultados mediante un diagrama, donde se presentan, la corriente de alimentación, las corrientes de salida y los datos de diseño de la unidad. Adicionalmente se cuenta con un botón para el reinicio de la simulación.

La simulación de la unidad permite realizar la validación de la celda de flotación IAF actual del tren 1 del sistema de tratamiento del CPF2 del campo Rubiales.

#### **4.1.1. Validación unidad celda de flotación**

La validación de la celda de flotación se realiza estadísticamente, mediante la recopilación de datos tomados de diferentes autores, donde mediante una desviación estándar, se determina la dispersión de los datos consultados con respecto a los obtenidos en la simulación. De esta forma, se puede verificar la confiabilidad del modelo desarrollado y los resultados obtenidos.

Los datos de validación para el tiempo de residencia se muestran en la Tabla No. 17.

**Tabla No. 17.**

*Recopilación de datos de tiempo de residencia para la celda de flotación*

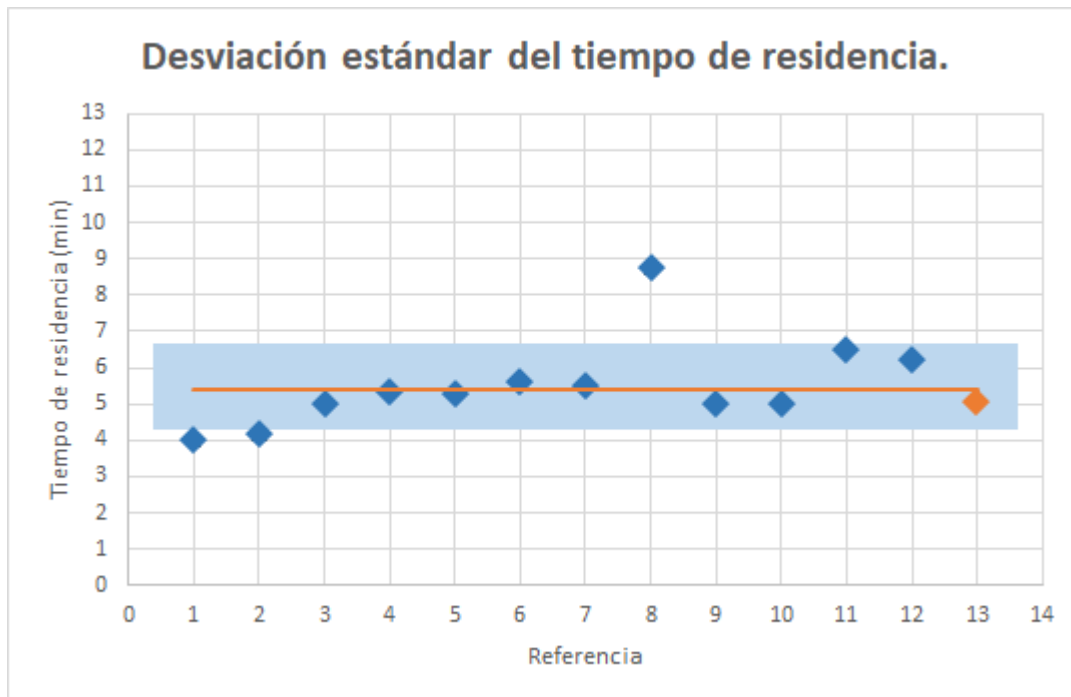
<b>Referencia</b>	<b>Tiempo de residencia (min)</b>
[91]	4
[100]	4,16
[101]	5
[102]	5,33
[103]	5,3
[103]	5,6
[103]	5,5
[104]	8,75
[105]	5
[106]	5
[107]	6,5
[108]	6,2

**Nota.** La tabla presenta una recopilación de valores de tiempo de residencia para una unidad de celda de flotación, a partir de diferentes autores.

A partir de la información tomada de la Tabla No. 17, se realiza una gráfica donde se muestra la dispersión de los datos, con respecto al resultado obtenido para el tiempo de residencia de la simulación (5,05 min), este valor es el rombo naranja que se puede observar en la Figura No. 22

**Figura No. 22.**

*Desviación estándar del tiempo de residencia celda de flotación*



**Nota.** La gráfica muestra el grado de dispersión de los datos obtenidos bibliográficamente, con respecto al resultado dado por la simulación (rombo naranja). Esta contempla valores estadísticos como la desviación estándar (rango azul) y el promedio (línea naranja) de los datos mostrados en la Tabla No. 17

A partir de la gráfica se puede determinar que el valor obtenido de la simulación está dentro del rango de tolerancia y cercano a la línea promedio, por tanto, el resultado del tiempo de residencia es acorde a estudios realizados experimentalmente, validando de esta forma el modelo desarrollado en la simulación y sus resultados.

Además de esto, también se realiza una validación para el porcentaje de remoción de la celda de flotación, a partir del mismo método utilizado para el tiempo de residencia.

La información recopilada a partir de diversos estudios es mostrada en la Tabla No. 18

**Tabla No. 18.**

*Recopilación de datos de porcentaje de remoción para la celda de flotación*

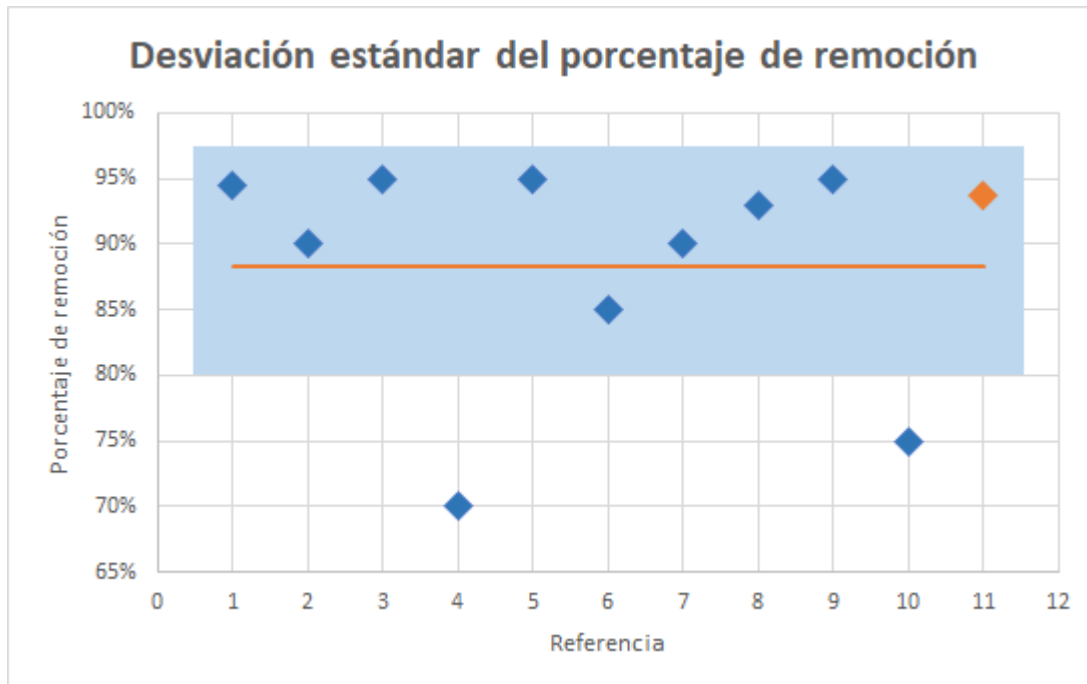
<b>Referencia</b>	<b>% Remoción</b>
[91]	94,5%
[109]	90%
[110]	95%
[111]	70%
[112]	95%
[113]	85%
[108]	90%
[114]	93%
[115]	95%
[116]	75%

**Nota.** La tabla presenta una recopilación de porcentajes de remoción para una unidad de celda de flotación, a partir de diferentes autores.

A partir de la información tomada de la Tabla No. 18, se procede a realizar una gráfica donde se muestra la dispersión de los datos, con respecto al resultado obtenido de la simulación para el porcentaje de remoción (93,75%), este valor es el rombo naranja que se puede observar en la Figura No. 23

**Figura No. 23.**

*Desviación estándar del porcentaje de remoción celda de flotación*



**Nota.** La gráfica muestra el grado de dispersión de los datos obtenidos bibliográficamente para el porcentaje de remoción, con respecto al resultado dado por la simulación (rombo naranja). Esta contempla valores estadísticos como la desviación estándar (rango azul) y el promedio (línea naranja) de los datos mostrados en la Tabla No. 18

A partir de la gráfica se puede determinar que el valor obtenido de la simulación para el porcentaje de remoción está dentro del rango de tolerancia, sin embargo, este valor está más alejado a la línea promedio, debido a que hay mayor dispersión de los datos, de igual forma, el resultado obtenido es acorde a estudios realizados experimentalmente, validando de esta forma el modelo desarrollado en la simulación.

#### **4.2. Unidad de filtro cáscara nuez**

La unidad de filtración es la operación siguiente a la celda de flotación IAF, esta unidad recibe el agua de producción con una carga de 87,25 mg/L y tiene como objetivo separar partículas de un tamaño mayor a  $5\mu\text{m}$  y generar un agua de producción con una concentración de sólidos y aceites menor a 2 mg/L.



Para la validación de esta unidad, se da inicio calculando la masa de cáscara nuez del filtro a partir de la ecuación 11.

**Ecuación 11. Masa de cáscara nuez**

$$\text{Masa de cáscara de nuez} = \frac{\text{Concentración de sólidos y aceite} * \text{Caudal de Agua}}{\text{Capacidad de retención}}$$

**Nota.** Tomado de: D. García and P. Vivas, “Ampliación de la capacidad del sistema de tratamiento de agua de producción mediante el dimensionamiento conceptual de nuevos equipos en la estación jaguar ubicada en el bloque caracara.” Fundación Universidad de América, 2016.

En un estudio experimental realizado por [99] se evaluó la remoción de sólidos y aceite en filtros de cáscara nuez para el tratamiento agua de producción petrolera, y se determinó que la capacidad de retención de la cáscara nuez fue de 0,32g de aceite/g de medio filtrante. El caudal de agua que ingresa al filtro es de 15635,8 m<sup>3</sup>/día, valor obtenido a partir de la información de soporte brindada por la empresa. Como se mencionó anteriormente, el agua ingresa al filtro con una concentración de 87,25 mg/L de sólidos y aceite.

Se continúa calculando el volumen que ocupa la cáscara nuez dentro del tanque del filtro, este valor se obtiene a partir de la ecuación 12.

**Ecuación 12. Volumen cáscara nuez compacto**

$$\text{Volumen de cáscara nuez compacto} = \frac{\text{Masa de cáscara nuez}}{\text{Densidad de cáscara nuez}}$$

**Nota.** Tomado de: T. Brown, Química la ciencia central, 11th ed. Pearson, 2009.

A partir de [118] se determina que la densidad de la cáscara nuez es de 0,45 kg/L.

Sin embargo, el volumen compacto no considera el efecto de la porosidad y permeabilidad de la cáscara de nuez, por esta razón es necesario determinar un nuevo volumen que considere estos parámetros. Este puede calcularse a partir de la ecuación 13.

**Ecuación 13. Volumen de lecho filtrante poroso y permeable**

$$V_{\text{lecho filtrante}} = \frac{V_{\text{cáscara}}}{1 - \phi}$$

**Nota.** Tomado de: O. Serra, "Fundamental of well-log interpretation: the acquisition of logging data, developments in petroleum science, vol 1. 15A-trans," El Sevier Science Publishers BV, Amsterdam, the Netherlands, 1984.

La porosidad ( $\phi$ ) de la cáscara nuez según [120] es de 0,476.

Los datos de diseño del filtro cáscara nuez calculados, se presentan en la Tabla No. 19.

**Tabla No. 19.**

*Datos de diseño del filtro cáscara nuez calculados*

Parámetro	Valor
Masa de cáscara nuez (kg)	4263,38
Volumen cáscara nuez compacto (m <sup>3</sup> )	9,47
Volumen lecho filtrante (m <sup>3</sup> )	18,08

Posteriormente, se determina la eficiencia del filtro cáscara nuez mediante datos heurísticos de proceso y soporte bibliográfico [99] [121], en donde se expone que los valores de eficiencia de estos sistemas se encuentran en un rango del 90% al 99%. A partir de esta información se define un valor de 97% de eficiencia y con apoyo de la información de proceso brindada por la empresa se logra validar acertadamente este valor.

Finalmente, se realiza el cálculo de la remoción y % de remoción para el filtro, mediante la ecuación 14 y 15 respectivamente.

**Ecuación 14. Remoción del filtro cáscara nuez**

$$\text{Remoción del filtro cáscara nuez} = E * [S]$$

Donde,

E: Eficiencia del filtro

[S]: Concentración de sólidos y aceite, mg/L

El valor de remoción del filtro es de 84,63 mg/L, lo que quiere decir que se obtiene un efluente con una concentración de 2,62 mg/L de sólidos y aceite. Esta cantidad es validada con las especificaciones de remoción del equipo entregadas por la empresa, donde la carga de sólidos y aceite a la salida del filtro debe ser menor a 3 mg/L.

**Ecuación 15. % de remoción del filtro cáscara nuez**

$$\% \text{ de remoción del filtro cáscara nuez} = \frac{\text{Remoción del filtro}}{[S]} * 100\%$$

Donde,

[S]: Concentración de sólidos y aceite total, mg/L

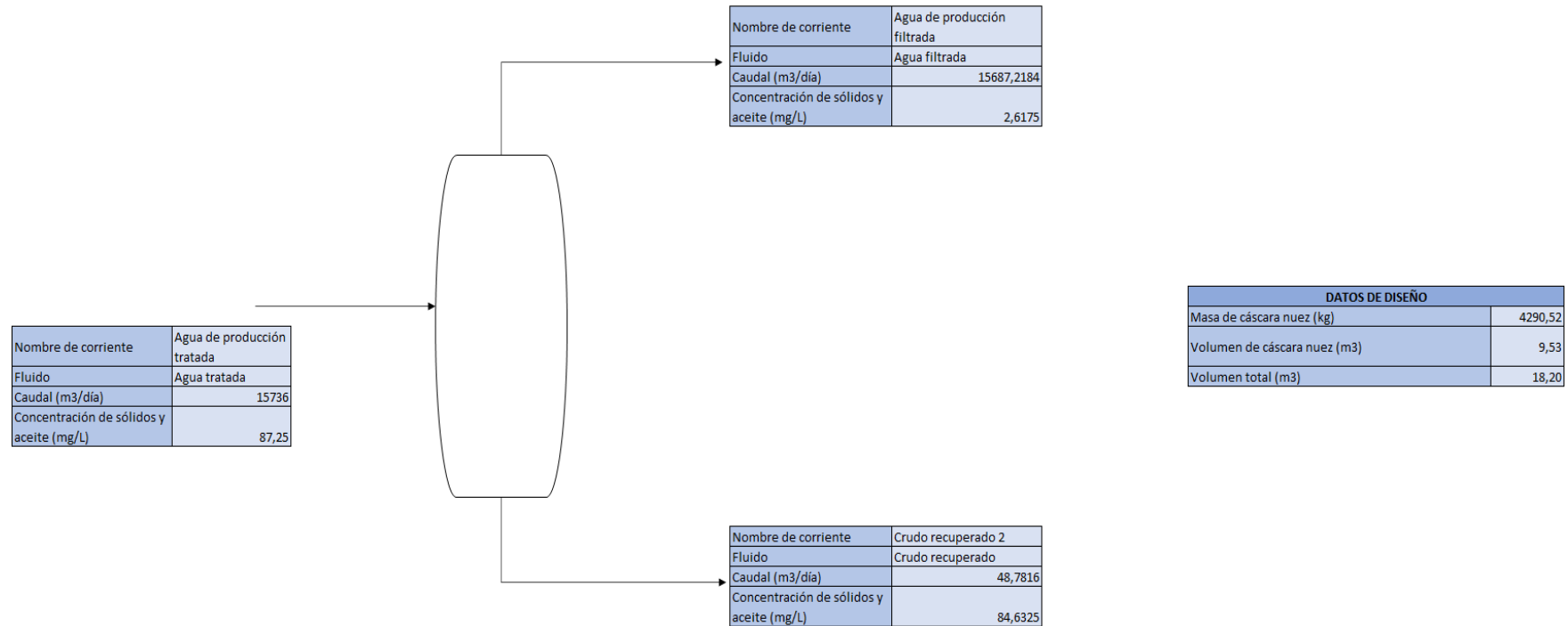
El porcentaje de remoción obtenido es del 97% y se valida con la información del proceso entregado por la empresa.

La simulación del filtro cáscara nuez se calcula continuamente a partir de los datos arrojados por la celda de flotación por aire inducido, los resultados de la simulación se presentan en la Figura No. 24.

**Figura No. 24.**

*Resultados de la simulación de la unidad de filtro cáscara nuez*

**UNIDAD DE FILTRO CÁSCARA NUEZ**



**Nota.** La simulación entrega los resultados en un diagrama donde se puede evidenciar la corriente de ingreso al filtro y las dos corrientes de salida con sus especificaciones de flujo y concentración de sólidos. Adicionalmente, se presentan los datos de diseño calculados para el filtro cáscara nuez.

La simulación de esta unidad permite realizar la validación del filtro cáscara nuez actual del tren 1 del sistema de tratamiento del CPF-2 del campo Rubiales.

#### **4.2.1. Validación unidad filtro cáscara nuez**

La validación del filtro cáscara nuez se realiza estadísticamente, mediante la recopilación de valores de porcentaje de remoción, tomados de estudios experimentales de diferentes autores, donde mediante una desviación estándar, se determina la dispersión de los datos consultados con respecto al obtenido en la simulación. De esta forma, se puede verificar la confiabilidad del modelo desarrollado y los resultados obtenidos.

Los datos de la validación para el porcentaje de remoción del filtro cáscara nuez se presentan en la tabla No. 20

**Tabla No. 20.**

*Recopilación de datos de porcentaje de remoción para el filtro cáscara nuez*

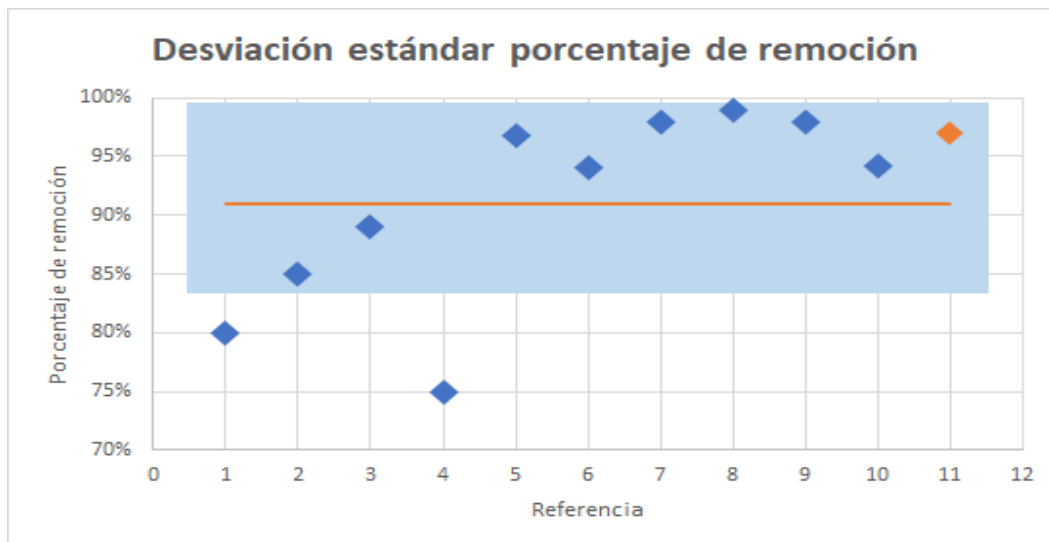
<b>Referencia</b>	<b>% Remoción</b>
[122]	80%
[123]	85%
[124]	89%
[125]	75%
[126]	96,75%
[127]	94%
[128]	98%
[129]	99%
[130]	98%
[97]	94,25%

**Nota.** La tabla presenta una recopilación de porcentajes de remoción para el filtro cáscara nuez, a partir de estudios experimentales realizados por diferentes autores.

Teniendo en cuenta la información mostrada en la Tabla No. 20 se realiza un análisis gráfico a partir de la desviación estándar, este se muestra la dispersión de los datos, con respecto al resultado obtenido de la simulación para el porcentaje de remoción en el filtro cáscara nuez (97%), este valor es el rombo naranja que se puede observar en la Figura No. 25

**Figura No. 25.**

*Desviación estándar del porcentaje de remoción filtro cáscara nuez*



**Nota.** La gráfica muestra el grado de dispersión de los datos obtenidos bibliográficamente para el porcentaje de remoción, con respecto al resultado dado por la simulación (rombo naranja). Esta contempla valores estadísticos como la desviación estándar (rango azul) y el promedio (línea naranja) de los datos mostrados en la Tabla No. 20.

A partir de la gráfica se puede determinar que el valor obtenido de la simulación para el porcentaje de remoción está dentro del rango de tolerancia, sin embargo, este valor está alejado a la línea promedio, debido a que hay mayor dispersión de los datos, de igual forma, el resultado obtenido es acorde a estudios realizados experimentalmente, validando de esta forma el modelo desarrollado para el filtro cáscara nuez.

### 4.3. Unidad de decantación

La unidad de decantación del CPF-2 de campo Rubiales, se encarga de separar el crudo y sedimentos del agua proveniente de la etapa de retrolavado de los filtros

cáscara nuez. La separación de los componentes de la corriente se da a causa de la segregación gravitacional, la cual permite que el agua aceitosa se eleve a la superficie donde es removida, los sólidos concentrados se sedimenten en el fondo y posteriormente se envíen al sumidero y la obtención de una corriente de agua clarificada que generalmente se encuentra en una mayor proporción dentro del equipo. La simulación de esta unidad se realizó en el Software Aspen Hysys, utilizando la unidad de separación trifásica.

En primera instancia se ingresa la composición del agua de retrolavado proveniente de los filtros cáscara nuez. Para la definición de la fase oleosa, se consideran los grados API del crudo de campo Rubiales; al ser este un crudo pesado se toma un típico de composición con las características especificadas en la Tabla No. 21.

**Tabla No. 21.**

*Composición agua de retrolavado*

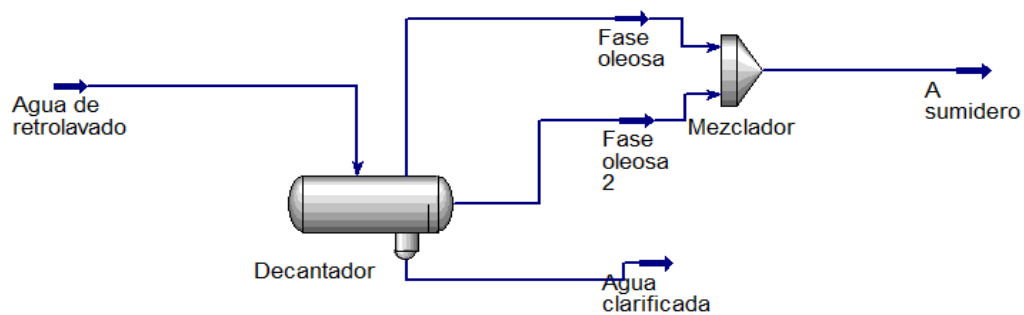
<b>Componente</b>	<b>Fracción másica</b>
Nitrógeno	0,0018
CO <sub>2</sub>	0,0074
Metano	0,1119
Etano	0,0106
Propano	0,0124
i-Butano	0,0018
n-Butano	0,0018
i-Pentano	0,0023
n-Hexano	0,0050
CO	0
Hidrógeno	0
H <sub>2</sub> O	0,6927
C7+	0,1476

**Nota.** La simulación se realiza bajo la ecuación de estado de Peng- Robinson la cual es útil para describir las propiedades de fluidos, específicamente hidrocarburos. Para

los hidrocarburos de mayor peso (C7+) se generó un grupo de pseudocomponentes teniendo en cuenta propiedades como el peso molecular y el punto de ebullición

**Figura No. 26.**

*Simulación del decantador en Aspen Hysys*



**Nota.** El decantador se simula como un separador trifásico, debido a que no se cuenta con una unidad de decantación establecida en el software. El caudal de entrada a la unidad es de 46.968 m<sup>3</sup>/día.

La composición obtenida de las corrientes de salida del decantador se presenta en la Tabla No. 22.

**Tabla No. 22.**

*Composición de las corrientes de salida del decantador*

Componente	Corriente	
	A sumidero	Agua
Nitrógeno	0,0070	0
CO <sub>2</sub>	0,0188	0,0001
Metano	0,7843	0
Etano	0,0398	0
Propano	0,0317	0
i-Butano	0,0035	0
n-Butano	0,0079	0



**Tabla No. 22.** Continuación

i-Pentano	0,0035	0
n-Pentano	0,0040	0
n-Hexano	0,0065	0
CO	0	0
Hidrógeno	0	0
H <sub>2</sub> O	0,0239	0,9999
C7+	0,0691	0

**Nota.** La tabla presenta la fracción másica de las corrientes de salida del decantador para un flujo másico de entrada de 35088 kg/día.

El agua a la salida del sistema de tratamiento actual del CPF-2 del campo Rubiales (agua filtrada y agua clarificada), se encuentra a una condición de temperatura de 29 °C, la cual es la adecuada para su ingreso al sistema de ósmosis inversa.

#### **4.3.1. Validación unidad de decantación**

La validación de la unidad de decantación se realiza estadísticamente, al igual que las anteriores unidades, mediante la recopilación de datos tomados de diferentes autores con respecto a estudios experimentales para separadores trifásicos, donde mediante una desviación estándar, se determina la dispersión de los datos consultados con respecto a los obtenidos en la simulación. De esta forma, se puede verificar la confiabilidad del modelo desarrollado y los resultados obtenidos.

Los datos de validación para el porcentaje de remoción se muestran en la Tabla No. 23.

**Tabla No. 23.**

*Recopilación de datos eficiencia para un separador trifásico*

<b>Referencia</b>	<b>% Remoción</b>
[131]	90%
[132]	95%
[133]	95%

**Tabla No. 23.** Continuación

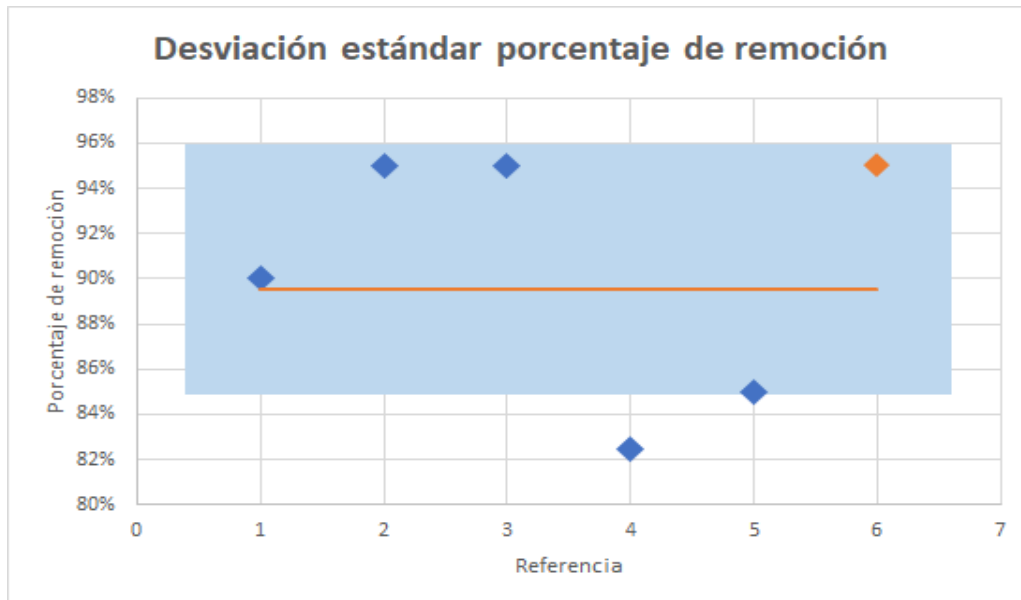
[134]	82,5%
[135]	85%

**Nota.** La tabla presenta una recopilación de porcentajes de remoción para el decantador (separador trifásico), a partir de estudios experimentales realizados por diferentes autores.

Teniendo en cuenta la información mostrada en la Tabla No. 23 se realiza un análisis gráfico teniendo en cuenta la desviación estándar, este se muestra la dispersión de los datos, con respecto al resultado obtenido de la simulación para el porcentaje de remoción en el decantador o también llamado separador trifásico (95%), este valor es el rombo naranja que se puede observar en la Figura No. 27

**Figura No. 27.**

*Desviación estándar porcentaje de remoción del separador trifásico*



**Nota.** La gráfica muestra el grado de dispersión de los datos obtenidos bibliográficamente para el porcentaje de remoción en el decantador, con respecto al resultado dado por la simulación (rombo naranja). Esta contempla valores estadísticos como la desviación estándar (rango azul) y el promedio (línea naranja) de los datos mostrados en la Tabla No. 23.

A partir de la gráfica se puede determinar que el valor obtenido de la simulación para el porcentaje de remoción está dentro del rango de tolerancia, sin embargo, este valor está por encima del promedio, de igual forma, el resultado obtenido es acorde a estudios realizados experimentalmente, validando de esta forma la simulación realizada para el decantador.

#### **4.4. Sistema de ósmosis inversa**

El proceso de ósmosis inversa permite la reducción significativa de contaminantes principalmente iones y partículas disueltas en el agua de producción. Sin embargo, es importante realizar un pretratamiento que reduzca la concentración de metales, debido a los requerimientos de calidad del agua que ingresa a la unidad, con el fin de minimizar el ensuciamiento, las incrustaciones y degradación las membranas.

##### **4.4.1. Pretratamientos**

El pretratamiento para el sistema de ósmosis inversa consta de seis etapas, las cuales se describen a continuación:

**4.4.1.i. Precipitación y coagulación química.** Estas técnicas son ampliamente utilizadas en procesos de escala industrial por su facilidad de operación, selectividad y economía. La precipitación de hidróxidos se realiza mediante el uso de hidróxido de sodio (soda cáustica) como agente precipitante, con el fin de remover metales en forma de hidróxidos insolubles. Este regulador permite ajustar el pH del agua a un valor predeterminado y constante con el fin de efectuar la separación [136]. El pH óptimo para obtener un efluente con buena calidad oscila entre 10 y 12. En un estudio realizado para la eliminación de mercurio del agua de producción a partir de hidróxido de sodio (NaOH), se determinó que el valor de pH adecuado para su remoción es de 11,5 [137]. Para este pretratamiento, la soda cáustica se dosifica en línea, con el fin de ajustar el pH al valor deseado y obtener un precipitado el cual será filtrado en la operación de filtración granular posterior.

Adicionalmente, con el objetivo de remover partículas coloidales, metales, sulfuros y fosfatos, se realiza una coagulación, mediante la dosificación de hidroxiclورو de aluminio o cloruro férrico en línea como agente coagulante. Este proceso tiene como principal finalidad reducir el contenido de hierro y aluminio en el agua suministrada al sistema de ósmosis inversa, debido a que la presencia de hierro puede generar

problemas en la membrana tales como bioincrustación y ensuciamiento en la parte delantera del sistema a causa de los óxidos de hierro férrico insolubles y los hidróxidos férricos [138].

**4.4.1.ii. Ajuste de pH.** Posteriormente a la etapa de precipitación y coagulación es necesario realizar un ajuste al pH del agua, puesto que a un pH alto aumenta la posibilidad de formación de incrustaciones en la membrana. La disminución del pH se realiza mediante la dosificación de ácido sulfúrico al 98% sin exceder los 30 mg/L, hasta alcanzar un valor de pH 7,3. [139]

**4.4.1.iii. Filtración.** Para retirar los precipitados y sólidos presentes en el agua se utilizan filtros granulares de arena, estos por lo general, eliminan el 90% y el 99% de los sólidos en suspensión, partículas orgánicas y limo contenido en el agua. Los filtros en las plantas de ósmosis inversa deben diseñarse de manera más conservadora que los filtros de plantas convencionales de tratamiento de aguas superficiales, para capturar sólidos finos, limo y sustancias orgánicas coloidales contenidas en el agua.

La eliminación de estos componentes permite proteger las membranas de ósmosis inversa de daños prematuros como, pérdida de permeabilidad, productividad y rechazo de sal [140].

**4.4.1.iv. Eliminación de cloro libre y oxidantes.** La exposición al cloro u otros oxidantes fuertes, genera daños y una aceleración en la degradación de las membranas. Por esta razón para proteger la integridad de las membranas se adicionan compuestos (captadores de oxidantes), que reaccionan con los oxidantes presentes en el agua creando productos secundarios no oxidantes.

El químico de reducción utilizado con mayor frecuencia es el metabisulfito de sodio ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ ). Cuando este se adiciona, crea bisulfito de sodio, el cual reduce el ácido hipocloroso a ácido sulfúrico, ácido clorhídrico y bisulfato de sodio, los cuales son compuestos no oxidantes. Aproximadamente, se necesitan 3,0 mg / L de metabisulfito de sodio para eliminar 1,0 mg / L de cloro libre [141].

**4.4.1.v. Filtración en cartucho.** Los filtros en cartucho son microfiltros finos de tamaño nominal de 1 a 25 mm hechos de fibras plásticas delgadas (típicamente polipropileno), que se enrollan alrededor de un tubo central para formar cartuchos de tamaño estándar [142].

Estos filtros tienen como función principal proteger la membrana de ósmosis inversa, por esta razón se consideran como equipos de seguridad de naturaleza oleofílica. Para este pretratamiento se cuenta con 2 etapas de filtración en cartucho, una para la retención de sólidos y otra de retención de emulsiones.

**4.4.1.vi. Control de incrustaciones.** La formación de depósitos minerales o incrustación en las membranas se produce debido a la precipitación y cristalización de sales de baja solubilidad como carbonato de calcio, carbonato de magnesio, sulfato de bario, sulfato de estroncio y sílice. La incrustación de estos componentes genera ensuciamiento de la membrana (descamación), lo que disminuye la vida útil de estas e incrementa los costos de mantenimiento.

Para controlar y prevenir la formación de estas, es indispensable el uso de inhibidores de incrustaciones. La dosis de inhibidor dependerá del tipo de mineral y su concentración en el agua. Es importante resaltar que la mayoría de inhibidores pueden oxidarse e inactivarse con cloro y otros oxidantes fuertes, por esta razón estos productos deben adicionarse siempre después del proceso de dechloración. [140]

Los anti-incrustantes poliméricos, son ampliamente utilizados en el pretratamiento del agua suministrada a sistemas de ósmosis inversa y calderas. Actualmente la empresa King Lee technologies cuenta con gran variedad de anti-incrustantes, entre ellos, el Pretreat Plus Gypsum Concentrate, un anti-incrustante de gran alcance para las incrustaciones de sulfato difíciles de controlar, tiene una fuerte capacidad de dispersión y la dosificación a utilizar se encuentra entre 0.1 a 8.0 mg/L. Estos productos son diseñados para prevenir la formación de depósitos de carbonato cálcico, sulfato cálcico, sulfato de bario, fosfato de cálcico, fluoruro cálcico, sílica, e hidróxido de hierro y aluminio.

Todos los pretratamientos previamente mencionados buscan reducir el ensuciamiento de las membranas, proteger su integridad y evitar la frecuencia

excesiva de limpieza y reemplazo de estas. Lo cual se verá reflejado en un sistema viable técnicamente como económicamente.

#### **4.4.2. Unidad de ósmosis inversa**

Para el diseño de la unidad de ósmosis inversa se utiliza el software Lewaplus® de la empresa Lanxess Energizing Chemistry el cual permite planificar y diseñar sistemas de ósmosis inversa, intercambio iónico y ultrafiltración para la industria de tratamiento de agua. El módulo de ósmosis inversa calcula el diseño y el rendimiento de una planta de ósmosis para aplicaciones de agua salobre y salada, además brinda una ayuda para simular la influencia que tienen diferentes parámetros como la temperatura y la salinidad sobre el rendimiento del sistema.

**4.4.2.i. Especificaciones de la membrana.** La membrana seleccionada para la simulación del sistema es la LewaBrane RO B400 FR Fouling Resistant Membrane. Los elementos RO B400 FR son elementos de membrana compuesta de poliamida enrollada en espiral, estos están diseñados para proporcionar mayor turbulencia en el espaciador del agua de alimentación en combinación con la membrana LewaBrane de baja carga superficial altamente reticulada. Estos nuevos elementos RO están recomendados para aguas salobres y de baja salinidad en las cuales se espere una mayor tendencia al ensuciamiento (fouling) biológico y orgánico. En la Tabla No. 24 se presenta la información general de esta membrana y en la Tabla No. 25 los parámetros de operación. La ficha técnica del producto se presenta en el Anexo 4.

**Tabla No. 24.**

*Información general membrana de ósmosis inversa*

<b>Información</b>	<b>Valor</b>
Espesor del espaciador del agua de alimentación (mm)	0,86
Área de la membrana (m <sup>2</sup> )	37,2
Porcentaje de rechazo de sal promedio	99,5
Porcentaje de rechazo de sal mínimo	99
Tasa de flujo de permeado promedio (m <sup>3</sup> /día)	39,9

**Tabla No. 24.** Continuación

Tasa de flujo de permeado mínimo (m <sup>3</sup> /día)	31,9
--	------

**Nota.** Los valores de la tabla están determinados en las siguientes condiciones: presión aplicada 15,5 bar (225 psi), concentración de NaCl 2000 mg / l, temperatura de funcionamiento 25 ° C (77 ° F), pH 7 y tasa de recuperación del 15%.

**Tabla No. 25.***Parámetros de operación de la membrana*

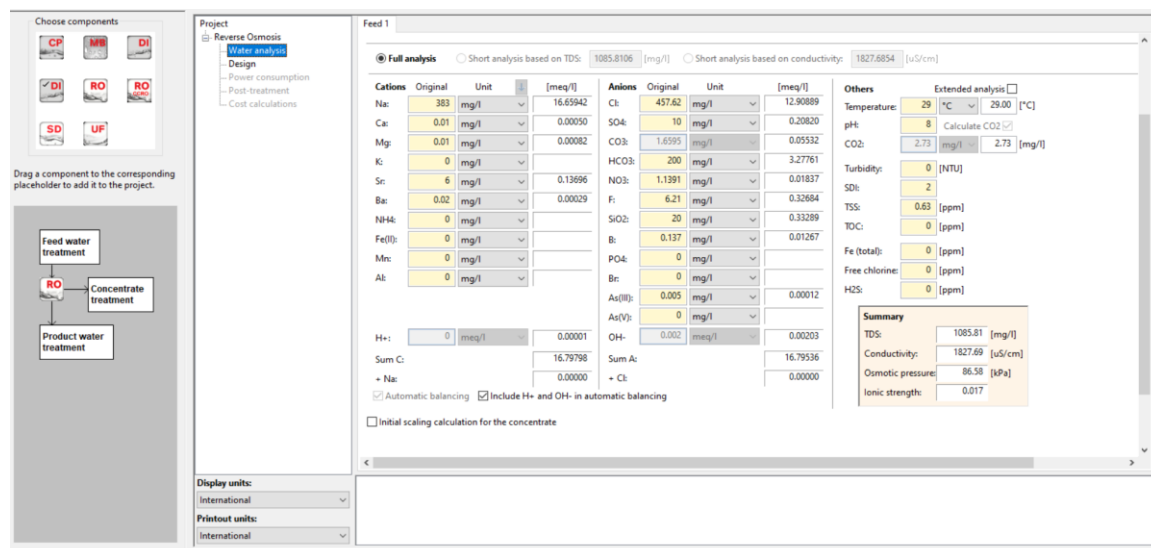
Parámetro	Valor
Presión de operación máxima (psi)	600
Temperatura de operación máxima (°F)	113
SDI del agua de alimentación máxima	5
Rango de pH durante la operación	2 - 11
Rango de pH durante la limpieza	1 - 12
Caída de presión por elemento máxima (psi)	15
Caída de presión por recipiente máxima (psi)	50
Concentración de cloro máxima (ppm)	0,1

**Nota.** Esta información es tomada de la ficha técnica del fabricante.

**4.4.2.ii. Análisis del agua.** En primer lugar, se ingresa la caracterización del agua de alimentación y algunos parámetros como el pH y la temperatura, en la Figura No. 28 se muestra la pestaña de análisis del agua de ingreso.

**Figura No. 28.**

*Pestaña de análisis del agua de ingreso*



**Nota.** Para esta simulación se ingresó un análisis completo de la composición del agua de alimentación.

**4.4.2.iii. Diseño.** El diseño inicia definiendo el tipo de agua como un agua de pozo salobre con un SDI < 3 y se definen los parámetros del sistema de osmosis, los cuales se presentan en la Tabla No. 26.

**Tabla No. 26.**

*Parámetros del sistema de ósmosis*

Parámetro	Valor
Temperatura (°C)	29
Porcentaje de recuperación	70
Presión de descarga de la bomba (kPa)	1129.61
Flujo de alimentación (m³/h)	66.66
Flujo de alimentación a la etapa 1 (m³/h)	66.66
Flujo de permeado (m³/h)	46.66

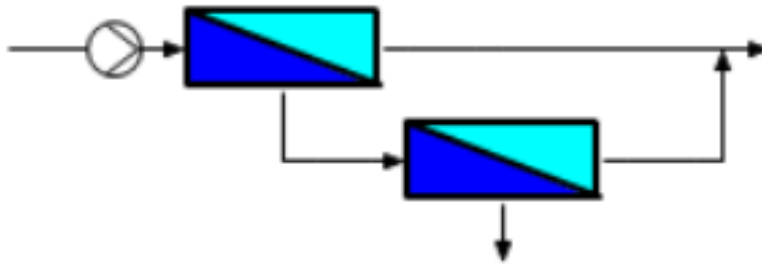
**Nota.** El flujo de alimentación corresponde al valor de capacidad propuesto de 10KBWPD



La configuración del sistema diseñado se muestra en la Figura No. 29, esta cuenta con un paso, dos etapas y un porcentaje de recuperación del 70%, en la etapa uno (1) se cuenta con cinco (5) vasos de presión cada uno con siete (7) elementos, por otro lado, para la etapa dos (2) se cuenta con tres (3) vasos de presión cada uno con siete (7) elementos, las especificaciones por etapa se presentan en la Tabla No. 27

**Figura No. 29.**

*Configuración del sistema de osmosis inversa*



**Nota.** En esta figura se presenta la configuración del sistema de ósmosis, la cual cuenta con dos etapas y un paso.

**Tabla No. 27.**

*Especificaciones por etapa*

<b>Etapa</b>	<b>1</b>	<b>2</b>
Tipo de elemento	RO B400 FR	RO B400 FR
Vasos / Elementos por vaso	5/7	3/7
Presión de alimentación (kPa)	1029.61	838.26
Presión de concentrado (kPa)	838.26	675.39
Presión del permeado (kPa)	0	0
Flujo de permeado (L/m <sup>2</sup> /h)	25.77	16.78
Tasa de flujo de alimentación por vaso (m <sup>3</sup> /h)	13.33	11.04
Tasa de flujo de concentrado por vaso (m <sup>3</sup> /h)	6.62	6.67

**Nota.** En la tabla se presentan las especificaciones por etapa, estas fueron entregadas por el simulador

**4.4.2.iv. Resultados.** Los resultados obtenidos en la simulación para cada etapa se presentan en la Tabla No. 28

**Tabla No. 28.**

*Resultados de la simulación*

Composición	Etapa 1		Etapa 2	
	Concentrado	Permeado	Concentrado	Permeado
Na (mg/L)	766.299	4.720	1261.21	15.496
Ca (mg/L)	0.020	0	0.033	0
Mg (mg/L)	0.020	0	0.033	0
K (mg/L)	0	0	0	0
Sr (mg/L)	12.053	0.026	19.942	0.085
Ba (mg/L)	0.040	0	0.067	0
NH4 (mg/L)	0	0	0	0
Fe(II) (mg/L)	0	0	0	0
Mn (mg/L)	0	0	0	0
Al (mg/L)	0	0	0	0
Cl (mg/L)	915.597	5.640	1500.681	18.518
SO4 (mg/L)	20.108	0.025	33.170	0.082
CO3 (mg/L)	7.386	0	21.56	0.002
HCO3 (mg/L)	396.063	2.455	641.087	7.962
NO3 (mg/L)	2.182	0.11	3.379	0.345
F (mg/L)	12.409	0.092	20.307	0.301
SiO2 (mg/L)	40.038	0.224	65.811	0.731
B (mg/L)	0.204	0.071	0.236	0.154
PO4 (mg/L)	0	0	0.009	0
Br	0	0	0	0
As(III)	0.008	0.002	0.009	0.005
As(V)	0	0	0	0
CO2	2.732	2.732	2.732	2.732
TDS [mg/l]	2172.416	13.365	3567.466	43.681

**Tabla No. 28.** Continuación

pH	8.278	6.137	8.472	6.642
Conductividad [ $\mu$ S/cm]	3562.516	26.559	5745.286	82.878
Presión osmótica [kPa]	169.889	1.140	274.7477	3.695
LSI	-2.4	-8.988	-1.790	-7.417

**Nota.** Esta tabla sintetiza la composición del efluente de salida del proceso, el cual presenta una alta calidad cumpliendo con los límites permisibles según la Resolución 1207 del 2014 para la disposición en riego.

Los resultados obtenidos por la simulación de la unidad de ósmosis inversa permiten identificar que hay una remoción significativa de las variables críticas como lo fueron los fluoruros y mercurio gracias a esto, es posible disponer el agua obtenida en riego según la Resolución 1207 del 2014

## 5. EVALUACIÓN DEL COSTO DE LA ALTERNATIVA SELECCIONADA

En este apartado se realiza la evaluación del costo de la unidad de ósmosis inversa propuesta a partir de la simulación, para el sistema de tratamiento de agua del CPF-2 de campo Rubiales. En esta evaluación se tendrán en cuenta los costos de equipos y los costos operacionales.

### 5.1. Costos de equipos

Este se refiere a la inversión inicial requerida para la adquisición de equipos, elementales y accesorios para el sistema de ósmosis inversa, en la Tabla No. 29 se presentan los costos unitarios y totales de equipos y accesorios en base a las dimensiones de diseño establecidas.

**Tabla No. 29.**

*Costo de equipos de la unidad de ósmosis inversa*

<b>Ósmosis inversa</b>			
<b>Descripción</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costo unitario</b>	<b>Costo total</b>
Membranas de ósmosis inversa	56	\$2.876.568	\$161.087.788
Membranas de sacrificio	8	\$69.800	\$558.400
Vasos de presión	8	\$3.327.633	\$26.621.062
Bombas de alta presión y ERDs	2	\$3.201.000	\$6.402.000
Tuberías, válvulas, soldaduras y accesorios	1	\$100.000.000	\$100.000.000
Transmisores de caudal	2	\$2.373.200	\$4.746.400
Transmisores de presión	3	\$1.745.080	\$5.235.240
Transmisiones de conductividad	2	\$3.205.014	\$6.410.027
Rotámetros	1	\$1.116.800	\$1.116.800
Manómetro	1	\$314.114	\$314.114
		<b>TOTAL</b>	<b>\$312.491.831</b>

**Nota.** En esta tabla se consolidan los costos de inversión de la unidad de ósmosis inversa. La ficha técnica de la bomba de alta presión y los vasos de presión propuestos se presentan en el Anexo 5. y Anexo 6., respectivamente.

Adicionalmente, es importante considerar los costos asociados a la instalación en sitio de los equipos, estos varían de acuerdo a la distancia, la complejidad de acceso al sitio de instalación y las exigencias del montaje, aproximadamente estos oscilan entre un 15% a un 30% del costo total del proyecto. En este trabajo no se profundiza en la estimación de ese costo debido a que lo definen muchos factores variantes.

## 5.2. Costos operacionales

Los costos operacionales hacen referencia a los costos energéticos, costos de mano de obra y de mantenimiento. Estos costos son fijos mensuales y anuales.

### 5.2.1. Costos energéticos

Los costos energéticos van asociados al equipo de osmosis inversa y a las bombas de alta presión y equipos auxiliares requeridos en el proceso, el costo kWh es proporcionado por la empresa de energía local el cual equivale a \$400. A partir de este valor se calcula el costo asociado al consumo energético del sistema de ósmosis mensual y anual como se presenta en la Tabla No. 30.

**Tabla No. 30.**

*Costos energéticos de la unidad de ósmosis inversa*

Ítem	Consumo total mensual (kWh/mes)	Costo (COP/mes)	Consumo total anual (kWh/año)	Costo (COP/año)
Bomba de alta presión	29.760,00	\$11.904.000	357.120,00	\$142.848.000
Equipos auxiliares	9.120,00	\$3.648.000	109.440,00	\$43.776.000
	<b>TOTAL MENSUAL</b>	<b>\$15.552.000</b>	<b>TOTAL ANUAL</b>	<b>\$186.624.000</b>

**Nota.** En la tabla se presentan los costos mensuales y anuales asociados al consumo energético del sistema de ósmosis en base a un costo de kWh para el campo Rubiales de 400 COP.

### 5.2.2. Mano de obra y mantenimiento

Se contará con dos (2) operarios, el primero encargado del proceso de operación del equipo y el segundo encargado del mantenimiento. En la Tabla No. 31 se presenta el costo de mano de obra asociado a la operación y mantenimiento del sistema, el cual incluye el valor de prestaciones sociales.

**Tabla No. 31.**

*Costo de mano de obra para la unidad de ósmosis inversa*

<b>Descripción</b>	<b>Número de horas mensuales</b>	<b>Costo mensual (COP)</b>	<b>Número de horas anuales</b>	<b>Costo anual (COP)</b>
Operación	162	\$4.000.000	1944	\$48.000.000
Mantenimiento	32	\$6.000.000	384	\$72.000.000
	<b>TOTAL MENSUAL</b>	<b>\$10.000.000</b>	<b>TOTAL ANUAL</b>	<b>\$120.000.000</b>

**Nota.** Cabe resaltar que dentro de los costos de mantenimiento deben considerarse también cambios de válvulas, tuberías, membranas, accesorios, repuestos, entre otros; de igual forma se deben tener en cuenta los imprevistos que puedan llegar a presentarse como, por ejemplo, fugas de tuberías o eventos de paros no programados.

### 5.2.3. Costos totalizados

Los costos totales anualizados relacionados con los costos de equipos y operacionales se presentan en la Tabla No. 32

**Tabla No. 32.**

*Costos totales anualizados de la unidad de ósmosis inversa*

<b>Descripción</b>	<b>Costo total (COP)</b>
Equipos	\$312.491.831
Mano de obra	\$120.000.000
Energético	\$186.624.000
<b>TOTAL</b>	<b>\$619.115.831</b>

**Nota.** En la tabla se presentan los costos totales anualizados asociados a la unidad de ósmosis inversa correspondientes a los costos de equipos, mano de obra y gastos energéticos.

## 6. CONCLUSIONES

Los altos volúmenes de agua producida en el campo Rubiales permiten que sea un lugar potencial para el desarrollo de proyectos enfocados a la optimización del recurso hídrico y su uso beneficioso en actividades agrícolas.

El sistema de tratamiento actual del CPF-2 del campo Rubiales, permite alcanzar las condiciones requeridas para el vertimiento superficial, sin embargo, para el reúso del agua de producción en actividades de tipo agrícola, sobrepasa los límites establecidos por la Resolución 1207 del 2014. Para este fin es necesaria la adición de una unidad de tratamiento de pulido que permita alcanzar las condiciones requeridas.

La priorización de criterios según la matriz de decisión multicriterio permitió identificar que los subcriterios con mayor relevancia en la selección de la tecnología fueron el porcentaje de remoción de iones y metales pesados, debido a que las variables críticas en el agua de producción a la salida del sistema actual de tratamiento del CPF-2 poseían cantidades de fluoruros y mercurio que excedían los límites máximos establecidos en la resolución.

La tecnología de ósmosis inversa fue la alternativa seleccionada para el sistema de tratamiento de agua de producción del CPF-2 del campo Rubiales, sin embargo, los humedales artificiales también presentaron una calificación muy favorable, logrando ser considerados como la segunda opción para el tratamiento de pulido.

La definición de las variables críticas como la dureza y el sílice para un sistema de ósmosis inversa permiten prevenir efectos no deseados que afecten la integridad de la unidad tales como el ensuciamiento e incrustaciones, adicionalmente a partir de estas es posible definir los pretratamientos necesarios, que serán un parámetro clave en la protección de las membranas de ósmosis.

El sistema de ósmosis inversa bajo los parámetros dados ofrece un porcentaje de remoción para fluoruros del 95.05%, es decir, el necesario para que el agua de producción pueda cumplir con las especificaciones establecidas por la Resolución 1207 del 2014 para la disposición final del agua en riego.

La propuesta realizada para el sistema de ósmosis inversa tiene un costo anual aproximado de \$619.115.831, el cual incluye el costo de inversión en equipos, la



mano de obra y el costo energético, sin considerar los costos asociados al pretratamiento, los cuales aumentan el costo total anual.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. S. García-Reyes, M. E. Cabarcas-Simancas y S. L. Herrera-Velasco, "Manejo del agua de producción para proyectos de gas en aguas profundas y ultra-profundas del Caribe Colombiano," *Revista Fuentes El Reventón Energético*, vol. 15, (2), pp. 89-105, 2017. Disponible en: <https://doaj.org/article/3c296bafbaa240798f5f78b1e5f8fef3>.
- [2] L. Nabzar. y J. L. Duplan. *Water in fuel production Oil production and refining. 2011.* Panorama 2011, IFP Energies. Disponible en: [https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig\\_q=RN:42050183](https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:42050183)
- [3] A. Fakhru'l-Razi et al, "Review of technologies for oil and gas produced water treatment," *J. Hazard. Mater.*, vol. 170, (2), pp. 530-551, 2009. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030438940900778X>. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.05.044>.
- [4] ECOPETROL. "Reporte Integrado De Gestión Sostenible 2019".
- [5] Water Environment Federation. "Produced water: Oil and Gas Terminology Glossary." [En línea]. Disponible en: <https://www.wef.org/globalassets/assets-wef/direct-download-library/public/03---resources/wsec-2017-fs-013-iwwc-og-glossary---final---5.21.18.pdf>
- [6] A. Ortega., *Estrategia para el uso sostenible de agua de producción para riego de suelos, adaptada de la experiencia del desierto de Omán a un patrón de pozos en un campo Colombiano*, tesis MEng. Facultad de Ingenierías, Fundación Universidad de América, Bogotá, Colombia, 2019
- [7] J. O. Robertson ROBERTSON, y G. V. Chilingar "Environmental Concerns," *Environmental Aspects of Oil and Gas Production*, pp. 1-16, 2017. Available: <https://doi.org/10.1002/9781119117421.ch1>. DOI: 10.1002/9781119117421.ch1.
- [8] J. Neff., K. Lee y E.M. DeBlois "Produced Water: Overview of composition, fates and effects" LinkSpringer, New York. [En línea]. Disponible en: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4614-0046-2\\_1](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4614-0046-2_1) DOI: [https://doi.org/10.1007/978-1-4614-0046-2\\_1](https://doi.org/10.1007/978-1-4614-0046-2_1)
- [9] I. Ebenezer-T. y G. Z. Chen, Produced water treatment technologies, *International Journal of Low-Carbon Technologies*, Vol 9, (3), pp 157–177, 2014. [En línea] Disponible en:

- <https://academic.oup.com/ijlct/article/9/3/157/807670?keytype=ref&ijkey=e6u2Aot0TtUML26> DOI: <https://doi.org/10.1093/ijlct/cts049>
- [10] M. Nasiri, I. Jafari and B. Parniankhoy, "Oil and Gas Produced Water Management: A Review of Treatment Technologies, Challenges, and Opportunities," *Chem. Eng. Commun.*, vol. 204, (8), pp. 990-1005, 2017. [En línea] Disponible en: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00986445.2017.1330747> DOI: 10.1080/00986445.2017.1330747.
- [11] K. Guerra., K. Dahm y S. Dundorf "Oil and Gas Produced Water Management and Beneficial Use in the Western United States: Reclamation managing water in the west" *Science and Technology Program Report No. 157* [En línea]. Disponible en: <https://www.usbr.gov/research/dwpr/reportpdfs/report157.pdf>
- [12] B. Bailey y M. Crabtree., Mike. "Control de agua" *Oilfield Review*. [En línea]. Disponible en: [https://connect.slb.com/~-/media/Files/resources/oilfield\\_review/spanish00/summary00/p32\\_53.pdf](https://connect.slb.com/~-/media/Files/resources/oilfield_review/spanish00/summary00/p32_53.pdf)
- [13] S. Jiménez *et al*, "State of the art of produced water treatment," *Chemosphere*, vol. 192, pp. 186-208, 2018. [En línea] Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045653517317241> DOI: 10.1016/j.chemosphere.2017.10.139.
- [14] J. Dembicki-Harry, "Chapter 3 - source rock evaluation," en *Practical Petroleum Geochemistry for Exploration and Production*, J. Dembicki Harry, Ed. 2017. [En línea] Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128033500000039>. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803350-0.00003-9>.
- [15] Panorama 2011. "Water in fuel production, oil production and refining," [En línea]. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/276292861\\_Water\\_in\\_fuel\\_production\\_Oil\\_production\\_and\\_refining](https://www.researchgate.net/publication/276292861_Water_in_fuel_production_Oil_production_and_refining)
- [16] S. Pardo-Díaz *et al*, "Biodegradación de fenol en aguas tratadas de la industria petrolera para re-uso en cultivos agrícolas," *Revista De Biología Tropical*, vol. 65, (2), pp. 685-699, 2017. [En línea]. Disponible en: [https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0034-](https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0034-)

77442017000200685#:~:text=Los%20fenoles%20son%20de%20gran,riesgo%20para%20la%20salud%20humana.

- [17] E. Gutierrez., F. Perez., E. Blanco., N. Paz y Y. Caldera. "Comportamiento de metales presentes en aguas de producción de petróleo durante el tratamiento anaerobio termofílico." *Boletín del Centro de Investigaciones Biológicas*. Vol 43, (1) pp 145-160, 2009. [En línea].
- [18] M. T. Stephenson. "Components of Produced Water: A Compilation of Industry Studies." *Journal of Petroleum Technology*, Vol 44, (05), pp 548–603, 1992. [En línea]. Disponible en: <https://www.onepetro.org/journal-paper/SPE-23313-PA> DOI: <https://doi.org/10.2118/23313-PA>
- [19] S. L. Mesa et al, "Revisión del panorama actual del manejo de agua de producción en la industria petrolera colombiana," *Gestión Y Ambiente*, vol. 21, (1), pp. 87-98, 2018. [En línea] Disponible en: <https://revistas.unal.edu.co/index.php/gestion/article/view/69792> DOI: 10.15446/ga.v21n1.69792.
- [20] J. Viana "Disposición y tratamiento del agua producida" Asociación regional de empresas de petróleo y gas natural en Latinoamérica y el Caribe. Montevideo, Uruguay, 2006. [En línea]. Disponible en: <http://www.ingenieroambiental.com/4000/GUIA%2001%20-%20OK.pdf>
- [21] E. Salamanca. "Tratamiento de aguas para el consumo humano" *Modulocuc*, vol. 17, (1), pp. 29-48, 2016. [En línea]. Disponible en: <https://revistascientificas.cuc.edu.co/moduloarquitecturacuc/article/view/1527> DOI: <https://doi.org/10.17981/moducuc.17.1.2016.02>
- [22] F. Zabel. "Innovations in flotation technology" en *Flotation in Water Treatment LinkSpringer*, Vol 208, pp 431-454, 1992. [En línea]. Disponible en: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-011-2658-8\\_23#citeas](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-011-2658-8_23#citeas) DOI: [https://doi.org/10.1007/978-94-011-2658-8\\_23](https://doi.org/10.1007/978-94-011-2658-8_23)
- [23] L. K. Wang., D. A. Vaccari., Y. Li., N. K. Shammass, "Chemical precipitation" en *Physicochemical Treatment Processes. Handbook of Environmental Engineering. LinkSpringer*. Vol 3, pp 141-197, 2005. [En línea]. Disponible en: <https://link.springer.com/chapter/10.1385/1-59259-820-x:141> DOI: <https://doi.org/10.1385/1-59259-820-x:141>
- [24] L. Mendia, "Electrochemical processes for wastewater treatment," *Water Science and Technology*, vol. 14, (1-2), pp. 331-344, 1982. [En línea].

- Disponible en: <https://iwaponline.com/wst/article/14/1-2/331/21713/Electrochemical-Processes-for-Wastewater-Treatment> DOI: <https://doi.org/10.2166/wst.1982.0067>
- [25] A. E. Segneanu et al, "Waste water treatment methods," en *Water Treatment*, pp. 53-80, 2013. [En línea]. Disponible en: <https://www.intechopen.com/books/water-treatment/waste-water-treatment-methods> DOI: 10.5772/53755
- [26] H. Nour, R. M. Yunus y Z. Jemaat, "Chemical demulsification of water-in-crude oil emulsions," *JApSc*, vol. 7, (2), pp. 196-201, 2007. [En línea]. Disponible en: <https://scialert.net/abstract/?doi=jas.2007.196.201> DOI: 10.3923/jas.2007.196.201
- [27] S. Renou, J. G. Givaudan, S. Poulain, F. Dirassouyan, y P. Moulin, "Landfill Leachate Treatment: Review and Opportunity," vol. 150, pp. 468–93, 2008. [En línea]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304389407013593> DOI: 10.1016/j.jhazmat.2007.09.077.
- [28] N. K. Shamas., J. Y. Yang., P. Yuan. y Y. Hung , "Chemical oxidation," en *Physicochemical Treatment Processes. Handbook of Environmental Engineering*, *LinkSpringer*. Vol 3, pp 229-270, 2005. [En línea]. Disponible en: <https://link.springer.com/chapter/10.1385/1-59259-820-x:229#citeas> DOI: <https://doi.org/10.1385/1-59259-820-x:229>
- [29] En AWE International. "Biological Treatment of Produced Water" 3, octubre, 2010. [En línea]. Disponible en: <https://www.awemagazine.com/article/biological-treatment-of-produced-water-237/#:~:text=The%20most%20common%20biological%20method,bioreactor%20and%20into%20a%20clarifier.>
- [30] P. A. Arce C. *Humedales artificiales: Una alternativa para tratamiento de aguas de producción*, tesis pos. Facultad de educación permanente y avanzada, Fundación Universidad de América, Bogotá, Colombia, 2018
- [31] T. Madsen, "Chapter 6 - membrane filtration in water treatment – removal of micropollutants," in *Chemistry of Advanced Environmental Purification Processes of Water*, E. G. Søgaard, Ed. 2014,. [En línea] Disponible en:

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780444531780000067>.

DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53178-0.00006-7>.

- [32] J. G. Jacangelo., M. Watson., V. Herndon y C. A. Buckley. "Capítulo 11: Microfiltración" en *Tratamiento del agua por procesos de membrana*, Durban, Sudáfrica, Universidad de Natal. [En línea] Disponible en: <https://cidta.usal.es/cursos/etap/modulos/libros/microfiltracion.pdf>
- [33] A. S. Morcillo et al, "El uso de membranas de microfiltración y ultrafiltración en tratamientos terciarios para reutilización agrícola de aguas residuales urbanas," *Tecno Ambiente: Revista Profesional De Tecnología Y Equipamiento De Ingeniería Ambiental*, vol. 11, (112), pp. 37-41, 2001. [En línea]. Disponible en:  
[https://www.researchgate.net/publication/215485441\\_El\\_uso\\_de\\_membranas\\_de\\_microfiltracion\\_y\\_ultrafiltracion\\_en\\_tratamientos\\_terciarios\\_para\\_reutilizacion\\_agricola\\_de\\_aguas\\_residuales\\_urbanas](https://www.researchgate.net/publication/215485441_El_uso_de_membranas_de_microfiltracion_y_ultrafiltracion_en_tratamientos_terciarios_para_reutilizacion_agricola_de_aguas_residuales_urbanas)
- [34] D. Mourato, "Microfiltración y nanofiltración en el área de agua potable," *ZENON Environmental Inc. Canadá*, 1998. [En línea] Disponible en: <http://www.elaguapotable.com/MICROFILTRACION%20Y%20NANOFILTRACION%20EN%20EL%20RECTORIA%20DE%20AGUA%20POTABLE.pdf>
- [35] R. Arnold *et al*, "Manejo de la producción de agua: de residuo a recurso," *Oilfield Rev*, vol. 16, pp. 30-45, 2004. [En línea]. Disponible en: [https://www.academia.edu/32939851/Manejo\\_de\\_la\\_produccion\\_de\\_agua\\_De\\_residuo\\_a\\_recurso](https://www.academia.edu/32939851/Manejo_de_la_produccion_de_agua_De_residuo_a_recurso)
- [36] J. Winpenny *et al* "Reutilización del agua en la agricultura: ¿Beneficios para todos?" En *informe sobre temas hídricos FAO*, 2013. [En línea]. Disponible en: <http://www.fao.org/3/a-i1629s.pdf>
- [37] O. Heredia, "El agua de Riego: Criterios de Interpretación. Efectos sobre el suelo y la producción" [En línea]. Disponible en: [.https://hortintl.cals.ncsu.edu/sites/default/files/articles/agua\\_riego\\_criterios\\_interpretacion.pdf](https://hortintl.cals.ncsu.edu/sites/default/files/articles/agua_riego_criterios_interpretacion.pdf)
- [38] *Resolución 1207 del 2014*, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. En línea]. Disponible en: <http://parquearvi.org/wp-content/uploads/2016/11/Decreto-1207-de-2014.pdf>

- [39] D. A. Puentes-Alvarez y J. S. Velasco-Garcia. “*Evaluación de la viabilidad de aplicación de la tecnología radio corto para la perforación de un pozo en el campo Rubiales*”, tesis pre. Facultad de ingenierías, Fundación Universidad de América, Bogotá, Colombia, 2018
- [40] J. A. Díaz-López y M. J. Robayo-Niño. “*Análisis de las principales causas de errores de posicionamiento de hueco en el campo Rubiales de Ecopetrol*”, tesis pre. Facultad de ingenierías, Fundación Universidad de América, Bogotá, Colombia, 2018
- [41] S. Saavedra-Traslaviña y K. D. Sáenz-Rojas. “*Direccionamiento de la gestión del proceso de vertimiento de agua industrial del campo Rubiales al caño Rubiales*”, tesis pre. Facultad de ingenierías, Fundación Universidad de América, Bogotá, Colombia, 2018
- [42] Ecopetrol 2020
- [43] C. Moreno. “Generación de una propuesta para la optimización de la inyección de agua en un pad de campo rubiales mediante el estudio de pruebas de presión y análisis nodal”, 2019
- [44] D. Bermejo Arnaldos, "Reutilización de aguas residuales domésticas. Estudio y comparativa de tipologías edificatorias: depuradoras naturales como alternativa sostenible," 2012.
- [45] M. L. Valero-Alvarado “*Selección de tecnologías para el tratamiento de las aguas de producción de Shale gas utilizando una técnica de decisión multicriterio*” tesis Mag. Facultad de ingenierías físico-químicas, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, 2013
- [46] S. Arancibia *et al*, "Evaluación Multicriterio: aplicación para la formulación de proyectos de infraestructura deportiva," *Memoria De Ingeniería Civil Industrial Universidad De Chile*, Santiago, 2003. [En línea]. Disponible en: <http://www.dii.uchile.cl/~ceges/publicaciones/ceges48.pdf>
- [47] J. F. Pacheco y E. Contreras, "Manual metodológico de evaluación multicriterio para programas y proyectos" 2008. [En línea]. Disponible en: <https://www.dii.uchile.cl/wp-content/uploads/2011/06/manual58-llpes.pdf>
- [48] M. Velasquez and P. Hester, "An analysis of multi-criteria decision making methods," *International Journal of Operations Research*, vol. 10, pp. 56-66, 2013. [En línea]. Disponible en: [https://www.researchgate.net/profile/Patrick\\_Hester/publication/275960103\\_A](https://www.researchgate.net/profile/Patrick_Hester/publication/275960103_A)

- n\_analysis\_of\_multi-  
 criteria\_decision\_making\_methods/links/55eefed208ae199d47bff202.pdf
- [49] A. Alinezhad y J. Khalili. "MAUT Method" en *New Methods and Applications in Multiple Attribute Decision Making (MADM)*. *International Series in Operations Research & Management Science, LinkSpringer*. vol 277, pp 127-131, 2019. [En línea]. Disponible en: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-15009-9\\_18](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-15009-9_18)
- [50] G. Toskano y G. Bruno, "El proceso de análisis jerárquico (AHP) como herramienta para la toma de decisiones en la selección de proveedores," tesis pre. Universidad Nacional Mayor De San Marcos. Lima, Perú, 2005. [En línea]. Disponible en: [https://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/Tesis/Basic/toskano\\_hg/cap3.PDF](https://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/Tesis/Basic/toskano_hg/cap3.PDF)
- [51] J. C. O. Gómez y J. P. O. Cabrera, "El proceso de análisis jerárquico (AHP) y la toma de decisiones multicriterio. Ejemplo de aplicación." *Scientia Et Technica*, vol. 2, (39), 2008. [En línea]. Disponible en: <https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:IGPaIFVTyfMJ:https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/4745706.pdf+&cd=4&hl=es-419&ct=clnk&gl=co>
- [52] P. Priore *et al*, "Utilización del razonamiento basado en casos en la toma de decisiones. Aplicación en un problema de secuenciación," *Dirección Y Organización*, (28), 2002. [En línea]. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/28058485\\_Utilizacion\\_del\\_razonamiento\\_basado\\_en\\_casos\\_en\\_la\\_toma\\_de\\_decisiones\\_Aplicacion\\_en\\_un\\_problema\\_de\\_secuenciacion](https://www.researchgate.net/publication/28058485_Utilizacion_del_razonamiento_basado_en_casos_en_la_toma_de_decisiones_Aplicacion_en_un_problema_de_secuenciacion)
- [53] L. Lozano y J. Fernández, "Razonamiento basado en casos: Una visión general" 2008. [En línea]. Disponible en: <https://www.infor.uva.es/~calonso/IAI/TrabajoAlumnos/Razonamiento%20basado%20en%20casos.pdf>
- [54] A. Arieu, "Eficiencia técnica comparada en elevadores de granos de Argentina, bajo una aplicación de análisis de envolvente de datos. La situación del puerto de Bahía Blanca," *Universidad Tecnológica Nacional. Consorcio De Gestión Del Puerto De Bahía Blanca*, 2004. [En línea]. Disponible en: <https://aaep.org.ar/anales/works/works2004/Arieu.pdf>



- [55] M. R. Patel, M. P. Vashi y B. V. Bhatt, "SMART-Multi-criteria decision-making technique for use in planning activities," *Proceedings of New Horizons in Civil Engineering (NHCE-2017), Surat India*, 2017. [En línea]. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/315825133\\_SMART-Multi-criteria\\_decision-making\\_technique\\_for\\_use\\_in\\_planning\\_activities](https://www.researchgate.net/publication/315825133_SMART-Multi-criteria_decision-making_technique_for_use_in_planning_activities)
- [56] M. J. Álvarez-Rodríguez. "Programación por metas. Goal programming" Tesis pre. Grado en Matemáticas. Universidad de la Laguna. La Laguna, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://riull.ull.es/xmlui/bitstream/handle/915/14636/Programacion%20por%20Metas.pdf?sequence=1>
- [57] J. Figueira, V. Mousseau y B. Roy, "ELECTRE methods," en *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys 2005*. [En línea]. Disponible en: <https://pdfs.semanticscholar.org/b4ac/6cfbd4878f652079900ed2b6dea4565cda5c.pdf>
- [58] N. Padilla-Garrido., M. T. Arévalo-Quijada. y F. M. Guerrero-Casas. "Aplicación del método Promethee en la jerarquización de títulos de una cartera de valores" *Revista Electrónica de Comunicaciones y trabajos de ASEPUMA*, 1999. [En línea]. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/26440851\\_Aplicacion\\_del\\_metodo\\_Promethee\\_en\\_la\\_jerarquizacion\\_de\\_titulos\\_de\\_una\\_cartera\\_de\\_valores](https://www.researchgate.net/publication/26440851_Aplicacion_del_metodo_Promethee_en_la_jerarquizacion_de_titulos_de_una_cartera_de_valores)
- [59] J. F. Raigoza-Loaiza. "Aplicación de métodos Multi-criterio (MCDA) para planeamiento energético de largo plazo en la industria del cemento" tesis pre. Facultad de Minas. Departamento Ciencias de la Computación y la Decisión. Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia, 2016.
- [60] A. Taoufikallah. "Selección del sistema de gestión de la producción mediante la metodología AHP: Aplicación a una empresa del sector aeronáutico" tesis master. Escuela técnica superior de ingenieros de Sevilla. Universidad de Sevilla, Sevilla, España.
- [61] J. M. Moreno Jiménez et al, "Validación, robustez y estabilidad en decisión multicriterio: análisis de sensibilidad en el proceso analítico jerárquico," *Revista Real Academia De Ciencias Exactas, Físico-Químico Y Naturales*, vol. 92, (4), pp. 387-397, 1998. Available: [http://dmle.cindoc.csic.es/pdf/RRACEFN\\_1998\\_92\\_04\\_14.pdf](http://dmle.cindoc.csic.es/pdf/RRACEFN_1998_92_04_14.pdf).

- [62] G. B. Toskano Hurtado, "El Proceso de análisis jerárquico (AHP) como herramienta para la toma de decisiones en la selección de proveedores : aplicación en la selección del proveedor para la Empresa Gráfica Comercial MyE S.R.L." 2005.
- [63] R. Ávila, "El AHP (Proceso Analítico Jerárquico) y su aplicación para determinar los usos de las tierras. El caso de Brasil," *Informe Técnico. Proyecto Regional Información Sobre Tierras Y Aguas Para Un Desarrollo Agrícola Sostenible*. Santiago, Chile, 2000. [En línea]. Disponible en: [http://www.fao.org/tempref/GI/Reserved/FTP\\_FaoRlc/old/proyecto/139jpn/document/3dctos/sirtplan/infotec/2ahptx.pdf](http://www.fao.org/tempref/GI/Reserved/FTP_FaoRlc/old/proyecto/139jpn/document/3dctos/sirtplan/infotec/2ahptx.pdf)
- [64] Cepal. "Metodología multicriterio" 2007
- [65] J. Osorio-Gómez y J. Orjuela-Cabrera, "El proceso de análisis jerárquico (AHP) y la toma de decisiones multicriterio. Ejemplo de aplicación," *St*, vol. 2, (39), 2008. [En línea]. Disponible en: <https://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/view/3217>. DOI: 10.22517/23447214.3217.
- [66] Agrosal "Efecto de la salinidad en los cultivos" en *efectos de la salinidad y la sodicidad en los cultivos*, 2013. [En línea] Disponible en: <http://www.agrosal.ivia.es/efectos.html>
- [67] J. S. G. Reyes, S. L. H. Velasco y M. E. C. Simancas, "Manejo del agua de producción para proyectos de gas en aguas profundas y ultra-profundas del Caribe Colombiano," *Fuentes, El Reventón Energético*, vol. 15, (2), pp. 89-105, 2017. [En línea]. Disponible en: <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistafuentes/article/view/7686>
- [68] C. Mastandrea, C. Chichizola, B. Ludueña, H. Sánchez, H. Álvarez, and A. Gutiérrez, "Hidrocarburos aromáticos policíclicos. Riesgos para la salud y marcadores biológicos," vol. 39, no. 1, pp. 27–36, 2005. [En línea]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/535/53522191006.pdf>
- [69] A. Jin *et al*, "Impact of reclaimed water irrigation on PAHs in agricultural soil and groundwater," en *AIP Conference Proceedings*, 2010. [En línea]. Disponible en: <https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.3529328> DOI: 10.1063/1.3529328

- [70] J. P. Pérez Díaz, E. Peña Cervantes, R. López Cervantes, and I. M. Hernández Torres, "Metales pesados y calidad agronómica del agua residual tratada," vol. 34, no. 1, pp. 19–25, 2016.
- [71] K. P. Romero-Ledezma, "Contaminación por metales pesados," *Revista Científica Ciencia Médica*, vol. 12, (1), pp. 45-46, 2009. [En línea]. Disponible en: [http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1817-74332009000100013](http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1817-74332009000100013)
- [72] E. W. Allen, "Process water treatment in Canada's oil sands industry: II. A review of emerging technologies," *J. Environ. Eng. Sci.*, vol. 7, (5), pp. 499-524, 2008. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1139/S08-020>. DOI: 10.1139/S08-020.
- [73] Gernjak, W., Fuerhacker, M., Fernández-Ibañez, P., Blanco, J. y Malato, S. (2006). *Tratamiento solar foto-Fenton: parámetros y control del proceso. Catálisis aplicada B: ambiental*, 64 (1-2), 121-130. doi: 10.1016 / j.apcatb.2005.12.002
- [74] D. M. Fúquene *et al*, *Tratamiento De Aguas Residuales*. 2019. [En línea]. Disponible en: <https://search.datacite.org/works/10.22490/9789586516358.08>. DOI: 10.22490/9789586516358.08.
- [75] S. Mukherjee, P. Sahu & G. Halder, "Microbial remediation of fluoride-contaminated water via a novel bacterium *Providencia vermicola* (KX926492)," *J. Environ. Manage.*, vol. 204, pp. 413-423, 2017.
- [76] L. Li, C. Song, Y. Huang, & Y. Zhou, "Investigation of BTEX removal efficiency using the electrolytic oxidation and Fenton's reaction," vol. 38, no. 3, pp. 149–157, 2016, doi: 10.3103/S1063455X1603005X. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3103/S1063455X1603005X>
- [77] E. Ranieri, P. Gikas & G. Tchobanoglous, "BTEX removal in pilot-scale horizontal subsurface flow constructed wetlands," *Desalination and Water Treatment*, vol. 51, (13-15), pp. 3032-3039, 2013.
- [78] M. Smol, M. Włodarczyk-Makuła, K. Mielczarek, J. Bohdziewicz, & D. Włóka, "The Use of Reverse Osmosis in the Removal of PAHs from Municipal Landfill Leachate," vol. 36, no. 1, pp. 20–39, 2016, doi: 10.1080/10406638.2014.957403. [En línea]. Available: <https://doi.org/10.1080/10406638.2014.957403>

- [79] Da Rocha, Otidene Rossiter Sá *et al*, "Solar photo-Fenton treatment of petroleum extraction wastewater," *Null*, vol. 51, (28-30), pp. 5785-5791, 2013. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/19443994.2013.792136>. DOI: 10.1080/19443994.2013.792136.
- [80] A. T. Lima, L. M. Ottosen, K. Heister, and J. P. G. Loch, "Assessing PAH removal from clayey soil by means of electro-osmosis and electro dialysis," pp. 1–6, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.07.010>. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969712009552>
- [81] M. Baniasadi *et al*, "Biological Treatment of wastewater contaminated with polycyclic aromatic hydrocarbon (PAHs) in continuous biofilm reactor,
- [82] S. Lamichhane, K. B. Krishna and R. Sarukkalige, "Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) removal by sorption: a review," *Chemosphere*, vol. 148, pp. 336-353, 2016.
- [83] H. A. Qdais and H. Moussa, "Removal of heavy metals from wastewater by membrane processes: a comparative study," *Desalination*, vol. 164, (2), pp. 105-110, 2004.
- [84] D. Rubio, R. Calderón, A. Gualtero, D. Acosta, and I. Rojas, "Tratamientos para la Remoción de Metales Pesados Comúnmente Presentes en Aguas Residuales Industriales. Una Revisión," vol. 13, p. 73, 2015, doi: 10.25054/22161325.710.
- [85] J. Šíma, J. Krejsa & L. Svoboda, "Removal of mercury from wastewater using a constructed wetland," *Croat. Chem. Acta*, vol. 88, (2), pp. 165-169, 2015.
- [86] C. P. Huang and D. W. Blankenship, "The removal of mercury (II) from dilute aqueous solution by activated carbon," *Water Res.*, vol. 18, (1), pp. 37-46, 1984.
- [87] M. Gar Alalm, A. Tawfik, and S. Ookawara, "Investigation of optimum conditions and costs estimation for degradation of phenol by solar photo-Fenton process," vol. 7, no. 1, pp. 375–382, 2017, doi: 10.1007/s13201-014-0252-0. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s13201-014-0252-0>
- [88] D. P. Rousseau, E. Lesage, A. Story, P. A. Vanrolleghem, and N. De Pauw, "Constructed wetlands for water reclamation," vol. 218, no. 1–3, pp. 181–189, 2008.

- [89] T. McAlary, W. Wetz & D. Mali, "Environmental Security Technology Certification Program", 2018. [En línea]. Disponible en: [www.serdp-estcp.org](http://www.serdp-estcp.org)
- [90] IMA Water technology, *Información técnica filtros de carbón activo*, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://www.plantasdeosmosis.com/productos/filtros-de-agua-industriales/informacion-tecnica-filtros-ima-water/96/informacion-tecnica-filtros-de-carbon-activo.html>
- [91] L. K. Wang *et al*, Flotation Technology. 2010. [En línea]. Disponible en: <https://link.springer.com/book/10.1007%2F978-1-60327-133-2>
- [92] Yunus A. Çengel, J. M. Cimbala & S. F. Sknarina, *Mecánica De Fluidos: Fundamentos Y Aplicaciones*. 2006. [En línea]. Disponible en: [https://www.academia.edu/35477658/Mec%C3%A1nica\\_de\\_Flu%C3%ADdos\\_Cengel\\_Cimbala\\_1ra\\_Edici%C3%B3n](https://www.academia.edu/35477658/Mec%C3%A1nica_de_Flu%C3%ADdos_Cengel_Cimbala_1ra_Edici%C3%B3n)
- [93] M. A. Riera and N. A. G. Chavez, "Diseño de una unidad de flotación con aire disuelto para la remoción de contaminantes de las aguas residuales generadas en una empresa manufacturera," *Revista Digital De Investigación Y Postgrado*, vol. 5, (2), pp. 2, 2015.
- [94] A. De Turrís *et al*, "Tratamiento de aguas de producción por flotación con aire disuelto," *Interciencia*, vol. 36, (3), pp. 211-218, 2011.
- [95] W. W. Eckenfelder Jr and D. L. Ford, *Industrial Wastewater Quality*. 2009.
- [96] M. Riera and N. Graterol, "DESIGN OF A UNIT DISSOLVED AIR FLOTATION FOR REMOVAL OF POLLUTANTS OF THE WASTEWATER GENERATED IN A MANUFACTURING COMPANY," vol. 55, pp. 777–796, 2015.
- [97] D. García and P. Vivas, "Ampliación de la capacidad del sistema de tratamiento de agua de producción mediante el dimensionamiento conceptual de nuevos equipos en la estación jaguar ubicada en el bloque caracara.," Fundación Universidad de América, 2016.
- [98] M. Stewart and K. Arnold, Part 1 - Produced Water Treating Systems. Boston: Gulf Professional Publishing, 2011, pp. 1–134 [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781856179843000018>
- [99] H. Rawlins, "Experimental Study on Oil and Solids Removal in Nutshell Filters for Produced Water Treatment," 2018 [Online]. Available: <http://eprocess-tech.com/wp-content/uploads/2016/10/SPE-190108-MS.pdf>
- [100] F. P. Puget, M. V. Melo, and G. Massarani, "Wastewater treatment by flotation," vol. 17, no. 4–7, pp. 407–414, 2000, doi: 10.1590/S0104-66322000000400005.

- [Online]. Available: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_abstract&pid=S0104-66322000000400005&lng=en&nrm=iso&tlng=en](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0104-66322000000400005&lng=en&nrm=iso&tlng=en). [Accessed: 06-Feb-2021]
- [101] P. Mavros and K. Matis, *Innovations in Flotation Technology*. 1992.
- [102] P. T. L. Koh and P. Schwarz, "CFD modelling of bubble–particle attachments in flotation cells," vol. 19, pp. 619–626, 2006, doi: 10.1016/j.mineng.2005.09.013.
- [103] D. Lelinski, J. Allen, L. Redden, and A. Weber, "Analysis of the residence time distribution in large flotation machines," vol. 15, pp. 499–505, 2002, doi: 10.1016/S0892-6875(02)00070-5.
- [104] J. Baeyens, I. Y. Mochtar, S. Liers, and H. De Wit, "Plugflow dissolved air flotation," vol. 67, no. 7, pp. 1027–1035, 1995.
- [105] P. Darling, *References*. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration (SME) [Online]. Available: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt008K1903/sme-mining-engineering/fundamental-references>
- [106] L. Wang, K. Runge, and Y. Peng, "The observed effect of flotation operating conditions and particle properties on water recovery at laboratory scale," vol. 94, pp. 83–93, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2016.05.003>. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0892687516301236>
- [107] S. K. Kawatra, "Flotation Fundamentals. Retrieved from Mining Engineering Handbook". [Online]. Available: [http://www.chem.mtu.edu/chem\\_eng/faculty/kawatra/Flotation\\_Fundamentals.pdf](http://www.chem.mtu.edu/chem_eng/faculty/kawatra/Flotation_Fundamentals.pdf), 2019
- [108] N. D. Sylvester and J. J. Byeseda, "Oil/water separation by induced-air flotation," vol. 20, no. 06, pp. 579–590, 1980.
- [109] F. C. P. Rocha e Silva et al., "Oil removal efficiency forecast of a Dissolved Air Flotation (DAF) reduced scale prototype using the dimensionless number of Damköhler," vol. 23, pp. 45–49, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2018.01.019>. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214714417307468>
- [110] P. Li and H. Tsuge, "Water Treatment by Induced Air Flotation Using Microbubbles," vol. 39, pp. 896–903, 2006, doi: 10.1252/jcej.39.896.

- [111] P. Painmanakul, P. Sastaravet, S. Lersjintanakarn, and S. Khaodhiar, "Effect of bubble hydrodynamic and chemical dosage on treatment of oily wastewater by Induced Air Flotation (IAF) process," vol. 88, no. 5, pp. 693–702, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2009.10.009>. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263876209002743>
- [112] J. Saththasivam, K. Loganathan, and S. Sarp, "An overview of oil–water separation using gas flotation systems," vol. 144, pp. 671–680, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.08.087>. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653515300874>
- [113] S. S. da Silva, O. Chiavone-Filho, E. L. de Barros Neto, and E. L. Foletto, "Oil removal from produced water by conjugation of flotation and photo-Fenton processes," vol. 147, pp. 257–263, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.08.021>. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479714004356>
- [114] G. Bennett and N. Shammas, *Separation of Oil from Wastewater by Air Flotation*. 2010, pp. 85–119.
- [115] B. Meyssami and A. B. Kasaeian, "Use of coagulants in treatment of olive oil wastewater model solutions by induced air flotation," vol. 96, no. 3, pp. 303–307, 2005, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2004.04.014>. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852404001567>
- [116] N. J. M. V. Ham, L. A. Behie, and W. Y. Svrcek, "The effect of air distribution on the induced air flotation of fine oil in water emulsions," vol. 61, no. 4, pp. 541–547, 1983, doi: <https://doi.org/10.1002/cjce.5450610408>. [Online]. Available: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/cjce.5450610408>. [Accessed: 06-Feb-2021]
- [117] T. Brown, *Quimica la ciencia central*, 11th ed. Pearson, 2009.
- [118] H. C. Ltd, "Technical Data Sheet Walnut Shell." 2016 [Online]. Available: <https://www.hodgeclemco.co.uk/wp-content/themes/Hodge%20Clemco/images/photos/TDS%2045%20Walnut%20Shell.pdf>
- [119] O. Serra, "Fundamental of well-log interpretation: the acquisition of logging data, developments in petroleum science, vol 1. 15A-trans," *El Sevier Science Publishers BV, Amsterdam, the Netherlands*, 1984.

- [120] L. C. Graton and H. J. Fraser, "Systematic Packing of Spheres: With Particular Relation to Porosity and Permeability," vol. 43, no. 8, pp. 785–909, 1935 [Online]. Available: <http://www.jstor.org/stable/30058420>
- [121] D. Z. Ismail, "Removal of Oil From Wastewater Using Walnut-Shell", en, vol. 1, no. 1, pp. 117-124, Dec. 2017.
- [122] D. Zhang, W. X. Wu, and L. Zhang, "Effect of different filtration materials on oil and water separation efficiency," vol. 164, p. 012028, 2017, doi: 10.1088/1757-899x/164/1/012028. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/164/1/012028>
- [123] A. Srinivasan and T. Viraraghavan, "Oil removal from water using biomaterials," vol. 101, no. 17, pp. 6594–6600, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.03.079>. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852410005560>
- [124] X. Yin, J. Zhang, X. Wang, and M. Zhu, "Modified walnut shell filter material for the enhanced removal of oil from oilfield wastewater," vol. 26, 2020, doi: 10.4491/eer.2019.369.
- [125] D. Z. Ismail, "Removal of Oil From Wastewater Using Walnut-Shell", en, vol. 1, no. 1, pp. 117-124, Dec. 2017.
- [126] A. Fahim and A. Alsulaili, "Oil removal from produced water by agriculture waste adsorbents," vol. 25, p. 12, 2020, doi: 10.1504/IJEW.2020.10026030.
- [127] T. M. Aversa, C. M. F. Silva, Q. C. Rocha, and E. F. Lucas, "Synthesis, characterization and evaluation of two crosslinked polymeric resins and their comparison with walnut shell in oil removal from water," vol. 51, no. 8, pp. 634–639, 2016, doi: 10.1080/10934529.2016.1159872. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/10934529.2016.1159872>
- [128] S. Moran, 17.3.2 Hydrophilic Media: Nutshell Filters. Elsevier [Online]. Available: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt011PEV5L/applied-guide-water-effluent/hydrophilic-media-nutshell>
- [129] C. H. Rawlins and F. . Sadeghi, "Experimental Study on Oil Removal in Nutshell Filters for Produced-Water Treatment," vol. 33, no. 01, pp. 145–153, 2017, doi: 10.2118/186104-PA. [Online]. Available: <https://doi.org/10.2118/186104-PA>. [Accessed: 2021]



- [130] M. Davies and P. J. B. Scott, 17.2.2 Filter Media. NACE International [Online]. Available: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt007YFS21/oilfield-water-technology/filter-media>
- [131] J. Yang, Z. Wang, Ma, Liu, Tang, and Z. Zhu, "Oil-Water-Gas Three-Phase Separation in Multitube T-Junction Separators," vol. 11, p. 2655, 2019, doi: 10.3390/w11122655.
- [132] Y. Liang, S. Zhao, X. Jiang, X. Jia, and W. Li, "Numerical Simulation on Flow Field of Oilfield Three-Phase Separator," vol. 2013, 2013, doi: 10.1155/2013/298346.
- [133] D. G. Akpan, "*Performance of Internals in Three-Phase Tank Separators*", 2013.. [En línea]. Disponible en: <https://core.ac.uk/download/pdf/52100414.pdf>
- [134] M. Zhu *et al*, "Design and Computational Fluid Dynamics Analysis of a Three-Phase Decanter Centrifuge for Oil-Water-Solid Separation," *Chem. Eng. Technol.*, vol. 43, (5), pp. 1005-1015, 2020.
- [135] B. Bianchi, A. Tamborrino and F. Santoro, "Assessment of the energy and separation efficiency of the decanter centrifuge with regulation capability of oil water ring in the industrial process line using a continuous method," *Journal of Agricultural Engineering*, 2013.
- [136] C. A. Gómez Guarnizo, "Plan de manejo de residuos peligrosos para el laboratorio del Centro de Investigaciones de Ingeniería Ambiental - CIIA de la Universidad de Los Andes," Uniandes, 2003 [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/1992/15803>
- [137] D. L. Gallup, "Removal of mercury from water in the petroleum industry," in *21st Annual International Petroleum Environmental Conference, Houston TX*, 2014
- [138] Lenntech. "Hydranautics - RO Water chemistry" 2002. [En línea]. Disponible en: <https://www.lenntech.com/Data-sheets/Hydranautics-RO-Water-Chemistry-LL.pdf>
- [139] T. Sánchez Antón, "Proyecto Básico de la Estación de Desalación de Agua de Mar de Sitges," 2005.
- [140] N. Voutchkov, Chapter 8 - Granular Media Filtration. Amsterdam: Elsevier, 2017, pp. 153–186 [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128099537000085>

- [141] N. Voutchkov, "Chapter 6 - Conditioning of Saline Water." Elsevier, Amsterdam, pp. 113–135, 2017 [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128099537000061>
- [142] N. Voutchkov, "Chapter 5 - Pretreatment by screening" Elsevier, Amsterdam, pp. 95–111, 2017 [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978012809953700005X>

## GLOSARIO

**Agua de producción:** Es el agua que llega a superficie junto con el petróleo crudo, gas y lodos, en la etapa de explotación de yacimientos petrolíferos. Generalmente contiene aceites orgánicos solubles y no solubles, sólidos en suspensión, sólidos disueltos y varios productos químicos utilizados en el proceso de perforación.

**Celda de flotación:** Es un equipo que tiene como función separar de manera eficiente diferentes fluidos por medios mecánicos o químicos.

**Decantador:** Son unidades de proceso que permiten la separación de partículas que se encuentran suspendidas en el agua.

**Fuerza impulsora:** Es la fuerza necesaria para que el transporte de componentes se produzca, por medio de un gradiente a través de lo que podría ser una membrana capaz de originar un flujo de componentes.

**Medio filtrante:** Es un término utilizado para describir cualquier material utilizado para filtrar partículas de la corriente de flujo de un fluido, este tiene el propósito de controlar el paso de los contaminantes. Los diferentes tipos de medios filtrantes se distinguen por su capacidad o habilidad de tolerar el paso de los contaminantes.

**Membrana semipermeable:** Es una estructura porosa que permite la circulación del solvente desde la solución con menor concentración a la solución con mayor concentración. El índice del paso depende de la presión osmótica, la concentración, el gradiente electroquímico y la temperatura de las moléculas o de los solutos en cualquier lado, así como la permeabilidad de la membrana para cada soluto.

**Osmosis inversa:** Tecnología utilizada para eliminar contaminantes presentes en el agua ejerciendo presión a través de una membrana semipermeable.

**Permeado:** Corresponde a la parte del agua que atraviesa la membrana, es decir el efluente tratado. Este suele contener entre el 1 o 2% de la concentración de sales promedio del agua de ingreso, dependiendo del tipo de membrana.

**Porosidad:** Es la fracción de volumen de un material que no está ocupado por materia sólida.

**Rechazo:** Es también conocida como agua concentrada, es el agua que no consigue atravesar la membrana, esta posee el mayor porcentaje de sales y contaminantes. Normalmente se rechaza entre un 20 a un 75% del agua a tratar.

**Rendimiento:** Es la relación entre la cantidad de permeado obtenido y la cantidad máxima de permeado que se podría obtener si la membrana filtrara en un 100%. El

rendimiento del sistema de membranas depende de la calidad del agua de alimentación

**Retrolavado:** Es la operación principal de limpieza de un lecho filtrante, en esta el agua fluye en la dirección opuesta a la cual opera normalmente, con el fin de remover sólidos que se encuentren retenidos en el lecho.

**Skim tank:** También llamado tanque desnatador, es utilizado en el proceso de separación crudo-agua, estos recolectan el aceite flotante con el fin de recuperarlo posteriormente de sumideros.

**Sumidero:** Es un tipo de dolina circular que actúa como colector de lodos y crudo provenientes de los decantadores y desnatadores, donde posteriormente se recupera el crudo y los lodos se disponen adecuadamente.

**Tanque de surgencia:** Separador vertical u horizontal que se utiliza principalmente para eliminar el agua libre que pueda causar problemas como corrosión o formación de hidratos o emulsiones difíciles de romper.

**Índice de saturación de Langelier (LSI):** Es un índice que permite determinar las tendencias corrosivas o incrustantes en el agua para uso doméstico o industrial.

## **ANEXOS**

## **ANEXO 1.**

### **RECOMENDACIONES**

Es importante que se defina la disposición final del agua concentrada o de rechazo, que se genera en el sistema de ósmosis inversa.

Los costos asociados a la instalación del sistema ósmosis inversa no se evaluaron para este proyecto, pero su estimación es de gran importancia, si se desea desarrollar esta propuesta a escala piloto.

El pretratamiento es una etapa primordial que debe considerarse a la hora de diseñar una planta de ósmosis inversa, especialmente cuando el agua a tratar no cuenta con una alta calidad, es decir, agua con un alto contenido de sólidos, sales, entre otros contaminantes.

Es conveniente realizar un estudio detallado de los requerimientos del cultivo con el fin de identificar los beneficios entregados al suelo a partir de la irrigación de este tipo de agua.

## ANEXO 2.

### FORMATO ENCUESTA 1



#### ENCUESTA DE EXPERTOS PARA EL DISEÑO DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUA DE PRODUCCIÓN DEL CAMPO RUBIALES PARA DISPOSICIÓN EN RIEGO.

La siguiente encuesta ha sido diseñada con el fin de definir los criterios que permitan soportar la selección de la (o las) mejor(es) tecnología(s), para el tratamiento de agua de producción del campo Rubiales para su disposición en riego.

Además de esto, se busca ponderar los criterios definidos con el fin de establecer un esquema de análisis de acuerdo con las prioridades que se definan con su valioso apoyo como experto. Por tal motivo, es de suma importancia su participación en la siguiente encuesta; esta información se recolecta con fines académicos para el desarrollo del trabajo de grado para el programa de ingeniería química de pregrado que busca diseñar un sistema de tratamiento de agua de producción del campo rubiales para disposición en riego.

El agua de salida del tratamiento actual en el campo Rubiales contiene elevadas cantidades de fluoruros y mercurio los cuales no permiten cumplir la normativa actual para su correcta disposición en riego.

#### POR FAVOR, TÓMESE EL TIEMPO NECESARIO PARA RESPONDER CON DETENIMIENTO CADA UNA DE LAS PREGUNTAS

1. A continuación, se presenta un listado de criterios agrupados en técnicos, ambientales, económicos y sociales.

En orden de importancia, donde (1) es poco importante y (10) es muy importante, por favor indique la importancia que usted le da a los siguientes criterios a la hora de seleccionar una tecnología de tratamiento de agua. En caso de que usted considere que algunos de los criterios no deben ser considerado para la selección de esta tecnología, por favor marque cero (0).

	Criterio	Descripción	Valoración													
			0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
<b>T É C N I C O S</b>	Viabilidad técnica	Ubicación de la tecnología, espacio que ocupará y facilidad de mantenimiento y operación														
	Eficiencia de remoción de iones	Porcentaje de remoción de los iones presentes en el agua de producción, tales como sulfuros, cloruros, fluoruros y sulfatos.														
	Eficiencia de remoción de BTEX	Porcentaje de remoción de compuestos BTEX (benceno, tolueno, etilbenceno y xileno)														
	Eficiencia de remoción de HAP	Porcentaje de remoción de hidrocarburos aromáticos policíclicos (naftaleno, benzo(a)pireno, fenantreno, entre otros)														
	Eficiencia de remoción de metales	Porcentaje de remoción de metales pesados, en específico mercurio y vanadio.														
	Madurez de la tecnología	El tiempo de desarrollo de la tecnología desde la investigación básica hasta su implementación industrial														

E C O N O M I C O S	Costo de capital	Inversión inicial para la compra o alquiler de la tecnología																		
	Costo de operación y mantenimiento	Costos asociados al funcionamiento del equipo, como consumo y costo energético, utilización de químicos, mantenimiento y sistemas de monitoreo remoto																		
A M B I E N T A L E S	Emisiones de gases de efecto invernadero	Contribución al efecto invernadero, es decir, cantidad de gases de efecto invernadero generados.																		
	Residuos	Corrientes resultantes de tipo sólido o líquido generadas por la tecnología.																		
	Disposición final	Manera en que se dispone la tecnología una vez haya cumplido de ciclo de vida útil																		
S O C I A L E S	Efectos en la salud humana	Impactos negativos o daños a la salud por parte de la tecnología asociados a inhalación, ingestión, radiación o contacto con la piel o por fluidos de proceso.																		
	Contaminación auditiva	Cantidad de ruido provocado por la tecnología																		
	Generación de olores	Producción de olores por parte de la tecnología																		
	Riesgos por accidentes	Accidentes que pueden generarse por la tecnología, tales como, derrames, fugas, fallas en la estructura, fallos de control, entre otros.																		

Si usted considera algún criterio que no esté incluido en la matriz anterior, por favor, escríbalo acá:

2. A continuación, se presenta el listado de tecnologías para el tratamiento del agua de producción del campo rubiales. A partir de una recopilación de diversas fuentes de información bibliográfica, se seleccionaron las tecnologías más convenientes para el sistema de tratamiento

De las siguientes opciones, por favor, ordene las alternativas de 1 a 5, donde 5 es la más apropiada y 1 es la menos apropiada, como tecnología para el sistema de tratamiento de agua de producción

Código	Tecnología	Puntuación
R1	Osmosis inversa	
R2	Solar foto fenton	
R3	Electrodialisis	



R4	Humedales artificiales	
R5	Filtros de carbón activado	

Si usted considera importante alguna tecnología que no esté incluida en la matriz anterior, por favor, escríbala acá:

---



---



---

3. Califique el impacto que cada tecnología tiene sobre los siguientes subcriterios ambientales; la calificación se realizará con los términos: Bajo (1), Medio (2), Alto (3) y Muy alto (4)

Cod.	Tecnologías	Criterios		
		A1	A2	A3
		Emisiones de gases de efecto invernadero	Residuos	Disposición
R1	Osmosis Inversa			
R2	Solar foto fenton			
R3	Electrodiálisis			
R4	Humedales artificiales			
R5	Filtros de carbón activado			

**Nombre del encuestado:**

**Fecha:**

**Firma:**

### ANEXO 3.

#### FORMATO ENCUESTA 2



#### ENCUESTA NÚMERO 2 DE EXPERTOS PARA LA CALIFICACIÓN DE CRITERIOS SOCIALES PARA CADA TECNOLOGÍA

La siguiente encuesta ha sido diseñada con el fin de cuantificar los criterios sociales que permitan soportar la selección de la (o las) mejor(es) tecnología(s), para el tratamiento de agua de producción del campo Rubiales para su disposición en riego.

Además de esto, se busca ponderar los criterios definidos con el fin de establecer un esquema de análisis de acuerdo con las prioridades que se definan con su valioso apoyo como experto. Por tal motivo, es de suma importancia su participación en la siguiente encuesta; esta información se recolecta con fines académicos para el desarrollo del trabajo de grado para el programa de ingeniería química de pregrado que busca diseñar un sistema de tratamiento de agua de producción del campo rubiales para disposición en riego.

El agua de salida del tratamiento actual en el campo Rubiales contiene elevadas cantidades de fluoruros y mercurio, los cuales no permiten cumplir la normativa actual para su correcta disposición en riego.

**POR FAVOR, TÓMESE EL TIEMPO NECESARIO PARA RESPONDER CON DETENIMIENTO LA SIGUIENTE TABLA:**

Califique el impacto que desde su experiencia cada tecnología tiene sobre los siguientes subcriterios sociales; la calificación se realizará con los términos: Bajo (1), Medio (2), Alto (3) y Muy alto (4)

Cod.	Tecnologías	Criterios			
		S1	S2	S3	S4
		Efectos en la salud humana	Contaminación auditiva	Generación de olores	Riesgos de accidentes
R1	Osmosis Inversa				
R2	Solar foto <del>feñon</del>				
R3	Electrodialisis				
R4	Humedales artificiales				
R5	Filtros de carbón activado				

Nombre del encuestado:

Fecha:

Firma:

## ANEXO 4.

### FICHA TÉCNICA MEMBRANA LEWABRANE RO B400 FR

#### INFORMACIÓN DE PRODUCTO LEWABRANE® RO B400 FR



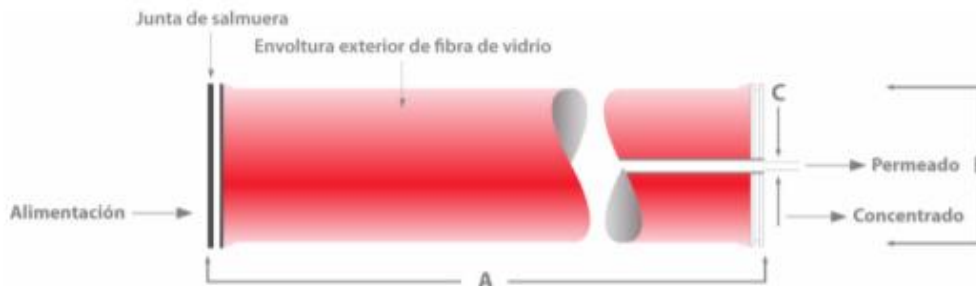
Lewabrane® RO B400 FR es un elemento de membrana composite de poliamida, enrollado en espiral, y diseñado para el tratamiento de agua industrial. Los elementos Lewabrane® FR están diseñados para proporcionar más turbulencia del agua de aporte en combinación con la superficie de baja carga, y altamente reticulada de la membrana Lewabrane. Estos nuevos elementos RO están recomendados para aguas salobres y de baja salinidad en las cuales se espere una mayor tendencia al ensuciamiento (fouling) biológico y orgánico.

#### Información general

	Sistema métrico	Unidades americanas
Espesor del espaciador de alimentación	0,86 mm	34 mil
Área de la membrana	37,2 m <sup>2</sup>	400 ft <sup>2</sup>
Rechazo de sal, promedio	99,5 %	99,5 %
Rechazo de sal, min.	99,0 %	99,0 %
Flujo del permeado, promedio	39,9 m <sup>3</sup> /d	10500 gpd
Flujo del permeado, min.	31,9 m <sup>3</sup> /d	8400 gpd

El elemento es testado según las siguientes condiciones: presión 15,5 bar (225 psi), concentración NaCl 2000 mg/l, temperatura 25°C (77 °F), pH 7 y tasa de recuperación del 15%

#### Dimensiones del elemento



	A (Longitud)	B (Diámetro)	C (ID)
Sistema métrico	1016 mm	201 mm	29 mm
Unidades americanas	40 inch	7.9 inch	1.125 inch

### Datos de aplicación

	Sistema métrico	Unidades americanas
Presión de operación, máx.	41 bar	600 psi
Temperatura de operación, máx.	45 °C	113 °F
SDI del agua de alimentación, máx.	5	5
Caudal de alimentación, máx.	18,0 m <sup>3</sup> /h	80 gpm
Flujo del concentrado, min.	2,7 m <sup>3</sup> /h	12 gpm
Rango de pH durante en operación	2 - 11	2 - 11
Rango de pH durante la limpieza	1 - 12	1 - 12
Pérdida de carga por elemento, máx.	1,0 bar	15 psi
Pérdida de carga por tubo de presión, máx.	3,5 bar	50 psi
Concentración de cloro, máx.	0,1 ppm	0,1 ppm

### Información adicional

- Tratar los elementos con cuidado, no dejarlos caer.
- Cada elemento es testado en húmedo, conservado en una solución de bisulfito sódico al 1% en peso, y empaquetado al vacío en un embalaje impermeable al oxígeno.
- Durante el almacenaje evitar las heladas y la exposición directa a los rayos solares. La temperatura debe ser inferior a los 35 °C (95 °F).

### Tras el montaje

- Guardar los elementos de ósmosis inversa en estado húmedo, y utilizar una solución conservante compatible para almacenajes superiores a los 7 días.
- En la puesta en marcha inicial verter el permeado durante los primeros 30 min..
- La contrapresión del permeado no debe sobrepasar jamás la presión de alimentación.
- Tomar en consideración la limpieza de la membrana, si la pérdida de carga se incrementa en un 20%, o la permeabilidad decrece en un 10%.
- Utilizar sólo productos químicos compatibles con la membrana.
- Para información detallada consultar el Lewabrane® manual de nuestra website [www.lpt.lanxess.com](http://www.lpt.lanxess.com).

Este documento contiene información importante y debe ser leído por completo.

Edición: 2014-02-20  
Edición previa: 2014-02-17

## ANEXO 5.

### FICHA TÉCNICA BOMBA DE ALTA PRESIÓN



una marca de



www.barnes.com.co

**Bombas Alta presión**  
con motor eléctrico

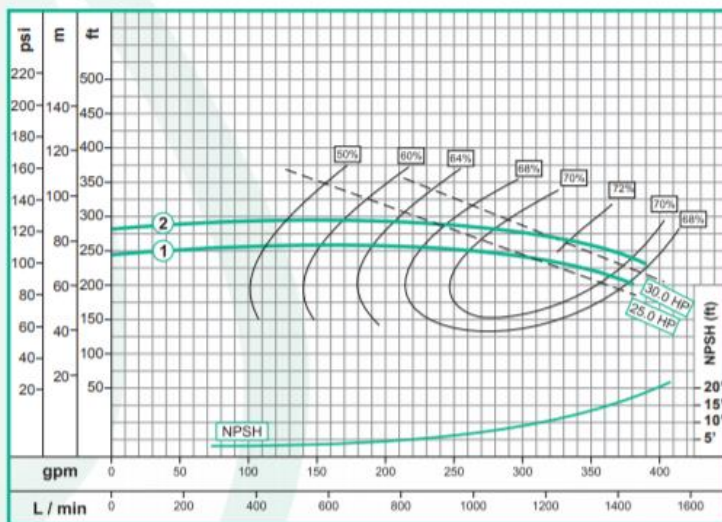
**QE 2 250**  
**QE 2 300**

Características de la bomba							
Tipo de bomba	Acoplamiento		Tipo de impulsor				
Centrífuga	Monobloque		Cerrado, balanceado dinámicamente (ISO G6.3)				
Etapas	Cierre del eje			Temperatura máx. líquido			
1	Sello mecánico 1 1/2" Tipo 21			70°C (158°F) Continua			
Modelo	Ref.	Ø Succión	Ø Descarga	Ø Impulsor	Peso (kg)	H máx. (mca) *	Q máx. (gpm) **
1 QE 2 250	1E0523	2 1/2" B	2" B	7,625"	144,0	76	380
2 QE 2 300	1E0524	2 1/2" B	2" B	8,125"	191,0	86	390

Características del motor			
Alimentación		Velocidad (rpm)	
Eléctrica		3.600 (nominal)	
Cerramiento		Frecuencia (Hz)	
TEFC		60	
Potencia (hp)	Fases	Voltaje (V)	Frame
25,0	3	220/440	NEMA 256JM
30,0	3	220/440	NEMA 284JM

\* La altura (H) máxima se logra con la válvula totalmente cerrada. (mca= metros columna de agua).  
 \*\* El caudal (Q) máximo se logra con la válvula totalmente abierta. (gpm= galones por minuto).

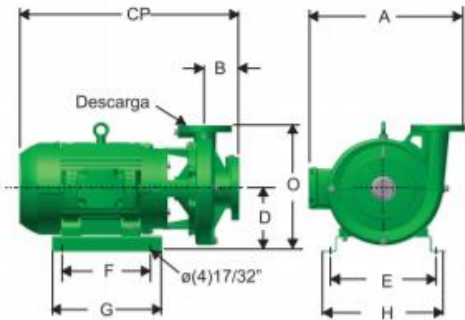
#### Curva de rendimiento



#### Aplicaciones

- Uso doméstico
  - Sector agrícola
  - Industria
  - Construcción
  - Institucional
- Acueductos
  - Aprovechamiento de aguas limpias
  - Distribución de agua en unidades residenciales
  - Extracción de agua de pozos llanos
  - Industria Minera
  - Industria Petroquímica
  - Industria Química
  - Lavado a presión de maquinaria
  - Lavado de establos
  - Llenado de tanques elevados
  - Llenado tanque bajo-tanque alto
  - Recirculación de agua en torres de enfriamiento
  - Riego por aspersión
  - Sistemas contra incendio
  - Sistemas de presión
  - Sistemas de trabajo pesado y continuo

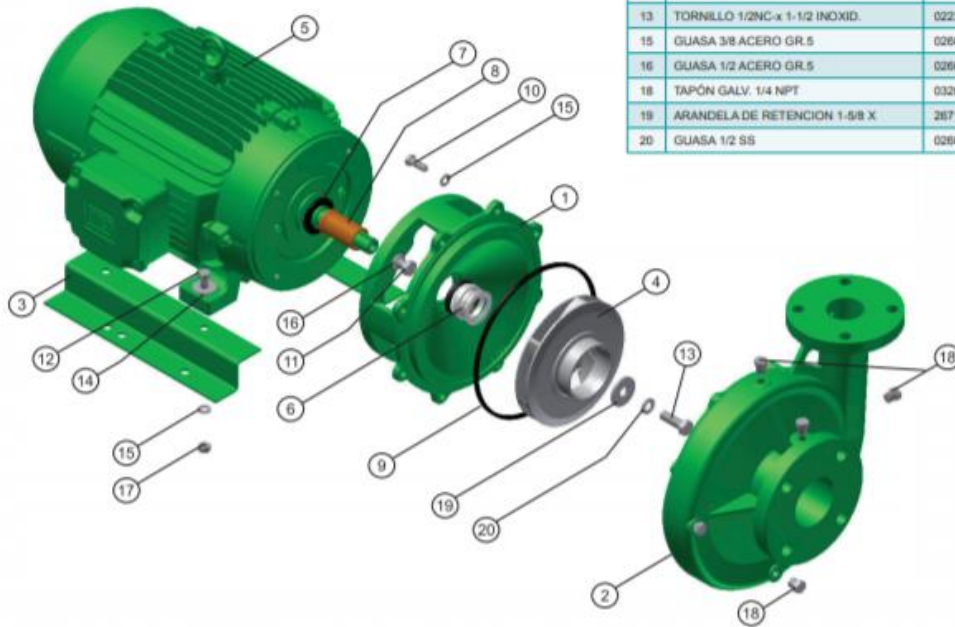
Dimensiones generales (mm)									
Modelo	CP	O	A	B	E	D	F	G	H
QE 2 250	770	337	488	97	254	218	227	406	403
QE 2 300	792	356	505	97	279	180	241	294	350



Materiales	
Cuerpo	Hierro fundido ASTM A-48, Clase 20
Impulsor	Hierro fundido ASTM A-48, Clase 20
Sello mecánico	Carbon / Cerámica / Buna-N
Acople intermedio	Hierro fundido ASTM A-48, Clase 20
Empaques	Buna Nitrilo

#### Lista de partes

No.	Descripción	Ref.	Cantidad	
			1	2
1	ACOPLE FE	22028	1	
1	ACOPLE FE	22029		1
2	CUERPO FE	22745	1	1
3	BASE MOTOR	19368	1	1
4	IMPULSOR FE $\varnothing$ 7,625"	35762	1	
4	IMPULSOR FE $\varnothing$ 8,125"	35812		1
5	MOTOR E 25-2 256JM 24V-3 TEFC	13959	1	
5	MOTOR E 30-2 284JM 24V-3 TEFC	13968		1
6	SELLO MEC. 1-1/2" T21 01245BP4RS	00031	1	1
7	ARANDELA CAUCHO 3"1.740"3/16	05164	1	1
8	CAMISA INOX. 3025HCE 254/324JM	30653	1	1
9	ANILLO CUADRADO CAUCHO HC	21297	1	1
10	TORNILLO 3/8 X 1 NC.GR.2 IRIZA	02037	8	8
11	TORNILLO 1/2 X 1 1/4 NC.GR.5	02224	4	
11	TORNILLO 5/8 X 1-1/2 NC.GR.5	02253		4
13	TORNILLO 1/2NC-x 1-1/2 INOXID.	02230	1	1
15	GUASA 3/8 ACERO GR.5	02604	8	8
16	GUASA 1/2 ACERO GR.5	02608	4	
18	TAPÓN GALV. 1/4 NPT	03201	6	6
19	ARANDELA DE RETENCION 1-5/8 X	28719	1	1
20	GUASA 1/2 SS	02609	1	1



# ANEXO 6.

## FICHA TÉCNICA VASO DE PRESIÓN

This drawing is an integral part of the general statement of use and Technical Manual

GENERAL DRAWING - PAGE 1/2

Notes:

- All dimensions are for reference only, not for construction unless certified.
- Item 14 & 15 should be located on feed side.
- Drawing unit: mm. (inches)
- Saddles can be shimmed if required.
- Do not scale drawing, may be reprinted on any paper size or copied.
- Length between ports (P) can be changed to adapt old dimension - with customer's special request.
- The vessel is supplied with two strap assembly.
- For tolerances & sizes, please check the drawing in page 2.

Warning:

- Never pressurize a pressure vessel that was not loaded with membrane elements.
- Wrong manifolding may cause an excessive load on port what can lead to leaks.
- Max. allowable working pressure not to exceed 300 psi. (20.7 bar).
- Permeate internal pressure not to exceed 125 psi. (8.6 bar).
- Operating temperature not to exceed 49°C (120°F).

Shell length code	L (l.o.a.) mm	L (l.o.a.) inch	P, port to port mm	S# (span) mm	M, mm/in length for membranes elements	W weight kg	W ASME weight kg/lb	Article number (C + stamp)
1	1526	1542	1194	500	1032	35.1	38.4	81300-1(1A)
2	2542	2558	2210	1500	2048	44.7	48.1	81300-2(2A)
3	3558	3574	3226	2500	3064	54.4	57.8	81300-3(3A)
4	4574	4590	4242	3250	4080	64.1	67.4	81300-4(4A)
5	5590	5606	5258	4250	5096	73.8	77.1	81300-5(5A)
6	6606	6622	6274	5250	6112	83.4	86.8	81300-6(6A)
7	7622	7638	7290	6250	7128	93.1	96.5	81300-7(7A)
8	8638	8654	8306	7250	8144	102.8	106.1	81300-8(8A)

Item	Qty	Part Number	Description	Material
1	1	81300-0	Body of Pressure Vessel	Glass/Epoxy
2	2	040-156-0458	F/C port 1.5"	Stainless steel
3	2	006-156-0452	Diak for sideport	Stainless steel
4	2	014-150-0508	Seal for sideport	EPDM
5	4	011-156-1262	Retaining ring for SP	Stainless steel
6	2	85410299	Support ring (Code)	Aluminum
7	2	011-801-1202	Retaining ring (finger hook)	Stainless steel
8	2	265453003	Metal cap 3mm (Code)	Stainless steel
9	2	285716010Vg	End cap	Engineering plastic
10	2	007-000-0092	Seal for End cap	EPDM
11	2	285773918	Seal for Adapter	EPDM
12	2	As required	Adapter	Engineering plastic
13	2/4	As required	Membrana seal	EPDM
14	0-3	285776231	Diak spacer - 1mm	Engineering plastic
15	0-7	285776233	Diak spacer - 3mm	Engineering plastic
16	2	85410310	Strap Assy.	Stainless steel
17	2/3	85410351	Saddle	Engineering plastic
18	2	285034015	Support ring (Non Code)	Engineering plastic

This drawing is an integral part of the general statement of use and Technical Manual

GENERAL DRAWING - PAGE 2/2

Notes:

- All dimensions are for reference only, not for construction unless certified.
- For membranes shimming (if needed) use disks spacers on feed side of the vessels.
- Drawing unit: mm. (inches)
- Saddles can be shimmed if required.
- Do not scale drawing, may be reprinted on any paper size or copied.
- The vessel is supplied with two strap assembly.

Warning:

- Never pressurize a pressure vessel that was not loaded with membrane elements.
- Wrong manifolding may effect an excessive load on port what can lead to leaks.
- Max. allowable pressure not to exceed the indicated working pressure.
- Permeate internal pressure not to exceed 125 psi. (8.6 bar).
- Operating temperature not to exceed 49°C (120°F).

Membranes quantity	1	2	3	4	5	6	7	8
P, port to port	1194	2210	3229	4242	5258	6274	7290	8306
S, supports span	500	1500	2500	3250	4250	5250	6250	7250
M, space of membranes	1032	2048	3064	4080	5096	6112	7128	8144

Membranes quantity	1	2	3	4	5	6	7	8
300 code (20.7)	1526	2542	3558	4574	5590	6606	7622	8638
450 (31)	60.71	100.71	140.71	180.71	220.71	260.71	300.71	340.71
600 (81)	61.65	101.65	141.65	181.65	221.65	261.65	301.65	341.65
800 (103.4)	66.85	106.85	146.85	186.85	226.85	266.85	306.85	346.85

Working pressure, psi (bar)	B (Peak bell diameter), mm (inch)				H (height of side port), mm (inch)				
	1.5"	2"	2.5"	3"	1.5"	2"	2.5"	3"	
300 (20.7)	249	257	265	282	288	166	166	166	175
450 (31)	249	257	265	282	288	166	166	166	175
600 (81)	249	257	265	282	288	166	166	166	175
800 (103.4)	249	257	265	282	288	166	166	166	175

**LENTECH**  
 info@lentech.com Tel. +31-152-610-900  
 www.lentech.com Fax. +31-152-616-289

\* Ports with special height (H) in vessel and Length between ports (P) can be changed to adapt old dimension - with customer's special request.

\*\* NC (Non Code)

Working pressure, psi (bar)	A, mm (inch)	B, mm (inch)	C, mm (inch)	D, mm (inch)	E, mm (inch)
300 NC (20.7)	2	29	117	214	229
450 (31)	0.08	1.14	4.61	8.43	9.02
600 (81)	0.35	1.42	4.61	8.43	9.02
800 (103.4)	0.35	1.42	4.61	8.43	9.02