

**PROPUESTA PARA EL REÚSO DE AGUA DE PRODUCCIÓN EN EL CAMPO  
PETROLERO CASTILLA LA NUEVA**

**JOAQUÍN RICARDO LASPRILLA ÁVILA**

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE MAGÍSTER EN GESTIÓN  
AMBIENTAL PARA LA COMPETITIVIDAD**

**DIRECTOR**

**HARVEY ANDRÉS MILQUEZ SANABRIA  
INGENIERO QUÍMICO  
MSC. INGENIERÍA QUÍMICA  
PHD. ENERGÍAS RENOVABLES**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
MAESTRÍA EN GESTIÓN AMBIENTAL PARA LA COMPETITIVIDAD  
BOGOTÁ D.C.**

**2023**

**NOTA DE ACEPTACIÓN**

---

---

---

---

---

---

---

---

**Nombre**  
**Firma del Director**

---

**Nombre**  
**Firma del presidente Jurado**

---

**Nombre**  
**Firma del Jurado**

---

**Nombre**  
**Firma del Jurado**

**Bogotá D.C. agosto de 2023**

## **DIRECTIVOS DE LA UNIVERSIDAD**

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. Mario Posada García-Peña

Consejero institucional

Dr. Luis Jaime Posada García-peña

Vicerrectora académica y de investigación

Dra. Alexandra Mejía Guzmán

Vicerrector administrativo y financiero

Dr. Ricardo Alfonso Peñaranda Castro

Secretario general.

Dr. José Luis Macías Rodríguez

Decana Facultad de Ingeniería

Dra. Naliny Patricia Guerra Prieto

Directora Maestría En Gestión Ambiental para la competitividad

Ing. Nubia Liliana Becerra Ospina

## TABLA DE CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	12
1. OBJETIVOS	14
1.1. Objetivo General	14
1.2. Objetivos Específicos	14
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	15
3. MARCO TEÓRICO	18
3.1. Aguas Producidas en Colombia	18
3.2. Alternativas de Reúso de Aguas de Producción.	20
3.3. Producción en Castilla La Nueva	22
3.4. Zona de Influencia y Directrices de Ecopetrol	25
3.5. Marco Legal	26
4. METODOLOGÍA	29
4.1. Caracterizar el recurso hídrico para uso potencial en la zona de influencia	29
4.1.1. <i>Definición del Área de Influencia</i>	29
4.1.2. <i>Identificación del Índice de uso del Agua</i>	30
4.1.3. <i>Revisión de la Huella Hídrica de los Cultivos de Arroz y Palma de Aceite en la Cuenca del río.</i>	30
4.2. Seleccionar Un Tratamiento Para el Aprovechamiento de las Aguas de Producción	31
4.2.1. <i>Cálculo de volúmenes de agua a tratar y su caracterización</i>	31
4.2.2. <i>Requerimientos Legales Para Las Aguas de Reúso</i>	31
4.2.3. <i>Investigación y selección del método de tratamiento</i>	31
4.3. Formulación un Modelo de Negocio Para el Reúso de Aguas En Sistemas Agrícolas	34
4.3.1. <i>Cálculo de volúmenes de agua a tratar y su caracterización</i>	34
4.3.2. <i>Requerimientos Legales Para Las Aguas de Reúso</i>	34
4.3.3. <i>Investigación y selección del método de tratamiento</i>	34
4.4. Formulación un Modelo de Negocio Para el Reúso de Aguas En Sistemas Agrícolas	37
5. DISCUSIÓN Y RESULTADOS	38
5.1. Caracterización Del Recurso Hídrico Para uso Potencial en la Zona de Influencia	38
5.1.1. <i>Área De Influencia</i>	38

5.1.2. Zona Objetivo	43
5.1.3. Actividades Productivas En La Cuenca	43
5.1.4. Cobertura del uso del Suelo	45
5.1.5. Concesiones de Agua	49
5.1.6. Demanda Potencial del Sector Agrícola	50
5.1.7. Palma Africana	54
5.1.8. Tipos de Riego	55
5.1.9. Entidades presentes en la Actividad Económica Asociada al Río Guayuriba	56
5.1.10. Calidad del Agua	57
5.1.11. Carga por Usuario	58
5.1.12. Tasa Retributiva	59
5.1.13. Huella Hídrica	61
5.1.14. Índice de Escasez	64
5.1.15. Índice de Vulnerabilidad al Desabastecimiento Hídrico (IVH)	66
5.1.16. Partes Interesadas (Stakeholders)	71
5.1.17. Proyección de la Huella Hídrica Azul por el cultivo de palma de Aceite en el Tramo 1 de la Cuenca del Río Guayuriba	80
5.2. Selección de Un Tratamiento Para el Aprovechamiento de Aguas de Producción del Campo Castilla la Nueva	82
5.2.1. Cálculo del volumen de agua a tratar	82
5.2.2. Caracterización del Agua de Producción	84
5.2.3. Requerimientos Legales Para las Agua de Reúso	93
5.2.4. Alternativas Para El Tratamiento del Agua de Producción del Campo Petrolero Castilla la Nueva	94
5.2.5. Matriz de Selección	116
5.2.6. Modelo de Negocio Para el Reúso de Agua de Producción del Campo Petrolero Castilla la Nueva en Sistemas Agrícolas	132
6. CONCLUSIONES	153
BIBLIOGRAFÍA	156
ANEXOS	175

## LISTA DE FIGURAS

	<b>pág</b>
<b>Figura 1.</b> Gestión de efluentes por destino Ecopetrol 2019	19
<b>Figura 2.</b> Histórico de volúmenes de vertimientos por tipo de receptor Ecopetrol 2019	20
<b>Figura 3.</b> Uso benéfico del agua producido dentro del sector energético	21
<b>Figura 4.</b> Distribución de PQRs asociadas al recurso hídrico durante el año 2019 en Ecopetrol	26
<b>Figura 5.</b> Distribución de Subzonas Hidrográficas	38
<b>Figura 6.</b> Macro localización cuenca hidrográfica del río Guayuriba	40
<b>Figura 7.</b> Localización Geográfica del afluente Tramo 1 – Río Guayuriba	41
<b>Figura 8.</b> Localización de usuarios en el Tramo 1 – Río Guayuriba	42
<b>Figura 9.</b> Ubicación de las unidades de cobertura de la cuenca hidrográfica Rio Guayuriba	48
<b>Figura 10.</b> Coberturas Agrícolas y pecuarias	49
<b>Figura 11.</b> Demanda hídrica sectorial - agrícola en metros cúbicos por segundo (m <sup>3</sup> /s)	52
<b>Figura 12.</b> Porcentaje de distribución del agua captada en el rio Guayuriba según usos agropecuarios	54
<b>Figura 13.</b> Unidades de estudio para el análisis de la huella hídrica en la cuenca del río Guayuriba	63
<b>Figura 14.</b> Mapa de escasez de agua azul por subcuenca	66
<b>Figura 15.</b> Índice de vulnerabilidad por desabastecimiento hídrico (IVH) en la cuanta del río Guayuriba en condiciones normales	69
<b>Figura 16.</b> Índice de vulnerabilidad por desabastecimiento hídrico (IVH) en la cuanta del río Guayuriba en condiciones secas	70
<b>Figura 17.</b> Reinyección de aguas de producción en Ecopetrol	83
<b>Figura 18.</b> Tecnologías de tratamiento para aguas de producción	100
<b>Figura 19.</b> Diagrama de bloques BFD para el tratamiento de agua de producción mediante ósmosis inversa	107
<b>Figura 20.</b> Diagrama de bloques BFD para el tratamiento de agua de producción mediante recompresión mecánica de vapor (MVR)	110
<b>Figura 21.</b> Diagrama de bloques BFD para el tratamiento de agua de producción mediante electrodiálisis (ED)	113

<b>Figura 22.</b> Diagrama de bloques BFD para el tratamiento de agua de producción mediante nanofiltración (NF)	116
<b>Figura 23.</b> Árbol del proceso de jerarquía analítica (AHP) para la evaluación de las alternativas con dos niveles de jerarquía	118
<b>Figura 24.</b> Valores ponderados para cada una de las alternativas por experto para el criterio de evaluación 1 (Calidad del agua)	124
<b>Figura 25.</b> Valores ponderados para cada una de las alternativas por experto para el criterio de evaluación 2 (Requerimiento de mantenimiento)	125
<b>Figura 26.</b> Valores ponderados para cada una de las alternativas por experto para el criterio de evaluación 3 (Capital inicial)	126
<b>Figura 27.</b> Valores ponderados para cada una de las alternativas por experto para el criterio de evaluación 4 (Costo operativo)	127
<b>Figura 28.</b> Valores ponderados para cada una de las alternativas por experto para el criterio de evaluación 5 (Eficiencia energética)	128
<b>Figura 29.</b> Valores ponderados para cada una de las alternativas por experto para el criterio de evaluación 6 (Impacto ambiental)	129
<b>Figura 30.</b> Diagrama BFD y balance de masa para la alternativa de tratamiento seleccionada (Ósmosis inversa)	131
<b>Figura 31.</b> Creación de valor en la cadena de abastecimiento	133
<b>Figura 32.</b> Modelo de negocio CANVAS para el reúso de agua de producción generada en el campo petrolero Castilla la Nueva en el cultivo de palma de aceite de la zona de influencia	151

## LISTA DE TABLAS

	pág
<b>Tabla 1.</b> Parámetros fisicoquímicos para el agua de producción y sus valores establecidos como meta de tratamiento	43
<b>Tabla 2.</b> Cultivos presentes en la cuenca del río Guayuriba	45
<b>Tabla 3.</b> Cobertura presente en la cuenca del río Guayuriba	46
<b>Tabla 4.</b> Demanda hídrica río Guayuriba	53
<b>Tabla 5.</b> Tipos de riego	55
<b>Tabla 6.</b> Empresas del Sector Económico en la cuenca hidrográfica del río Guayuriba	56
<b>Tabla 7.</b> Objetivos de calidad tramo uno 1 río Guayuriba y directos-departamento Meta	58
<b>Tabla 8.</b> Resultados in situ y de laboratorio. Muestras puntuales. Agua residual industrial – Salida del STAP estación Acacias (Km 22)	59
<b>Tabla 9.</b> Valores Tasa retributiva de enero a diciembre del año 2021	59
<b>Tabla 10.</b> Ubicación y las áreas cultivadas con palma de aceite y arroz en el tramo 1 de la cuenca del Río Guayuriba	64
<b>Tabla 11.</b> Matriz de relación entre el IRH y el IUA para determinar el IVH	67
<b>Tabla 12.</b> Índice de vulnerabilidad por desabastecimiento hídrico (IVH) en condiciones normales y secas	67
<b>Tabla 13.</b> Área sembrada de Palma africana en la cuenca del río Guayuriba	72
<b>Tabla 14.</b> Predios que requieren de riego para el cultivo de palma de aceite en la cuenca del río Guayuriba	73
<b>Tabla 15.</b> Área sembrada de arroz en la cuenca del río Guayuriba	74
<b>Tabla 16.</b> Predios que requieren de riego para el cultivo de arroz en la cuenca del río Guayuriba	75
<b>Tabla 17.</b> Municipios y veredas con producción bovina en la zona de influencia del río Guayuriba (Tramo 1)	76
<b>Tabla 18.</b> H Azul del cultivo de palma de aceite en la zona de interés para en el año 2013 y 2020	81
<b>Tabla 19.</b> Variables para el cálculo del volumen de agua de producción a tratar y valores asignados	84
<b>Tabla 20.</b> Composición de aguas de producción no tratadas en el campo Castilla	86



<b>Tabla 21.</b> Propiedades fisicoquímicas del agua a la salida STAP de la Estación Acacias al Río Guayuriba (Km 22)	88
<b>Tabla 22.</b> Criterios de calidad para uso agrícola	93
<b>Tabla 23.</b> Criterios de calidad adicionales de aguas residuales para uso agrícola	94
<b>Tabla 24.</b> Comparativo entre las propiedades fisicoquímicas del agua de producción tratada del campo petrolero Castilla la Nueva y el valor límite máximo permisible según la normativa vigente en Colombia	95
<b>Tabla 25.</b> Parámetros fisicoquímicos para el agua de producción y sus valores establecidos como meta de tratamiento	97
<b>Tabla 26.</b> Ficha técnica del tratamiento por ósmosis inversa para agua de producción tratada del campo petrolero Castilla	101
<b>Tabla 27.</b> Pretratamientos para la eliminación de hidrocarburos totales (THC) antes del proceso de ósmosis inversa	103
<b>Tabla 28.</b> Procesos para el tratamiento de agua de rechazo generada como residuo del proceso de ósmosis inversa	105
<b>Tabla 29.</b> Ficha técnica del tratamiento por recompresión mecánica de vapor (MVR) para agua de producción tratada del campo petrolero Castilla	108
<b>Tabla 30.</b> Ficha técnica del tratamiento por electrodiálisis (ED) para agua de producción tratada del campo petrolero Castilla	111
<b>Tabla 31.</b> Ficha técnica del tratamiento por nanofiltración (NF) para agua de producción tratada del campo petrolero Castilla	113
<b>Tabla 32.</b> Escala de referencias en caso de que el parámetro A sea preferible sobre el parámetro B	119
<b>Tabla 33.</b> Escala de referencias en caso de que el parámetro B sea preferible sobre el parámetro A	119
<b>Tabla 34.</b> Matriz de comparaciones pareadas entre los criterios de evaluación (Matriz A)	120
<b>Tabla 35.</b> Matriz moralizada de comparaciones pareadas entre los criterios de evaluación	121
<b>Tabla 36.</b> Criterios de evaluación y su valoración ponderada (Columna de pesos relativos, $\bar{W}$ )	122
<b>Tabla 37.</b> Evaluación de la consistencia del método para la asignación de ponderaciones de cada uno de los criterios	123

<b>Tabla 38.</b> Matriz para la selección de una alternativa	130
<b>Tabla 39.</b> Prioridad de selección para las alternativas de tratamiento	131
<b>Tabla 40.</b> Escala de valoración FODA	135
<b>Tabla 41.</b> Capacidad financiera	135
<b>Tabla 42.</b> Capacidad financiera	136
<b>Tabla 43.</b> Talento humano	136
<b>Tabla 44.</b> Factores económicos	137
<b>Tabla 45.</b> Factores Políticos	137
<b>Tabla 46.</b> Factores sociales	138
<b>Tabla 47.</b> Factore tecnológicos	138
<b>Tabla 48.</b> Factores geográficos	138
<b>Tabla 49.</b> Factores geográficos	139
<b>Tabla 50.</b> Mapa estratégico del proyecto	140
<b>Tabla 51.</b> Costos asociados al proceso al tratamiento de agua de producción empleando la tecnología de ósmosis inversa	149
<b>Tabla 52.</b> Costos asociados al proceso al tratamiento de agua de producción del campo petrolero Castilla la Nueva mediante un proceso de ósmosis inversa	150

## RESUMEN

El presente documento tiene como objetivo proponer un tratamiento para el agua de producción del campo Castilla la nueva, con el fin de cumplir con la normatividad ambiental para su reúso en actividades agrícolas. La metodología se desarrolla en tres etapas: en primer lugar, la caracterización del recurso hídrico para evaluar su uso potencial en la zona de influencia; en segundo lugar, la selección de un tratamiento adecuado; y, por último, se formula un modelo de negocio para el reúso del agua en la industria agrícola.

Con base en los resultados obtenidos, se determinó que la demanda de agua por parte del sector palmicultor en la zona de influencia es superior a la cantidad de agua producida en el campo petrolero, lo que convierte al reúso agrícola en una opción viable para el sector. Asimismo, se identificó que los parámetros de calidad de agua a mejorar son los hidrocarburos totales (THC) y los sólidos disueltos totales (SDT).

Para alcanzar los parámetros mencionados anteriormente, se evaluaron cuatro alternativas: ósmosis inversa (OR), recompresión mecánica de vapor (MVR), electrodiálisis (ED) y nanofiltración. Mediante la metodología de análisis jerárquico, se determinó que la mejor opción, según la opinión de los expertos, es la ósmosis inversa.

Finalmente, mediante un análisis DOFA se establecieron las estrategias del modelo de negocio y posteriormente, a través de la metodología CANVAS, se definió la propuesta de valor, socios clave, actividades clave, recursos clave, segmentos de clientes, relaciones con clientes, canales, estructura de costos y fuentes de ingreso necesarios para el desarrollo del proyecto.

**Palabras Clave:** campo petrolero Castilla la Nueva, agua de producción, reúso, sector palmicultor, alternativa, tratamiento, meta de tratamiento, sólidos disueltos totales (SDT), hidrocarburos totales (THC), modelo de negocio.

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la investigación desempeña un papel crucial en el avance de las disciplinas académicas y en la resolución de problemas prácticos en diversos campos de estudio. En este contexto, el presente proyecto de investigación tiene como finalidad evaluar el tratamiento de aguas de producción generadas en campos petroleros. Se ha observado que esta industria produce una cantidad significativa de agua durante la extracción de hidrocarburos, llegando a generar más de 300 millones de barriles de agua al día a nivel mundial (García, Herrera & Cabarcas, 2017). Esta situación ha despertado un gran interés en el tratamiento de aguas de producción, puesto que representan un desafío para la industria debido a la presencia de contaminantes y compuestos tóxicos que deben ser eliminados antes de su descarga o reutilización.

En particular, el reúso de este tipo de aguas en el sector agrícola ha surgido como una opción prometedora que puede beneficiar tanto a la industria petrolera como a la agricultura, contribuyendo a la protección del ambiente y conservación del recurso hídrico. Es importante destacar que, en la actualidad, las actividades agrícolas utilizan aproximadamente el 70% del agua dulce extraída en el mundo. Además, debido a la evaporación de los cultivos, el uso consuntivo del agua en la agricultura es aún mayor (Banco Mundial, 2022). Esta situación es preocupante considerando la escasez de este recurso vital en muchas regiones del mundo. La disponibilidad de agua es limitada y cada vez más escasa, por lo tanto, es imprescindible buscar alternativas que promuevan su uso eficiente y sostenible, garantizando así su disponibilidad para las generaciones futuras.

En el marco de este proyecto, se propuso una metodología para estudiar el campo petrolero Castilla la Nueva, ubicado en el departamento del Meta, Colombia. En primer lugar, se llevó a cabo la caracterización del recurso hídrico en la zona de influencia, con el objetivo de determinar el potencial de reutilización del agua de producción generada en las actividades económicas de la región. En segundo lugar, se comparó la calidad del agua de producción del campo con los requisitos establecidos por las autoridades para su reúso en el sector agrícola. Como resultado, se identificaron los parámetros que exceden estos límites. Para abordar esta situación, se planteó una alternativa de tratamiento que permite que el agua cumpla las concentraciones establecidas como

meta del proceso. Por último, se realizó una evaluación del modelo de negocio empelando una matriz FODA para definir las estrategias y la metodología CANVAS. Este análisis permitió evaluar la viabilidad y eficiencia de la alternativa seleccionada en términos económicos y operativos.

Se tomó como objeto de estudio el campo petrolero Castilla la Nueva, debido a que se convirtió en el campo con mayor extracción del país durante el primer trimestre de 2020, alcanzando una producción diaria de 116.904 barriles (Ahumada, 2020). Sin embargo, a partir de la presente investigación se espera extender esta iniciativa a otros campos petroleros, así como se propone evaluar la posibilidad de llevar a cabo el diseño de trenes de tratamiento que permitan extender el reúso a otras industrias e incluso en el largo plazo alcanzar los parámetros de la *National Science Foundation* (NSF) que permiten el reúso de este tipo de aguas para el consumo humano.

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1. Objetivo General**

Proponer un tratamiento para agua de producción que cumpla con la normatividad ambiental para el reúso agrícola en el campo petrolero Castilla la Nueva

### **1.2. Objetivos Específicos**

- Caracterizar el recurso hídrico para uso potencial en la zona de influencia
- Seleccionar un tratamiento para el aprovechamiento de las aguas de producción
- Formular un modelo de negocio para el reúso de aguas en sistemas agrícolas

## 2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los problemas de contaminación a nivel mundial tanto en suelos como en agua y aire se atribuyen principalmente a acciones antropogénicas. Entre estas, cabe destacar la extracción de recursos naturales, especialmente de hidrocarburos. Ahora bien, aunque esta industria representa uno de los sectores que ha posibilitado el progreso de la humanidad, es necesario considerar el costo que esto conlleva, pues actividades propias de la industria generan importantes afectaciones al ambiente, especialmente en el agua, recurso natural que sustenta la vida.

Dicho lo anterior, es importante destacar que Colombia no es una excepción. La oferta total de agua en el país es de 2,01 billones de metros cúbicos, de los cuales la industria petrolera tiene concesionados 67,5 millones equivalentes al 0,00336% de la oferta, evidenciando el impacto de esta industria sobre el recurso hídrico del país (SIAC, 2022).

Otro aspecto que debe mencionarse y enfatizarse en Colombia es la relación entre la producción de petróleo y la generación de agua. Según un estudio realizado por Almansa-Manrique et al. (2018), en promedio en el país se producen trece barriles de agua por cada barril de petróleo extraído. Esta agua, conocida como agua de producción, puede ser tratada y reinyectada en la misma formación o vertida en suelos o en cuerpos de agua superficiales. Sin embargo, es preocupante que la opción más común para la disposición de este fluido sea el vertimiento, lo cual representa un riesgo para las fuentes hídricas y suelos, ya que afecta sus propiedades fisicoquímicas.

Ahora que se han expuesto estas dos afectaciones sobre el recurso hídrico en el país ocasionadas por las actividades de producción de petróleo es importante ampliar un poco el conocimiento sobre las empresas que en Colombia se dedican a esta actividad. Para el año 2020, cinco empresas fueron las responsables del 85% de la producción de petróleo, donde sobresale Ecopetrol de acuerdo con el informe de producción fiscalizada de crudo 2020 publicado por la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH), seis de cada diez barriles generados en octubre de ese mismo año fueron aportados por esta empresa. Adicionalmente en el año 2021 de las empresas petroleras que operan en el país, Ecopetrol mantuvo su liderazgo como el mayor operador de hidrocarburos, con una

participación de 60,08% en el total de producción nacional y un aproximado de 442.432 barriles producidos por día (Agencia Nacional de Hidrocarburos, 2021).

Con base a las cifras previas, se ha seleccionado el campo petrolero Castilla La Nueva y su área de influencia como objetivo de este proyecto, pues en el primer trimestre de 2020, este campo se convirtió en el campo petrolero con la mayor extracción del país, con una producción diaria de 116.904 barriles, superando a Rubiales por 4.178 barriles diarios (Ahumada, 2020).

Con relación a Ecopetrol es importante destacar que ha implementado las siguientes medidas para hacer frente a los impactos negativos ocasionados sobre el agua:

En primer lugar, en cuanto al agua requerida para desarrollar las actividades de la cadena de valor de la empresa, para el año 2022 este valor fue de 169,6 millones de metros cúbicos. De este volumen, 131,5 millones de metros cúbicos, equivalentes al 77,5%, provienen de la reutilización de efluentes, y sólo 38,1 millones de metros cúbicos, equivalentes al 22,5% fue aceptado de fuentes naturales y/o comprado a acueductos. Este hecho demuestra un gran avance frente al porcentaje de reutilización de agua requerida para operar que ha venido aumentando anualmente pasando de 56% en 2017 a 77,5% en 2022, lo cual ha permitido una reducción sostenida en las captaciones de agua fresca en los últimos años (Ecopetrol, 2022).

En segundo lugar, en cuanto, a la reutilización y disposición del agua de producción el panorama no es igual de alentador, debido a que el porcentaje de reutilización de aguas de producción de Ecopetrol para el 2022 fue de 27%, que aunque es equivalente a 3 puntos porcentuales por encima respecto a 2021 (Ecopetrol, 2022) no es suficiente; ya que el 73% restante es tratada y vertida en cuerpos de aguas superficiales o en el suelo impactando de forma negativa tanto el medio biótico como abiótico, debido a que su acumulación en grandes cantidades ocasiona pérdida de vegetación natural, alteración de las características microbiológicas del agua, alteración de las condiciones de cuerpos de agua lóticos y lénticos que afectan la fauna acuática, alteración de la calidad fisicoquímica del agua, entre otras (Vargas, 2020).

Lo anterior evidencia la necesidad de plantear alternativas para el reúso de las aguas de producción generadas en la extracción de petróleo. Por tanto, en este documento se presenta una tecnología de



tratamiento que permite el reúso de las agua de producción en el sector agrícola dado que por otro lado, este es el sector en el país con la más alta demanda de agua equivalente a 16.760,3 millones de metros cúbicos (IDEAM, 2022), disminuyendo el impacto en el medio ambiente por el vertimiento de las mismas, y a su vez al emplear estas aguas luego de ser tratadas en las actividades desarrolladas en el sector agricultor, reduce la demanda de agua de fuentes naturales y/o acueductos protegiendo este recurso natural que es sustento para la vida. Adicionalmente, podrían existir ganancias emergentes como la generación de empleo, beneficios tributarios, aceptación de las industrias desde el punto social, entre otras. El proyecto está afín con los objetivos de agua limpia y saneamiento, cuando se habla del tema de aguas residuales y su tratamiento.

### 3. MARCO TEÓRICO

El agua en la industria del petróleo es uno de los recursos naturales que más se usa, por lo tanto, su manejo influye en los costos de operación, el impacto ambiental y la producción de crudo. En Colombia la industria petrolera usa y/o genera agua en las fases de exploración, explotación, transporte y refinación, siendo la etapa de explotación la de mayor consumo, aportando un 91,72% del gasto total (Mesa et al., 2018). La etapa de explotación arranca con la adecuación de superficies para la instalación de facilidades de producción, vías de acceso, estaciones de separación y bombeo (Zamora & Ramos, 2010).

En Estados Unidos, el volumen de agua asociado a la producción de crudo puede tener una relación de 10 barriles por cada barril de petróleo que se obtiene del yacimiento lo que ocasiona la búsqueda de alternativas para su manejo tanto en la formación como también en el agua en superficie (Mesa et al., 2018). Sin embargo, a medida que el campo declina, el incremento del volumen de agua producida aumenta y por ende los costos asociados para su tratamiento van a la misma velocidad.

#### 3.1. Aguas Producidas en Colombia

El agua de producción hace referencia a la reportada en superficie proveniente de la producción de pozos de hidrocarburos, desde la zona de interés (agua connata), un acuífero activo adyacente (agua de intrusión) o un proyecto de inyección de agua (agua inyectada) (Ramírez et al., 2019).

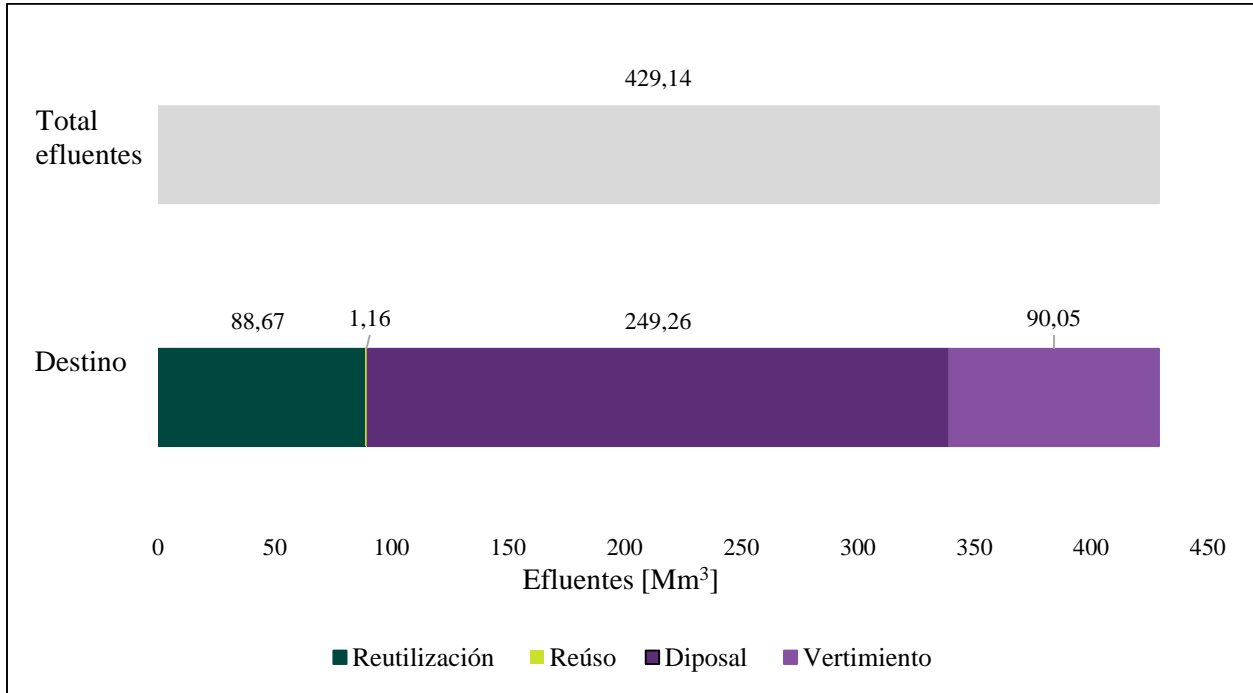
En el año 2012, Pacific Rubiales generó 139,37 Mm<sup>3</sup> (millones de metros cúbicos) de agua producida. En 2013, esta cantidad aumentó a 194,64 Mm<sup>3</sup> y en el año 2014 alcanzó los 275,28 Mm<sup>3</sup> de los cuales aproximadamente el 5% se reutilizó en actividades de completamiento, preparación de concretos, preparación de lodos de perforación, agua para contraincendios y pruebas hidrostáticas (Pacific Rubiales, 2015)

En Colombia, en Ecopetrol S.A, para 2019 se produjeron 429,14 Mm<sup>3</sup> de efluentes (aguas de producción más aguas residuales) de los cuales el 92,8% son aguas de producción y el 7,2% corresponde a aguas industriales del proceso de refinación. Ecopetrol menciona un crecimiento de

las aguas residuales para los años 2016 y 2017 con respecto a los años anteriores, el cual se debe a la recepción del Campo Rubiales como activo. (Ecopetrol, 2020).

**Figura 1**

*Gestión de efluentes por destino Ecopetrol 2019*

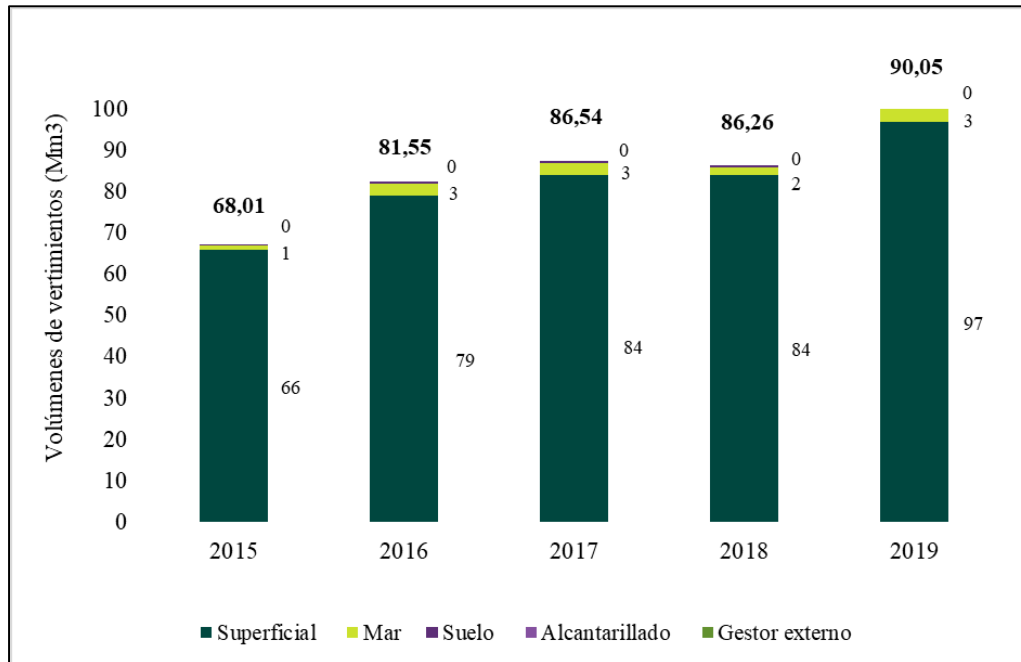


*Nota.* Se caracterizan en millones de metros cúbicos (Mm<sup>3</sup>) el total de efluentes y su reúso. Adaptado de: Reporte integrado de gestión sostenible 2019 (p.323), Ecopetrol, 2020, <https://s.itoeste.com/bGI>

En el año 2019, Ecopetrol utilizó un total de 74 puntos de vertimiento en todo el país, donde se vertieron 90,5 Mm<sup>3</sup>. Estos vertimientos se distribuyeron de la siguiente manera: el 97,02% se realizó sobre agua superficial, el 2,97% en aguas marinas y el restante 0,01% en suelos y alcantarillados. Con relación a la distribución de los vertimientos por segmento, se registró que el 85,2% del agua vertida corresponde al segmento de producción, el 14,7% a refinación y petroquímica, y solo el 0,1% a transporte (Ecopetrol, 2020).

**Figura 2**

*Histórico de volúmenes de vertimientos por tipo de receptor Ecopetrol 2019*



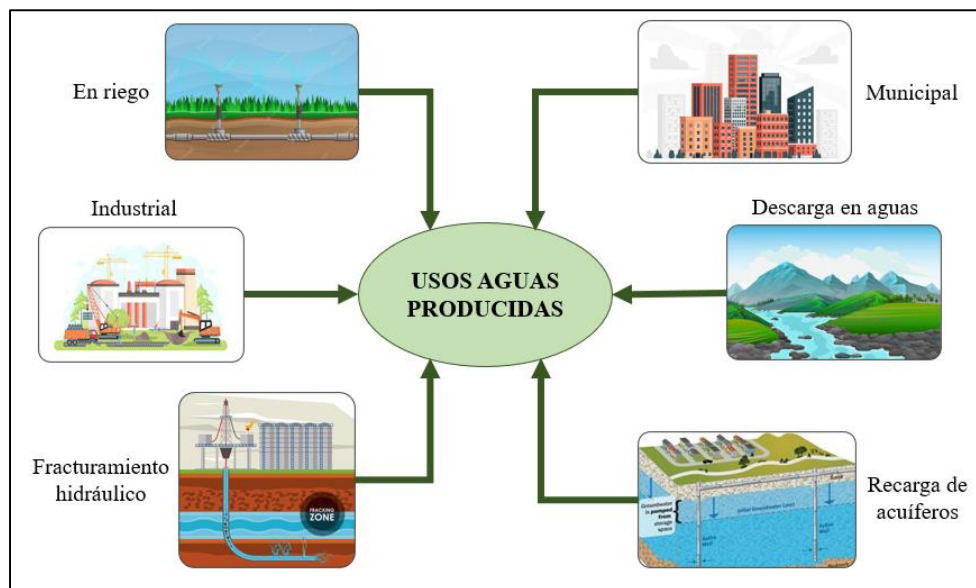
*Nota.* Se evidencia el crecimiento de las aguas producidas en millones de metros cúbicos (Mm<sup>3</sup>) y la distribución por vertimiento. Adaptado de: Reporte integrado de gestión sostenible 2019 (p.325), Ecopetrol, 2020, <https://s.itoeste.com/bGI>

### 3.2. Alternativas de Reúso de Aguas de Producción

En la industria energética se han planteado diversas opciones para el reúso de aguas de producción, tal como se muestra en la figura 3. Aproximadamente la mitad de los volúmenes son reinyectados a la formación, lo cual resulta en costos más bajos en comparación con el reúso fuera del sector energético (Scanlon et al., 2020). Por consiguiente, surge la pregunta en la industria sobre la viabilidad de la disposición subterránea para estos volúmenes (Scanlon et al., 2020). Además, existe una creciente preocupación acerca de que la inyección en pozos profundos pueda ser responsable del aumento en las tasas de actividad sísmica (Folger & Tiemann, 2016), así como de los impactos negativos en la calidad de las aguas superficiales adyacentes y las comunidades microbianas en los sedimentos aguas abajo (Akob et al., 2016). En consecuencia, es necesario buscar otras alternativas que sean sostenibles tanto para la industria como para el ambiente.

**Figura 3**

*Uso benéfico del agua producido dentro del sector energético*



**Nota.** Se identifican los posibles usos de agua producida como son riego, municipal, industrial, pecuario, descarga de aguas superficiales (estanques de evaporación, descarga de arroyos) y recarga de aguas subterráneas. Adaptado de: *¿Will water issues Constrain Oil and Gas production in the United States?*, Scanlon et al., 2020, <https://dx.doi.org/10.1021/acs.est.9b06390>

Si el agua residual se gestiona como recurso hídrico, podría soportar la demanda de la región y, al mismo tiempo, reducir los volúmenes de vertimiento, así como disminuir los posibles impactos al medio ambiente y los costos de operación del sector petrolero (Ma et al., 2018).

Por otra parte, el segundo sector económico de la región es la agricultura, más específicamente el cultivo de palma de aceite, donde Colombia es el cuarto productor, con un 2% de la producción mundial (Potter, 2020). Según la proyección del Gobierno de Uribe con la continuidad de Santos y la expectativa del desarrollo de biocombustibles, se proyecta ser el tercer o segundo productor de palma de aceite a nivel global en los próximos años. Con esto, se impulsaría el sector agrícola de la región y, por ende, su consumo de agua incrementaría a este ritmo (Potter, 2020). Cabe resaltar que este sector se encuentra entre los que más demanda de agua tienen, destacándose la producción de racimos de frutas (Subramaniam et al., 2020), lo cual puede afectar negativamente

el recurso hídrico de la región. Por tanto, es necesario tomar acciones para mejorar la eficiencia del agua o buscar nuevas fuentes para este tipo de industria (Atzori et al., 2019).

Teniendo en cuenta que el cultivo de palma se ha cuadruplicado en la zona de influencia, se considera la posibilidad de utilizar agua de producción tratada para el riego agrícola, lo cual podría resultar beneficioso tanto para la industria agrícola como para la industria petrolera (Potter, 2020). Sin embargo, esto dependerá de varios factores, como la demanda volumétrica de la industria agrícola, la calidad del agua, los requisitos ambientales del sector, el suministro continuo del agua de producción (tiempo de declinación del campo) y el costo del tratamiento.

Ahora bien, es necesario explorar otras opciones expuestas en la Resolución colombiana 1256 del 2021, donde se adoptan disposiciones relacionadas con el uso de aguas residuales tratadas. Entre estas opciones se puede contemplar que el tratamiento pueda ser realizado directamente por el generador, o que estas aguas sean entregadas a un tercero a través de una concesión a un usuario receptor de agua residual tratada, para que este las trate y administre, asumiendo los riesgos en primera instancia sobre cualquier efecto que estas puedan producir al ser reusadas. Es importante aclarar que el generador no cesa su responsabilidad en los posibles efectos que puedan presentarse al ser reutilizadas, como lo menciona la Resolución 1265 del 2021.

### **3.3. Producción en Castilla La Nueva**

Según Ahumada (2020), el campo petrolero Castilla la Nueva en el primer trimestre de 2020 fue el campo con mayor extracción en Colombia, con una producción de 116.904 barriles diarios, superando a Rubiales en 4.178 barriles, debido a que Rubiales tuvo el cierre de al menos 32 pozos por bloqueos de la comunidad, mientras que Castilla la Nueva progresó gracias al constante desarrollo primario de la perforación (120 pozos entre el 2019 y 2020) y el avance en los trabajos de mantenimiento de al menos 85 pozos en el mismo periodo. Debido a lo anterior, la Estatal Colombiana tuvo nuevas facilidades para el tratamiento de agua en Castilla 3, sumándose a la entrada de la planta de inyección PIA EC3 en diciembre del 2019.

El mantener esta producción implicó que el corte de agua fuera cada vez mayor, incrementando el valor económico relacionado a este proceso debido a la inclusión de nuevos equipos, una mayor cantidad de horas-hombre y los costos asociados al tratamiento fisicoquímico, haciendo que el proceso fuera un reto para la compañía (Ahumada, 2020). De este modo, se evidencia la necesidad de buscar una alternativa técnico-económica que permita el equilibrio sostenible del negocio. Otro punto relevante es la capacidad operativa del centro de facilidades de producción (separación de crudo), la cual podría verse atenuada o disminuida por no tener la capacidad de tratamiento de aguas producidas, lo que derivaría en el cierre parcial o momentáneo de pozos productores, disminuyendo la producción de crudo y generando una afectación económica.

Según Ortega (2019), las aguas producidas tienen trazas de grasas y aceites, así como metales pesados como cadmio, plomo, estroncio, cromo y mercurio. Además, se encuentran gases disueltos como oxígeno, cloro, ácido sulfhídrico y sales como sulfatos, carbonatos y bicarbonato. También se identificó la presencia de microorganismos, como bacterias sulfato reductoras, que pueden tener un impacto negativo en los cuerpos de agua si se descargan al ambiente.

Por otro lado, en Castilla La Nueva, Ecopetrol ha conseguido, a través de Agrosavia (anteriormente conocida como Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria), demostrar que las aguas de producción son aptas para actividades agrícolas, pecuarias y el riego de cultivos de porte forestal. Logrando en su Área de Sostenibilidad Agroenergética (ASA), el reúso de 1,2 Mm<sup>3</sup> de agua producida y picos de consumo de hasta 10.900 m<sup>3</sup>/ día (Ecopetrol, 2020).

Con el fin de analizar detalladamente las aguas de producción y evaluar un aporte a la comunidad presente en las zonas de perforación, Ecopetrol estableció una alianza estratégica con la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica). Esta alianza tenía como objetivo investigar y monitorear el efecto de las aguas tratadas en las especies vegetales y animales. Corpoica llevó a cabo el análisis del agua ya tratada proveniente de los campos de Castilla y Apiay, con el propósito de evaluar la viabilidad para ser reusada en bebederos de ganado y en mini sistemas de riego en cultivos como el sorgo, la caña y algunas especies forestales. Esta iniciativa buscaba dar un valor agregado a los vertimientos del río.

Giovanni Annichiarico, jefe de Producción del Campo Castilla, comenta que el análisis mencionado anteriormente tomo más de tres años de investigación. Durante este tiempo, se realizaron pruebas rigurosas en áreas confinadas, con estudios de laboratorio constantes. Estas pruebas permitieron a Corpoica considerar que las aguas objeto de estudio eran aprovechables para la producción agropecuaria, al verificar la ausencia de hidrocarburos tanto en los cultivos como en el ganado evaluado.

Ecopetrol decidió extender la práctica como un piloto en un terreno real, basándose en los resultados obtenidos durante el período de prueba, donde no se observaron afectaciones en el agua, el suelo, las plantas ni los animales por el consumo de agua de producción. Fue así como, a través de un segundo convenio con Corpoica, se ideó un ambicioso proyecto ambiental denominado Área de Sostenibilidad Agroenergía (ASA). Este utiliza 70.000 de los 800.000 barriles por día de agua asociada a la producción del Campo Castilla para hacer un aprovechamiento agropecuario en la región, en tanto que 650.000 barriles van a vertimiento y 70.000 a reinyección. El proyecto consta de un espacio controlado de 46 hectáreas, que son propiedad de Ecopetrol en la zona rural del municipio de Acacías, donde se llevó a cabo la siembra de especies en 11 parcelas de cultivos aprovechables en la elaboración de biocombustibles y una laguna artificial que sirve de bebedero para vacas y búfalos.

“Lo tradicional era hacer el vertimiento de toda el agua al río, y lo que hacemos ahora es disponer de una parte de esa agua para darle un uso agrícola y pecuario; es decir, hemos mejorado la práctica tradicional de reúso de agua generando un sinnúmero de beneficios ambientales y sociales”. Hoy el proyecto es modelo en el tema de utilización de agua. Es por eso por lo que fue objeto de reconocimientos en la categoría de gerenciamiento de agua de producción cuando fue expuesto durante el encuentro de la Asociación Regional de Empresas de Petróleo y Gas Natural en Latinoamérica y el Caribe (Arpel), realizado en México a finales de 2012. El 23 de enero de 2013 fue presentado a los Ministerio de: Minas, Medio Ambiente y Agricultura, así como a los directores de la Corporación Ambiental Cormacarena y de la Autoridad de Licencias Ambientales, para que sea puesto al servicio del país.



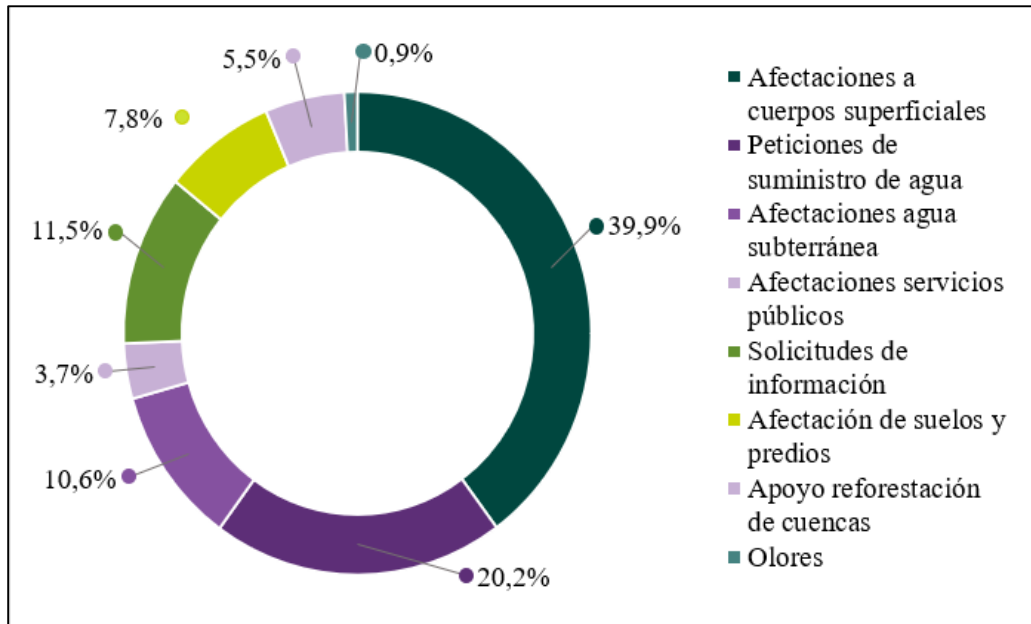
### **3.4. Zona de Influencia y Directrices de Ecopetrol**

Ecopetrol, en sus lineamientos ambientales, busca prevenir, controlar, mitigar y compensar los potenciales impactos ambientales de sus operaciones con el propósito de contribuir a la mejora de la calidad del ambiente donde lleva a cabo sus actividades. Uno de los pilares fundamentales de esta estrategia es la gestión integral del agua. En este contexto, el presente proyecto podría formar parte de dicha directriz, logrando una mejor eficiencia en el uso del recurso, reduciendo los costos operativos, aportando a la disminución de los conflictos asociados al agua y mejorando la credibilidad y relacionamiento con los grupos de interés (Ecopetrol, 2020).

Otro de sus pilares es la Economía Circular, la cual se basa en el uso eficiente de recursos y la creación de nuevos negocios, así como en la gestión del territorio hacia la circularidad. Esto se podría lograr con el reúso de las aguas de producción en otro sector industrial. Sin embargo, a pesar de los esfuerzos de gestión del agua por parte de Ecopetrol, se generaron 218 PQRs (peticiones, quejas y reclamos) relacionados con el recurso hídrico, lo que representa un aumento del 23% en comparación con el año anterior (Ecopetrol, 2020). Este incremento conlleva riesgos reputacionales en las zonas donde opera la empresa y aumenta la posibilidad de conflictos por el uso y manejo del recurso. Por lo tanto, es urgente que Ecopetrol continúe desarrollando alternativas para la gestión del agua en su zona de influencia.

**Figura 4**

*Distribución de PQRs asociadas al recurso hídrico durante el año 2019 en Ecopetrol*



*Nota.* Sobre un total de 289 PQRs se clasifica el tipo de reclamaciones relacionadas con el recurso hídrico recibidas por Ecopetrol a nivel nacional. Adaptado de: Reporte integrado de gestión sostenible 2019 (p.328), Ecopetrol, 2020, <https://s.itoeste.com/bGl>

### 3.5. Marco Legal

La Resolución 1256 del 2021 especifica los sectores y la calidad de agua que deben tener las aguas de reúso. Desde la perspectiva agrícola, existe un plan de desarrollo y crecimiento económico para el sector de palma de aceite y arroz.

Se observa que el recurso del agua se encuentra principalmente definido y orientado por las siguientes directrices, políticas y decretos:

- Constitución política de Colombia
- Política nacional para la gestión integral del recurso hídrico
- Plan hídrico nacional
- Plan nacional de desarrollo (PND)
- Decreto 3930 de 2010 compilado por el Decreto 1076 de 2015, por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9ª de 1979, así como el Capítulo II del Título VI -Parte III-

Libro II del Decreto-ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos y se dictan otras disposiciones

- Decreto 1640 de 2012 por medio del cual se reglamentan los instrumentos para la planificación, ordenación y manejo de las cuencas hidrográficas y acuíferos, y se dictan otras disposiciones.
- Resolución 631 de 2015, establece los parámetros y los valores límites máximos permisibles que deberán cumplir quienes realizan vertimientos puntuales a los cuerpos de agua superficiales y a los sistemas de alcantarillado.
- Decreto 1076 del 2015, el cual incorpora las modificaciones introducidas al Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible

La Constitución Política Colombiana de 1992 en los artículos 8 y 95 menciona la obligación del Estado y de las personas de proteger y preservar los recursos culturales y naturales del país y velar por la conservación de un ambiente sano.

La política nacional para la gestión integral del recurso hídrico tiene como objetivo:

Garantizar la sostenibilidad del recurso, mediante una gestión y un uso eficiente y eficaz, articulados al ordenamiento y uso del territorio y a la conservación de los ecosistemas que regulan la oferta hídrica, considerando el agua como factor de desarrollo económico y de bienestar social, e implementando procesos de participación equitativa e incluyente. (Minambiente, 2023)

Dicha política tiene un horizonte de 12 años (2010-2022) y para su desarrollo se establecieron ocho principios y seis objetivos específicos los cuales tienen definidas estrategias, directrices o líneas de acción, donde todas las partes interesadas tienen roles y responsabilidades en la gestión integral del recurso hídrico (Minambiente, 2010).

El Plan Hídrico Nacional incluye los programas, proyectos y actividades que desarrollan la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico – PNGIRH. La propuesta de contenido y estructura del Plan Hídrico Nacional (PHN) – Fase II ha sido formulada teniendo en cuenta las diferencias y problemáticas propias de cada región del país. Para tal fin, se han utilizado los

resultados obtenidos en los talleres de diagnóstico realizados para la formulación de los Planes Estratégicos en las 5 macrocuencas del país: Magdalena, Cauca, Caribe, Orinoco, Pacífico y Amazonas. Además, se han considerado los análisis estratégicos realizados en la fase III en las macrocuencas Magdalena - Cauca y Caribe (Minambiente, 2021).

Cabe destacar que el PHN no tiene la intención de reemplazar los planes de acción de las autoridades ambientales ni de los entes territoriales en materia de gestión del agua. Su objetivo es priorizar los programas que el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible está interesado en impulsar a nivel nacional. Esto se hace de tal forma que las autoridades ambientales y entes territoriales no pierdan autonomía en la planificación de sus inversiones y, al mismo tiempo, contribuyan al logro de los objetivos de la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico (Minambiente, 2021).

Finalmente, El Plan Nacional de Desarrollo (2018–2022) ha definido pactos transversales, entre los cuales se encuentra el de sostenibilidad. Este pacto busca consolidar acciones que permitan un equilibrio entre la conservación y la producción, de manera que la riqueza natural del país sea apropiada como un activo estratégico de la nación. Entre sus objetivos se plantea la implementación de la estrategia nacional de economía circular para aumentar el reciclaje de residuos y el reúso del agua (Departamento Nacional de Planeación, 2020).

Como parte de este PND, se encuentra el CONPES 4004 titulado “Economía circular en la gestión de los servicios de agua potable y manejo de aguas residuales”. Este documento tiene como objetivo mejorar las capacidades institucionales y de gobernanza, implementar un modelo de economía circular y desarrollar mecanismos de gestión de la información en la prestación de los servicios de agua potable y manejo de aguas residuales. Su propósito es garantizar la disponibilidad de agua a largo plazo, así como la prestación de servicios de agua potable y manejo de aguas residuales en condiciones de calidad y continuidad (Departamento Nacional de Planeación, 2020).

## 4. METODOLOGÍA

La metodología utilizada en este proyecto de investigación fue mixta, combinando enfoques cualitativos y cuantitativos para obtener una comprensión completa y holística de la situación en estudio.

En cuanto al enfoque cuantitativo, se emplearon fuentes de información secundaria. Inicialmente, se identificaron bases de datos académicas, bibliotecas digitales y repositorios en línea que contenían documentos, informes y artículos científicos relacionados con el tema de investigación. En segundo lugar, se establecieron como criterios de selección para garantizar la relevancia y calidad de las fuentes el año de publicación, la reputación de las revistas y la pertinencia del contenido. Finalmente, se recopilaron los documentos, informes y artículos seleccionados organizándolos en categorías relevantes para la investigación.

Para el desarrollo del proyecto, se empleó el método AHP (Proceso de Jerarquía Analítica), utilizado para la toma de decisiones en situaciones complejas. Este método se basa en la descomposición jerárquica de un problema en criterios, así como en la comparación relativa de las alternativas en términos de dichos criterios. En la etapa de construcción de la jerarquía, se utilizó una evaluación cualitativa para determinar las relaciones de importancia y preferencia entre los criterios y las alternativas. Mientras que, luego de establecida esta jerarquía, se realizó una evaluación cuantitativa utilizando escalas numéricas para comparar y ponderar los elementos de la misma. Cabe mencionar que se habla del método AHP de manera general, sin embargo, en la sección 3.2.3.1. de este capítulo se profundiza en dicho método.

A continuación, se describe la metodología empleada por objetivo en cada una de las fases de esta investigación:

### **4.1. Caracterizar el recurso hídrico para uso potencial en la zona de influencia**

#### ***4.1.1. Definición del Área de Influencia***

Se identificó el área de influencia del proyecto mediante la información obtenida de los permisos de vertimiento al río Guayuriba y del reporte de análisis regional de la subzona hídrica de los ríos Metica, Guatiquía, Guayuriba y Negro. Esta información se logró a partir de fuentes secundarias como documentos públicos de corporaciones ambientales, alcaldías y ministerios.

#### ***4.1.2. Identificación del Índice de uso del Agua***

Este índice se identificó con el fin de conocer el índice de vulnerabilidad, calidad y escasez del agua del río afectado tanto por la industria agrícola como por la industria de extracción de petróleo. Para obtener esta información, se utilizaron fuentes secundarias como: documentos públicos de las corporaciones ambientales, alcaldías y ministerios.

El IUA (Índice de Uso de Agua) se empleó para medir la cantidad de agua utilizada por los diferentes sectores en un período determinado (anual o mensual), tomando en cuenta la unidad espacial de la subzona hidrográfica y las cuencas abastecedoras de los acueductos, en relación con la oferta hídrica superficial disponible. También se utilizó el IVH (Índice de Vulnerabilidad Hídrica) y el IACAL (Índice de Alteración Potencial de la Calidad del Agua) para evaluar la problemática en las cuencas afectadas y determinar las tasas retributivas correspondientes.

La información mencionada anteriormente fue recopilada a través de motores de búsqueda como Elsevier y Google Académico, así como de entidades estatales, documentos corporativos y el repositorio de la Universidad América y sus convenios.

#### ***4.1.3. Revisión de la Huella Hídrica de los Cultivos de Arroz y Palma de Aceite en la Cuenca del río***

Se identificó el consumo de agua en los cultivos predominantes de la cuenca del río Guayuriba con el objetivo de evaluar la viabilidad de utilizar agua industrial en ellos. La información mencionada anteriormente se obtuvo mediante la búsqueda en motores como Elsevier, Google Académico, así como a través de entidades estatales, documentos corporativos, el repositorio de la Universidad América y sus convenios.

En resumen, utilizando la información recopilada, se analizó el impacto de las industrias circundantes en el recurso hídrico y se determinó la época del año en la que el uso de agua de producción es más factible.

## **4.2. Seleccionar Un Tratamiento Para el Aprovechamiento de las Aguas de Producción**

### ***4.2.1. Cálculo de volúmenes de agua a tratar y su caracterización***

Para determinar las alternativas de tratamiento de las aguas de producción, el primer paso consistió en conocer los volúmenes y características de dichas aguas. Estos datos se obtuvieron a través de la entidad ambiental Cormacarena, así como de informes técnicos que contenían la caracterización fisicoquímica, microbiológica, hidrobiológica y toxicológica de las aguas residuales industriales tratadas. Específicamente, se hizo referencia a los informes correspondientes al cuarto trimestre de diciembre de 2021, que abarcan tanto la Estación Acacias como el cuerpo receptor de vertimiento, el Río Guayuriba.

### ***4.2.2. Requerimientos Legales Para Las Aguas de Reúso***

Con la información recopilada y obtenida al realizar las actividades mencionadas en la sección 3.1 de este capítulo, se determinó la fuente del agua de producción a tratar. El siguiente paso consistió en identificar los parámetros fisicoquímicos a los cuales se desea llevar esta agua. Para ello, se utilizaron motores de búsqueda como Google Académico y se realizaron consultas con la entidad ambiental correspondiente.

### ***4.2.3. Investigación y selección del método de tratamiento***

Teniendo en cuenta la caracterización del agua de alimentación, incluyendo la salinidad, los constituyentes orgánicos e inorgánicos, y los criterios exigidos por la ley para el reúso de agua (Scanlon et al., 2020), se identificaron las tecnologías de tratamiento de agua residual. Para ello, se utilizaron motores de búsqueda como Google Académico, el repositorio de la Universidad

Nacional, ScienceDirect, Elsevier, así como las bases de datos de la Universidad América y la Universidad Industrial de Santander, entre otros.

Para seleccionar el sistema de tratamiento adecuado, fue necesario considerar otras variables, como las preocupaciones ambientales del consumidor, los desafíos de construcción, las limitaciones operativas y la viabilidad económica. Con este fin, se utilizó un sistema de soporte de decisiones que permitió elegir una solución consciente, que se enfoca directamente en el problema específico del agua de producción en cuestión (Hamouda et al., 2009).

Existen más de 20 factores a tener en cuenta al seleccionar un tratamiento, pero comúnmente los principales son la eficiencia en la eliminación de contaminantes y el costo de capital, ya que muchos de los factores no técnicos no son cuantificables. En términos generales, se tienen tres enfoques para elegir las alternativas de tratamiento: el diseño técnico, el análisis técnico-económico y el análisis del sistema (Hamouda et al., 2009). Para el desarrollo de este proyecto, se seleccionó el enfoque técnico-económico, debido a que permite evaluar las alternativas de tratamiento de manera integral, considerando tanto aspectos técnicos como los económicos lo que garantiza una toma de decisiones informada y equilibrada.

Las soluciones de tratamiento pueden ser diversas, por lo tanto, fue necesario seleccionar la opción que podría satisfacer al menos la mayoría de los objetivos propuestos sin descartar los demás (Van Der Vleuten-Balkema & Preisig, 2004). Para realizar este análisis de decisión multicriterio, se utilizó la metodología AHP (Proceso de jerarquía analítica).

El método AHP se fundamenta en la utilización de jerarquías de variables o criterios para alcanzar el objetivo deseado. En este estudio, se llevó a cabo una comparación entre los sistemas alternativos de forma paritaria, considerando todos los criterios seleccionados. Se asignaron valores numéricos del 1 al 9 utilizando una escala de juicio comparativo. Para cada criterio, se construyó una matriz de decisión, que posteriormente se combinó mediante normalización y cálculo de la media geométrica (Ellis & Tang, 1991).



En esta evaluación, participaron técnicos expertos en el tratamiento de agua de empresas, quienes cumplen con el siguiente perfil: Profesional en ingeniería química o ingeniería de petróleos, con más de 30 años de experiencia específica en el sector petrolero y en el tratamiento de aguas industriales, 40 años de experiencia general, con conocimientos específicos en programas de potabilización y clarificación de aguas residuales e industriales, aguas de producción generadas en campos petroleros, tecnologías de tratamiento de aguas industriales, diseño de equipos de tratamiento de agua y revisión de procesos para el tratamiento de aguas industriales.

- ***Metodología Proceso de Análisis Jerárquico (AHP)***

Esta técnica para la resolución de problemas multicriterio, aplicada a la dominación de la influencia entre alternativas respecto a atributo, incluye tres etapas en su formulación: (I) modelización; (II) valoración y, (III) priorización y síntesis (Saaty, 1980). En la primera etapa (modelización), se construyó un modelo o estructura en la que están representados todos los criterios considerados relevantes en el proceso de selección para la alternativa de tratamiento. La valoración ponderada de los criterios o jerarquía resultante es completa, representativa (incluye todos los aspectos relevantes), no redundante y minimal (no incluye aspectos irrelevantes).

En la segunda etapa (valoración) se incorporaron las evaluaciones y consideraciones de los expertos mediante la aplicación de las matrices de comparaciones pareadas por criterio. Estas matrices cuadradas  $A=(a_{ij})$  reflejan la dominación relativa de una alternativa frente a otra respecto a un criterio de selección en particular,  $a_{ij}$  representa la dominación de la alternativa  $i$  sobre la  $j$ . En la tercera etapa (priorización y síntesis) se establecieron las diferentes prioridades consideradas en la resolución del problema, cabe aclarar que se entiende como prioridad una unidad abstracta válida para cualquier escala en la que se integran las preferencias que el individuo tuvo al comparar las alternativas.

Finalmente, para evaluar la consistencia del método se calculó la consistencia (RC), un índice no estadístico que está definido como el cociente entre el índice de consistencia (IC) y el índice de consistencia aleatorio (ICA). Es relevante mencionar que el proceso de análisis jerárquico (AHP) es una de las técnicas multicriterio con mayor implantación práctica en la toma de decisiones,

gracias a su facilidad de uso y la posibilidad de aplicarla en decisión individual o en grupo (Moreno, 2002).

### **4.3 Formulación un Modelo de Negocio Para el Reúso de Aguas En Sistemas Agrícolas**

#### ***4.3.1 Cálculo de volúmenes de agua a tratar y su caracterización***

Para determinar las alternativas de tratamiento de las aguas de producción, el primer paso consistió en conocer los volúmenes y características de dichas aguas. Estos datos se obtuvieron a través de la entidad ambiental Cormacarena, así como de informes técnicos que contenían la caracterización fisicoquímica, microbiológica, hidrobiológica y toxicológica de las aguas residuales industriales tratadas. Específicamente, se hizo referencia a los informes correspondientes al cuarto trimestre de diciembre de 2021, que abarcan tanto la Estación Acacias como el cuerpo receptor de vertimiento, el Río Guayuriba.

#### ***4.3.2 Requerimientos Legales Para Las Aguas de Reúso***

Con la información recopilada y obtenida al realizar las actividades mencionadas en la sección 3.1 de este capítulo, se determinó la fuente del agua de producción a tratar. El siguiente paso consistió en identificar los parámetros fisicoquímicos a los cuales se desea llevar esta agua. Para ello, se utilizaron motores de búsqueda como Google Académico y se realizaron consultas con la entidad ambiental correspondiente.

#### ***4.3.3 Investigación y selección del método de tratamiento***

Teniendo en cuenta la caracterización del agua de alimentación, incluyendo la salinidad, los constituyentes orgánicos e inorgánicos, y los criterios exigidos por la ley para el reúso de agua (Scanlon et al., 2020), se identificaron las tecnologías de tratamiento de agua residual. Para ello, se utilizaron motores de búsqueda como Google Académico, el repositorio de la Universidad Nacional, ScienceDirect, Elsevier, así como las bases de datos de la Universidad América y la Universidad Industrial de Santander, entre otros.

Para seleccionar el sistema de tratamiento adecuado, fue necesario considerar otras variables, como las preocupaciones ambientales del consumidor, los desafíos de construcción, las limitaciones operativas y la viabilidad económica. Con este fin, se utilizó un sistema de soporte de decisiones que permitió elegir una solución consciente, que se enfoca directamente en el problema específico del agua de producción en cuestión (Hamouda et al., 2009).

Existen más de 20 factores a tener en cuenta al seleccionar un tratamiento, pero comúnmente los principales son la eficiencia en la eliminación de contaminantes y el costo de capital, ya que muchos de los factores no técnicos no son cuantificables. En términos generales, se tienen tres enfoques para elegir las alternativas de tratamiento: el diseño técnico, el análisis técnico-económico y el análisis del sistema (Hamouda et al., 2009). Para el desarrollo de este proyecto, se seleccionó el enfoque técnico-económico, debido a que permite evaluar las alternativas de tratamiento de manera integral, considerando tanto aspectos técnicos como los económicos lo que garantiza una toma de decisiones informada y equilibrada.

Las soluciones de tratamiento pueden ser diversas, por lo tanto, fue necesario seleccionar la opción que podría satisfacer al menos la mayoría de los objetivos propuestos sin descartar los demás (Van Der Vleuten-Balkema & Preisig, 2004). Para realizar este análisis de decisión multicriterio, se utilizó la metodología AHP (Proceso de jerarquía analítica).

El método AHP se fundamenta en la utilización de jerarquías de variables o criterios para alcanzar el objetivo deseado. En este estudio, se llevó a cabo una comparación entre los sistemas alternativos de forma paritaria, considerando todos los criterios seleccionados. Se asignaron valores numéricos del 1 al 9 utilizando una escala de juicio comparativo. Para cada criterio, se construyó una matriz de decisión, que posteriormente se combinó mediante normalización y cálculo de la media geométrica (Ellis & Tang, 1991).

En esta evaluación, participaron técnicos expertos en el tratamiento de agua de empresas, quienes cumplen con el siguiente perfil: Profesional en ingeniería química o ingeniería de petróleos, con más de 30 años de experiencia específica en el sector petrolero y en el tratamiento de aguas industriales, 40 años de experiencia general, con conocimientos específicos en programas de

potabilización y clarificación de aguas residuales e industriales, aguas de producción generadas en campos petroleros, tecnologías de tratamiento de aguas industriales, diseño de equipos de tratamiento de agua y revisión de procesos para el tratamiento de aguas industriales.

- **Metodología Proceso de Análisis Jerárquico (AHP)**

Esta técnica para la resolución de problemas multicriterio, aplicada a la dominación de la influencia entre alternativas respecto a atributo, incluye tres etapas en su formulación: (I) modelización; (II) valoración y, (III) priorización y síntesis (Saaty, 1980). En la primera etapa (modelización), se construyó un modelo o estructura en la que están representados todos los criterios considerados relevantes en el proceso de selección para la alternativa de tratamiento. La valoración ponderada de los criterios o jerarquía resultante es completa, representativa (incluye todos los aspectos relevantes), no redundante y minimal (no incluye aspectos irrelevantes).

En la segunda etapa (valoración) se incorporaron las evaluaciones y consideraciones de los expertos mediante la aplicación de las matrices de comparaciones pareadas por criterio. Estas matrices cuadradas  $A=(a_{ij})$  reflejan la dominación relativa de una alternativa frente a otra respecto a un criterio de selección en particular,  $a_{ij}$  representa la dominación de la alternativa  $i$  sobre la  $j$ . En la tercera etapa (priorización y síntesis) se establecieron las diferentes prioridades consideradas en la resolución del problema, cabe aclarar que se entiende como prioridad una unidad abstracta válida para cualquier escala en la que se integran las preferencias que el individuo tuvo al comparar las alternativas.

Finalmente, para evaluar la consistencia del método se calculó la consistencia (RC), un índice no estadístico que está definido como el cociente entre el índice de consistencia (IC) y el índice de consistencia aleatorio (ICA). Es relevante mencionar que el proceso de análisis jerárquico (AHP) es una de las técnicas multicriterio con mayor implantación práctica en la toma de decisiones, gracias a su facilidad de uso y la posibilidad de aplicarla en decisión individual o en grupo (Moreno, 2002).

#### **4.4 Formulación un Modelo de Negocio Para el Reúso de Aguas En Sistemas Agrícolas**

Por último, se definió la estrategia del proyecto a través de un análisis FODA y el modelo de negocio mediante la metodología “Canvas” como una herramienta de respaldo para la aprobación del proyecto siendo una iniciativa de emprendimiento e innovación dentro del negocio. Esta metodología permitió abordar las oportunidades y necesidades del entorno. La información secundaria requerida para ello se obtuvo a través de motores de búsqueda como Google Académico, Elsevier, ASCE/Library, entre otros.

## 5 DISCUSIÓN Y RESULTADOS

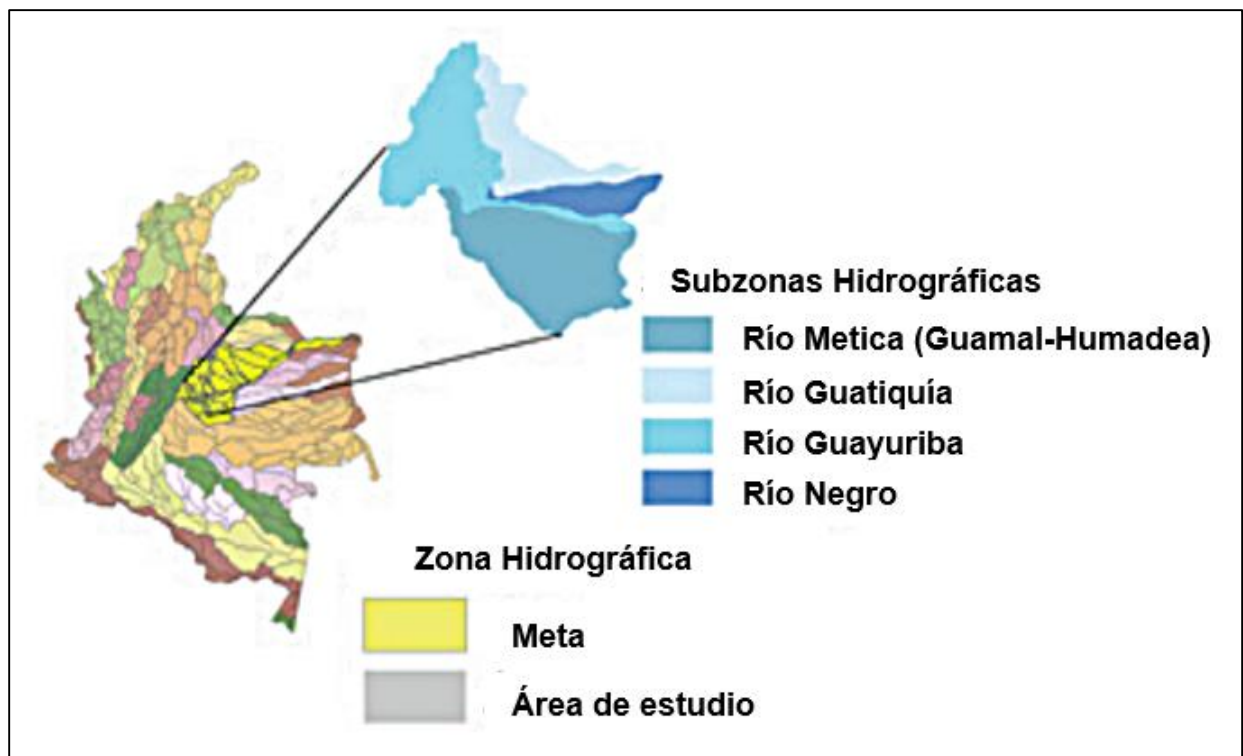
### 5.3 Caracterización Del Recurso Hídrico Para uso Potencial en la Zona de Influencia

#### 5.3.1 Área De Influencia

El área de estudio está vinculada a la zona hidrográfica del Orinoco la cual está conformada por cuatro subzonas hidrográficas: Río Metica (Guamal-Humadea), Río Guatiquía, Río Guayuriba y Río Negro, tal como se muestra en la figura 5.

**Figura 5**

*Distribución de Subzonas Hidrográficas*



*Nota.* Se muestra la ubicación de la zona hidrográfica Orinoco vinculada al área de estudio. Tomado de: Reporte de Análisis Regional de la SZH de los ríos: Metica, Guatiquía, Guayuriba y Negro (SZH-MGGN) (p. 30), ANLA, 2021, <https://www.anla.gov.co/documentos/biblioteca/21-09-2021-reporte-de-analisis-regional-rio-negro-6.pdf>

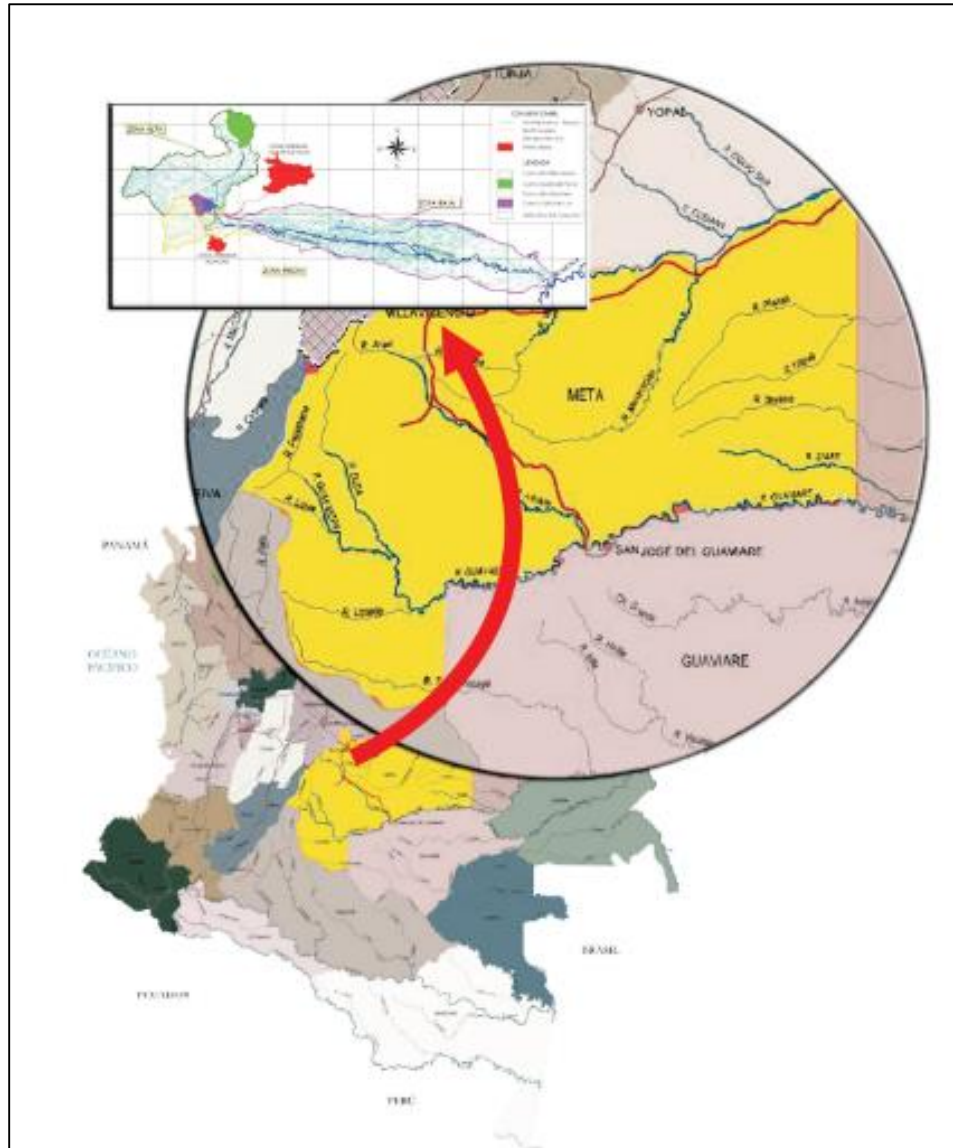
La zona de influencia del proyecto se encuentra en el río Guayuriba y sus alrededores, ubicado en la zona oriental de Colombia, en el departamento del Meta. Esta zona abarca un área de 1.132,5 Km<sup>2</sup> (figura 6), extendiéndose a través de varios municipios principales, incluyendo Villavicencio con una superficie de 491,8 Km<sup>2</sup>, Acacias con 438,1 Km<sup>2</sup>, San Carlos de Guaroa con 160,7 Km<sup>2</sup> y Puerto López con 42 Km<sup>2</sup>. Debido a su extensión, atraviesa 50 veredas y forma parte de la cuenca del río Blanco-Negro-Guayuriba, la cual es tributaria al río Metica (Cormacarena & Ecopetrol, 2010).

Su ubicación es de importancia nacional debido a su proximidad con dos destacados parques nacionales naturales: el Parque Nacional Natural Sumapaz, considerado el páramo más grande del mundo, y el Parque Nacional Natural Chingaza. Además, limita al norte con Villavicencio, al sur con Acacias y San Carlos de Guaroa, al oriente con Puerto López, y al occidente con Cundinamarca representando aproximadamente el 30,83% del área geográfica de la gran cuenca del río Orinoco (Gómez Ortiz, 2016).

Esta zona se destaca por su riqueza agrícola y diversidad ecosistémica, resultado de su variación altitudinal. La altura máxima oscila entre 4.000 y 3.650 msnm en las áreas del páramo de Bogotá, mientras que la altura mínima se encuentra entre 200 y 175 msnm en los llanos orientales. Aproximadamente el 38% de estas zonas está cubierto por bosques y áreas seminaturales; estos ecosistemas abastecen de agua a las zonas adyacentes, satisfaciendo necesidades domésticas e industriales, incluyendo la minería y el cultivo extensivo de arroz y palma de aceite, siendo esta última actividad la que representa el mayor uso del recurso hídrico. Por otra parte, se estima que el río Guayuriba transporta anualmente un promedio de 16.806.000 toneladas de sedimentos en suspensión a causa de la fácil extracción de material como cantos rodados, gravas y arenas (Cormacarena & Ecopetrol, 2010).

## Figura 6

### Macro localización cuenca hidrográfica del río Guayuriba



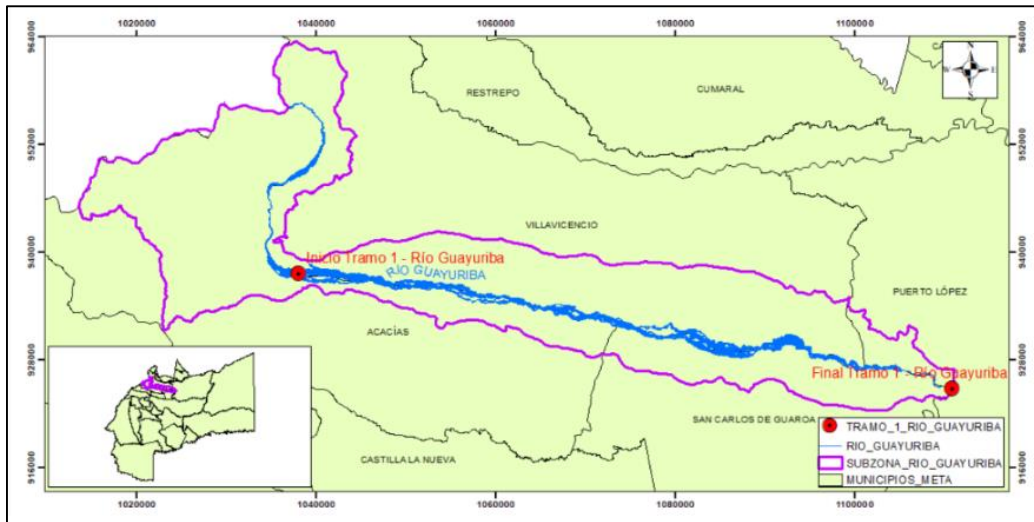
*Nota.* Se muestra el mapa del departamento del Meta y la ubicación del río Guayuriba. Tomado de: Plan de ordenamiento y manejo de la cuenca Hidrográfica del Río Guayuriba – Resumen ejecutivo 2010 (p. 9), Cormacarena & Ecopetrol, 2010.

Como se puede evidenciar en la figura 7, la zona objetivo está relacionada con el tramo 1 del río Guayuriba, el cual desemboca en el río Metica. Debido a actividades antrópicas, esta zona ha experimentado cambios en su territorio, resultando en pérdidas de superficies de agua.



**Figura 7**

*Localización Geográfica del afluente Tramo 1 – Río Guayuriba*



*Nota.* Se especifica el punto de inicio y fin del Tramo 1 – Río Guayuriba. Tomado de: Estado de la calidad de agua y determinación de la línea base del Tramo 1 – Río Guayuriba (p. 6), Cormacarena, (2021).

Los usuarios del tramo 1 del río Guayuriba, identificados en figura 8: Estación Acacias, Estación Suria, Aceites el Morichal S.A.S., Poblado Palmeras EDESA S.A., presentan vertimientos relacionados con sus actividades agroindustriales. Muchos de estos usuarios también aprovechan el recurso hídrico para otros fines, como el riego agrícola, pecuario y recreativo. El índice de calidad del río es excelente asociada a los vertimientos de agua residual industrial de la actividad petrolera, lo cual favorece la continuidad de su uso en cultivos aguas abajo y reduce la necesidad de obtener este recurso a través del río.

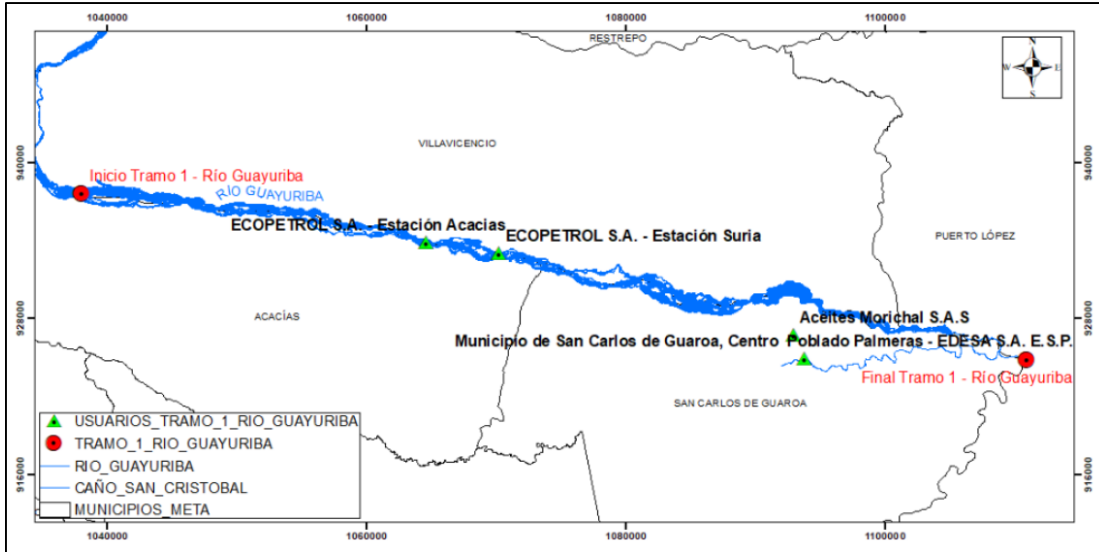
El tramo 1 es utilizado por Aceites Morichal, ubicado en el municipio de Acacias, seguido por los vertimientos de la estación Acacias y Suria, esta última ubicada en el municipio de Villavicencio. Por último, se encuentra el vertimiento del centro poblado palmeras EDESA S.A E.S.P., el cual está ubicado en San Carlos de Guaroa (CORMACARENA, 2021).

La industria petrolera descarga en el río Guayuriba aguas asociadas a la producción de hidrocarburos: de la Estación de Recolección Acacias (850.000 barriles/día) y de la Estación de recolección Suria (104.000 barriles/día). Estos vertimientos incrementan el caudal del río en las partes media y baja. Cabe destacar que dichos vertimientos fueron autorizados y son monitoreados

por Cormacarena, la autoridad ambiental encargada del río Guayuriba (Ajiaco-Martínez et al., 2015).

### Figura 8

Localización de usuarios en el Tramo 1 – Río Guayuriba



*Nota.* Usuarios del Tramo 1 - Río Guayuriba y su localización. Tomado de: Estado de la calidad de agua y determinación de la línea base del Tramo 1 – Río Guayuriba (p. 7), Cormacarena, (2021).

El río Guayuriba en el Tramo 1, pasa por los municipios descritos en la tabla 1 (Acacias, Castilla la Nueva, Puerto López, San Carlos de Guaroa y Villavicencio), los cuales serán incluidos en el área de estudio:

**Tabla 1***Propiedades de los municipios involucrados en el área de estudio*

<b>Municipio</b>	<b>Temperatura [°C]</b>	<b>Población [Hab]</b>	<b>Área Total [Km<sup>2</sup>]</b>	<b>Altura [m.s.n.m]</b>
Acacias	24	78.802	1.169	498
Castilla la Nueva	26	14.300	507,08	400
Puerto López	26	30.399	6.573	184
San Carlos de Guaroa	30	12.400	811	350
Villavicencio	27	452.472	1.382	467

*Nota.* Adaptado de: Plan Decenal de Educación Ambiental - Meta 2021 – 2031, Cormacarena, (2021).

### **5.3.2 Zona Objetivo**

Con base en la Resolución 2-6-07.0904 de 2007, se otorgó a la empresa colombiana de petróleos "ECOPETROL" el permiso de aprovechamiento forestal, ocupación de cauce y vertimiento de aguas residuales industriales. En esta resolución se estableció un vertimiento diario de 850.000 barriles de agua de producción tratada. Este vertimiento se lleva a cabo a través de un ducto que tiene una longitud aproximada de 22,88 km y se encuentra ubicado a 20 km de la cabecera oriental del municipio de Acacias, llegando hasta el río Guayuriba.

### **5.3.3 Actividades Productivas En La Cuenca**

El uso del agua en la agricultura tiene una relevancia importante sobre el recurso hídrico y la seguridad alimentaria. En promedio, la agricultura ocupa el 70% del agua que se extrae del mundo. Más de 330 millones de hectáreas cuentan con instalaciones de riego, lo que representa el 20% del total de la superficie cultivada y aporta un 40% de la producción total de alimentos a nivel mundial (Grupo Banco Mundial, 2017).

El agua utilizada para fines agrícolas desempeña una función fundamental en la seguridad alimentaria, especialmente considerando que se proyecta que la población mundial alcance los 10.000 millones de habitantes para el año 2050. Teniendo en cuenta esta proyección para satisfacer

las necesidades básicas de alimentos se estima que la producción agrícola deberá crecer en un 70%, teniendo como consecuencia un incremento en el consumo de calorías y alimentos más complejos (Grupo Banco Mundial, 2017). La agricultura de riego, en promedio, es dos veces más productiva por unidad de tierra y actúa como un amortiguador frente a la variabilidad climática, permitiendo una diversificación de los cultivos de manera más segura (Grupo Banco Mundial, 2017).

Según el Estudio Nacional de Agua (ENA), Colombia entre el 2012 y 2016 registró un incremento del 5% en la demanda total de agua la cual ascendió a 37.308 Mm<sup>3</sup>. Del total de agua necesaria para satisfacer las necesidades hídricas de la agricultura, el 90% proviene de aguas lluvias y el 10% de riego, siendo la caña, la palma, plátano y arroz, los cultivos con más demanda de agua (Semana, 2022). Adicionalmente, para el año 2020 se generó un aumento del 6,8% en el sector agropecuario impulsando la economía referente a su PIB (Zea, 2020). En el tramo 1 de estudio se encuentran los tipos de cultivo y hectáreas sembradas descritas en la tabla 2

**Tabla 2***Cultivos presentes en la cuenca del río Guayuriba*

<b>Cultivo</b>	<b>Área [ha]</b>	<b>Área [%]</b>
Cultivos transitorios	458,70	0,14
Arroz	4.603,38	1,44
Maíz	40,73	0,01
Frijol	25,44	0,01
Cebolla	9,07	0,00
Papa	158,08	0,05
Otros cultivos permanentes		
herbáceos	6,57	0,00
Caña	266,87	0,08
Café	5,97	0,00
Otros cultivos permanentes		
arbóreos	79,79	0,02
Palma de aceite	5.972,06	1,86
Cultivos confinados	47,00	0,01
Mosaico de cultivos	61,23	0,02
Mosaico de pastos y cultivos	17.947,90	5,60

*Nota.* Los cultivos cercanos a la cuenca no presentan una amplia extensión, sin embargo, contribuyen a la demanda en aumento del recurso hídrico el cual es obtenido directamente del río Guayuriba. Adaptado de: POMCA Río Guayuriba Actualización Capítulo 13 - Caracterización Flora (p. 12), Corpoguavio, CAR, Cormacarena, Corporinoquia & UTS, (2018).

Rojas (2016) llevó a cabo un análisis espacial multitemporal del cambio en el uso del suelo en el municipio de San Carlos de Guaroa, considerado el principal productor de palma de aceite en la cuenca. Los datos abarcaron el período comprendido entre 1985 y 2016. Según los resultados de este estudio, se determinó que, durante dicho periodo, el 19,38% de los bosques de galería desapareció, con una tasa anual de reducción del 3,22%. Esto implica que aproximadamente 59,53 hectáreas de bosques ribereños fueron transformadas anualmente, principalmente para dar lugar a cultivos de palma de aceite (p. 80).

#### **5.3.4 Cobertura del uso del Suelo**

De acuerdo con el POAM del 2018 del Río Guayuriba, en este mismo año se caracterizaron 10 tipos de cobertura, los cuales a su vez se dividen en 46 clases de cobertura discriminadas hasta el nivel seis de Corine Land Cover. En la tabla 3 se destacan aquellos que son de interés para el presente proyecto.

**Tabla 3**

*Cobertura presente en la cuenca del río Guayuriba*

<b>Cobertura</b>	<b>Área [ha]</b>	<b>Área [%]</b>
Pastos Limpios	68.464,24	21,35
Pastos Arbolados	2.879,44	0,90
Pastos enmalezados	16.666,45	5,20
Bosque denso alto de tierra firme	79.795,13	24,88
Bosque denso bajo de tierra firme	31.536,07	9,83
Bosque abierto alto de tierra firme	10,22	0,00
Bosque abierto bajo de tierra firme	95,78	0,00
Bosque de galería y/o primario	5.232,28	1,63
Plantación de latifoliadas	30,27	0,01
Herbazal denso de tierra firme no arbolado	47.389,54	14,77
Herbazal abierto	124,75	0,04
Herbazal abierto arenoso	1.360,90	0,42
Arbustal denso	15.848,19	4,94
Arbustal abierto mesófilo	1.033,25	0,32
Vegetación secundaria alta	6.510,77	2,03
Vegetación secundaria baja	2.553,49	0,80
Zonas arenosas naturales	2.598,36	0,81
Afloramientos rocos	42,69	0,01
Tierras desnudas y degradadas	643,81	0,20
Estanques para acuicultura continental	11,46	0,00

*Nota.* La cobertura de la vegetación presente en la cuenca tiene la mayor extensión del río Guayuriba. Adaptado de: POMCA Río Guayuriba Actualización Capítulo 13 - Caracterización Flora (p. 13), Corpoguavio, CAR, Cormacarena, Corporinoquia & UTS, (2018).

Ahora bien, como se evidenció anteriormente en la tabla 2, los principales cultivos son la palma de aceite con 5.972,06 hectáreas, el arroz con 4.603,38 hectáreas, la vegetación secundaria alta que corresponde a áreas cubiertas por vegetación con alturas mayores a los 5 metros con 6.510,77

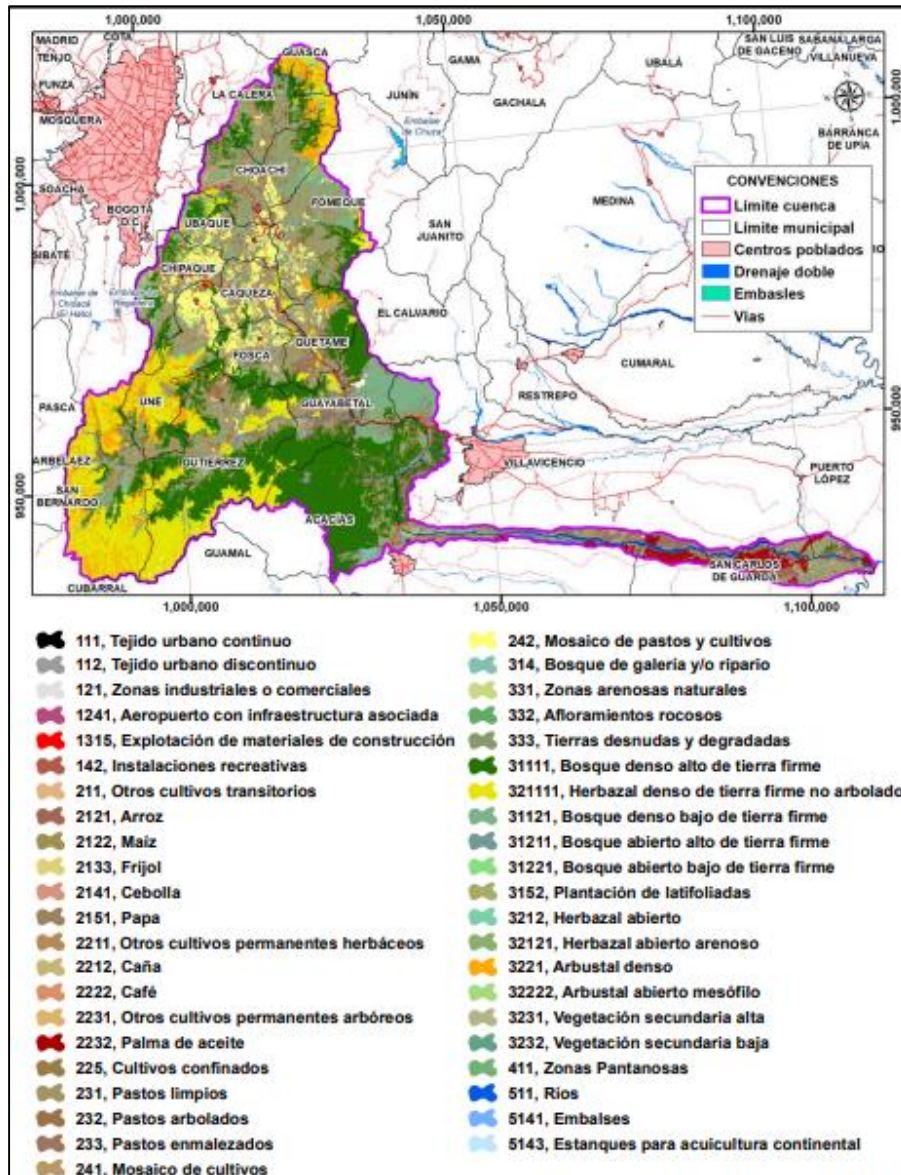
hectáreas y vegetación secundaria baja con 2.553,49 hectáreas. La vegetación secundaria baja hace presencia en la transición entre potreros y bosques densos de alta montaña que permanecen luego de la expansión agrícola, también cercano a las plantaciones de palma de aceite y otro tipo de unidades de cobertura (CAR et al., 2018).

El Arroz es un monocultivo extensivo y se desarrolla bajo las modalidades de secano (80%) y riego (20%). Suele rotar en la época de verano con cultivos de soya, en razón de que esta última actividad agrícola presenta resistencia a la sequía y altas temperaturas. Por otro lado, la Palma Africana es un cultivo altamente tecnificado que requiere grandes cantidades de agua (Cormacarena & Ecopetrol, 2010).

En la Figura 9, se puede observar las zonas de cultivo de palma representadas por el color y las flechas rojas. Asimismo, se evidencian las zonas de cultivo de arroz mediante flechas de color ocre. Estas zonas de cultivo de palma y arroz son las que podrían utilizar las aguas de producción de los campos cercanos.

**Figura 9**

*Ubicación de las unidades de cobertura de la cuenca hidrográfica Rio Guayuriba*



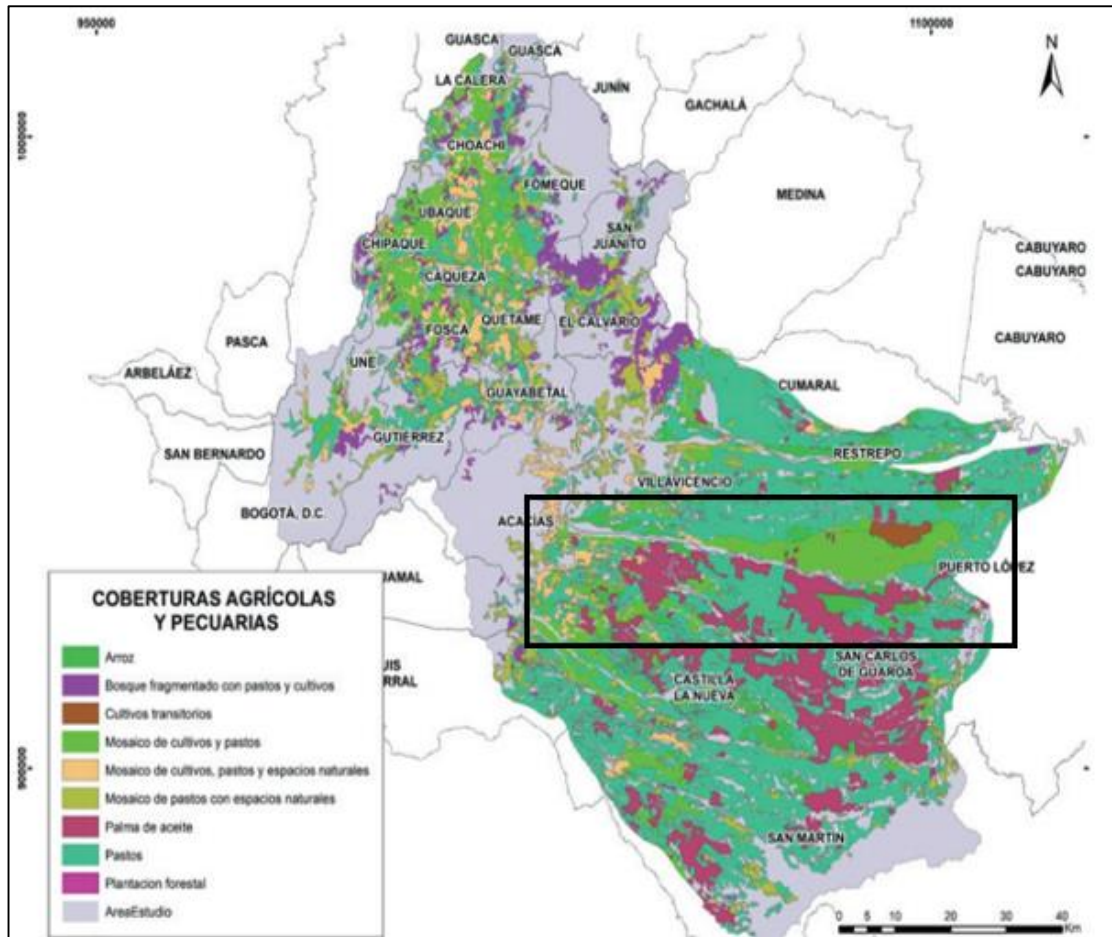
*Nota.* Tomado de: POMCA Río Guayuriba Actualización Capítulo 13 - Caracterización Flora (p. 39), Corpoguavio, CAR, Cormacarena, Corporinoquia & UTS, (2018).

Como se observa en la figura 10, los cultivos de palma de aceite y arroz se encuentran ubicados en las proximidades de las estaciones Castilla 1, 2 y Acacias. Esta cercanía facilita la distribución de las aguas de producción en esta zona, siendo 22 Km la máxima distancia en línea recta entre el cultivo más lejano y el río Guayuriba.



**Figura 10**

*Coberturas Agrícolas y pecuarias*



*Nota.* El recuadro hace referencia a la zona del Río Guayuriba en la cual el tramo 1 presenta en los municipios de castilla, acacias y san Carlos de Guaroa la cobertura más amplia de palma de aceite fuente. Tomado de: Reporte de Análisis Regional de la SZH de los ríos: Metica, Guatiquía, Guayuriba y Negro (SZH-MGGN) (p. 174), ANLA, 2021, <https://www.anla.gov.co/documentos/biblioteca/21-09-2021-reporte-de-analisis-regional-rio-negro-6.pdf>

### 5.3.5 Concesiones de Agua

Son permisos o autorizaciones otorgadas por las autoridades ambientales competentes para el uso y aprovechamiento de recursos hídricos, como ríos, lagos o manantiales, con el fin de garantizar su gestión adecuada y sustentable. Estas concesiones establecen los derechos y obligaciones de los usuarios en relación con el agua, y su objetivo principal es regular y controlar el acceso y la distribución equitativa de este recurso natural escaso.

Las concesiones de agua son necesarias para diversos fines, como abastecimiento en los casos que requieran derivación, riego y silvicultura, abastecimiento de abrevaderos cuando se requiera de derivación, uso industrial, generación térmica o nuclear de electricidad, explotación petrolera, inyección para generación geotérmica, generación hidroeléctrica, generación cinética directa, flotación de madera, transporte de minerales y sustancias tóxicas, agricultura y pesca, recreación y deportes, usos medicinales y otros usos similares (SOSTENIBLE, 2018).

Debido al uso del recurso hídrico en diferentes sectores, como el doméstico, industrial y agrícola, entre otros mencionados anteriormente, las entidades ambientales como CORMACARENA y ANLA (Autoridad Nacional de Licencias Ambientales) evalúan y garantizan su uso adecuado a través de concesiones. Estas concesiones se basan en los puntos de captación autorizados, los cuales se determinan mediante el índice de uso del agua (IUA), el cual permite relacionar la disponibilidad de agua en una subzona hidrográfica con la demanda de los diferentes actores que utilizan las fuentes hídricas del territorio.

En el año 2018, se confirmó que el 44% de las concesiones fueron otorgadas por el ANLA y CORMACARENA, alcanzando un total de 3.483,58 L/s en la zona del río Guayuriba, principalmente para actividades agroindustriales y abastecimiento de acueductos. La concesión más grande fue otorgada al oleoducto Castilla-Apiay, con un volumen de 117,4 L/s, de los cuales 58,71 L/s fueron tomados del río Guayuriba (Castaño & Torres, 2021).

Estas concesiones son evaluadas mediante registros diarios que permiten confirmar el caudal captado. Esto se realiza a través de la instalación de equipos de medición debidamente calibrados, los cuales garantizan la confiabilidad de los valores registrados en el Informe de Cumplimiento Ambiental – ICA.

### **5.3.6 Demanda Potencial del Sector Agrícola**

Hace referencia a la cantidad de agua que se requiere aportar de manera artificial para satisfacer las necesidades de riego de un cultivo. Se determina calculando la evapotranspiración del cultivo ( $ET_C$ ) menos el agua proporcionada por las precipitaciones. Cuando la precipitación efectiva es

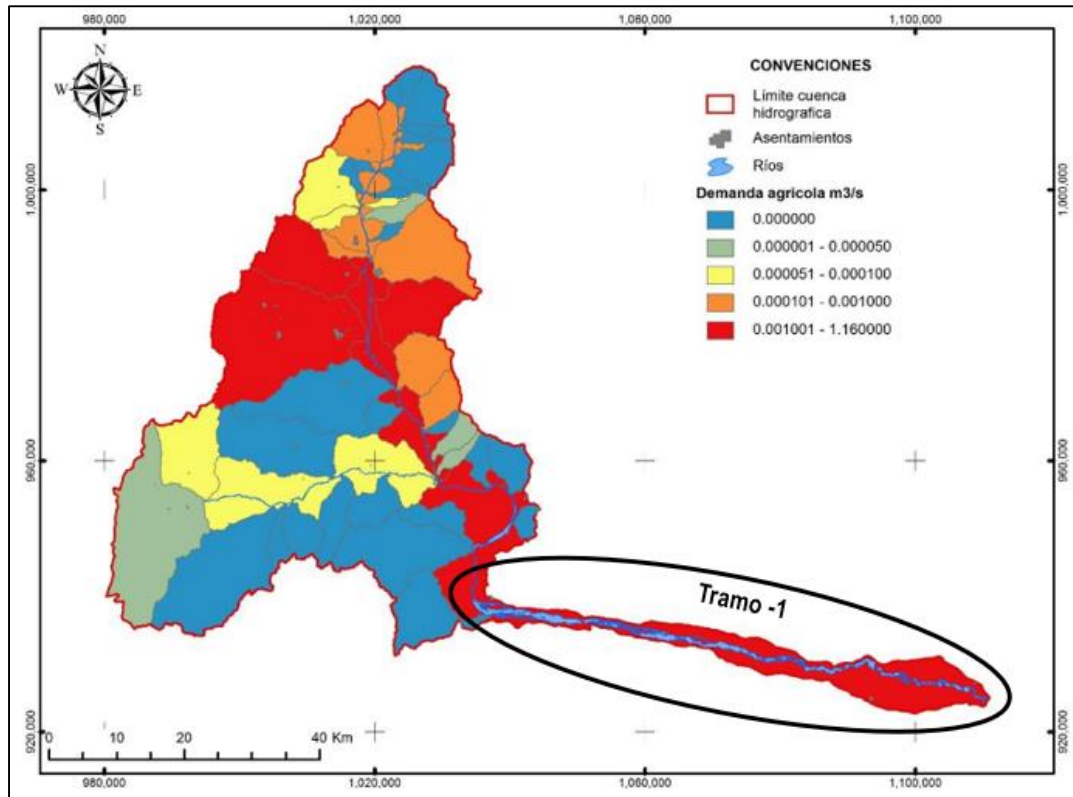
mayor que las necesidades de riego, la demanda de riego bruta es igual a cero (0). Por otro lado, cuando la precipitación efectiva es menor que el uso consuntivo del cultivo, la demanda se define como la diferencia entre la evapotranspiración del cultivo y el agua aportada por precipitación (IDEAM, 2010a).

Además del agua empleada para el riego de los cultivos, es necesario tener en cuenta algunos subprocesos del sector agrícola, como las actividades de postcosecha y beneficio, que no necesariamente implican un proceso de transformación industrial (SOSTENIBLE, 2018).

En la figura 11, se observa que la mayor demanda hídrica por parte del sector agrícola se encuentra en el tramo 1 de estudio de este proyecto, el cual está resaltado en color rojo.

**Figura 11**

*Demanda hídrica sectorial - agrícola en metros cúbicos por segundo (m<sup>3</sup>/s)*



**Nota.** La demanda agrícola asociada al tramo 1 del río Guayuriba y directos es la de mayor valor siendo de 1,1 m<sup>3</sup>/s el otorgado. Adaptado de: POMCA Río Guayuriba Actualización Capítulo 9 – Hidrología, oferta y demanda de agua (p. 155), Corpoguavio, CAR, Cormacarena, Corporinoquia & UTS, (2018).

Como se ha mencionado anteriormente, el río Guayuriba no solo satisface la demanda de agua necesaria para el sector agrícola, sino que también abastece otras demandas hídricas, como actividades domésticas, ganadería, sector piscícola y otras especies, concesiones y otras demandas. La demanda de agua asociada a cada una de estas actividades se especifica en la tabla 4.

**Tabla 4***Demanda hídrica río Guayuriba*

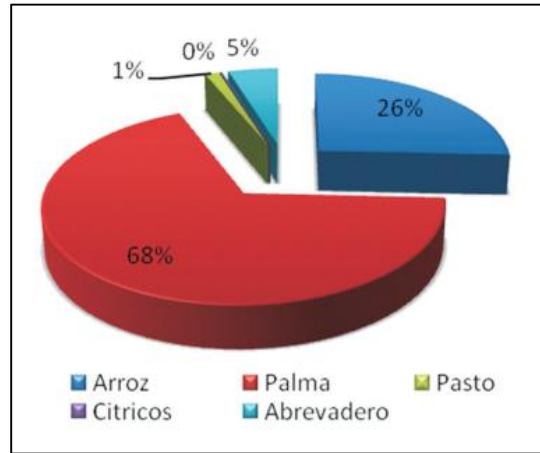
<b>Campo</b>	<b>Demanda [m3/s]</b>
Doméstico	0,01902
Otras especies	0,00268
Bovinos	0,01515
Piscícola	0,00346
Agrícola	1,15226
Concesiones	4,6414
Otras demandas	0,0038
<b>Demanda Total</b>	<b>5,83777</b>

*Nota.* El tramo 1 genera una de las mayores demandas hídricas por la cantidad de cultivos de palma y de arroz. Adaptado de: POMCA Río Guayuriba Actualización Capítulo 9 – Hidrología, oferta y demanda de agua (p. 154), Corpoguvio, CAR, Cormacarena, Corporinoquia & UTS, (2018).

La demanda del recurso hídrico varía según los diferentes usos, de esta forma el mayor volumen de agua se destina a las actividades agropecuarias. La captación de agua se concentra en la parte baja de la cuenca, en un tramo de 47 km que abarca los municipios de San Carlos de Guaroa y Puerto López. Además, como se confirma en la tabla 2 el principal uso agrícola está relacionado con las grandes extensiones de cultivos de arroz y palma de aceite (Cormacarena & Ecopetrol, 2010b). En la figura 12, se muestra la distribución de agua captada según el tipo de cultivo; en ella se observa que el 68% del total del agua captada del río Guayuriba se destina a los cultivos de palma, mientras que el 26% se utiliza para el cultivo de arroz. El porcentaje restante se distribuye entre abrevaderos, pastos y otros usos (Cormacarena & Ecopetrol, 2010b).

## Figura 12

Porcentaje de distribución del agua captada en el río Guayuriba según usos agropecuarios



*Nota.* Tomado de: Plan de ordenamiento y manejo de la cuenca Hidrográfica del Río Guayuriba – Resumen ejecutivo 2010 (p. 51), Cormacarena & Ecopetrol, 2010.

### 5.3.7 Palma Africana

La palma de aceite es la oleaginosa más productiva por hectárea a nivel mundial. Una hectárea sembrada produce entre 6 y 10 veces más aceite que otros cultivos similares. Colombia ocupa el cuarto lugar como productor de aceite de palma a nivel mundial y el primero en América (Fedepalma, 2022).

El departamento del Meta en el año 2020 contaba con 21 municipios productores o dedicados al cultivo de palma, con un total de 195.600 hectáreas sembradas. De estas, 147.343 hectáreas fueron productivas, lo que equivale a una producción de 495.208 toneladas de aceite de palma crudo, representando el 31,76% de la producción nacional. En la zona de evaluación de este proyecto se encuentran 8 plantas productivas, que son: Aceites Cimarrones S.A.S, Aceites Manuelita S.A.S, Alianza de Humea S.A.S, Inversiones la Mejorana S.A.S, Oleaginosas Santana S.A.S, Palmeras del Llano S.A., Servicios de Maquila Agrícola de los Llanos S.A.S, e Inversora la Paz S.A.S. (Fedepalma, 2022).

En el año 2020 el cultivo de palma africana represento el 9,1% del PIB agrícola en Colombia generando 188.506 empleos, de los cuales el 82,4% son empleos formales (Mesa & Azuero, 2021). Sin embargo, el crecimiento significativo de la demanda industrial de aceite de palma, como una alternativa económica de aceite vegetal, ha llevado a la destrucción de la selva húmeda, la explotación de trabajadores y un acaparamiento desmedido de tierras y agua, esto último debido a que el cultivo utiliza las mismas fuentes de agua que la comunidad, lo que resulta en escasez del recurso y conflictos sociales (GRAIN, 2020).

El volumen de agua necesario por hectárea para el cultivo de palma es de aproximadamente 3,4 mm de lluvia por día, lo que equivale a un promedio de 34.000 litros (GRAIN, 2020). Según información oficial del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), en Colombia, este cultivo es el segundo mayor consumidor de agua en el país, con una demanda de 1.768 millones de metros cúbicos al año (Avendaño & Velasco, 2019).

### 5.3.8 Tipos de Riego

El riego es un proceso mediante el cual se suministra agua de manera artificial a un área o terreno específico, con el propósito de mantener el nivel de humedad adecuado para el crecimiento y desarrollo de los cultivos. Consiste en la aplicación controlada y regulada de agua sobre el suelo utilizando diferentes sistemas o métodos. En la Tabla 5 se mencionan los distintos tipos de riego.

**Tabla 5**

*Tipos de riego*

Riego por Gravedad	Riego por Presión
Inundación	Aspersión
Canteras	Goteo
Melgas	

*Nota.* El tipo de riego más usado para el cultivo de palma es por gravedad con un sistema de inundación. Adaptado de: Colombia: escasez de agua por palma y petróleo en Puerto Gaitán, Avendaño & Velasco, (2019). <https://es.mongabay.com/2019/10/palma-de-aceite-en-colombia-afectaciones-agua-en-vereda-petrolera/>

El riego por gravedad es un método de riego, donde el agua se distribuye por el terreno mediante el aprovechamiento de la fuerza de gravedad. Este se basa en el flujo del agua desde una fuente de suministro, como un canal o un río, hacia las áreas de cultivo. El agua se canaliza a través de canales y surcos para que se infiltre en el suelo y llegue a las raíces de las plantas.

Por otro lado, el riego por presión comúnmente conocido como riego por aspersión implica el uso de sistemas de bombeo y tuberías para la distribución del agua a través de aspersores o rociadores. En este tipo de riego el agua se pulveriza en forma de gotas finas sobre el cultivo, cubriendo de manera uniforme el área de riego.

### 5.3.9 Entidades presentes en la Actividad Económica Asociada al Río Guayuriba

Con base en el análisis de las encuestas socioeconómicas, se identifican empresas privadas del sector agrícola, industrial y minero que generan desarrollo económico para los habitantes de la zona mediante la creación de empleo gracias a la mano de obra requerida. Sin embargo, estas actividades aprovechan los recursos naturales y causan impactos negativos en ellos. Por lo tanto, surge la necesidad de implementar estrategias productivas sostenibles en sus procesos (Corpoguavio et al., 2018).

En la Tabla 6 se enumeran algunas industrias en las cuales sería posible reutilizar las aguas de producción.

**Tabla 6**

*Empresas del Sector Económico en la cuenca hidrográfica del río Guayuriba*

Municipio	Vereda	Sector	Empresa
San Carlos de Guaroa	Palmeras		Aceites Manuelita S.A.
Puerto López	Bocas de Guayuriba	Agroindustria	Palmeras la Carolina
Acacías	San Cayetano		Palmeras Santana

*Nota.* El enfoque del proyecto evalúa las industrias agroindustriales asociadas a la mayor captación del recurso hídrico. Adaptado de: POMCA Río Guayuriba Actualización Capítulo 10 – Calidad del agua y saneamiento ambiental, Corpoguavio, CAR, Cormacarena, Corporinoquia & UTS, (2018).



### **5.3.10 Calidad del Agua**

El proyecto se centra en el tramo 1 del Río Guayuriba, donde se encuentran los vertimientos de aguas industriales de Ecopetrol Acacias. Estos vertimientos recolectan el agua de las estaciones Castilla 1, Castilla 2, Chichamente y Acacias. Además, se encuentra el vertimiento puntual de la estación Suria sobre el caño Chubano y el correspondiente a la planta extractora de Aceite el Morichal (Cormacarena & Ecopetrol, 2010a).

Cormacarena, de acuerdo con lo establecido en el decreto 1076 de 2015, artículo 2.2.9.7.1.1., y con el fin de cumplir con el marco normativo, debe evaluar el estado de la cuenca en términos de calidad de tal forma que sea posible definir las metas del quinquenio 2022-2026 y la reducción de descargas de DBO<sub>5</sub> y SST (CORMACARENA, 2021).

Según la Resolución 1671 del 2020, que establece los lineamientos de calidad de agua y vertimientos a corto (3 años), mediano (5 años) y largo plazo (10 años), se definen los parámetros que deben cumplir las aguas para poder ser vertidas en el tramo 1 del río Guayuriba, como se especifica en la tabla 7. Cabe mencionar que la normativa de conductividad chilena 1333 de 1987 establece que la conductividad del agua para riego no debe exceder los 750  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , ya que valores superiores pueden generar efectos perjudiciales. La norma Riverside también coincide con este mismo valor para el agua destinada al riego, clasificándola como C2S (Cormacarena, 2020).

**Tabla 7**

*Objetivos de calidad tramo uno 1 río Guayuriba y directos-departamento Meta*

Municipio	Subcuenca	Delimitación del tramo	Usos potenciales predominantes	Criterios de calidad		
				Parámetro	Unidad	Corto Mediano y Largo plazo
Villavicencio, Acacias, Puerto López, San Carlos de Guaroa	Río Guayuriba y Directos	Uno	Agrícola, Pecuario, Preservación, flora y fauna, recreativo, contacto secundario, industrial	pH	Unidades	5 - 9
				DBO <sub>5</sub>	mg/L	≤5
				Oxígeno disuelto	mg/L	≥5
				Variación de temperatura	°C	5
				NH <sub>3</sub>	mg/L	≤1
				Nitrógeno Total	mg/L	≤8
				Grasas y aceites	mg/L	≤2
				Conductividad	μS/cm	750
				SAAM	mg/L	0,5
				Material flotante	Existencia	Ausente
				Coliformes Fecales	NMP/100 mL	5000

*Nota.* Donde, DBO<sub>5</sub>: Demanda Biológica de Oxígeno, pH: Potencial de Hidrogeno. DQO: Demanda Química de Oxígeno, SST: Sólidos suspendidos totales y A: Ausente. Tomado de: RESOLUCION N° PS - Gj.1.2.6.20 1671, Cormacarena, (2020). <https://s.itoeste.com/bV4>

### 5.3.11 Carga por Usuario

Como se mencionó anteriormente, el tramo 1 cuenta con 4 usuarios principales que generan cambios en la calidad del agua. Los parámetros del efluente proveniente del campo petrolero en la Salida del STAP Estación Acacias hacia el Río Guayuriba (Km 22), que entra en contacto con el recurso hídrico, se pueden observar en la Tabla 8. Además, se presenta una comparación con los límites establecidos en la Resolución 631 de 2015, en los artículos 5 y 11.

**Tabla 8**

Resultados in situ y de laboratorio. Muestras puntuales. Agua residual industrial – Salida del STAP estación Acacias (Km 22)

Identificación	Salida del STAP	
	Estación Acacias Río Guayuriba (Km 22) / Promedio	Resolución 631 de 2015 (Artículo 5 y 11)
Fecha de monitoreo	10/12/2012	
pH unidades*	7,64	6,00-9,00
Conductividad $\mu\text{S}/\text{cm}^*$	476,2	N.R.
Oxígeno disuelto $\text{mg}/\text{l}^*$	5,04	N.R.
Oxígeno disuelto % *	73,3	N.R.
Temperatura agua $^{\circ}\text{C}$	32,1	<40 $^{\circ}\text{C}$
Sólidos Sedimentables $\text{ml}/\text{L}^*$	<0,1	1,00
Grasas y aceites $\text{mg}/\text{L}^*$	5,65	15,00
Hidrocarburos $\text{mg}/\text{L}^*$	3,47	10,00

*Nota.* Dónde: N.R. es No Regulado por la norma de estudio. Labotarios Chemilab tiene estos parámetros acreditados mediante la resolución 1146 de 07 de octubre del 2021 del IDEAM. Tomado de: Monitoreo agua residual industrial de la estación Acacias y aguas superficiales del río Guayuriba primer trimestre febrero 2022, Ecopetrol, (2022) & Resolución 631 de 215 (Art. 5 y 11), Minambiente, 2015. <https://s.itoeste.com/blK>

### 5.3.12 Tasa Retributiva

Con base en la tasa retributiva, se confirma que la tarifa para el vertimiento de la estación Acacias durante el periodo de enero a diciembre de 2021 es la que se encuentra detallada en la tabla 9.

**Tabla 9**

Valores Tasa retributiva de enero a diciembre del año 2021

Año	DBO $[\$/\text{kg}]$	SST $[\$/\text{kg}]$	IPC año anterior [%]
2021	157,14	67,20	1,61

*Nota.* Siendo estos valores los presentes para el vertimiento en el río Guayuriba. Tomado de: Tarifa mínima tasa retributiva por vertimientos puntuales al agua, Minambiente, (2023). <https://s.itoeste.com/bb7>

Los parámetros considerados para realizar los ajustes en relación con la tasa retributiva están asociados a la Resolución 0273 de 1997 emitida por el Ministerio de Ambiente, como se muestra en la Tabla 9. Los parámetros de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5) y Sólidos Suspendidos Totales (SST) son las dos variables que determinarán el costo final de esta tasa.

De acuerdo con la Resolución PS-GJ 1.2.6.21.1127 del 10/08/2021, se ha iniciado el proceso de consulta para establecer las metas de carga de contaminantes vertidos en los tramos de los ríos del departamento del Meta. Este proceso está siendo llevado a cabo por CORMACARENA para el quinquenio 2022-2026, y se basa en el estudio de parámetros como DBO5 y SST (Cormacarena, 2021).

La tasa por utilización del agua es un cobro que realiza Cormacarena a los usuarios por el uso del recurso hídrico a través de concesiones, y está fundamentada en los artículos 42 y 43 de la Ley 99 de 1993. Los fondos recaudados se destinan a la protección, monitoreo y renovación del recurso vital del agua (Cormacarena, 2022).

La Ley 99 de 1993, en su artículo 42, establece las tasas retributivas y compensatorias asociadas a la utilización directa o indirecta de la atmósfera, el agua y el suelo. Además, el artículo 43 de esta ley establece la utilización de aguas por parte de personas naturales o jurídicas, tanto públicas como privadas, generando un cobro de tasas fijadas por el Gobierno Nacional destinadas al pago de los gastos de protección y renovación de los recursos hídricos. Se establece en el párrafo 1 que los proyectos que requieran licencias ambientales relacionadas con el uso del agua deben destinar el 1% o más de la inversión total para la recuperación, preservación, conservación y vigilancia de la cuenca hidrográfica que abastece la respectiva fuente hídrica.

Si se quiere ampliar más el conocimiento respecto a cómo se calcula la tasa retributiva, se puede consultar el Decreto 3100 del 2003. En dicho decreto se reglamentan las tasas retributivas por la utilización directa del agua como receptor de los vertimientos puntuales, y se toman otras determinaciones relacionadas.

### 5.3.13 *Huella Hídrica*

La huella hídrica es un indicador con resolución temporal y explícita que permite conocer el volumen de agua utilizado, ya sea directa o indirectamente, para la producción de cualquier bien o servicio. Este indicador tiene tres componentes. En primer lugar, la HH verde, que hace referencia al agua lluvia que se evapora o se incorpora durante un proceso de producción; en segundo lugar la HH azul, que está determinada por el agua superficial que se evapora o se incorpora durante un proceso de producción; y por último, la HH gris, que se define como la cantidad de agua necesaria para asimilar una carga de contaminantes que fueron generados hasta alcanzar las concentraciones de calidad de agua definidas por la entidad ambiental correspondiente (Ada Tovar-Hernández et al., 2017). Dicho esto, se debe destacar que para este estudio serán de interés únicamente la huella hídrica (HH) verde y azul.

Para determinar la HH, es necesario tener en cuenta que, como se mencionó anteriormente, la mayor demanda de agua por parte del sector agrícola se encuentra en el tramo 1 de estudio en este proyecto, correspondiente a la cuenca del río Guayuriba en su zona media y baja. Esta área se caracteriza por tener leves pendientes, que abarcan el 36% del área total, zona donde se encuentran en su mayoría cultivos de palma de aceite y arroz (Ada Tovar-Hernández et al., 2017).

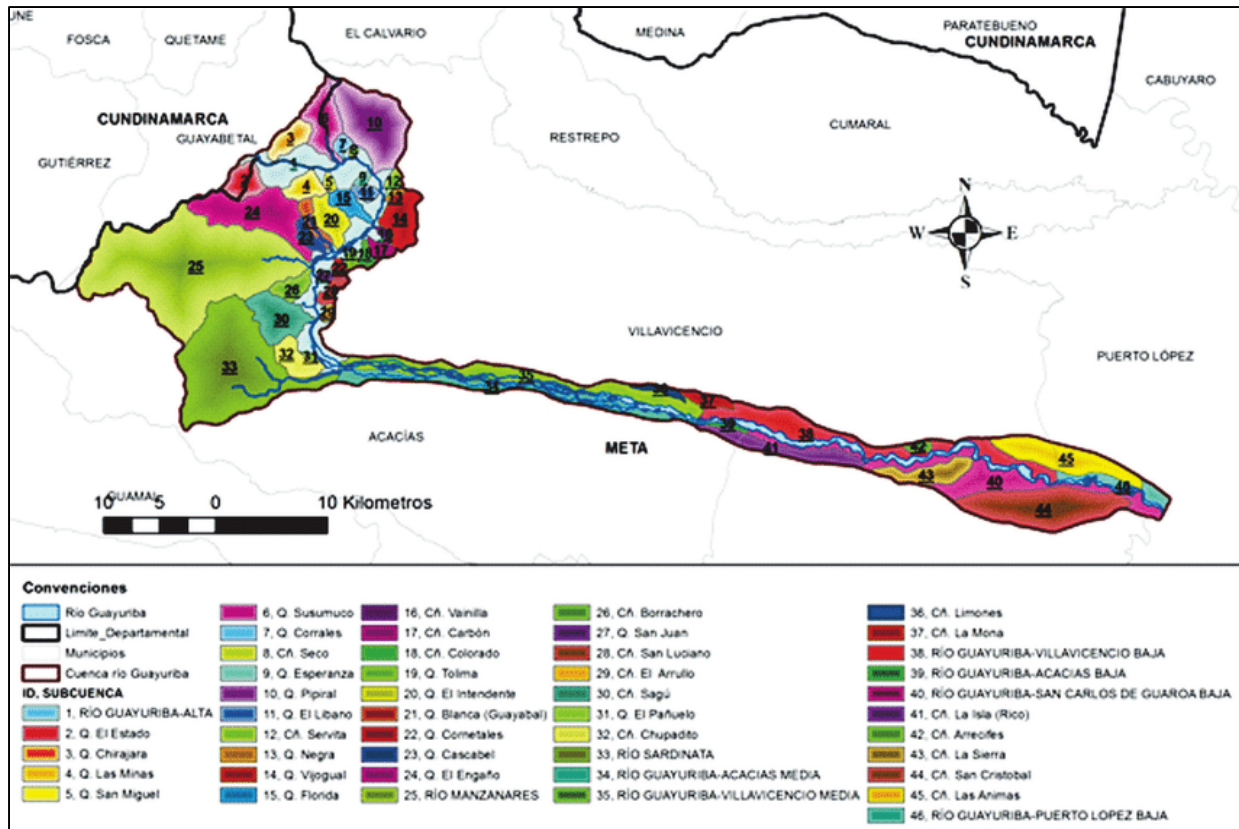
Ahora bien, según el estudio realizado por Tovar-Hernández et al (2017), para el año 2013, la HH verde en la cuenca del Río Guayuriba fue de 49.217.491 m<sup>3</sup>/año, correspondientes a un total de 4.536 ha de cultivo de palma y 3.198 ha de cultivo de arroz. El cultivo de palma de aceite fue el mayor consumidor del recurso hídrico, con un consumo de 9.030 m<sup>3</sup>/ha/año, mientras que el arroz consumió 2.670 m<sup>3</sup>/ha/año (p.56). Sin embargo, estos consumos son inferiores a los reportados en el Estudio Nacional del Agua (ENA) del año 2014, donde se reportan para los mismos cultivos en promedio consumos de 16.907 m<sup>3</sup>/ha/año y 3.394 m<sup>3</sup>/ha/año (IDEAM, 2015). Cabe resaltar que se observa una amplia brecha entre la HH verde del cultivo de palma de aceite y de arroz, lo cual se debe a que mientras que el cultivo de palma de aceite es permanente, el cultivo de arroz se desarrolla únicamente durante cuatro meses del año.

Por otro lado, es fundamental conocer que, en la zona de estudio, los menores volúmenes de HH verde se presentan en los meses secos, correspondientes a la temporada de diciembre a marzo, comportamiento que se da tanto para los cultivos de palma como de arroz. Lo anterior implica que, durante esta temporada, los cultivos no tendrán disponibilidad de agua para su desarrollo fenológico, por lo que será necesario incorporar sistemas de riego para suplir sus requerimientos (Tovar-Hernández et al., 2017).

Aunque anteriormente se mencionó que los cultivos requieren un sistema de riego en el periodo comprendido entre los meses de diciembre y marzo, se sabe que la demanda de riego inicia en noviembre, esto con el objetivo de garantizar el recurso durante la época seca. Adicionalmente, se logró identificar que las zonas donde hay mayor uso del recurso hídrico azul son las unidades Río Guayuriba Acacias Media y Río Guayuriba San Carlos de Guaroa Baja lo que se da debido a que cuentan con captaciones para riego sin que haya flujo de retorno. (Tovar-Hernández et al., 2017) En la figura 13 se muestran las unidades de estudio seleccionadas en la cuenca del Río Guayuriba por los autores Tovar-Hernández et al, para desarrollar su investigación titulada “Evaluación de la sostenibilidad de los cultivos de arroz y palma de aceite en la cuenca del Río Guayuriba (Meta, Colombia), a través de la evaluación de huella hídrica” (2017, p.55).

**Figura 13**

*Unidades de estudio para el análisis de la huella hídrica en la cuenca del río Guayuriba*



*Nota.* En la imagen se muestran las unidades de estudio seleccionadas por los autores del estudio mencionada. Tomado de: Evaluación de la sostenibilidad de los cultivos de arroz y palma de aceite en la cuenca del Río Guayuriba (Meta, Colombia), a través de la evaluación de huella hídrica (p.55), Tovar-Hernández et al. (2017). <https://orinoquia.unillanos.edu.co/index.php/orinoquia/article/view/394/1000>

En la siguiente tabla se evidencia el área, huella hídrica verde y huella hídrica azul para los cultivos de palma de aceite y arroz en el tramo 1 (Objeto de estudio del proyecto) de la cuenca del Río Guayuriba

**Tabla 10**

*Ubicación y las áreas cultivadas con palma de aceite y arroz en el tramo 1 de la cuenca del Río Guayuriba*

Unidad	Área unidad de estudio [Ha]	Palma de aceite			Arroz	
		Área [Ha]	HH Verde [m <sup>3</sup> /año]	HH Azul [m <sup>3</sup> /año]	Área [Ha]	HH Verde [m <sup>3</sup> /año]
Río Guayuriba Acacias Media	3.005	354	3.540.250	15.887.930	37	103.862
Río Guayuriba Villavicencio Media	3.933	1	10.335	2.582	664	1.726.837
CA. Limones	286	0	292.565	0	0,3075	0
CA. La Mona	451	72	679.118	199.794	152	391.350
Río Guayuriba Villavicencio Baja	4.380	109	1.006.310	322.720	1.123	2.976.503
Río Guayuriba Acacias Baja	247	36	339.564	99.899	0	0
Río Guayuriba San Carlos de Guaroa Baja	4519	1639	14.705.613	17.946.349	456	1.214.117
CA. La Isla	1556	1101	9.901.252	3.307.604	0	0
CA. Arrecifes	214	0	0	0	9	24.301
CA. La Sierra	1237	523	4.142.084	1.573.496	127	354.026
CA. San Cristobal	4186	313	2.827.844	983.929	311	862.690
CA. Las Animas	2523	187	1.704.228	583.836	319	886.894
Río Guayuriba Puerto Loéz Baja	942	201	1.820.311	633.365	0	0
<b>Total</b>	<b>27.479</b>	<b>4.536</b>	<b>40.969.474</b>	<b>41.541.504</b>	<b>3.198</b>	<b>8.540.580</b>

*Nota.* Las unidades mostradas en la tabla corresponden a las unidades de estudio de la 34-46 mostradas en la figura 13. Tomado de: Evaluación de la sostenibilidad de los cultivos de arroz y palma de aceite en la cuenca del Río Guayuriba (Meta, Colombia), a través de la evaluación de huella hídrica (2017) <https://orinoquia.unillanos.edu.co/index.php/orinoquia/article/view/394/1000>

### 5.3.14 Índice de Escasez

Se denomina índice de escasez a la relación porcentual entre la demanda de agua del conjunto de actividades económicas y la oferta hídrica disponible en las fuentes abastecedoras, pues la disponibilidad de una unidad, cuenca o región hidrológica se ve afectada por factores naturales y antrópicos (Sebastián et al., 2011).



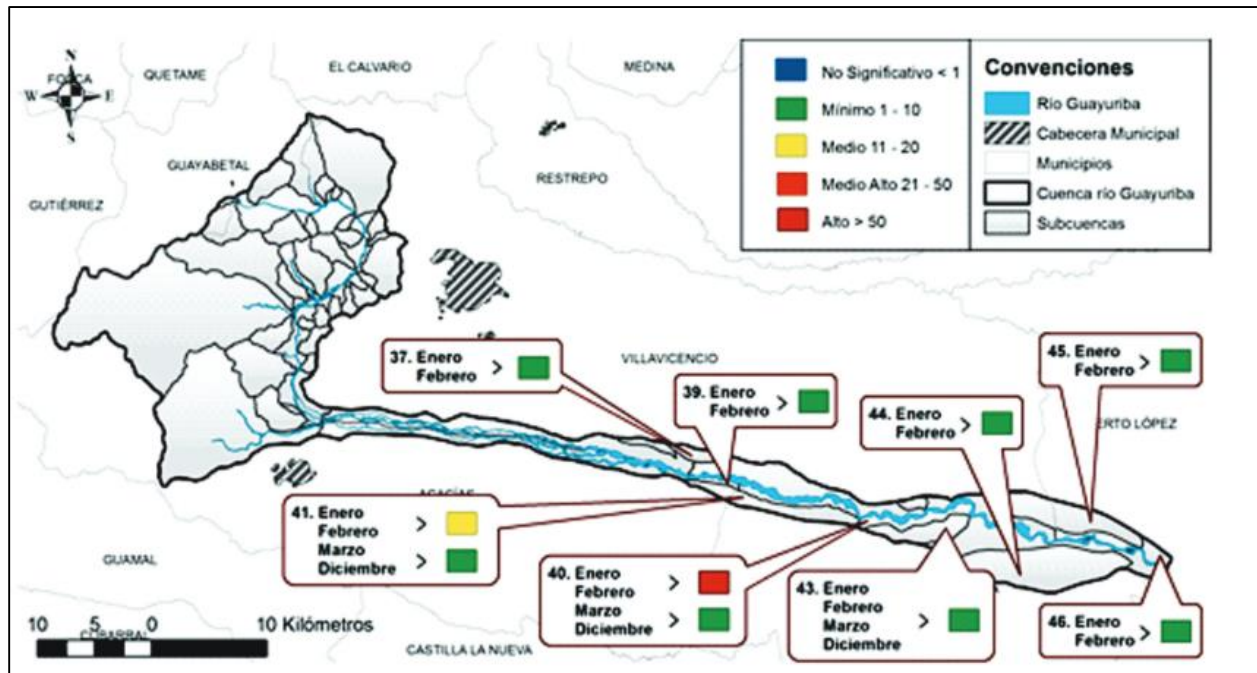
Ahora bien, teniendo en cuenta lo anterior y conforme a la revisión bibliográfica realizada se establece que en cuanto a la disponibilidad de agua verde (DAV) y en relación con la HH verde previamente establecida con base a la oferta del tramo 1 (objeto de este estudio) de la cuenca del río Guayuriba, solo se presenta un índice de escasez entre 1-10 en la unidad Caño Rico, esto específicamente en tres meses del año correspondientes a febrero, abril y junio, siendo la diferencia entre lo ofertado y lo demandado un volumen de 142.249 m<sup>3</sup> ( Tovar-Hernández et al., 2017), lo cual se atribuye específicamente a las actividades realizadas en la siembra de palma de aceite, debido a que estos cultivos tienen altos requerimientos hídricos (Mejía, 2000).

En los meses de mayo, junio y julio en general se presentan los mayores caudales, así como en condiciones medias como en condiciones secas. Según el análisis de la escorrentía de la cuenca en estudio en el mes de junio la oferta hídrica en condiciones medias es de 273,5 m<sup>3</sup>/s y en condiciones secas de 132,48 m<sup>3</sup>/s, equivalente a una reducción del orden de 52% respecto a la media del mismo mes. Como se ha mencionado anteriormente los meses de enero, febrero y marzo son los que presentan una menor oferta hídrica tanto en condiciones medias como en condiciones secas; siendo la oferta hídrica de enero 35,12 m<sup>3</sup>/s y 13,15 m<sup>3</sup>/s respectivamente para cada época lo que representa una reducción del 63% en condiciones secas respecto a la media del mes (CORPOGUAVIO et al., 2019).

Adicionalmente, para el índice de escasez de la HH azul, se determina que este se presenta en los meses secos del año correspondientes a enero, febrero y marzo en las unidades: Caño la mora, Río Guayuriba Acacias Bajo, Río Guayuriba San Carlos de Guaroa Baja, caño Rico, caño La Sierra, caño San Cristóbal, caño las Animas y Río Guayuriba-Puerto López (Ada Tovar-Hernández et al., 2017). En la figura 14 se evidencian cuáles son los niveles de escasez en las subcuencas en cada uno de los tres meses señalados.

**Figura 14**

*Mapa de escasez de agua azul por subcuenca*



*Nota.* Donde cada unidad está representada por un número como se define a continuación: Caño la mora (37), Río Guayuriba Acacias Bajo (39), Río Guayuriba San Carlos de Guaroa Baja (40), caño Rico (41), caño La Sierra (43), caño San Cristóbal (44), caño las Animas (45) y Río Guayuriba-Puerto López (46). Tomado de: Evaluación de la sostenibilidad de los cultivos de arroz y palma de aceite en la cuenca del Río Guayuriba (Meta, Colombia), a través de la evaluación de huella hídrica (p.60), Tovar-Hernández et al. (2017). <https://orinoquia.unillanos.edu.co/index.php/orinoquia/article/view/394/1000>

### **5.3.15 Índice de Vulnerabilidad al Desabastecimiento Hídrico (IVH)**

Este índice permite identificar el grado de fragilidad del sistema hídrico para mantener una oferta de agua para el abastecimiento, ante amenazas como periodos largos de estiaje o eventos como el Fenómeno cálido del Pacífico (El Niño) (Minambiente, 2022). Según el Estudio Nacional del Agua (ENA), en la subzona hidrográfica del río Guayuriba se presenta una presión por contaminación (IACAL año seco) moderada (IDEAM, 2019), sin embargo, de acuerdo con lo establecido en el POMCA del mismo río, a lo largo de la cuenca hidrográfica del río Negro-Blanco (zona baja de la cuenca) se presentan valores de calidad de agua regular y mala, lo que se atribuye a la realización de varios vertimientos de centros poblados e industriales (CORPOGUAVIO et al., 2018).

Según lo estipulado por el IDEAM y el Minambiente, el IVH se determina a partir de una matriz de decisión que relaciona los rangos entre los resultados del IRH y el IUA. Esta matriz se evidencia en la siguiente tabla.

**Tabla 11**

*Matriz de relación entre el IRH y el IUA para determinar el IVH*

Vulnerabilidad del Recurso hídrico, Relación IRH - IUA					
IUA Extremo = Porcentaje (Oferta/demanda)		Índice de regulación			
Rango	Categoría	Alta	Moderado	Baja	Muy baja
<1	Muy bajo	Muy baja	Baja	Media	Media
1-10	Bajo	Baja	Baja	Media	Media
10-20	Moderado	Media	Media	Alta	Alta
20-50	Alto	Media	Alta	Alta	Muy alta
50<	Muy alto	Media	Alta	Alta	Muy alta

*Nota.* IUA: Índice del Uso del Agua – IRH: Índice de Retención y Regulación Hídrica. Tomado de: Estudio Nacional del Agua (ENA) 2014 (p.362). IDEAM & Minambiente, (2015). <https://s.itoeste.com/boZ>

La tabla 12 muestra el índice de vulnerabilidad por desabastecimiento hídrico (IVH) para cada una de las Unidades Hidrográficas Nivel 1 (UHN1) de la cuenca del río Guayuriba de acuerdo con lo establecido en la matriz para la determinación del IVH. La información presentada en esta tabla indica, en términos generales un IVH medio en el tramo 1 (que abarca las unidades 350234 a 350246), debido al alto nivel de demanda de las diferentes unidades hidrológicas y a su baja a moderada regulación hídrica.

**Tabla 12**

*Índice de vulnerabilidad por desabastecimiento hídrico (IVH) en condiciones normales y secas*

UHN1	NOMBRE	IRH	IUA normal	IUA seco	IVH normal	IVH seco
350201	Río Guayuriba y Directos	Moderada	Bajo	Moderado	Bajo	Medio
350202	Quebrada El Pescado	Moderada	Muy bajo	Muy bajo	Bajo	Bajo
350203	Quebrada Pipiral	Moderada	Muy bajo	Muy bajo	Bajo	Bajo
350204	Quebrada Susumuco	Moderada	Muy bajo	Muy bajo	Bajo	Bajo
350205	Quebrada Perdices	Baja	Muy bajo	Bajo	Medio	Medio
350206	Quebrada Blanca	Baja	Bajo	Muy alto	Medio	Alto
350207	Quebrada Marcelita	Baja	Muy bajo	Muy alto	Medio	Medio

Tabla 12. (Continuación)

350208	Quebrada Naranjal	Baja	Muy bajo	Bajo	Medio	Medio
350209	Río Contador	Moderada	Muy bajo	Bajo	Bajo	Bajo
350210	Quebrada Negra	Baja	Bajo	Bajo	Medio	Medio
<b>UHN1</b>	<b>NOMBRE</b>	<b>IRH</b>	<b>IUA normal</b>	<b>IUA seco</b>	<b>IVH normal</b>	<b>IVH seco</b>
350211	Río Negro Parte Alta	Baja	Muy bajo	Bajo	Medio	Medio
350212	Quebrada Blanca	Moderada	Alto	Muy alto	Alto	Alto
350213	Quebrada La Caja	Moderada	Muy bajo	Bajo	Bajo	Bajo
350214	Quebrada Blanca o el Palmar	Moderada	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo
350215	Quebrada Calostros	Moderada	Muy bajo	Bajo	Bajo	Bajo
350216	Quebrada Jaboncillo	Moderada	Muy bajo	Bajo	Bajo	Bajo
350217	Quebrada Piedras Gordas	Moderada	Muy bajo	Bajo	Bajo	Bajo
350218	Quebrada Horqueta	Moderada	Muy bajo	Bajo	Bajo	Bajo
350219	Río Blanco - Choachí	Baja	Muy bajo	Bajo	Medio	Medio
350220	Quebrada Quisquiza	Moderada	Muy bajo	Bajo	Bajo	Medio
350221	Quebrada Potrero Grande	Moderada	Bajo	Alto	Bajo	Alto
350222	Río Palmar	Moderada	Moderado	Muy alto	Medio	Alto
350223	Río Cáqueza	Baja	Bajo	Bao	Medio	Medio
350224	Quebrada Pontezuela	Baja	Muy bajo	Muy bajo	Medio	Medio
350225	Río Los Medios o Blanco	Baja	Muy bajo	Muy bajo	Medio	Medio
350226	Río Gallo	Baja	Muy bajo	Muy bajo	Medio	Medio
350227	Quebrada El Brasil	Baja	Muy bajo	Muy bajo	Medio	Medio
350228	Quebrada Santa Rosa	Baja	Muy bajo	Muy bajo	Medio	Medio
350229	Río Chiquito	Baja	Muy bajo	Muy bajo	Medio	Medio
350230	Río Manzanares	Baja	Muy bajo	Muy bajo	Medio	Medio
350231	Río Sardinata	Baja	Muy bajo	Muy bajo	Medio	Medio
350232	Río Negro y Directos	Baja	Muy bajo	Bajo	Medio	Medio
350233	Quebrada El Salitre	Baja	Bajo	Bajo	Medio	Medio
350234	Quebrada Los Curos	Baja	Muy bajo	Bajo	Medio	Medio
350235	Quebrada Pericos	Baja	Bajo	Moderado	Medio	Alto
350236	Quebrada de Chucha	Baja	Bajo	Bajo	Medio	Medio
350237	Quebrada De Los Ocares	Baja	Bajo	Bajo	Medio	Medio
350238	Quebrada La Junia	Baja	Bajo	Bajo	Medio	Medio
350239	Quebrada El Raizal	Baja	Bajo	Moderado	Medio	Alto
350240	Quebrada Guaza	Baja	Moderado	Alto	Alto	Alto
350241	Río Sáname	Moderada	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo
350242	Quebrada De Quiña	Baja	Bajo	Bajo	Medio	Medio
350243	Río Blanco y Directos	Moderada	Muy bajo	Muy bajo	Bajo	Bajo
350244	Río Taguate	Baja	Muy bajo	Bajo	Medio	Medio
350245	Quebrada San Martín	Baja	Muy bajo	Bajo	Medio	Medio
350246	Quebrada El Engaño	Moderada	Muy bajo	Muy bajo	Bajo	Bajo

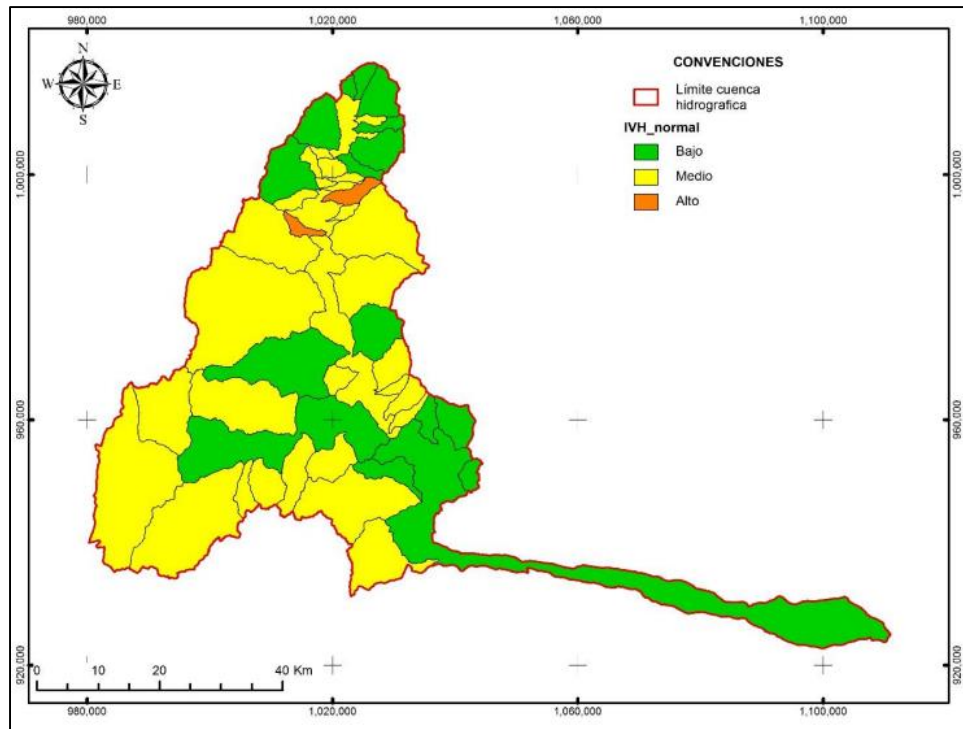
**Nota.** IUA: Índice del Uso del Agua – IRH: Índice de Retención y Regulación Hídrica. Adaptado de: POMCA Río Guayuriba Actualización Capítulo 9 – Hidrología, oferta y demanda de agua (p. 196-197), Corpoguavio, CAR, Cormacarena, Corporinoquia & UTS, (2018).

Aproximadamente el 57% de las subcuencas muestra una vulnerabilidad al desabastecimiento en categoría media durante condiciones secas, debido a la falta de buena regulación y a un uso moderado del agua. Por otro lado, alrededor del 15% de las subcuencas presenta un IVH alto debido a una demanda más elevada del recurso. En esta categoría se encuentran las siguientes subcuencas: Quebrada Blanca, Quebrada Potrero Grande, Río Palmar, Quebrada Pericos, Quebrada El Raizal y Quebrada Guaza (Corpoguavio et al., 2018).

En la figura 15 y la figura 16, se muestran los índices de vulnerabilidad por desabastecimiento hídrico para cada una de las Unidades Hidrográficas Nivel 1 (UHN1) de la cuenca del río Guayuriba, tanto en condiciones normales como en condiciones secas.

**Figura 15**

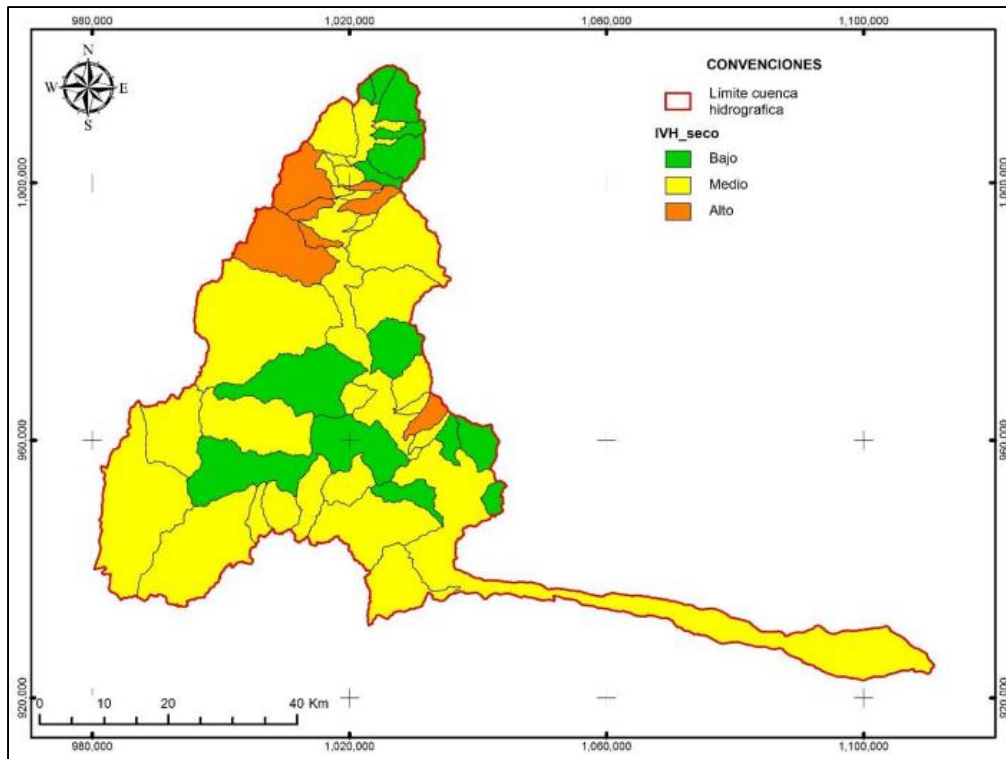
*Índice de vulnerabilidad por desabastecimiento hídrico (IVH) en la cuenca del río Guayuriba en condiciones normales*



**Nota.** Tomado de: POMCA Río Guayuriba Actualización Capítulo 9 – Hidrología, oferta y demanda de agua (p. 198), Corpoguavio, CAR, Cormacarena, Corporinoquia & UTS, (2018).

**Figura 16**

*Índice de vulnerabilidad por desabastecimiento hídrico (IVH) en la cuanta del río Guayuriba en condiciones secas*



*Nota.* Tomado de: POMCA Río Guayuriba Actualización Capítulo 9 – Hidrología, oferta y demanda de agua (p. 199), Corpoguavio, CAR, Cormacarena, Corporinoquia & UTS, (2018).

En cuanto a las microcuencas abastecedoras, según los resultados reportados en el POMCA del río Guayuriba, se establece que en términos generales los afluentes directos del río presentan una vulnerabilidad baja, incluso en época seca. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, la mayoría de las cuencas muestran una vulnerabilidad media, lo que indica una regulación insuficiente. Aquellas cuencas que presentan valores altos de vulnerabilidad tienen una demanda mayor debido a concesiones, aunque es importante mencionar que estos valores altos no llegan a ser demasiado elevados (Corpoguavio et al., 2018).

La precipitación varía entre los 2.400 mm/año en el sector bajo y 5.000 mm/año en la zona alta del área de estudio, mientras que la humedad relativa fluctúa entre el 78% y el 86% (Trujillo et al., 2015). En la zona alta de la cuenca, las comunidades se encuentran dispersas en el territorio y utilizan la captación de nacederos como sistema de abastecimiento de agua. La disposición de aguas residuales domésticas (ARD) se realiza en campo abierto, en esta zona, las comunidades no

informan problemas por escasez de agua debido a la abundancia del recurso hídrico (Delgado et al., 2016).

En la zona media, se encuentran asentamientos de población dispersa y aglomerada, siendo la captación por aljibe el sistema más utilizado. En cuanto a la disposición de las ARD, se identifican tres alternativas: pozos sépticos, mixta a pozo séptico (aguas negras) y a campo abierto (aguas grises), y a fuente hídrica. A partir de esta zona, las comunidades experimentan problemas de escasez del recurso debido a los diversos usos del agua, entre los que destacan los usos industriales, agrícolas y turísticos (Delgado et al., 2016).

Finalmente, en la zona baja, en donde las comunidades se encuentran aglomeradas, el sistema principal de captación de agua es mediante acueductos comunitarios, y la disposición de ARD más utilizada es el alcantarillado comunitario, seguido de separación mixta y, por último, la disposición directa en fuentes hídricas. En esta zona particular de la cuenca, las poblaciones experimentan problemas por escasez de agua durante la época seca (Delgado et al., 2016).

De acuerdo con el estudio realizado por Delgado et al. (2016), el volumen de agua requerido por la población de la cuenca del río Guayuriba es de 60.325 m<sup>3</sup>/año. Además, se identifica que esta cuenca abastece a la población del área urbana del municipio de Acacías (ubicada en una cuenca vecina) mediante un trasvase de 6.324.480 m<sup>3</sup>/año, captado de la zona alta de la cuenca, donde el recurso es abundante, superando ampliamente los requerimientos de la población total que habita la cuenca.

### ***5.3.16 Partes Interesadas (Stakeholders)***

En el contexto de un proyecto, los stakeholders son todas aquellas personas, grupos o instituciones que están directa o indirectamente involucrados en el proyecto, y que pueden verse afectados o afectar sus actividades, decisiones y resultados. Con el objetivo de identificar los actores relevantes para este proyecto, se presenta un análisis de los stakeholders.

Específicamente, se destaca el tramo 1 de la cuenca del río Guayuriba como una zona de gran interés para el desarrollo de este proyecto, debido a que en esta área se registra la mayor demanda hídrica por parte del sector agrícola. Considerando esta información, se procede a caracterizar los grupos o actores relevantes para la ejecución de este proyecto.

- **Sector Palmicultor**

El cultivo de palma de aceite o palma africana (*Elaeis guineensis Jacq*) es una excelente opción para las tierras bajas en las regiones tropicales. Además, representa una alternativa con excelentes perspectivas a futuro debido a su alta rentabilidad. A partir de la palma se elaboran diversos productos industriales como: detergentes, jabones, cosméticos, entre otros. También genera un aporte importante a la medicina, permitiendo la fabricación de productos a base de origen vegetal, lo que disminuye en gran parte problemas de salud en la población en general; sin dejar de lado que una de sus aplicaciones más importantes es el uso como materia prima para la producción de biocombustibles como el biodiésel (Corpoguavio et al., 2018).

Según el Mapa de Cobertura y Uso del Suelo elaborado por el ISD (Instituto para la Sostenibilidad del Desarrollo) a través del Contrato de Cooperación Científica 28208026 de 2008, en la cuenca del río Guayuriba se registraron 8.650 hectáreas de palma aceitera en el año, lo que equivale al 7,63% del total de la cuenca. A continuación, se muestra la tabla con los datos reportados:

**Tabla 13**

*Área sembrada de Palma africana en la cuenca del río Guayuriba*

<b>Municipio</b>	<b>Vereda</b>	<b>Área [ha]</b>
Villavicencio	Arrayanes	7,207
	La vigía	30,423
	Venegas del Guayuriba	69,040
	<b>Total</b>	<b>106,671</b>
Acacias	Sardinata	160,030
	San Cayetano	627,335
	San José de las Palomas	1.830,385
	<b>Total</b>	<b>2.617,750</b>



Tabla 13 (Continuación)

	Palomas	539,970
San Carlos de Guaroa	Pesqueros	2.472,807
	Palmeras	2.222,913
	Pajure	204,328
	<b>Total</b>	<b>5.440,018</b>
Puerto López	Bocas del Guayuriba	485,961
<b>TOTAL</b>		<b>8.650,400</b>

*Nota.* Adaptado de: Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica (POMCH) del Río Guayuriba- Villavicencio. ISD – CORMACARENA, (2010).

En la tabla 13 se evidencia que la vereda con mayor número de hectáreas (2.472) sembradas con Palma Africana es Pesqueros y que en segundo lugar se encuentra Palmeras con 2.222 hectáreas sembradas. Esto posiciona al municipio de San Carlos de Guaroa como el principal productor de palma aceitera en la cuenca. A continuación, se presenta una tabla que registra los predios que demandan agua para el riego de cultivos de palma.

**Tabla 14**

*Predios que requieren de riego para el cultivo de palma de aceite en la cuenca del río Guayuriba*

Nombre del Predio	Municipio	Vereda
Palmeras la Cabaña	San Carlos de Guaroa	Palomas
Palmares Borrego	San Carlos de Guaroa	San José de las Palomas
La Florencia	San Carlos de Guaroa	Palmeras
Morichito	San Carlos de Guaroa	Palmeras
Morichal	San Carlos de Guaroa	Palmeras
La María	San Carlos de Guaroa	Palmeras
Aceites Manuelita S.A.	San Carlos de Guaroa	San José de las Palomas
GLOSHI SCS	San Carlos de Guaroa	Palmeras
Finca las Animas	Puerto López	Bocas del Guayuriba

*Nota.* Se especifica el nombre de los predios que requieren agua para el riego de cultivos de palma de aceite, así como el municipio y vereda donde se encuentran localizados. Adaptado de: Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica (POMCH) del Río Guayuriba. Villavicencio. ISD – CORMACARENA, (2010).

- *Sector Arrocerero:*

Para más de la mitad de la población mundial el arroz es el alimento básico, aunque es el más importante a nivel mundial si se considera la extensión de la superficie en que se cultiva y la cantidad de empleo que proporciona. Según el Mapa de Cobertura y Uso Actual del Suelo de la cuenca del río Guayuriba, a nivel local, el cultivo de arroz ocupa un área de 17.868 hectáreas, correspondientes al 15,78% de las tierras dedicadas a la agricultura comercial en relación a la cuenca (ISD & CORMACARENA, 2010). Este cultivo se concentra principalmente en la zona media- baja de la cuenca (Tramo 1) en las siguientes veredas:

**Tabla 15**

*Área sembrada de arroz en la cuenca del río Guayuriba*

<b>Municipio</b>	<b>Vereda</b>	<b>Área [ha]</b>
Acacias	San Cayetano	203,404
	San José de las Palomas	1.012,435
	<b>Total</b>	<b>1.215,840</b>
Villavicencio	Río Negrito	459,563
	El Cocuy	973,193
	La Vigía	438,562
	Vegas del Guayuriba	1.008,627
	Rincón de Pompeya	4.577,049
	Santa Rosa	387,087
	Arrayanes	3.855,165
	Puerto Tembleque	1.403,527
	Santa Helena Baja	9,619
	<b>Total</b>	<b>13.112,392</b>
San Carlos de Guaroa	Palomas	252,154
	Pesqueros	1.972,059
	Palmeras	384,094
	Pajure	752,709
<b>Total</b>	<b>3.361,016</b>	
Puerto López	Bocas del Guayuriba	179,342
<b>TOTAL</b>		<b>17.868,59</b>

*Nota.* Adaptado de: Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica (POMCH) del Río Guayuriba. Villavicencio. ISD – CORMACARENA, (2010).

Según lo evidenciado en la tabla 15 se puede establecer que el cultivo de arroz se concentra en el municipio de Villavicencio, en el cual se encuentran 13.112 hectáreas sembradas aportando un 73% del total de las hectáreas sembradas con arroz.

A continuación, se presenta una tabla que registra los predios que demandan agua para el riego de cultivos de arroz.

**Tabla 16**

*Predios que requieren de riego para el cultivo de arroz en la cuenca del río Guayuriba*

Nombre del Predio	Municipio	Vereda
San Juan	San Carlos de Guaroa	Palmeras
Grovilandia y Amaral	San Carlos de Guaroa	Palmeras
El Naranjal	San Carlos de Guaroa	Palmeras
GLOSHI SCS	San Carlos de Guaroa	Palmeras
Mandarinos	San Carlos de Guaroa	Palmeras
Finca Matecoco	San Carlos de Guaroa	Palmeras

*Nota.* Adaptado de: Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica (POMCH) del Río Guayuriba. Villavicencio. ISD – CORMACARENA, (2010).

- **Industria Ganadera (Bovina):**

En el departamento del Meta, la actividad pecuaria está conformada por diferentes sistemas productivos, como ganadería, porcicultura, avicultura y piscicultura. Sin embargo, la actividad ganadera destaca por sus extensas áreas de pastoreo, donde se encuentran cientos de cabezas de ganado bovino.

En el primer semestre del año 2009, la vereda Pompeya (que incluye Alto de Pompeya y Rincón de Pompeya), ubicada en el municipio de Villavicencio, fue la que presentó la mayor producción bovina, registrando 8.725 cabezas de ganado. En segundo lugar, se encontraba la vereda Palmeras, ubicada en el municipio de San Carlos de Guaroa, con un registro de 6.598 cabezas de ganado. A

continuación, se muestra una tabla que lista las veredas con producción bovina en la cuenca del río Guayuriba (FEDEGAN, 2009).

**Tabla 17**

*Municipios y veredas con producción bovina en la zona de influencia del río Guayuriba (Tramo 1)*

<b>Municipio</b>	<b>Vereda</b>	<b>Cabezas de Gando</b>
Acacias	El Rosario	1.539
	Las Margaritas	952
	San Cayetano	1.806
	San José de las Palomas	2.542
	<b>Total</b>	<b>6.839</b>
Villavicencio	Santa Rosa	6.180
	Santa Helena	2.846
	Vegas del Guayuriba	775
	Cocuy	2.805
	Río Negrito	2.251
	La Vigía	2.232
	Rincón de Pompeya	8.725
	Arrayanes	371
<b>Total</b>	<b>26.185</b>	
San Carlos de Guaroa	Palmeras	6.598
	Pajuare	3.997
	<b>Total</b>	<b>10.595</b>
Puerto López	Bocas del Guayuriba	1.684
<b>Total, Cabezas De Ganado</b>		<b>45.303</b>

*Nota.* Adaptado de: Primer Ciclo de Vacunación, FEDEGAN, (2009).

Según la Federación Nacional de Ganaderos (FEDEGAN), en los municipios de influencia del río Guayuriba y en general en el departamento del Meta, se utiliza comúnmente ganado bovino de raza cebú; practicándose en su mayoría la ganadería extensiva (pastoreo), seguida del sobrepastoreo. En esta zona, se cría principalmente ganado en pie de cría y de doble propósito, es decir, se enfoca en la producción de carne y leche.

- *Centros Urbanos/Comunidades:*

Según el informe publicado por Ecopetrol, el ICAOC y la Universidad de los Llanos en su estudio titulado “La gente de la cuenca del Río Guayuriba”, la población total de la cuenca en el año 2015 fue de 13.132 habitantes. De esta cifra, aproximadamente el 44%, es decir, alrededor 5.768 personas, se encuentran ubicadas en la cuenca alta del río Guayuriba, que corresponde a la zona predominante de la cordillera Oriental y tiene una extensión mayor que las cuencas media y baja. Las actividades económicas principales en esta área son los cultivos de granadilla, tomate de árbol, granjas avícolas y piscicultura.

En la cuenca alta se encuentran ubicadas las veredas: Mesa Grande, Vanguardia, Conucos, San Antonio, Chirajara, Susumuco, Servita, Líbano, Laberinto, Los Pinos, Casera de Teja, Venecia, Lomas de San Juan, San Miguel, Pipiral, Buena Vista, El Carmen, Samaria, San Juan de Dios, Cornetales, La Cumbre, Brisas del Guayuriba, Concepción Baja, Portachuelo, Vista Hermosa, Manzanares, San Cristóbal, Loma del Pañuelo, San Pablo, La Pradera, Alto Acacias, Las Blancas, El Diamante y Sardineta (Ecopetrol et al., 2015).

La cuenca media se encuentra ubicada en la llanura orinoquense, abarca los municipios de Acacias y Villavicencio, y está compuesta por ocho veredas: El Rosario, Río Negrito, Las Margaritas, El Cocuy, San Cayetano, La Vigía del Guayuriba, Vegas de Guayuriba y San José de las Palomas. En esta zona se encuentra aproximadamente el 19,52% de la población total de la cuenca, lo que equivale a unos 2.564 habitantes. En términos de actividades económicas, el 60% de las veredas se dedican principalmente actividad agropecuaria, lo cual representa el indicador más alto. La segunda actividad predominante es la agricultura, que ocupa el 2% de las veredas, mientras que explotación petrolera tiene una influencia en el 1% de las veredas que conforman la cuenca media. En las veredas San Cayetano y Las Margaritas, los cultivos de palma africana son predominantes, y las empresas del sector palmicultor son las principales fuentes de empleo. En la vereda La Vigía del Guayuriba, el cultivo de arroz es el más común, siendo Ecopetrol la fuente principal de empleo seguido de las empresas del sector turístico. En cuanto al número de habitantes la vereda Vegas del Guayuriba, que aloja el 16% de la población (42 personas), es la segunda vereda más poblada, debido a la migración generada por las oportunidades laborales que ofrecen empresas como trituradoras, CIAT (Centro Internacional de Agricultura), Ecopetrol, Corpoica y el turismo informal en los balnearios del lugar (Ecopetrol et al., 2015).

La cuenca baja está habitada por alrededor de 4.800 personas, lo que representa el 36,55% de la población total de la cuenca. Está compuesta por las siguientes veredas: Rincón de Pompeya, Pesqueros, Arrayanes, Palmarito, Puerto tembleque, Palmeras, Bocas del Guayuriba y Pajuare. La vereda más poblada de esta cuenca es Rincón de Pompeya, con el 41% de la población. Esto se debe su ubicación en la zona de influencia directa del complejo petrolero Apiay, propiedad de Ecopetrol, lo cual ha motivado la llegada de personas ante la expectativa de trabajo que genera la industria petrolera (Ecopetrol et al., 2015).

La segunda vereda más poblada de la cuenca es Palmeras, que alberga aproximadamente el 10% de la población total. Esta vereda es un asentamiento conformado por personas que llegaron a trabajar en las grandes empresas del sector palmero, siendo una de las principales Aceites Manuelita S.A (Ecopetrol et al., 2015).

- ***Entidades Gubernamentales:***

Las entidades gubernamentales desempeñan un papel fundamental como stakeholders, pues están directamente involucradas en el proyecto. En primer lugar, las entidades gubernamentales a nivel local, como las alcaldías de Acacias, Villavicencio, San Carlos de Guaroa y Puerto López, y las entidades ambientales como Corpoguavio, CORMACARENA y Corporinoquia, son responsables de la regulación y supervisión de los aspectos ambientales relacionados con la cuenca del río Guayuriba. Por lo tanto, es crucial cumplir con los estándares y normativas establecidas por las mismas. Además, es indispensable tener acceso a la información y documentos de su repositorio que permiten conocer el estado de la cuenca y su actividad socioeconómica.

A nivel regional, entidades como el gobierno del departamento del Meta y las corporaciones autónomas regionales (CAR) desempeñan un papel relevante. Estas entidades proporcionaron documentos que definen políticas y estrategias para la gestión sostenible del agua y promueven el reúso en el sector petrolero.

A nivel nacional, entidades como el Ministerio de Ambiente (Minambiente), el cual es responsable de formular y aplicar políticas y regulaciones relacionadas con la protección y gestión

del medio ambiente, incluido el registro hídrico; Ministerio de Agricultura, que tiene competencias en la gestión de recursos hídricos agrícolas y promueve prácticas de riego sostenible; la Autoridad Nacional del Agua (ANA), responsable de la gestión integral de los recursos hídricos a nivel nacional; Instituto Nacional de Recursos Hídricos (INRH), el cual está encargado de estudiar, proyectar y programar todas las obras hidráulicas y energéticas necesarias para el desarrollo integral de las cuencas hidrográficas y la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA) encargada de garantizar que los proyectos, obras o actividades sujetos a licenciamiento, permiso o trámites cumplan con la normativa ambiental, contribuyendo al desarrollo sostenible del país.

- ***Organizaciones de Productores de Palma:***

Existen varias organizaciones de productores de palma de aceite que representan los intereses de los agricultores y promueven prácticas sostenibles en la industria. Para el desarrollo de este proyecto, es de especial interés la Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite (Fedepalma), debido a que es una entidad que agrupa a los cultivadores de palama de aceite en el país y promueve la investigación, desarrollo tecnológico, sostenibilidad y competitividad del sector de palma en Colombia.

- ***Industrias de la Región:***

La región del Meta se destaca por tener una amplia variedad de industrias en diferentes sectores económicos. Sin embargo, en el marco de este proyecto, se consideran Stakeholders las industrias palmicultoras que se ubican en la zona de evaluación del estudio, las cuales son: Aceites Cimarrones S.A.S, Aceites Manuelita S.A.S, Alianza de Humea S.A.S, Inversiones la Mejorana S.A.S, Oleaginosas Santana S.A.S, Palmeras del Llano S.A., Servicios de Maquila Agrícola de los llanos S.A.S, e Inversora la Paz S.A.S. (Fedepalma, 2022).

Por otro lado, Ecopetrol es la principal empresa estatal de petróleo y gas en Colombia, y uno de los actores más relevantes para este proyecto. Esto se debe a que la compañía es propietaria del campo petrolero Castilla la Nueva, y el reúso del agua de producción generada, permitiría a la empresa aumentar la producción de barriles de petróleo, superando las limitaciones de producción

ocasionadas por el volumen de agua máximo permitido de vertimiento estipulado en la Resolución No. 2-6.07.0904 de 2007, modificada y prorrogada por la Resoluciones No. PSGJ.1.2.6.010.2471 de 2010, PSGJ.1.2.6.011.1745 de 2011 y PSGJ.1.2.6.16.1012 de 2016.

### ***5.3.17 Proyección de la Huella Hídrica Azul por el cultivo de palma de Aceite en el Tramo 1 de la Cuenca del Río Guayuriba***

De acuerdo a un estudio de la huella hídrica realizado en el tramo 1 de la cuenca del río Guayuriba en promedio la HH azul para el cultivo de palma de aceite en el año 2013 fue de 9.030 m<sup>3</sup>/ha/año (Ada Tovar-Hernández et al., 2017) mientras que según el ENA 2014, este cultivo requiere en promedio consumos de 16.907 m<sup>3</sup>/ha/año (IDEAM, 2015). Cabe mencionar que la diferencia entre los datos reportados podría asociarse a que en el ENA se toman datos generales mientras que los datos utilizados en el primer estudio para la cuenta del río Guayuriba son específicos para cada una de las unidades de estudio e implican consumos puntuales de acuerdo a las condiciones edáficas, climáticas y prácticas culturales del cultivo en la zona de influencia, razón por lo cual en esta investigación se tomara el consumo reportado por Ada Tovar-Hernández et al (2017).

Ahora bien, estudios demuestran que existe una relación directa del agua con la productividad de un cultivo de palma de aceite, con esto en mente según la demanda hídrica se determina que en promedio el requerimiento óptimo es de 1.700 a 2.000 milímetros (mm) de precipitación (HH Verde) por año con un promedio de 150 a 200 mm por mes. La acumulación de un déficit hídrico puede disminuir la producción de manera significativa, por lo que la implementación de un sistema de riego ayuda a reducir el impacto en la productividad, suministro que dependerá específicamente de las fuentes de agua superficial o subterránea (Juan & Sánchez, 2020)

Lo anterior se expone, ya que, se entiende que la demanda de agua no puede ser suplida por las precipitaciones y es necesario equilibrarla con la integración de un sistema de riego cuyo suministro serán las fuentes de agua superficial y subterránea. De esto se concluye que la demanda de agua superficial medida por hectárea estará ligada directamente a las condiciones climáticas de la zona donde se encuentre ubicado el cultivo.



En este apartado se quiere determinar cuál fue la HH azul del cultivo de aceite de palma para el año 2020 en la zona de influencia, para este fin se desarrolló el siguiente proceso: con base a la tasa de crecimiento anual del cultivo de palma que es del 4,52% equivalente aproximadamente a 200 hectáreas por año (Rojas, 2016) y a la información expuesta anteriormente se establece que para el año 2020 la HH azul por hectárea será mayor a la del año 2013 que es igual a 9.030 m<sup>3</sup>/ha/año.

Se puede proyectar que este consumo es mayor debido a que depende de las condiciones de precipitación y según la bibliografía consultada acerca del cambio climático, las precipitaciones pueden tener una variación que tiende a la baja del 2,5% cada década (OBSERVATORIO PIRENAICO DEL CAMBIO CLIMÁTICO, 2020), por lo tanto, se establece un requerimiento mayor de agua azul para el año 2020 que corresponde al agua necesaria para suplir ese 2,5% menos en la precipitación (HH Verde) equivalente a 225,75 m<sup>3</sup>/ha/año. Según esta variación de las precipitaciones se calcula una HH Azul en el año 2020 de 9.255,75 m<sup>3</sup>/ha/año.

Una vez se establece este consumo, según la información suministrada en la tabla 2 se conoce que el área de cultivo de aceite de palma en la zona de estudio corresponde a 5.972,06 Ha en el 2020. Finalmente, a partir de estos dos datos se puede concluir que en el 2020 la HH azul del cultivo de aceite de palma fue de 55.275.894,35 m<sup>3</sup>/año.

**Tabla 18**

*H Azul del cultivo de palma de aceite en la zona de interés para en el año 2013 y 2020*

<b>Palma de aceite</b>				
<b>Año 2013</b>		<b>Año 2020</b>		
HH Azul [m <sup>3</sup> /año]	HH Azul [m <sup>3</sup> /Ha/año]	HH Azul [m <sup>3</sup> /Ha/año]	Área [Ha]	HH Azul [m <sup>3</sup> /año]
41.541.504	9.030	9.255,75	5.972,06	55.275.894,35

**Nota.** El cálculo de la HH Azul para el año 2020 se realizó con base a los datos reportados en el año 2023 en el estudio titulado “Evaluación de la sostenibilidad de los cultivos de arroz y palma de aceite en la cuenca del Río Guayuriba (Meta, Colombia)”.

## **5.4 Selección de Un Tratamiento Para el Aprovechamiento de Aguas de Producción del Campo Castilla la Nueva**

El objetivo de esta sección es conocer las posibles alternativas para tratar el agua de producción generada en el campo petrolero Castilla la Nueva para su posterior reúso en el sector agrícola, más específicamente en el cultivo de palma de aceite. Para seleccionar la mejor alternativa, se utilizará una metodología de priorización que será evaluada por un panel de expertos. Antes de establecer las posibles alternativas, es importante tener en cuenta dos aspectos fundamentales. En primer lugar, se debe determinar el volumen de agua de producción a tratar. En segundo lugar, es necesario analizar las características fisicoquímicas del agua, pues estas determinaran el tipo de proceso y tecnología que se debe implementar. A continuación, se abordarán estos aspectos.

### **5.4.1 Cálculo del volumen de agua a tratar**

Para calcular cual es el volumen de agua a tratar se tuvieron en cuenta dos variables: la oferta de agua de producción del Campo petrolero Castilla la Nueva y la demanda de agua superficial de los cultivos de palma de aceite en la zona de influencia, cabe mencionar que en este estudio se denomina oferta de agua de producción a aquella agua de producción del campo petrolero Castilla la Nueva cuya disposición final es el vertimiento.

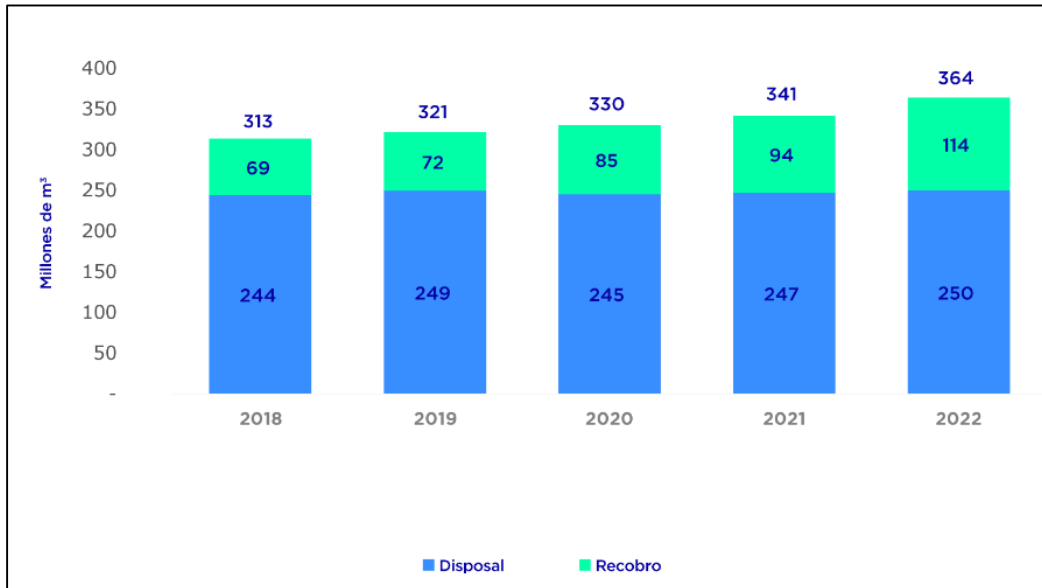
En cuanto a la primera variable para el campo Petrolero Castilla la Nueva se estimó una producción de 1.040.000 BWPD (Barriles de agua por día) en el año 2019 (Gil & Mendoza, 2019), sin embargo, se debe tener en cuenta que Ecopetrol acorde a su lineamiento con la eficiencia en el manejo del agua a implementado diferentes alternativas para la disposición del agua de producción destinándose de forma global así: 54% disposición final (Disposal), 28% a reutilización, 17% vertimiento y 1% a reúso, (Ecopetrol, 2023) por lo que el valor mencionado anteriormente no corresponde a la oferta de agua de producción del campo.

Adicionalmente, es necesario destacar que en lo referente a la reinyección de agua de producción para el año 2022 en Ecopetrol en total se reinyectaron 363,86 millones de m<sup>3</sup> de aguas de producción, valor equivalente al 84% del total de agua producidas. Para disposición final

(Disposal) se reinyectaron 249,52 millones de m<sup>3</sup> de agua, mientras que para recobro se reinyectaron 114,34 millones de m<sup>3</sup> (Ecopetrol, 2023).

**Figura 17**

*Reinyección de aguas de producción en Ecopetrol*



*Nota.* Eficiencia operativa en el manejo del agua., Ecopetrol, (2023).

En lo referente específicamente al campo Castilla de acuerdo con los permisos de vertimiento otorgados por Cormacarena a este, según la Resolución No. 2-6.07.0904 de 2007, modificada y prorrogada por las Resoluciones No. PSGJ.1.2.6.010.2471 de 2010, PSGJ.1.2.6.011.1745 de 2011 y PSGJ.1.2.6.16.1012 de 2016; el permiso de vertimiento de las aguas provenientes de la Estación Acacias a la fuente hídrica denominada río Guayuriba por la línea de 36". Coordenadas: E 1064560 N 933555 corresponde a un caudal máximo permitido de: 850.000 Bls/día – 1,564 L/s, norma vigente hasta el 5 de junio del 2022 (RESOLUCIÓN 00916, 2016).

Ahora bien, se debe tener en cuenta que esos 850.000 Bls/día equivalen tanto a agua de producción como a aguas residuales, aportando respectivamente cada una 93% y 7% del total de los efluentes (Ecopetrol, 2022); por lo cual se establece que en el campo petrolero Castilla la Nueva se vierten 790.500 BWPD siendo este valor igual a la oferta de agua de producción del campo Castilla la Nueva.

Por otro lado, según los valores presentados en la tabla 18 se determinó que la HH azul del cultivo de aceite de palma fue de 55.275.894,35 m<sup>3</sup>/año en el 2020 por lo que se establece que la demanda de agua de los cultivos de palma de aceite es igual a 952,563,67 Bls/día. Finalmente, según los valores calculados para las dos variables se concluye que de acuerdo con la oferta en primer lugar se puede asumir máximo el 82% de la demanda de agua de los cultivos de palma de aceite en la zona y en segundo lugar se establece que el volumen máximo de agua de producción a tratar será de 790.500 Bls/día.

En este punto es importante destacar que cualquier proceso de tratamiento propuesto tendrá como producto agua permeada por lo cual este efluente debe recircularse con aguas de producción obtenidas después del proceso de pretratamiento para la reducción de hidrocarburos totales con el fin de cumplir con los requerimientos de calidad del agua de riego para uso agrícola en cuanto a la adsorción de sodio (RAS).

Los valores asignados a cada variable y el volumen de agua de producción a tratar se muestran en la siguiente tabla.

**Tabla 19**

*Variables para el cálculo del volumen de agua de producción a tratar y valores asignados*

<b>Variable</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Oferta de agua de producción campo petrolero castilla la nueva	790.500	Bls/día
Demanda de agua superficial de los cultivos de palma de aceite	952.563,67	Bls/día
Volumen de agua de producción a tratar	790.500	Bls/día

*Nota. Variables para el cálculo del volumen de agua de producción a tratar y valores asignados*

#### **5.4.2 Caracterización del Agua de Producción**

- **Agua de Producción**

Como se mencionó anteriormente, el término "agua de producción" se refiere al agua que se extrae en la superficie durante la producción de pozos de hidrocarburos. A continuación, se presenta la caracterización fisicoquímica del agua de producción del campo petrolero Castilla la Nueva.

**Tabla 20**

*Composición de aguas de producción no tratadas en el campo Castilla*

Componente	Unidad	Estación Castilla II	Estación Acacias	Resolución 631 de 2015 (Art. 5,6,7 y 11)	Cumplimiento
pH	Unidades de pH	7,25	6,9	6,00 - 9,00	Cumple
Conductividad	µs/Cm	813	409	NS	-
Coliformes Termotolerantes	NMP/100 mL	4,00E+02	1,06E+04	NS	-
Fenoles Totales	mg/L	N/A	N/A	0,2	-
Hidrocarburos	mg/L	<0,41	<0,41	10	Cumple
Cianuro Libre	mg CN <sup>-</sup> /L	<0,010	<0,10	1,00	Cumple
Cloruros	mg CN <sup>-</sup> /L	192	81,5	1200	Cumple
Fluoruros	mg F <sup>-</sup> /L	NS	NS	Análisis y Reporte	-
Sulfatos	mg SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> /L	8,50	7,94	300	Cumple
Aluminio	mg Al/L	0,0255	0,104	NS	-
Berilio	mg Be/L	<5,83	<5,83	NS	-
Cadmio	mg Cd/L	<0,704	<0,704	0,10	Cumple
Cinc	mg Zn/L	<13,1	<13,1	3,00	No Cumple
Cobalto	mg Co/L	<1,46	<1,46	NS	-
Cobre	mg Cu/L	<0,430	<0,430	1,00	Cumple
Cromo	mg Cr/L	<3,07	<3,07	0,50	No Cumple
Hierro	mg Fe/L	2,451	1,432	3,00	No Cumple
Mercurio	mg Hg/L	<0,399	<0,399	0,01	No Cumple
Litio	mg Li/L	219	171	NS	-
Manganeso	mg Mn/L	0,117	0,0858	NS	-
Molibdeno	mg Mo/L	<1,65	<1,91	NS	-
Níquel	mg Ni/L	<2,54	<2,54	0,50	No Cumple
Plomo	mg Pb/L	<0,822	<0,822	0,20	No Cumple
Sodio	mg Na/L	108	58,14	NS	-
Vanadio	mg V/L	0,753	0,602	1,00	Cumple
Arsénico	mg As/L	1,58	1,68	0,10	No Cumple
Boro	mg B/L	197	142	NS	-
Selenio	mg Se/L	<15,4	<15,4	0,20	No Cumple
Cloro Total Residual	mg Cl <sub>2</sub> /L	N/A	N/A	NS	-
Nitratos (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ·N)	mg/L	<0,11	<0,11	Análisis y Reporte	-

**Nota.** Donde NA: No Aplica y NS: No solicitado, con color amarillo se resaltan los parámetros que están fuera del límite máximo establecido en la normativa. Adaptado de: Autoridad Ambiental en el Departamento del meta, CORMACARENA, Expediente 97-0023, pág. 15-19 ,2018.

De acuerdo con la información presentada en la tabla 20, se evidencia que el agua de producción sin tratar del campo petrolero Castilla la Nueva incumple ocho parámetros según lo establecido en la resolución 631 de 2015, “por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones”.

Por lo anterior, Ecopetrol implementó un Sistema de Tratamiento de Aguas de Producción (STAP) que permite que el agua producida se encuentre dentro de los parámetros y límites máximos permisibles para su vertimiento.

- ***Agua de Producción Tratada:***

El agua de producción generada en los pozos petroleros se somete a tratamientos específicos con el objetivo de recuperar la mayor cantidad de sólidos importantes. Esto se hace para cumplir con los requisitos legales para su disposición y evitar cualquier tipo de afectación ambiental. Las técnicas de tratamiento del agua dependen de la composición, producción, ubicación, cantidad y disponibilidad de los recursos.

En Colombia, la mayor parte del tratamiento de agua residual de la industria petrolera se concentra en tratamientos primarios como desengrasado, remoción de compuestos orgánicos y evaporación. Ecopetrol cuenta con un sistema de tratamiento de aguas de producción en la estación de interés, Campo Castilla la Nueva, que funciona bajo la regulación de la Corporación para el Desarrollo Sostenible del Área de Manejo Especial (Cormacarena) mediante la Resolución 1012 del año 2016 (Velásquez & Almansa, 2020).

Después de los procesos iniciales de separación de crudo y gas, el agua llega al STAP (Sistema de Tratamiento de Aguas de Producción) donde se realizan tres fases principales para recuperar los productos oleosos y sólidos. El tratamiento comienza en los separadores de grasas y aceites CPI, donde el agua pasa por celdas de flotación y burbujas de gas desplazando el crudo hacia la superficie para separarlo. Luego, el fluido pasa por unidades de filtración con cascarilla de nuez negra, que tiene propiedades oleofílicas y permite la filtración del agua de producción; finalmente

el fluido sobrenadante de los filtros se dirige a los decantadores horizontales o barcazas, mientras que el agua continúa su recorrido hacia las piscinas de aspersion y torres de enfriamiento, donde se regula la temperatura (Velásquez & Almansa, 2020).

Es importante resaltar que el diseño de dicho Sistema de Tratamiento de Aguas de Producción se planteó con la meta de cumplir la normativa establecida en la Resolución 631 de 2015. Ecopetrol, en su reporte del monitoreo al agua residual industrial de la estación Acacias y aguas superficiales del río Guayuriba del primer trimestre del año 2022 notifica que se cumplen los parámetros establecidos en la Resolución (Castañeda, 2022); pues se reportan los valores que se muestran en la tabla 21, donde también se encuentran los límites establecidos en dicha Resolución.

**Tabla 21**

*Propiedades fisicoquímicas del agua a la salida STAP de la Estación Acacias al Río Guayuriba (Km 22)*

N°.De Laboratorio		MIS75372		
Identificación	Salida del STAP estación Acacias al Río Guayuriba	Resolución 631 de 2015 (Art. 5,6,7 y 11)	Cumplimiento	
Fecha de Muestreo	18/02/2022			
Parámetro	Unidades	Resultado		
Acidez Total	mg CaCO <sub>3</sub> /*L	<5,00	Análisis y Reporte	-
Alcalinidad Total	mg CaCO <sub>3</sub> /L*	98,1	Análisis y Reporte	-
Aluminio Total	mg Al/L*	<1,0	N.R	-
Arsénico Total	mg Ar/L*	<0,00250	0,10	Cumple
Bario Total	mg Ba/L*	0,765	Análisis y Reporte	-
Berilio Total	mg Be/L*	<0,0250	N.R	-
Bicarbonatos	mg CaCO <sub>3</sub> /L*	98,1	N.R	-
Boro	mg B/L*	0,217	N.R	-
Cadmio Total E	mg Cd/L*	<0,000250	0,10	Cumple



Tabla 21(Continuación)

Nº. De Laboratorio		MIS75372		
Identificación		Salida del STAP estación Acacias al Río Guayuriba	Resolución 631 de 2015 (Art. 5,6,7 y 11)	Cumplimiento
Fecha de Muestreo		18/02/2022		
Parámetro	Unidades	Resultado		
Calcio Total	mg Ca/L*	10,4	N.R	-
Carbonato de sodio residual	N/A	1,14	N.R	-
Carbonatos	mg CaCO <sub>3</sub> /L*	<6,04	N.R	-
Cianuro total	mg CN <sup>-</sup> /L*	<0,0100	1,00	Cumple
Cloruros	mg Cl <sup>-</sup> /L*	73,0	1200	Cumple
Cobalto Total E	mg Co/L*	<0,00100	N.R	-
Cobre Total	mg Cu/L*	0,00355	1,00	Cumple
Coliformes Termo Tolerantes	NMP/100mL*	<1,0	N.R	-
Coliformes Totales	NMP/100mL*	95,9	N.R	-
Color Real	a (436nm)m <sup>-1</sup> *	0,324	Análisis y Reporte	-
Color Real	a (525nm)m <sup>-1</sup> *	0,256	Análisis y Reporte	-
Color Real	a (620nm)m <sup>-1</sup> *	0,228	Análisis y Reporte	-
Conductividad	in situ µS/cm*	456	N.R	-
Cromo Hexavalente	mg Cr <sup>+6</sup> /L*	<0,04	N.R	-
Cromo Total	mg Cr/L*	0,00150	0,50	Cumple
DBO5 (Demanda Bioquímica de Oxígeno)	mg O <sub>2</sub> /L*	7,43	60	Cumple
DQO	mg O <sub>2</sub> /L*	15,7	180	Cumple
Dureza Cálctica	mg CaCO <sub>3</sub> /L*	37,0	Análisis y Reporte	-
Dureza Total	mg/L*	44,5	Análisis y Reporte	-
Fenoles	mg fenol/L*	0,130	0,2	Cumple
Fluoruros	mg F <sup>-</sup> /L*	0,437	Análisis y Reporte	-
Fósforo Total	mg P/L*	<0,0700	Análisis y Reporte	-
Halógenos Absorbibles enlazados Orgánicamente	(AOX) mg/L*	0,08	Análisis y Reporte	-
Hierro Total	mg Fe/L*	<0,200	3,00	Cumple
Magnesio Total	mg Mg/L*	1,84	N.R	-

Tabla 21(Continuación)

N°.De Laboratorio		MIS75372		
Identificación		Salida del STAP estación Acacias al Río Guayuriba	Resolución 631 de 2015 (Art. 5,6,7 y 11)	Cumplimiento
Fecha de Muestreo		18/02/2022		
Parámetro	Unidades	Resultado		
Manganeso Total	mg Mn/L*	<0,100	N.R	-
Mercurio Total	mg Hg/L*	<0,00100	0,01	Cumple
Molibdeno Total	mg Mo/L*	<0,00500	N.R	-
Níquel Total	mg Ni/L*	<0,00100	0,50	Cumple
Nitratos	mg N-NO <sub>3</sub> /L*	0,571	Análisis y Reporte	-
Nitritos	mg N-NO <sub>2</sub> /L*	0,0441	N.R	-
Nitrógeno Amoniacal	mg NH <sub>3</sub> -N/L*	<1,00	Análisis y Reporte	-
Nitrógeno Total	mg N/L	<3,00	10,00	Cumple
Nitrógeno total Kjeldahl	mg N/L*	<3,00	N.R	-
Fosforo Reactivo Disuelto (Ortofosfato)	mg/L P-PO <sub>4</sub> *	<0,0700	Análisis y Reporte	-
Oxígeno Disuelto	in situ*	5,19	N.R	-
pH	in situ unidades*	6,99	6,00 - 9,00	Cumple
Plata Total	mg Ag/L*	<0,0500	Análisis y Reporte	-
Plomo Total	mg Pb/L*	0,00122	0,20	Cumple
Potasio Total	mg K/L*	6,21	N.R	-
PSI (Porcentaje de Sodio Intercambiable)	%	6,18	N.R	-
PSP	%	92,7	N.R	-
RAS (Relación de Absorción de Sodio)	N/A	3,50	N.R	-
Salinidad Efectiva	meq/L	2,19	N.R	-
Salinidad Potencial	meq/L	2,15	N.R	-
Selenio Total	mg Se/L*	<0,00250	0,20	Cumple
Sodio Total	mg Na/L*	46,6	N.R	-
Sólidos sedimentables	in situ mL/L*	<0,1	1,00	Cumple
Sólidos Suspendingos Totales	mg/L*	<10,0	50	Cumple
Sólidos Totales	mg/L*	322	N.R	-
Sulfatos	mg SO <sub>4</sub> <sup>-</sup> /L*	8,48	300	Cumple
Sulfuros	mg S <sub>2</sub> /L*	<1,00	1,00	Cumple

Tabla 21(Continuación)

N°.De Laboratorio		MIS75372		
Identificación	Salida del STAP estación Acacias al Río Guayuriba		Resolución 631 de 2015 (Art. 5,6,7 y 11)	Cumplimiento
Fecha de Muestreo	18/02/2022			
Parámetro	Unidades	Resultado		
Surfactantes: Aniónicos como SAAM	mg SAAM/L*	<0,500	Análisis y Reporte	-
Turbidez	NTU*	5,3	N.R	
Vanadio Total	mg V/L*	<0,0100	1,00	Cumple
Zinc Total	mg Zn/L*	<0,0500	3,00	Cumple
pH	Unidades**	6,99	6,00 - 9,00	Cumple
Conductividad	µS/cm**	456,3	N.R	-
Oxígeno Disuelto	mg/L**	5,19	N.R	-
Oxígeno Disuelto	%**	74,3	N.R	-
Temperatura Agua	°C**	30,5	<40°C	Cumple
Sólidos sedimentables	ml/L**	<0,1	1	Cumple
Aceites y grasas	mg/L**	4,56	15	Cumple
Hidrocarburos	mg/L**	2,68	10	Cumple
<b>Compuestos Fenólicos*</b>				
2,4-Diclorofenol	mg/L*	<0,002	N.R	-
2,4-Dinitrofenol	mg/L*	<0,002	N.R	-
4,6-Dinitro-2-Metilfenol (Dinitro-p-cresol)	mg/L*	<0,002	N.R	-
Dinoseb (6-sec-butil-2,4-dinitrofenol)	mg/L*	<0,002	N.R	-
2-clorofenol	mg/L*	<0,002	N.R	-
2,6-Diclorofenol	mg/L*	<0,002	N.R	-
2,4-Dimetilfenol	mg/L*	<0,002	N.R	-
2-Metilfenol (o-cresol)	mg/L*	<0,002	N.R	-
3+4-Metilfenol (m+p-cresol)	mg/L	<0,002	N.R	-
2-Nitrofenol	mg/L*	<0,002	N.R	-
4-Nitrofenol	mg/L*	<0,002	N.R	-
Pentaclorofenol	mg/L*	<0,002	N.R	-
Fenol	mg/L*	<0,002	N.R	-
2,3,4,6-Tetraclorofenol	mg/L*	<0,002	N.R	-
2,4,5-Triclorofenol	mg/L*	<0,002	N.R	-
2,4,6-Triclorofenol	mg/L*	<0,002	N.R	-
4-Cloro-3-Metilfenol	mg/L*	<0,002	N.R	-
<b>HAPs (Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos) *</b>				
Naftaleno	mg/L*	<0,002	0,01	Cumple
Acenafteno	mg/L*	<0,002	0,01	Cumple

Tabla 21(Continuación)

N°.De Laboratorio		MIS75372		
Identificación		Salida del STAP estación Acacias al Río Guayuriba	Resolución 631 de 2015 (Art. 5,6,7 y 11)	Cumplimiento
Fecha de Muestreo		18/02/2022		
Parámetro	Unidades	Resultado		
Acenaftileno	mg/L*	<0,002	0,01	Cumple
Antraceno	mg/L*	<0,002	0,01	Cumple
Benzo (a) antraceno	mg/L*	<0,002	0,01	Cumple
Benzo (a) pireno	mg/L*	<0,002	0,01	Cumple
Benzo (b) fluoranteno	mg/L*	<0,002	0,01	Cumple
Benzo (g,h,i) perileno	mg/L*	<0,002	0,01	Cumple
Criseno	mg/L*	<0,002	0,01	Cumple
Benzo (k) fluoranteno	mg/L*	<0,002	0,01	Cumple
Dibenzo (a,h) antraceno	mg/L*	<0,002	0,01	Cumple
Fluoranteno	mg/L*	<0,002	0,01	Cumple
Fluoreno	mg/L*	<0,002	0,01	Cumple
Indenol (1,2,3-cd) pireno	mg/L*	<0,002	0,01	Cumple
Fenantreno	mg/L*	<0,002	0,01	Cumple
Pireno	mg/L*	<0,002	0,01	Cumple
<b>Compuestos Orgánicos Volátiles (BTEX)*</b>				
Benceno	mg/L*	<0,0100	Análisis y Reporte	-
Tolueno	mg/L*	<0,0100	Análisis y Reporte	-
Etilbenceno	mg/L*	<0,0100	Análisis y Reporte	-
o-xileno	mg/L*	<0,0100	Análisis y Reporte	-
m+p-xileno	mg/L*	<0,0100	Análisis y Reporte	-

**Nota.** Se muestran los resultados in situ y de laboratorio realizados por CHEMILAB S.A.S.; los cuales fueron reportados por Ecopetrol. Los siguientes símbolos representan: \*Chemilab tiene estos parámetros acreditados mediante la Resolución 1618 del 23 de diciembre del 2021 del IDEAM, \*\* Los valores presentados corresponden al promedio de los datos registrados en las alícuotas, N.R. No Regulado por la norma de estudio y N.S. No Solicitado. Tomado de: Monitoreo agua residual industrial de la estación Acacias y aguas superficiales del río Guayuriba primer trimestre febrero 2022, Ecopetrol, (2022).

### 5.4.3 Requerimientos Legales Para las Agua de Reúso

En cuanto a los requerimientos legales para el reúso de aguas de producción en actividades agrícolas de acuerdo con el artículo 2.2.3.3.9.5 del decreto 1076 del 2015 se establecen algunos de los parámetros referentes para la destinación del recurso hídrico para uso agrícola evidenciados en la tabla 22 así:

**Tabla 22**

*Criterios de calidad para uso agrícola*

Referencia	Símbolo	Valor [mg/L]
Aluminio	Al	5,0
Arsénico	As	0,1
Berilio	Be	0,1
Cadmio	Cd	0,01
Cinc	Zn	2,0
Cobalto	Co	0,05
Cobre	Cu	0,2
Cromo	Cr+6	0,1
Flúor	F	1,0
Hierro	Fe	5,0
Litio	Li	2,5
Manganeso	Mn	0,2
Molibdeno	Mo	0,01
Níquel	Ni	0,2
pH	Unidades	4,5 – 9,0 unidades.
Plomo	Pb	5,0
Selenio	Se	0,02
Vanadio	V	0,1

*Nota.* Las unidades de los valores se expresan en miligramos por litro. Tomado de: Decreto 1076 de 2015 Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible - Gestor Normativo - Función Pública, Departamento Administrativo de la Función Pública, (2015). <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=78153>,

A continuación, se enlistan otros factores de calidad del agua que deben ser contemplados para su uso agrícola:

- El Boro deberá estar entre 0,3 y 4 mg/L dependiendo del tipo de suelo y cultivo
- El NMP de coliformes totales no debe exceder 5.000 cuando sea usado el recurso para riego de frutas que se consuman sin quitar la cáscara y hortalizas de tamaño corto

- El NMP de coliformes fecales no deberá exceder de 1000 cuando se use para el mismo fin del anterior literal
- Deberá medirse la conductividad
- Deberá medirse la relación de absorción de sodio (RAS)
- Deberá medirse el porcentaje de sodio posible (PSP)
- Deberá medirse la salinidad efectiva y potencial
- Deberá medirse el carbonato de sodio residual
- Deberán medirse los Radio nucleótidos
- Adicionalmente, se dan a conocer en la tabla 23 los valores máximos permisibles del agua residual presente en la resolución 1256 del 2021 aplicada al riego agrícola.

**Tabla 23**

*Criterios de calidad adicionales de aguas residuales para uso agrícola*

Variable	Unidad de medida	Valor límite Máximo permisible
Conductividad	µS/cm	1500
Fenoles Totales	mg/L	0,2
Hidrocarburos Totales	mg/L	1
Cianuro Libre	mg/L	0,2
Cloruros	mg/L	300
Fluoruros	mg/L	1
Sulfatos	mg/L	500
Mercurio	mg/L	0,001
Sodio	mg/L	200
Antimonio	mg/L	0,1
Cloro Total Residual (con mínimo 30 minutos de contacto)	mg/L	< 1
Nitratos	mg/L	11

*Nota.* Siendo los parámetros excluidos solo por las autoridades ambientales al momento de presentar la solicitud con balances de materia y la caracterización de las aguas residuales. Adaptado de: Resolución 1256 del 2021.

#### **5.4.4 Alternativas Para El Tratamiento del Agua de Producción del Campo Petrolero Castilla la Nueva**

Con base a la investigación realizada para la caracterización del agua de producción tratada en el campo petrolero Castilla la Nueva y la normativa establecida en Colombia para los parámetros de uso de aguas residuales en el sector agrícola, se ha construido la tabla 24. En esta tabla, se comparan las propiedades fisicoquímicas del agua de producción tratada del campo Castilla con los límites máximos permitidos según la normativa vigente. El objetivo principal de esta comparación es identificar aquellos parámetros que exceden los límites permitidos, pues este será el punto de partida para determinar las posibles alternativas de tratamiento del agua de producción.

**Tabla 24**

*Comparativo entre las propiedades fisicoquímicas del agua de producción tratada del campo petrolero Castilla la Nueva y el valor límite máximo permisible según la normativa vigente en Colombia*

Variable	Unidad de Medida	Valor Límite Máximo Permissible		Agua de Producción Tratada Campo Castilla
		Decreto 1076 de 2015	Resolución 1256 de 2021	
<b>Físicos</b>				
pH	Unidades de pH	4,5 - 9,0	-	6,99
Conductividad	µs/Cm	-	1500	456,3
<b>Químicos</b>				
Fenoles Totales	mg/L	-	0,2	<0,026
Hidrocarburos Totales	mg/L	-	1	2,68
<b>Iones</b>				
Cianuro Libre	mg CN <sup>-</sup> /L	-	0,2	<0,0100
Cloruros	mg Cl <sup>-</sup> /L	-	300	73
Fluoruros	mg F <sup>-</sup> /L	1	1	0,437
Sulfatos	mg SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> /L	-	500	8,48
<b>Metales</b>				
Aluminio	mg Al/L	5	-	<1,0
Berilio	mg Be/L	0,1	-	<0,0250
Cadmio	mg Cd/L	0,01	-	<0,000250
Cinc	mg Zn/L	2	-	<0,0500
Cobalto	mg Co/L	0,05	-	<0,00100
Cobre	mg Cu/L	0,2	-	0,00355
Cromo	mg Cr/L	0,1	-	0,00150
Hierro	mg Fe/L	5	-	3,00

Mercurio	mg Hg/L	-	0,001	<0,00100
Litio	mg Li/L	2,5	-	<0,15
Manganeso	mg Mn/L	0,2	-	<0,100
Molibdeno	mg Mo/L	0,01	-	<0,00500
Níquel	mg Ni/L	0,2	-	<0,00100
Plomo	mg Pb/L	5	-	0,00122
Sodio	mg Na/L	-	200	46,6
Antimonio	mg Sb/L	-	0,1	<0,00250
Vanadio	mg V/L	0,1	-	<0,0100
<b>Metaloides</b>				
Arsénico	mg As/L	0,1	-	<0,00250
Boro	mg B/L	-	0,3 - 4,0	0,217
<b>No Metales</b>				
Selenio	mg Se/L	0,02	-	<0,00250
<b>Otros parámetros</b>				
Cloro Total Residual (Con mínimo 30 minutos de contacto)	mg Cl <sub>2</sub> /L	-	Menor a 1,0	<0,2
Nitratos (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N)	mg/L	-	11	0,571

**Nota.** Con color azul se resaltan los parámetros del agua de producción tratada que se encuentran dentro de lo establecido en la normativa y con color amarillo se resaltan los parámetros que están fuera del límite máximo establecido en la normativa. Tomado de: Monitoreo agua residual industrial de la estación Acacias y aguas superficiales del río Guayuriba primer trimestre febrero 2022. Ecopetrol (2022). Decreto 1076 de 2015 & Resolución 1256 del 2021

De acuerdo con lo expuesto en la tabla 24, el agua de producción tratada del campo petrolero castilla no cumple con uno de los parámetros indicados en la normativa para el reúso en el sector agrícola. Este parámetro corresponde a los hidrocarburos totales, que deben tener un límite máximo de 1 mg/L según la norma, pero en el agua de producción tratada se encontró una concentración de 2,8 mg/L.

Además, es importante tener en cuenta otro parámetro relacionado con sólidos disueltos totales (SDT), debido a que esta variable es indispensable para clasificar la calidad del agua desde una perspectiva agrícola. Los SDT permitiendo determinar la salinidad del recurso hídrico, lo cual tendrá implicaciones y afectaciones sobre las condiciones normales para el riego del cultivo. En la



práctica, para manejar agua con elevadas concentraciones de sales, es necesario aumentar la frecuencia entre riegos e implementar un ligero excedente que ayude a remover el exceso de sales (Intagri, 2021).

Por lo tanto, es necesario que los SDT disminuyan de 322 mg/L (valor reportado por Ecopetrol para el agua de producción tratada en el campo petrolero Castilla) a 50 mg/L (valor reportado en la Resolución 632 de 2015). Esta reducción garantizará una calidad adecuada del agua para su uso en actividades agrícolas y evitará posibles problemas en el riego de los cultivos.

Dicho esto, se establece como meta de tratamiento los valores reportados en la siguiente tabla:

**Tabla 25**

*Parámetros fisicoquímicos para el agua de producción y sus valores establecidos como meta de tratamiento*

<b>Parámetro</b>	<b>Unidad de Medida</b>	<b>Salida del STAP estación Acacias al Río Guayuriba</b>	<b>Meta de tratamiento</b>
Hidrocarburos Totales	mg/L	2,68	1,0
Sólidos Disueltos Totales (SDT)	mg/L	322	50,0

*Nota. Parámetros fisicoquímicos para el agua de producción y sus valores establecidos como meta de tratamiento*

Los procesos para el tratamiento de agua de producción del sector petrolero tienen una configuración típica que se divide en tres fases: un tratamiento primario, el cual a su vez puede incluir dos etapas, separación primaria de aceite/agua donde en el caso del proceso llevado a cabo en la STAP del campo Castilla se hace uso de un interceptor de capa corrugada (CPI) y una separación secundaria de aceite/agua donde Ecopetrol emplea un proceso de flotación por gas disuelto (DGF). Posteriormente, se realiza un tratamiento secundario en el que se emplean filtros a base de cascarilla de nuez negra con propiedades oleofílicas, para luego ser enfriado (Velásquez & Almansa, 2020). Este proceso de tratamiento empleado en el campo petrolero Castilla permite obtener agua de muy buena calidad; sin embargo, no es suficiente para su reúso en el sector agrícola, puesto que se incumplen algunos de los parámetros como se muestra en la tabla 24. Por lo anterior, es necesario incluir un proceso terciario o de pulido que permita alcanzar al agua las propiedades necesarias.

En cuanto a la desalinización (Eliminación de sólidos disueltos), actualmente se emplean dos procesos basados en membranas y tecnologías térmicas. Las tecnologías de membranas incluyen electrodiálisis, electrodiálisis inversas, nanofiltración y osmosis inversa (Lenntech, 2022). En general, la Osmosis inversa es capaz de tratar aguas producidas hasta de 40 g/L de SDT (Sólidos disueltos totales), sin embargo, este proceso requiere altos niveles de energía y a niveles más bajos (entre 15 y 20 g/L de SDT) los costos son elevados. La recuperación de agua varía con la salinidad, oscilando entre un 30% y 60% para agua de mar (35 g/L) y entre un 60% a 85% de agua salobre (Igunnu & Chen, 2014). Los tratamientos con Osmosis inversa son eficaces para eliminar casi todos los contaminantes inorgánicos, incluidos los elementos radiactivos de origen natural; sin embargo, se requieren técnicas analíticas adicionales para eliminar algunos componentes orgánicos que permanecen en las aguas (Scanlon, Ikonnikova, et al., 2020).

Por otro lado, las tecnologías térmicas, como la destilación de efectos múltiples, compresión mecánica a vapor y Recompresión no dependen directamente de la salinidad, sin embargo, si es una variable que debe ser considerada. Las técnicas de destilación térmica implican calentamiento y evaporización de las aguas de alimentación, seguidas de la condensación del agua pura. La recuperación de agua oscila entre el 20% y 35% a través de la destilación de efectos múltiples y un 40% para compresión mecánica de vapor (Igunnu & Chen, 2014).

Estas bajas recuperaciones de agua resultan en grandes volúmenes de concentrados que necesitan ser dispuestos y, debido a la elevada temperatura, no requieren biocidas. La compresión mecánica de vapor se ha aplicado a aguas hasta con 300 g/L de sólidos totales y puede generar agua de alta calidad (Nasiri et al., 2017). La gestión de los sólidos suele ser un desafío, pero generalmente los sistemas diseñados para generar salmuera concentrada son los preferidos (GROUNDWATER, 2021). Es importante destacar que los enfoques térmicos tienen altos requerimientos de energía; por este motivo generalmente se usan donde se dispone de calor residual.

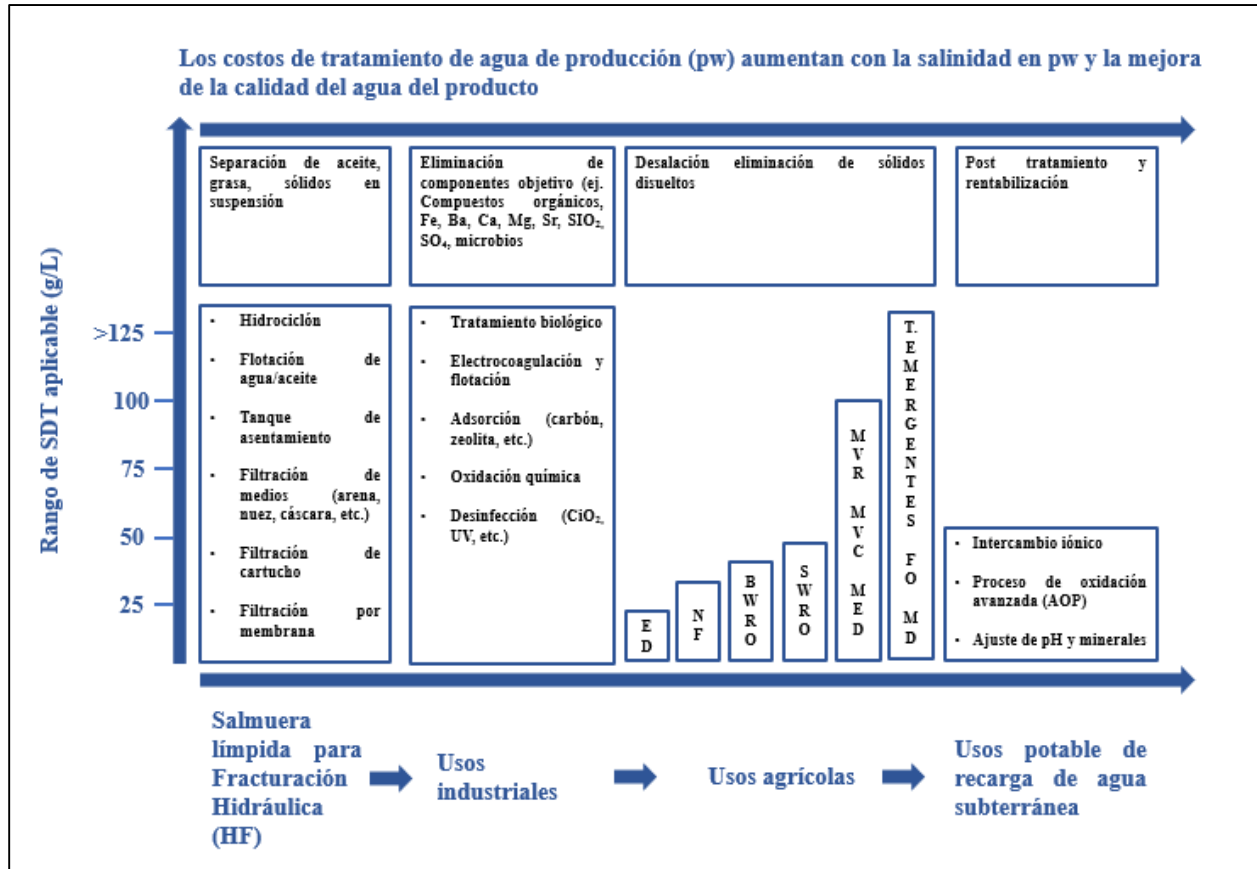
En la figura 18 se muestran los tratamientos recomendados en la literatura para el tratamiento de aguas de producción según los sólidos disueltos totales (SDT).

La destilación por membrana utiliza una fuente de calor para mejorar el transporte masivo a través de membranas, una de las ventajas de este enfoque es su capacidad para utilizar cualquier nivel de sólidos disueltos totales (SDT) en la solución de alimentación, adicionalmente se rechazan aproximadamente el 100% de solutos, incluidos Na, SiO<sub>2</sub>, B y los metales pesados. Adicionalmente, la recuperación de agua puede ser mejorada, cuando se combina con tecnologías cristalizadoras. Un estudio basado en el tratamiento de agua de producción con 250 g/L de sólidos disueltos totales (SDT) mostró que este enfoque tiene un costo competitivo (Macedonio et al., 2014).

La ósmosis directa es un proceso de membrana impulsado por presión motriz (Hickenbottom et al., 2013). En este proceso, el agua se difunde de una corriente de alimentación con baja presión osmótica a través de una membrana semipermeable hasta una solución de extracción con alta presión osmótica. Una de las ventajas de este proceso es que no se requiere alta presión externa.

**Figura 18**

*Tecnologías de tratamiento para aguas de producción*



*Nota.* Donde: SDT: Sólidos disueltos totales; ED: electrodiálisis; NF: Nanofiltración; BWRO: Ósmosis inversa de agua salobre; SWRO: Ósmosis inversa de agua de mar; MED: Destilación de múltiples efectos; MVC: Compresión mecánica de vapor; MVR: Recompresión mecánica de vapor; tecnologías emergentes que incluyen: FO: Ósmosis directa; MD: Destilación por membrana. AOP: Proceso de oxidación avanzada. Adaptado de: Can we beneficially reuse produced water from oil and gas extraction in the U.S? (2020). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137085>

Además de las sales, aguas producidas contienen compuestos orgánicos complejos, como aceites, grasas, BTEX (benceno, tolueno, etilbenceno, xileno) y HAP (hidrocarburos aromáticos policíclicos), biopolímeros, y sustancias húmicas (Danforth et al., 2020) & (Khan et al., 2016). La materia orgánica debe eliminarse primero para minimizar el ensuciamiento de membranas u otras superficies, y para prevenir impactos en el medio ambiente durante la eliminación o reutilización. Los procesos biológicos han sido exitosos para remediar el agua contaminada por hidrocarburos carbonos, solventes y otros químicos orgánicos disueltos comúnmente observados en el agua producida. Generalmente, estos compuestos orgánicos son fácilmente biodegradables en procesos

aerobios, mientras que compuestos orgánicos halogenados o altamente clorados son más refractarios. Para estos compuestos se pueden utilizar procesos de adsorción y oxidación (Scanlon, Reedy, et al., 2020).

A continuación, se muestran las fichas técnicas de las alternativas de tratamiento antes mencionadas, en las cuales se especifica el nombre del tratamiento, su descripción, principales hallazgos, ventajas, limitaciones, evaluación ambiental y evaluación económica.

- **Ósmosis Inversa:**

**Tabla 26**

*Ficha técnica del tratamiento por ósmosis inversa para agua de producción tratada del campo petrolero Castilla*

<b>Nombre del Tratamiento</b>	Ósmosis Inversa (OR por sus siglas en inglés)	
<b>Descripción:</b> proceso de transferir solvente a través de una membrana semipermeable desde una disolución concentrada permitiendo alcanzar el equilibrio iónico entre los lados de la membrana (Solis, 2017); este proceso es comúnmente utilizado para separar y eliminar sólidos disueltos, iones (sales disueltas), pirógenos, color, nitrato y bacterias de las aguas residuales (Jafarnejad, 2016).		
<b>Principales Hallazgos</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Remoción de hasta 98- 99% de SDT (Jafarnejad, 2017); en una corriente de alimento de agua con 906 mg/L de SDT al sistema OR se logró un efluente con 17 mg/L de SDT (Madwal &amp; Tarazi, 2002).</li> <li>• Requiere un pretratamiento efectivo para la eliminación de aceites, grasas e hidrocarburos (Jafarnejad, 2017).</li> <li>• La recuperación de agua salobre varía entre un 60% a 85% (Igunnu &amp; Chen, 2014).</li> </ul>		
<b>Ventajas</b>	<b>Limitaciones</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se reportan estudios en los que se han tratado hasta 640.000 Brls/día de agua producida como es el caso de la compañía India Chennai Petroleum Company Limited (CPCL) (Alzahrani, Mohammad, Abdullah, et al., 2013)</li> <li>• Los sistemas de membrana de OR suelen tener una vida útil entre 3 a 7 años (Jafarnejad, 2017).</li> <li>• Puede tratar una gran variedad de caudales y concentraciones de SDT en el agua de producción, lo que la convierte en una tecnología versátil en comparación a la evaporación (IWA, 2016).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Las membranas generalmente no pueden soportar temperaturas superiores a 45 °C (Igunnu &amp; Chen, 2014).</li> <li>• El ensuciamiento de membrana es una limitación importante al momento de implementar el sistema de purificación RO y reemplazar las mismas representa un costo elevado (Jafarnejad, 2017).</li> <li>• Se obtiene agua de rechazo que contiene altas concentraciones de sales y otras impurezas, por lo</li> </ul>	

	que debe ser tratada antes de su eliminación (YASA ET, 2022).
<b>Evaluación ambiental</b>	
En cuanto a la sostenibilidad e impactos ambientales se estudia la alta demanda de energía (Tarnacki et al., 2012). y la generación de residuos (agua de rechazo) cuyo tratamiento o eliminación puede ser difícil y costoso (Abdulrazzaq et al., 2019,)	
<b>Evaluación Económica</b>	
El tamaño de rechazo requerido y los materiales de construcción pueden afectar los costos de capital para los sistemas de OR. En cuanto a los costos operativos estos dependen directamente del precio de la energía y el nivel de SDT en el agua de alimentación (Jafarinejad, 2017). Funston y otros, realizaron un estudio en el campo petrolero Placerita Canyon, en el condado de Los Ángeles, para agua de alimento al sistema OR con 5800 mg/L de SDT, donde el costo anual fue de 6 a 28 dólares por barril de agua tratada (2002). En otro estudio, para agua de alimento al sistema OR con 50 mg/L, se determinó un costo de USD 0,15/bbl tratado (Ersahin et al., 2018). Por lo anterior se establece a priori que el tratamiento puede tener un costo de aproximadamente USD 0,94/bbl tratado, dentro del cual se contempla el costo asociado al pretratamiento del del alimento al sistema de OR y el costo de tratamiento del agua de rechazo generada durante el proceso (Ersahin et al., 2018).	

*Nota. Ficha técnica del tratamiento por ósmosis inversa para agua de producción tratada del campo petrolero Castilla*

Como se menciona en la tabla 26, es necesario realizar un pretratamiento antes del proceso de ósmosis inversa que permita eliminar los hidrocarburos. La mayoría de los fabricantes de membranas recomiendan que la corriente de alimentación de agua al sistema de RO tenga un contenido de aceites y grasas inferior a 0,1 mg/L. Se han documentado casos en los que tan solo 0,001 mg/L de un hidrocarburo en la corriente de alimentación ha ensuciado irreversiblemente los sistemas de osmosis inversa (IPECA,2010).

A continuación, se especifican algunos de los procesos que se pueden emplear como pretratamiento para la reducción de hidrocarburos totales (THC) antes del proceso de ósmosis inversa

**Tabla 27**

*Pretratamientos para la eliminación de hidrocarburos totales (THC) antes del proceso de ósmosis inversa*

<b>Pretratamiento</b>	<b>Hallazgos</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Limitaciones</b>	<b>Evaluación Económica</b>	<b>Referencias</b>
Adsorción sobre carbón activado	<ul style="list-style-type: none"> <li>●Obtiene remociones entre 17 al 85% de THC</li> <li>●Su eficiencia depende del proceso de activación del carbón y de la superficie específica del mismo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●El proceso se facilita si el valor de pH del agua está cerca del pH del carbón activado</li> <li>●Se puede implementar carbón activado de origen vegetal disminuyendo los costos de operación</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●Cuando la concentración de THC inicial aumenta disminuye la remoción de THC</li> <li>●Proceso batch durante cuatro horas que requiere agitación</li> </ul>	El costo de tratamiento de un barril de agua de producción es en promedio de 0,12 USD	(Gallup et al., 1996; Luo & Wang, 2001; Mintcheva et al., 2022)
Oxidación química con $\text{Ca}(\text{ClO})_2$	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Obtiene remociones entre 80 a 94% de THC, Su eficiencia depende de la concentración y pH de la solución</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●Su disociación en agua da un ion hipoclorito (<math>\text{ClO}^-</math>), que adicionalmente se somete a protonación a ácido cloroso <math>\text{HOCl}</math>, los cuales son fuertes y eficientes agentes oxidantes que reaccionan con una amplia variedad de compuestos orgánicos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●El cloro residual y algunos subproductos clorados del agua deben eliminarse antes de cualquier uso posterior</li> <li>●Proceso batch durante una hora</li> </ul>	El costo de tratamiento depende de factores como: la concentración del oxidante, las propiedades físicas y químicas de los contaminantes y las condiciones de operación. Es un método costoso debido al alto costo de los productos químicos aplicados	(Shokrollahzadeh et al., 2012; Elmobarak et al., 2021; Mintcheva et al., 2022)

Tabla 27 (Continuación)

Pretratamiento	Hallazgos	Ventajas	Limitaciones	Evaluación Económica	Referencias
Oxidación UV/Ozono	<ul style="list-style-type: none"> <li>●Obtiene remociones entre 80 a 93% de THC.</li> <li>●Un estudio reportó una eliminación del 95,2 % de compuestos aceitosos sobre fotocatalizadores de ZnO bajo irradiación solar durante 120 min</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●Proceso eficaz para el tratamiento de aguas producidas que contienen hidrocarburos pesados</li> <li>●La potencia fotocatalítica del ZnO superó a la del TiO<sub>2</sub></li> <li>●La eliminación aumenta gradualmente con el tiempo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●Proceso batch durante 12 horas que requiere agitación constante</li> <li>●Muchos factores como el tamaño de partícula, el área de superficie, los sitios de superficie activa y los defectos pueden afectar la actividad fotocatalítica de los materiales.</li> <li>●Efectos negativos de iones cloro y bicarbonatos, así como de pH alcalino,</li> </ul>	<p>El costo de tratamiento depende de factores como: la concentración del oxidante, las propiedades físicas y químicas de los contaminantes y las condiciones de operación. Este procedimiento es costoso y consume mucha energía; pues los costos de energía para la producción de ozono son los principales gastos operativos.</p>	<p>(Hassan et al., 2018; Li et al., 2006; Elmobarak et al., 2021; Mintcheva et al., 2022)</p>

*Nota.* Pretratamientos para la eliminación de hidrocarburos totales (THC) antes del proceso de ósmosis inversa

De acuerdo con lo evidenciado en la tabla 26, una de las principales desventajas del proceso de tratamiento por ósmosis inversa es el volumen de agua de rechazo producida durante la filtración, pues debido a la alta salinidad de esta corriente puede ser prohibida su descarga. Por lo tanto, es necesario establecer cuáles son los procesos para el tratamiento de esta agua de rechazo. A continuación, se especifican algunas tecnologías que se pueden implementar:



**Tabla 28**

*Procesos para el tratamiento de agua de rechazo generada como residuo del proceso de ósmosis inversa*

Tecnología	Descripción	Aspectos Importantes	Evaluación Económica	Referencias
Evaporación solar	El agua se evapora de forma natural mediante el uso de energía solar; para lograr esto el concentrado de ósmosis inversa se coloca en un estanque revestido de poca profundidad.	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Una vez el agua se evapora la sal se deja en los estanques o se retira para su eliminación.</li> <li>● Los estanques de operación son relativamente fáciles de construir y requieren poca atención operativa.</li> <li>● No se ha demostrado que sea una solución sostenible a largo plazo.</li> <li>● Es un proceso poco utilizado debido a su baja productividad y a que se requieren grandes extensiones de tierra.</li> <li>● No permite la recuperación del agua evaporada.</li> </ul>	El costo de tratamiento de un barril de agua de rechazo es entre 0,12 a 0,25 dólares. Este varía de acuerdo a factores como el tamaño del estanque, la energía requerida, entre otros.	(Mickley, 2001; Katzir et al., 2010; Pérez-González et al., 2012; Pavloić, Mihajlović & Lević, 2016).
Cristalización	Este proceso se basa en evaporar el agua de rechazo hasta el punto en que los solutos presentes se saturan, para luego enfriarla y formar cristales que se puedan separar del agua restante.	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Se puede reducir la cantidad de agua de rechazo que debe descargarse al concentrar los solutos en cristales.</li> <li>● Existen diferentes tipos de cristalización para tratar agua de rechazo generada por ósmosis inversa, los cuales pueden ser por: enfriamiento, evaporación y de mezclas.</li> <li>● Se han reportado estudios con tasas de recuperación del 90 hasta el 99%.</li> <li>● Presenta alta demanda energética.</li> <li>● Han surgido nuevos avances como la cristalización por congelación eutéctica, sin embargo, muchos solo han sido estudiados a escala de laboratorio.</li> </ul>	El costo de tratamiento de agua de rechazo es de USD 0,09 por Kg sólido producido. Estudios afirman que es poco probable que esta tecnología sea económicamente viable en procesos a gran escala.	(Basile & Nunes, 2011; Randall et al., 2011; Al-Bazedi et al., 2014; Jafari et al., 2018; YASA ET, 2022)

Tabla 28 (Continuación)

Tecnología	Descripción	Aspectos Importantes	Evaluación Económica	Referencias
Clean-in-place (CIP)/Limpieza en el lugar	Método de limpieza y desinfección empleado en sistemas de filtración de membranas. El proceso implica el rociado de superficies o la circulación de soluciones de limpieza a través de las membranas.	<ul style="list-style-type: none"> <li>●Este proceso se lleva a cabo sin desmontar ni abrir el equipo y con poca o ninguna participación manual por parte del operador, por lo que ahorra tiempo y esfuerzo en comparación con otros métodos de limpieza tradicionales.</li> <li>●El proceso tiene como objetivo principal mantener la vida útil y la eficiencia de las membranas eliminando los residuos y depósitos que puedan acumularse en ellas.</li> <li>●Estudios demostraron que la limpieza con agentes quelantes fuertes como EDTA, es eficaz para eliminar materia orgánica natural (MON), las capas de incrustaciones de calcio y permiten restaurar el flujo de permeado.</li> </ul>	Estudios evidencian que el costo de limpieza puede representar un 10-20% del costo operativo total de un proceso de RO, por lo que se establece un costo entre USD 0,094 a 0,19 por barril.	(Luo & Wang, 2001; Singh & Pinnau, 2014; Geoffrey, 2022)
Sistemas de descarga cero de líquidos (ZLD por sus siglas en inglés)	Tiene como objetivo lograr la máxima recuperación de agua, a través de varias etapas de tratamiento evitando la eliminación de efluentes líquidos.	<ul style="list-style-type: none"> <li>●Esta tecnología implica un proceso cuya configuración básica es un proceso tándem de ósmosis inversa (RO).</li> <li>●Estudios demuestran que existe la necesidad de implementar procesos intermedios en procesos tándem para aumentar la recuperación y evitar la precipitación.</li> <li>● Se ha demostrado que estos sistemas logran altas recuperaciones, aunque no se logre la meta de descarga cero.</li> <li>●Tiene un elevado consumo energético debido a su naturaleza.</li> <li>●El incrustamiento y la precipitación de compuestos incrustantes son dos de las principales limitantes.</li> </ul>	El costo de tratamiento de un barril de agua de rechazo puede oscilar entre USD 0,32 a 0,56. Esta tecnología puede resultar costosa debido a su elevado requerimiento de energía.	(Ning & Troyer, 2009; Ning et al., 2010; Pérez-González et al., 2012, Dutta et al., 2019)

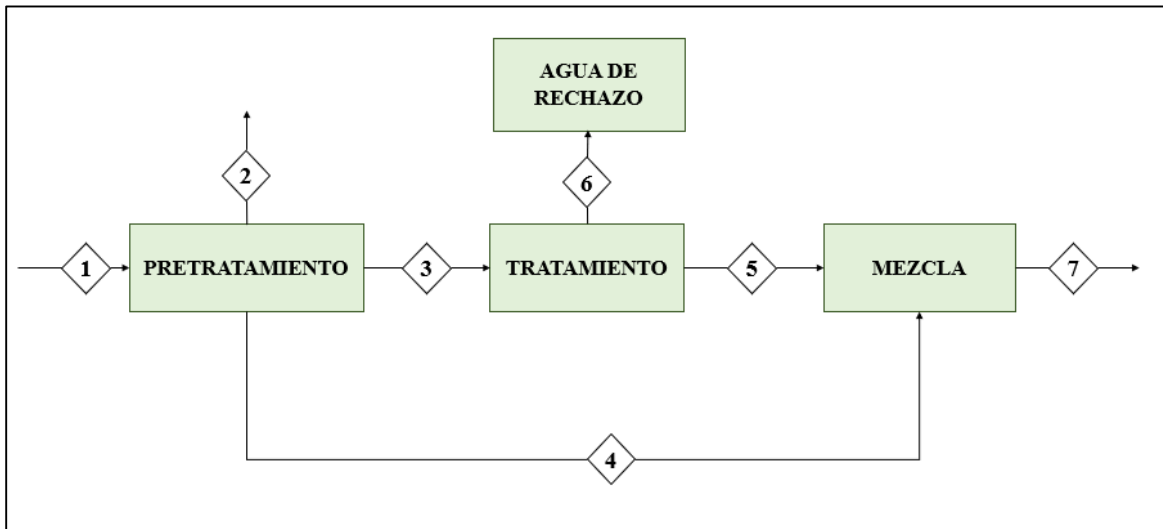
*Nota.* Procesos para el tratamiento de agua de rechazo generada como residuo del proceso de ósmosis inversa

Como se mencionó en la tabla 26, al implementar un proceso de ósmosis inversa para el tratamiento de agua de producción se obtiene una remoción de hasta 98-99% de SDT, por lo cual se denomina al efluente “agua permeada” con una concentración, en este caso particular, de aproximadamente 6,44 mg/L de SDT. Sin embargo, los SDT incluyen sales y minerales, por lo que aguas con concentraciones tan bajas de estos sólidos pueden llevar a obtener rendimientos del cultivo poco satisfactorios.

Por lo anterior y según las metas de tratamiento establecidas (Ver tabla 25), se requiere obtener agua con una concentración de 50mg/L de SDT. Para alcanzar esta meta, se realiza una recirculación del agua de producción obtenida como efluente del pretratamiento y se mezcla con el agua obtenida como efluente del tratamiento propuesto (ósmosis inversa). A continuación, se muestra el esquema del proceso:

**Figura 19**

*Diagrama de bloques BFD para el tratamiento de agua de producción mediante ósmosis inversa*



*Nota. Diagrama de bloques BFD para el tratamiento de agua de producción mediante ósmosis inversa*

Para determinar la relación de mezcla de las aguas mencionadas anteriormente, que permite alcanzar la meta de tratamiento, se plantea la siguiente ecuación siguiendo la ley de conservación de la materia en una mezcla de soluciones.

Ecu. 1

$$C_4V_4 + C_5V_5 = C_7V_7$$

Donde:

$$C_4 = 322 \frac{mg}{L} SDT$$

$$C_5 = 6,44 \frac{mg}{L} SDT$$

$$C_7 = 50 \frac{mg}{L} SDT$$

$V_4$  = Volumen de agua pretratada

$V_5$  = Volumen de agua permeada

$V_7$  = Volumen del efluente

Es importante resaltar que el valor de la variable  $V_4$  será asignado de acuerdo con los requerimientos del proceso y el valor de la variable  $V_5$  estará determinado por la variable antes mencionada, adicionalmente se debe garantizar que, al realizar la mezcla con los volúmenes calculados, se obtenga agua con una concentración inferior a 1 mg/L de hidrocarburos totales (THC). Por lo tanto, esto es una restricción que deberá ser considerada al momento de llevar a cabo los cálculos pertinentes.

- **Recompresión Mecánica de Vapor:**

**Tabla 29**

*Ficha técnica del tratamiento por recompresión mecánica de vapor (MVR) para agua de producción tratada del campo petrolero Castilla*

<b>Nombre del Tratamiento</b>	Recompresión Mecánica de Vapor (MVR por sus siglas en ingles)
<b>Descripción:</b> Proceso de destilación diseñado para reducir los volúmenes de aguas residuales al recuperar la mayor cantidad del agua en los desechos. La destilación en si misma es un proceso de separación que aprovecha el hecho de que algunos componentes de una mezcla se vaporizan más fácilmente que otros, dicho esto, MVR hace el proceso más eficiente al implementar un compresor para aumentar la presión de vapor de agua producida (Jim, 2011).	

Tabla 29. (Continuación)

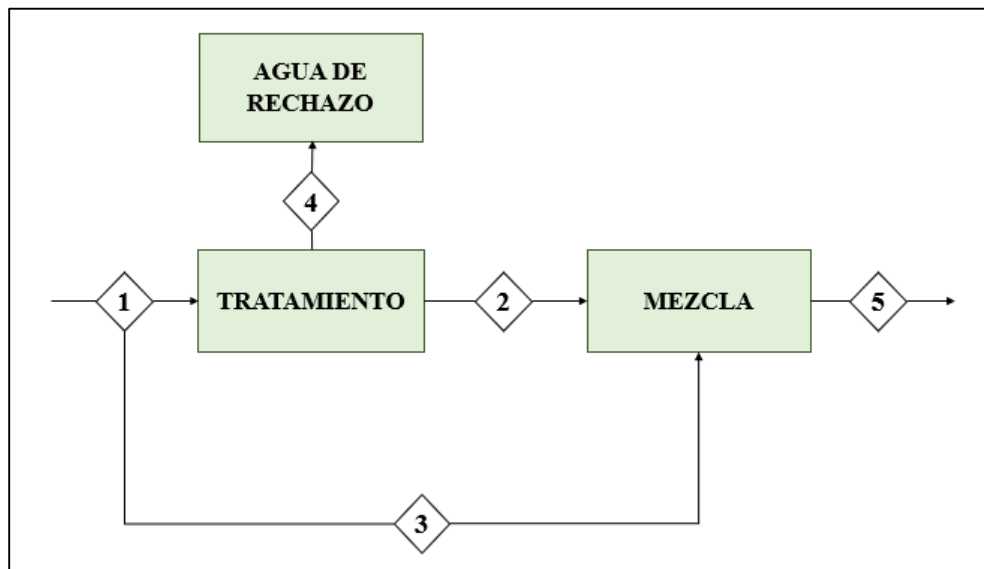
Principales Hallazgos	
<ul style="list-style-type: none"> <li>● Más del 99% de SDT fueron capturados en la corriente de concentrado (T et al., 2014).</li> <li>● Previo a la alimentación del agua de producción a las unidades de MVR se requiere realizar un ajuste de pH a 4 para estabilizar los cationes que forman incrustaciones como el calcio (T et al., 2014).</li> <li>● Eficiente para la eliminación de hidrocarburos totales (THC) en agua de producción de campos petroleros evidenciando rendimiento iguales o superiores al 99% (Sun et al., 2020; Yang et al., 2021).</li> </ul>	
Ventajas	Limitaciones
<ul style="list-style-type: none"> <li>● Método de destilación de alta eficiencia utilizado en miles de instalaciones para la desalinización de agua (Veil, 2008).</li> <li>● La principal ventaja de esta tecnología es su capacidad de reciclar calor latente de los vapores instantáneos a los fluidos del fondo, ahorrando entre un 10 y 15% de la energía total de la destilación (T et al., 2014).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Es posible que se requiera más de una unidad de operación de MVR para el tratamiento del volumen de agua de producción establecido (330.000) Brls/día.</li> <li>● Debido a la complejidad del sistema pueden requerir mantenimiento y reparaciones frecuentes (Hou et al., 2021)</li> <li>● Necesidad de agua de enfriamiento para el condensador de vapor (Wang et al., 2019)</li> </ul>
Evaluación ambiental	
<p>Este proceso se ha evaluado y estudiado cada vez más con el paso del tiempo debido a su capacidad para convertir salmueras salinas en corrientes de agua desmineralizada reduciendo la cantidad de residuos generados en comparación con otros procesos (Hou et al., 2021)</p>	
Evaluación Económica	
<p>En una instalación de centro-norte de Texas (región de equisto de Barnett), la energía eléctrica fue proporcionada por dos generadores de gas natural, y los compresores asociados a las unidades de MVR fueron accionados por motores de combustión interna alimentados por gas natural, en esta instalación se requirieron aproximadamente 48 ft<sup>3</sup> de gas natural /bbl de agua tratada, lo que representa un costo de menos de USD 0,25/bbl tratado, lo anterior asumiendo un costo de USD 5/millón de Btu (T et al., 2014). El capital inicial para la implementación del sistema es elevado en comparación a otros procesos (Wang et al., 2019)</p>	

*Nota. Ficha técnica del tratamiento por recompresión mecánica de vapor (MVR) para agua de producción tratada del campo petrolero Castilla*

Para este proceso según lo mencionado en la tabla 29 se obtiene una remoción del 99% o más de SDT, por lo que al igual que en el caso anterior el agua que sale como efluente del proceso de recompresión mecánica de vapor (MVR) será denominada “agua permeada” con una concentración para este caso particular de aproximadamente 3,22 mg/L de SDT; por lo que se deberá realizar una mezcla entre el agua obtenida como efluente del tratamiento (MVR) y el agua de alimento al tratamiento, es decir el agua que se obtiene como efluente de la STAP del campo petrolero Castilla la Nueva. A continuación, se muestra un esquema del proceso:

**Figura 20**

*Diagrama de bloques BFD para el tratamiento de agua de producción mediante recompresión mecánica de vapor (MVR)*



*Nota.* Diagrama de bloques BFD para el tratamiento de agua de producción mediante recompresión mecánica de vapor (MVR)

Para el cálculo de los volúmenes de mezcla de estas aguas se emplea la ecuación que obedece a la ley de conservación de la materia en una mezcla de soluciones:

**Ecu. 2**  $C_2V_2 + C_3V_3 = C_5V_5$

Donde:

$$C_2 = 6,22 \frac{mg}{L} SDT$$

$$C_3 = 322 \frac{mg}{L} SDT$$

$$C_5 = 50 \frac{mg}{L} SDT$$

$V_2 =$  Volumen de agua permeada

$V_3 =$  Volumen recirculación

$V_7 =$  Volumen del efluente

Con esto en mente, es necesario señalar que el valor de la variable  $V_3$  será asignado de acuerdo a las necesidades y requerimientos del proceso y el valor de la variable  $V_2$  estará determinado por la variable antes mencionada, los valores obtenidos tanto para el volumen  $V_3$  como para el volumen  $V_2$  deben garantizar que se cumplan los dos parámetros establecidos como meta de tratamiento.

- **Electrodiálisis:**

**Tabla 30**

*Ficha técnica del tratamiento por electrodiálisis (ED) para agua de producción tratada del campo petrolero Castilla*

Nombre del Tratamiento	Electrodiálisis (ED por sus siglas en ingles)	
<b>Descripción:</b> Proceso de separación de iones utilizado para eliminar impurezas disueltas de un líquido a través de una membrana selectiva donde se produce la migración de iones bajo la influencia de un campo eléctrico (López et al., 2018).		
<b>Principales Hallazgos</b>		
Remoción de hasta 90-99% de SDT y 70-90% de THC (Zarei et al., 2018; Zhang et al., 2020). Esta tecnología ha demostrado ser eficaz para el tratamiento de aguas de producción de campos petroleros con altas concentraciones de SDT y bajos niveles de THC (Jafari et al. 2019).		
<b>Ventajas</b>		<b>Limitaciones</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Puede tratar volúmenes grandes de agua de producción a un costo bajo (Korkmaz et al., 2015).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Obstrucción de las membranas y reducción en la vida útil de las mismas (Kundu et al., 2019).</li> </ul>	

<ul style="list-style-type: none"> <li>● Utiliza una fuente de energía eléctrica para separar iones cargados mediante un proceso sencillo y eficiente (Korkmaz et al., 2015).</li> <li>● No se requieren productos químicos adicionales (Kaya et al., 2016).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Puede ser costosa y requiere de equipos especializados (Mousavi et al., 2015)</li> <li>● Puede estar limitada por la baja eficiencia de eliminación de HAP (Hidrocarburos aromáticos polinucleares) (Tiehm et al., 2001)</li> </ul>
<b>Evaluación ambiental</b>	
Es una tecnología limpia que puede ser operada sin necesidad de regeneración de reactivos y no genera subproductos tóxicos lo que disminuye el impacto sobre el medio ambiente (Kundu et al., 2019).	
<b>Evaluación Económica</b>	
En un estudio se realizó el análisis de costo y efectividad de esta tecnología en la remoción de SDT y THC, pudiendo determinar un costo de tratamiento de USD 0,70/m <sup>3</sup> de agua tratada (Al-Bastaki et al. 2015), lo anterior es equivalente a un costo de USD 0,1/bbl de agua tratada. Un estudio realizado recientemente en el cual se evaluó la viabilidad económica de la electrodiálisis en comparación con otros métodos de tratamiento para agua de producción generada en campos petroleros, como destilación por membrana y osmosis inversa demostró que en términos de costos por metro cúbicos de agua tratada para aguas con bajo contenido de SDT y THC la opción más económica es la electrodiálisis. (Al-Hameedi, et.al. 2019).	

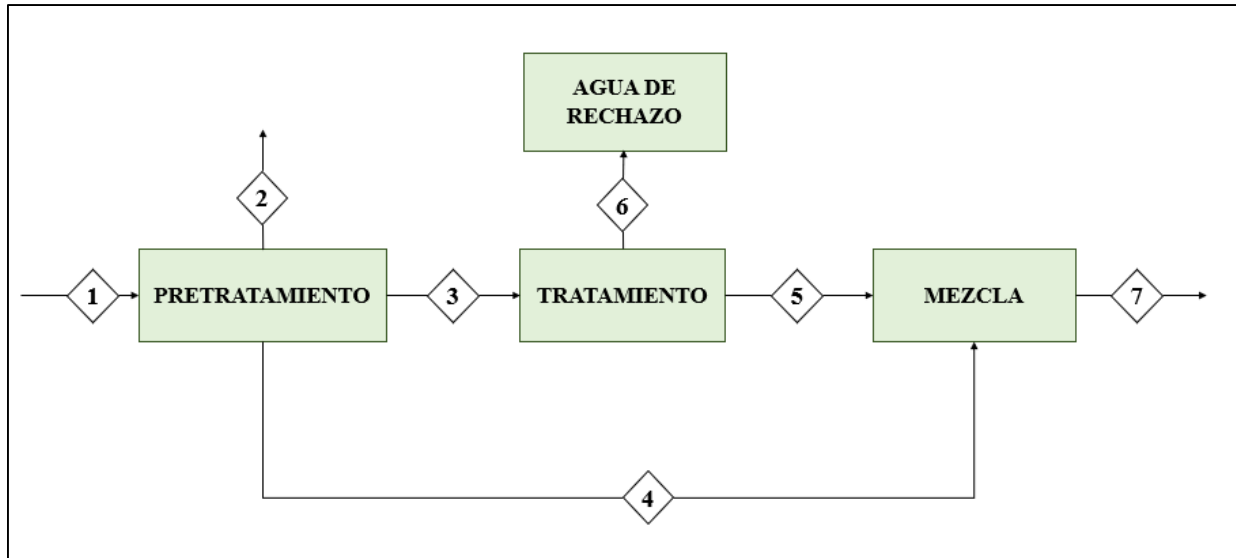
*Nota. Ficha técnica del tratamiento por electrodiálisis (ED) para agua de producción tratada del campo petrolero Castilla*

En cuanto al tratamiento del agua de producción utilizando una tecnología de electrodiálisis el agua que se obtiene como efluente del proceso es un “agua permeada” con una concentración para este caso particular de aproximadamente 32,2 mg/L SDT, por lo que se deberá realizar una mezcla entre el agua obtenida como efluente del proceso y una corriente de recirculación del efluente del pretratamiento. El esquema del proceso se muestra a continuación:



**Figura 21**

*Diagrama de bloques BFD para el tratamiento de agua de producción mediante electrodiálisis (ED)*



*Nota. Diagrama de bloques BFD para el tratamiento de agua de producción mediante electrodiálisis (ED)*

El cálculo de los volúmenes que serán mezclados se realiza mediante la ECU 1. donde para el tratamiento de electrodiálisis (ED),  $C_5 = 32,2 \frac{mg}{L} SDT$ .

La mezcla entre los volúmenes  $V_4$  y  $V_5$  deberá garantizar que se cumplan los dos parámetros de tratamiento previamente establecidos, cabe destacar que al emplear esta tecnología se pueden llegar a presentar rendimientos inferiores en cuanto a la remoción de sólidos disueltos totales (SDT) por lo que en caso de obtener como efluente aguas con concentraciones de  $50 \frac{mg}{L}$  no deberá realizarse la mezcla antes mencionada.

- **Nanofiltración:**

**Tabla 31**

*Ficha técnica del tratamiento por nanofiltración (NF) para agua de producción tratada del campo petrolero Castilla*

Nombre del Tratamiento	Nanofiltración (NF por sus siglas en ingles)
Tecnología de separación por membrana con poros de un tamaño intermedio entre los empleados para la ultrafiltración y ósmosis inversa. Permite la eliminación selectiva de sustancias, moléculas y partículas de tamaño específico en solución acuosa; esta tecnología es ampliamente utilizada en procesos industriales, dentro de los que destaca el tratamiento para la eliminación de sólidos disueltos totales, sales y otros	

contaminantes en agua de producción de campos petroleros. Cabe mencionar que el proceso de separación se basa en la diferencia de tamaño y carga entre las moléculas o partículas que se quieran separar (Gabelich, 2001).	
<b>Principales Hallazgos</b>	
Remoción de hasta 90-98% de SDT y 95% de THC (Amani et. al, 2019; Li et. al, 2016). Se ha encontrado que las membranas con tecnología de nanofiltración son altamente eficaces para la eliminación de contaminantes de varias fuentes de agua, tanto superficiales como subterráneas (Li et. al, 2020).	
<b>Ventajas</b>	<b>Limitaciones</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>● Requiere una menor presión que el proceso por OR lo que se traduce en una disminución en los requerimientos de energía y por ende en los costos de operación y mantenimiento (Jafarinejad &amp; Esfahani, 2021).</li> <li>● Se están desarrollando membranas de NF con una mayor selectividad y capacidad para eliminar contaminantes específicos (Adnan, et.al 2020).</li> <li>● Debido a su pequeño tamaño de poro es una tecnología altamente efectiva para la eliminación de SDT (Jafari, et.al 2019).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● El rendimiento esta significativamente influenciado por las características de la membrana, las condiciones de operación y las características de la corriente de alimento (Jafarinejad &amp; Esfahani, 2021).</li> <li>● El ensuciamiento de las membranas es un desafío importante por lo que requiere mantenimiento y limpieza regular para garantizar su eficiencia y prolongar su vida útil (Jafarinejad &amp; Esfahani, 2021).</li> <li>● Requiere un capital de inversión elevado para equipos y tecnología</li> </ul>
<b>Evaluación ambiental</b>	
Es un proceso ambientalmente sostenible para el tratamiento de agua de producción de campos petroleros, ya que al requerir menos energía que los procesos convencionales para el de tratamiento de agua de producción permite la reducción en la emisión de gases de efecto invernadero y la disminución en la huella de carbono generada por el proceso para el tratamiento de agua (Wei, et.al 2019).	
<b>Evaluación Económica</b>	
Un estudio en el que se evalúa la rentabilidad de esta tecnología para el tratamiento de agua de producción en la industria del petrolero reporta que el costo de tratamiento de un barril de agua de producción puede ser aproximadamente de USD 1,0; valor que varía de acuerdo a la calidad de agua de alimentación (Al-Mamun, et.al 2017). El proceso de nanofiltración es una opción rentable y viable para el tratamiento de agua de producción de campos petroleros.	

*Nota. Ficha técnica del tratamiento por nanofiltración (NF) para agua de producción tratada del campo petrolero Castilla*

El proceso de nanofiltración al ser una tecnología de separación por membrana, así como el proceso de ósmosis inversa requiere que se realice un pretratamiento al agua de producción que será alimentada, pues estudios han demostrado que los hidrocarburos totales (THC) presentes en estas aguas pueden ocasionar obstrucción de las membranas y formación de incrustaciones, lo que

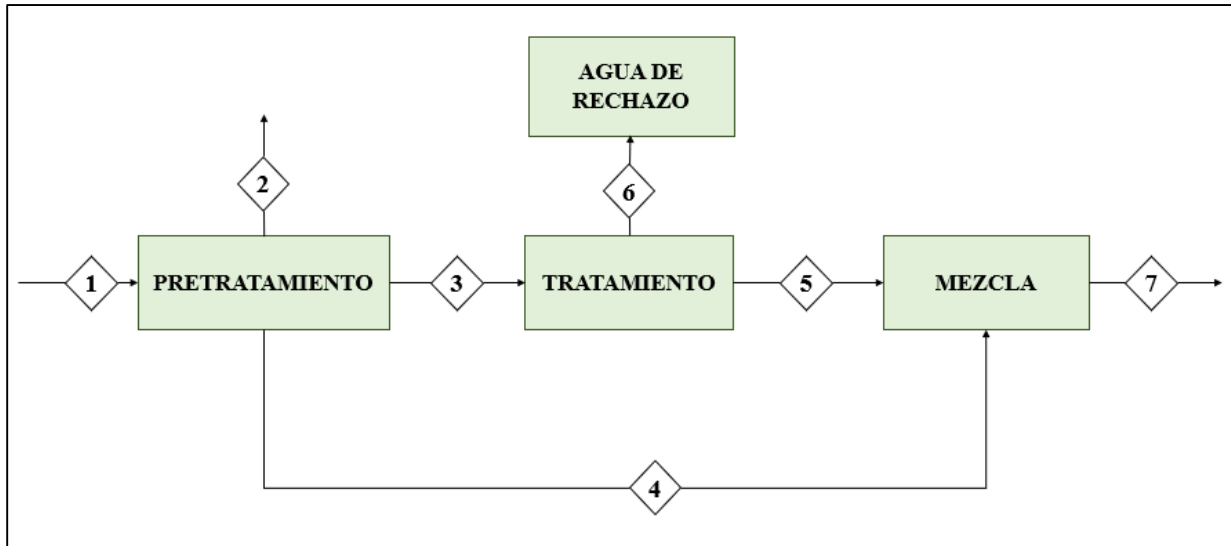
reduce la eficiencia del proceso y afecta la calidad del agua (Smith, Johnson & Rodríguez, 2018). Para tener conocimiento de cuáles son las tecnologías que podrían ser empleadas para dicho pretratamiento, así como las ventajas, desventajas y evaluación económica de cada una de estas ver tabla 27.

Adicionalmente, esta tecnología genera como desecho agua de rechazo con altas concentraciones de sólidos disueltos totales (SDT), por lo que requiere una gestión adecuada para evitar la contaminación ambiental y garantizar el cumplimiento de las normas establecidas por las autoridades ambientales (Johnson, Thompson & Martínez, 2019). Las tecnologías para el tratamiento de agua de rechazo con altas concentraciones de SDT, así como los aspectos más importantes y evaluación económica de las mismas se muestran en la tabla 28.

Por otro lado, el tratamiento de agua de producción utilizando la tecnología de nanofiltración (NF) produce como corriente efluente “agua permeada” con una concentración para este caso particular de aproximadamente 19,32 mg/L de SDT según lo evidenciado en la tabla 31, por lo anterior, deberá realizarse una mezcla entre este efluente y una corriente de recirculación del agua de producción que se obtiene como producto del pretratamiento. A continuación, se muestra un esquema del proceso:

**Figura 22**

*Diagrama de bloques BFD para el tratamiento de agua de producción mediante nanofiltración (NF)*



*Nota. Diagrama de bloques BFD para el tratamiento de agua de producción mediante nanofiltración (NF)*

Para determinar el volumen de mezcla correspondiente a estas dos corrientes se debe emplear la ECU 1. donde:  $C_5 = 19,32 \frac{mg}{L}$  de SDT; ahora bien, la mezcla entre dichas aguas en los volúmenes calculados:  $V_4$  y  $V_5$  deberá garantizar que se cumplan los dos parámetros establecidos como meta de tratamiento.

#### 5.4.5 Matriz de Selección

En el apartado anterior se establecieron cuáles son los posibles procesos que se pueden implementar para el tratamiento de agua de producción en el campo petrolero Castilla la Nueva, así como también se dieron a conocer los aspectos más relevantes de cada una de estas tecnologías.

Dicho esto, la presente sección tiene como fin seleccionar una alternativa para el proceso de tratamiento de acuerdo a unos parámetros específicos cuya priorización se llevó a cabo mediante un proceso de análisis jerárquico (AHP) en el que participó un panel conformado por expertos de la industria petrolera y el tratamiento de aguas. De acuerdo a la metodología planteada el proceso se desarrolló en tres fases así:

- **Fase I: Modelización:**

Esta fase del proceso consistió en la determinación de los criterios de selección con base a los requerimientos del tratamiento, para esto según la investigación realizada durante el proyecto se establecieron seis criterios fundamentales para la evaluación de las alternativas, los cuales son:

**1. Calidad del agua (CA):** Hace referencia a la medida en que el agua cumple con los requisitos y estándares establecidos para un uso determinado, esto puede ser: consumo humano, uso industrial, agricultura, pesca, recreación, entre otros. La calidad del agua se evalúa mediante parámetros fisicoquímicos, que para este caso particular corresponden a sólidos disueltos totales (SDT) e hidrocarburos totales (THC) (Gordon, 2018).

**2. Requerimiento de mantenimiento (RM):** Hace referencia a la cantidad de trabajo y recursos necesarios para garantizar el correcto funcionamiento y potenciar la eficiencia de un proceso. Este puede incluir actividades preventivas como mantenimiento programado e inspecciones y correctivas, como reparaciones y sustitución de piezas defectuosas o averiadas, este aspecto es esencial para garantizar la vida útil de un equipo (Mobley, 2014).

**3. Capital inicial (CI):** El capital inicial hace referencia a la cantidad de dinero requerida para establecer un nuevo proceso, por lo cual, se define como una inversión necesaria para el inicio de un proyecto o proceso (Gallagher, 2016).

**4. Costo Operativo (CO):** En cuanto al costo operativo este se refiere a los gastos recurrentes, necesarios y continuos que se tienen al momento de operar y mantener un proceso, estos pueden incluir: costos de energía, salarios, costos de materiales, gastos de mantenimiento, entre otros (Gallagher, 2016).

**5. Eficiencia energética (RE):** Hace referencia a la cantidad de energía necesaria para llevar a cabo determinado proceso industrial u operación, cabe mencionar que el conocimiento de los requerimientos de energía de un proceso es fundamental para la planificación y optimización del rendimiento del mismo, así como para la evaluación ambiental y económica. La energía puede

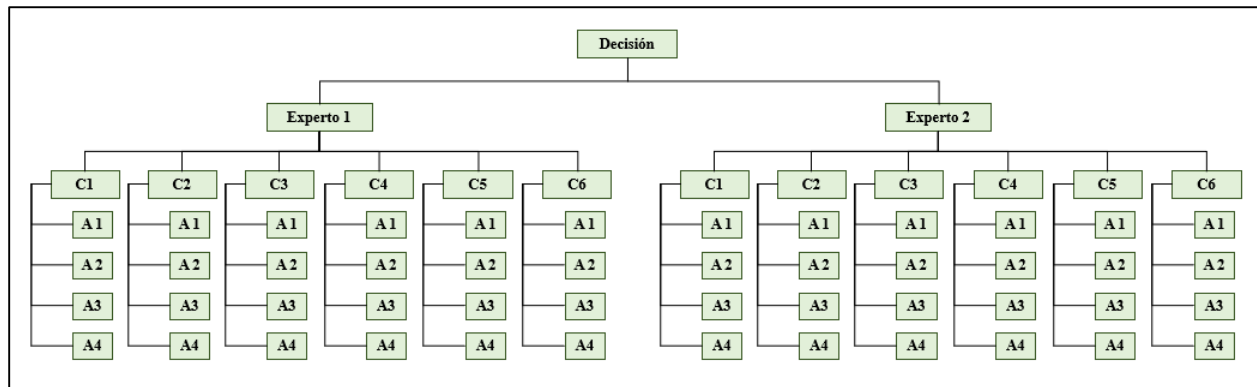
provenir de diversas fuentes como: electricidad, combustibles fósiles, gas natural, energía solar, entre otras (Kotas, 2015). Con este criterio se evalúa la cantidad de energía que requiere el sistema en relación con la cantidad de energía que realmente se aprovecha al realizar el proceso.

**6. Impacto ambiental (IA):** Hace referencia a los efectos tanto positivos como negativos que el proceso tiene sobre el medio ambiente, la evaluación del impacto ambiental se lleva a cabo mediante la identificación, evaluación y mitigación de los impactos ambientales negativos, esta evaluación es parte importante para llevar a cabo los trámites de permisos y autorizaciones para la operación de un nuevo proceso industrial (Gibson, 2015).

Para Taha (2003), la estructura general del proceso AHP puede comprender varias jerarquías de criterios. Generalmente en la toma de decisiones de una sola persona solo se emplea un nivel de jerarquía de los criterios, mientras que para la toma de decisiones grupales se emplean dos niveles de jerarquía. Ubicando en el nivel superior a las personas encargadas de la toma de decisiones y en el nivel inferior los criterios que serán evaluados, como se muestra en la siguiente figura.

**Figura 23**

*Árbol del proceso de jerarquía analítica (AHP) para la evaluación de las alternativas con dos niveles de jerarquía*



*Nota.* Dónde: C: Criterio y A: Alternativa.

Es fundamental realizar una jerarquización de los criterios. Esto debe a que, aunque los seis criterios seleccionados son de importancia para la selección de una alternativa, hay algunos que tienen mayor relevancia que otros. Por lo anterior, es necesario realizar una evaluación mediante

comparaciones pareadas criterio a criterio, asignando valoraciones numéricas de preferencia de un criterio sobre otro, de acuerdo a la escala de referencia establecida por Thomas L. Saaty, así:

**Tabla 32**

*Escala de referencias en caso de que el parámetro A sea preferible sobre el parámetro B*

Planteamiento verbal de la Alternativa	Calificación Numérica
El parámetro A es extremadamente preferible sobre el parámetro B	9
El parámetro A es entre muy fuerte y extremadamente preferible sobre el parámetro B	8
El parámetro A es muy fuertemente preferible sobre el parámetro B	7
El parámetro A es entrefuertemente y muy fuertemente preferible sobre el parámetro B	6
El parámetro A es fuertemente preferible sobre el parámetro B	5
El parámetro A es entre moderadamente y fuertemente preferible sobre el parámetro B	4
El parámetro A es moderadamente preferible sobre el parámetro B	3
El parámetro A es entre igualmente y moderadamente preferible sobre el parámetro B	2
El parámetro A es igualmente preferible sobre el parámetro B	1

*Nota:* Se denominan **parámetros (A)** a aquellos que se encuentran en la primera columna de la matriz identificados con color amarillo y **parámetro (B)** a aquellos que se encuentran en la primera fila de la matriz identificados con color azul. Fuente: Adaptado de: Application of the Analytical Hierarchy Process (AHP) for decision-making with expert judgment (2019). [https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0718-33052019000300348](https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-33052019000300348)

**Tabla 33**

*Escala de referencias en caso de que el parámetro B sea preferible sobre el parámetro A*

Planteamiento verbal de la Alternativa	Calificación Numérica
El parámetro B es extremadamente preferible sobre el parámetro A	1/9
El parámetro B es entre muy fuerte y extremadamente preferible sobre el parámetro A	1/8
El parámetro A es muy fuertemente preferible sobre el parámetro B	1/7

Tabla 33. (Continuación)

El parámetro B es entrefuertemente y muy fuertemente preferible sobre el parámetro A	1/6
El parámetro B es fuertemente preferible sobre el parámetro A	1/5
El parámetro B es entre moderadamente y fuertemente preferible sobre el parámetro A	1/4
El parámetro B es moderadamente preferible sobre el parámetro A	1/3
El parámetro B es entre igualmente y moderadamente preferible sobre el parámetro A	1/2
El parámetro B es igualmente preferible sobre el parámetro A	1

*Nota:* Se denominan **parámetros (A)** a aquellos que se encuentran en la primera columna de la matriz identificados con color amarillo y **parámetro (B)** a aquellos que se encuentran en la primera fila de la matriz identificados con color azul. Fuente: Adaptado de: Application of the Analytical Hierarchy Process (AHP) for decision-making with expert judgment (2019). [https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0718-33052019000300348](https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-33052019000300348)

Con base a las tablas mostradas anteriormente se completó la matriz para asignar valores de preferencia de un criterio sobre otro al compararlos uno a uno, los resultados se muestran a continuación:

Tabla 34

*Matriz de comparaciones pareadas entre los criterios de evaluación (Matriz A)*

Parámetros	CA	RM	CI	CO	RE	IA
CA	1	9	3	3	9	9
RM	1/9	1	1/7	1/9	1/4	1/3
CI	1/3	7	1	1/3	4	5
CO	1/3	9	3	1	5	6
RE	1/9	4	1/4	1/5	1	3
IA	1/9	3	1/5	1/6	1/3	1
TOTAL	2,00	33,00	7,59	4,81	19,58	24,33

*Nota.* Matriz de comparaciones pareadas entre los criterios de evaluación (Matriz A)

Posteriormente se llevó a cabo un procedimiento de normalización de los datos obtenidos en la matriz anterior. Esto se realizó mediante la aplicación de la siguiente ecuación:



**Ecu. 3**

$$N_{aij} = \frac{a_{ij}}{\sum C_n}$$

Donde:

$N_{aij}$ : Normalización de la denominación relativa de un criterio sobre el otro

$a_{ij}$ : Denominación relativa de un criterio sobre el otro

$C_n$ : Sumatoria de la columna n

Los resultados de la matriz normalizada se muestran en la tabla 35.

**Tabla 35**

*Matriz moralizada de comparaciones pareadas entre los criterios de evaluación*

<b>Parámetros</b>	<b>MATRIZ NORMALIZADA</b>					
<b>CA</b>	0,500	0,273	0,395	0,624	0,460	0,370
<b>RM</b>	0,056	0,030	0,019	0,023	0,013	0,014
<b>CI</b>	0,167	0,212	0,132	0,069	0,204	0,205
<b>CO</b>	0,167	0,273	0,395	0,208	0,255	0,247
<b>RE</b>	0,056	0,121	0,033	0,042	0,051	0,123
<b>IA</b>	0,056	0,091	0,026	0,035	0,017	0,041

*Nota.* Matriz moralizada de comparaciones pareadas entre los criterios de evaluación

Se determinó un valor ponderado para cada uno de los criterios, promediando los resultados obtenidos por fila en la tabla 35, lo anterior se realizó aplicando la siguiente ecuación:

**Ecu. 4**

$$\bar{X}_n = \frac{\sum F_n}{6}$$

Donde:

$\bar{X}_n$ : Promedio de la fila n

$F_n$ : Sumatoria de la fila n

Los valores obtenidos se muestran a continuación:

**Tabla 36**

*Criterios de evaluación y su valoración ponderada (Columna de pesos relativos,  $\bar{W}$ )*

<b>CRITERIOS</b>	<b>PONDERACIÓN</b>
<b>CA</b>	0,44
<b>RM</b>	0,03
<b>CI</b>	0,16
<b>CO</b>	0,26
<b>RE</b>	0,07
<b>IA</b>	0,04

*Nota.* Criterios de evaluación y su valoración ponderada (Columna de pesos relativos,  $\bar{W}$ )

Finalmente, para evaluar la consistencia del método se calculó la consistencia (RC), que está definido como el cociente entre el índice de consistencia (IC) y el índice de consistencia aleatorio (AC).

**Ecu. 5** 
$$RC = \frac{IC}{AC}$$

Dónde: IC es el índice de consistencia de la matriz A y se calcula mediante la siguiente ecuación:

**Ecu. 6** 
$$IC = \frac{n_{max} - n}{n - 1}$$

El valor de  $n_{max}$  se calcula de  $A\bar{W} = n_{max}\bar{W}$

AC es el índice de consistencia aleatoria de A y depende del número de elementos que se comparan, se calcula mediante la siguiente ecuación:

**Ecu. 7** 
$$AC = \frac{1,98(n - 2)}{n}$$

Donde n: número de alternativas

Los resultados obtenidos al llevar a cabo este procedimiento se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla 37**

*Evaluación de la consistencia del método para la asignación de ponderaciones de cada uno de los criterios*

CI	0,13
AC	1,32
CR	0,10

*Nota. Evaluación de la consistencia del método para la asignación de ponderaciones de cada uno de los criterios*

Según lo evidenciado en la tabla 37, el índice de consistencia (RC) es igual a 0,10 por lo que se puede establecer que la asignación de ponderaciones para cada uno de los criterios es razonable y es posible continuar con la siguiente fase del método.

- **Fase II: valoración:**

Una vez se determinaron los porcentajes de importancia de cada uno de los criterios para la selección de una alternativa se diseñó un instrumento para la evaluación de las mismas por parte de los expertos criterio por criterio (Ver Anexo A). Es necesario destacar que el instrumento mencionado anteriormente cuenta con seis matrices de evaluación correspondientes a cada uno de los criterios seleccionados para la evaluación de dichas alternativas.

A continuación, se realiza una descripción general del perfil de los expertos con el objetivo de evidenciar y conocer por que su criterio es válido e importante para la selección de una alternativa; dicho esto, es importante mencionar que, aunque el proyecto fue consultado por tres expertos solo dos de estos desarrollaron el instrumento de evaluación.

**Experto 1:** ingeniero químico e ingeniero de petróleos de la Universidad de América de Bogotá. Experiencia de 40 años en el sector de la industria petrolera en el diseño, montaje y operación de plantas de proceso de hidrocarburos. Especialista en tratamientos químicos para el crudo, gas y agua procesados en las plantas petroleras como refinerías, estaciones de recolección y proceso y, especialista en Gerencia de Proyectos de la universidad de EAFIT de Medellín.

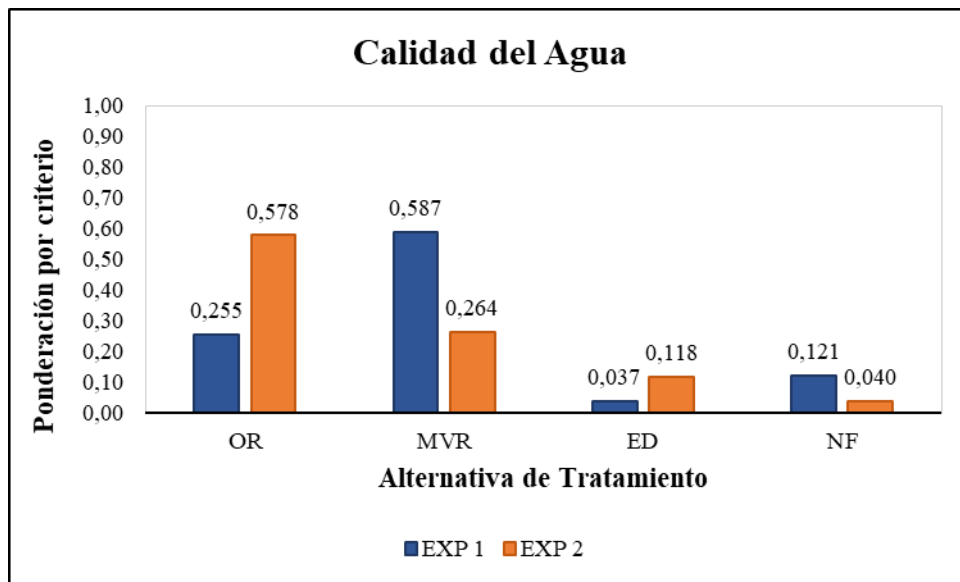
**Experto 2:** ingeniero químico de la Universidad Nacional de Colombia, con amplia experiencia como especialista y gerente de producto en el desarrollo de productos químicos para el tratamiento de agua, así como un proceso de patente por el IMP (Instituto Mexicano de la Propiedad Intelectual) y en la reestructuración y readecuación de procesos y plantas de tratamientos de agua. Ha participado en más de 80 congresos, seminarios y simposios nacionales e internacionales como presentador, sobre tratamiento de aguas industriales, gerenciamiento de la energía, control de proceso, optimización y manejo del recurso hídrico y digitalización.

Con base a los resultados de la evaluación realizada por los expertos a las alternativas de acuerdo a cada uno de los criterios, se llevó a cabo el análisis de los datos obtenidos; para esto se desarrolló la misma metodología con la cual se asignaron los valores de prioridad a dichos parámetros, es decir, se efectuó una normalización de los datos por matriz, para su posterior ponderación obteniendo los siguientes resultados:

**Criterio 1:**

**Figura 24**

*Valores ponderados para cada una de las alternativas por experto para el criterio de evaluación 1 (Calidad del agua)*



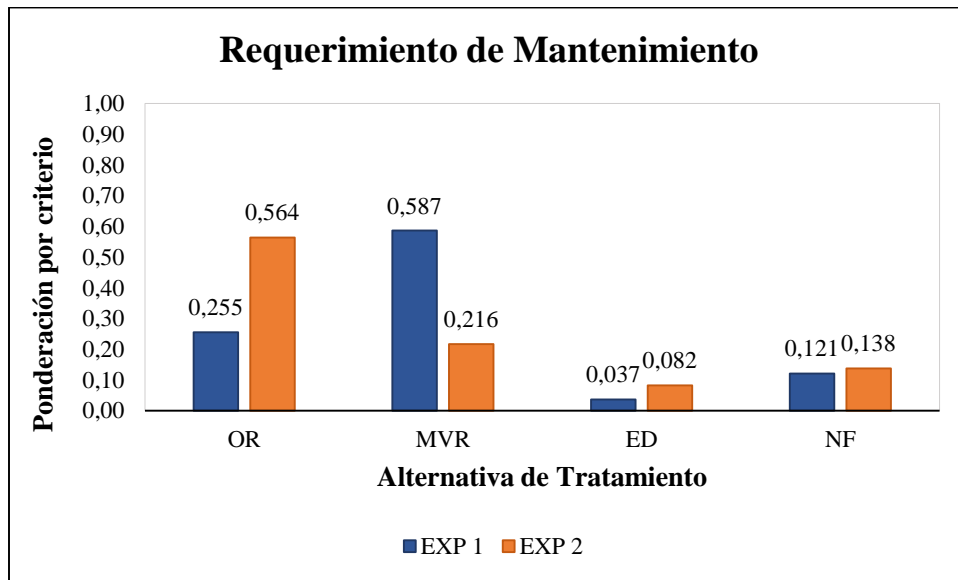
*Nota. Valores ponderados para cada una de las alternativas por experto para el criterio de evaluación 1 (Calidad del agua)*

Según los resultados mostrados en el gráfico anterior se puede establecer que para el experto 1 el proceso de recompresión mecánica de vapor (MVR) permite la obtención de agua con una mayor calidad, mientras que para el experto 2 el proceso de ósmosis inversa permite la obtención de un corriente efluente con mejores características de acuerdo a las necesidades del presente estudio.

**Criterio 2:**

**Figura 25**

*Valores ponderados para cada una de las alternativas por experto para el criterio de evaluación 2 (Requerimiento de mantenimiento)*



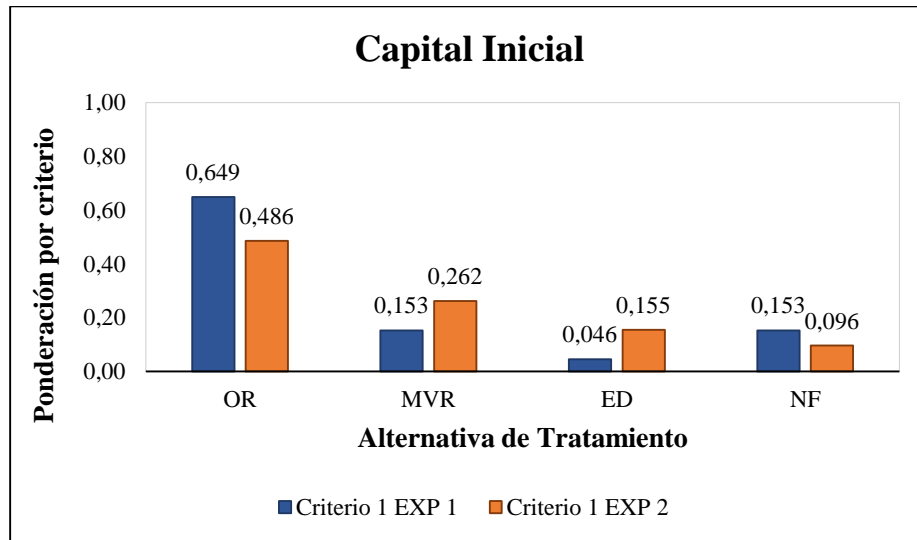
*Nota. Valores ponderados para cada una de las alternativas por experto para el criterio de evaluación 2 (Requerimiento de mantenimiento)*

Según los resultados mostrados en el gráfico anterior se puede establecer que para el experto 1 el proceso de recompresión mecánica de vapor (MVR) tiene un requerimiento de mantenimiento menor en comparación con las otras alternativas, mientras que para el experto 2 el proceso de ósmosis inversa tiene ventajas en cuanto a los requerimientos de mantenimiento.

### Criterio 3:

**Figura 26**

*Valores ponderados para cada una de las alternativas por experto para el criterio de evaluación 3 (Capital inicial)*

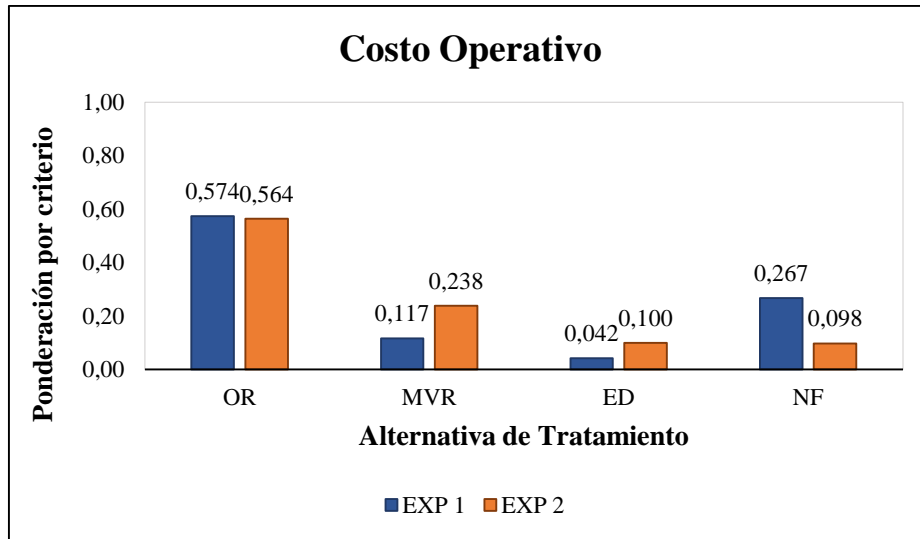


*Nota. Valores ponderados para cada una de las alternativas por experto para el criterio de evaluación 3 (Capital inicial)*

### Criterio 4:

**Figura 27**

*Valores ponderados para cada una de las alternativas por experto para el criterio de evaluación 4 (Costo operativo)*



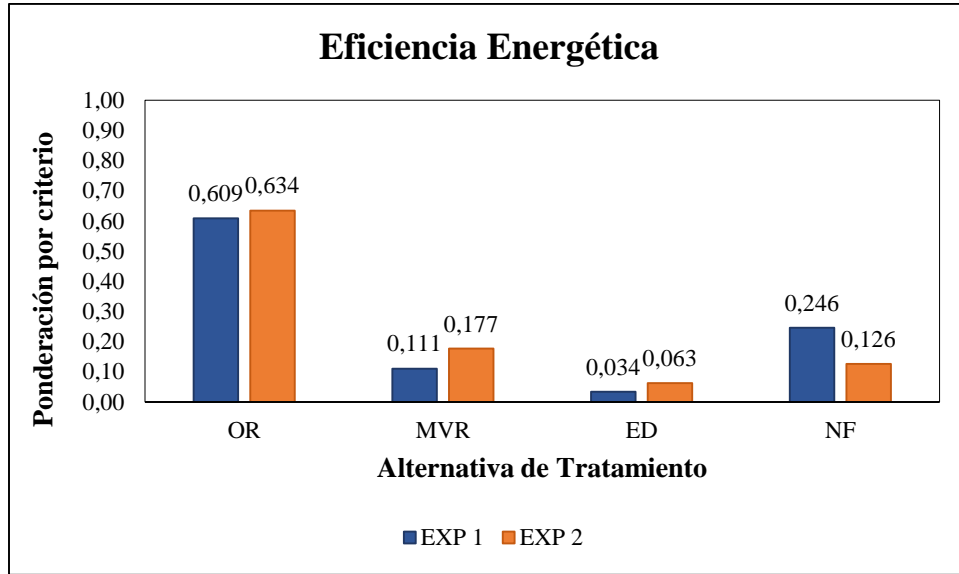
*Nota. Valores ponderados para cada una de las alternativas por experto para el criterio de evaluación 4 (Costo operativo)*

Según los resultados mostrados en las graficas gráfica3 y gráfica 4 se puede establecer que tanto para el experto 1 como para el experto 2 el proceso de ósmosis inversa es preferible para el tratamiento de agua de producción considerando tanto el costo de capital inicial como el costo operativo.

**Criterio 5:**

**Figura 28**

*Valores ponderados para cada una de las alternativas por experto para el criterio de evaluación 5 (Eficiencia energética)*



*Nota. Valores ponderados para cada una de las alternativas por experto para el criterio de evaluación 5 (Eficiencia energética)*

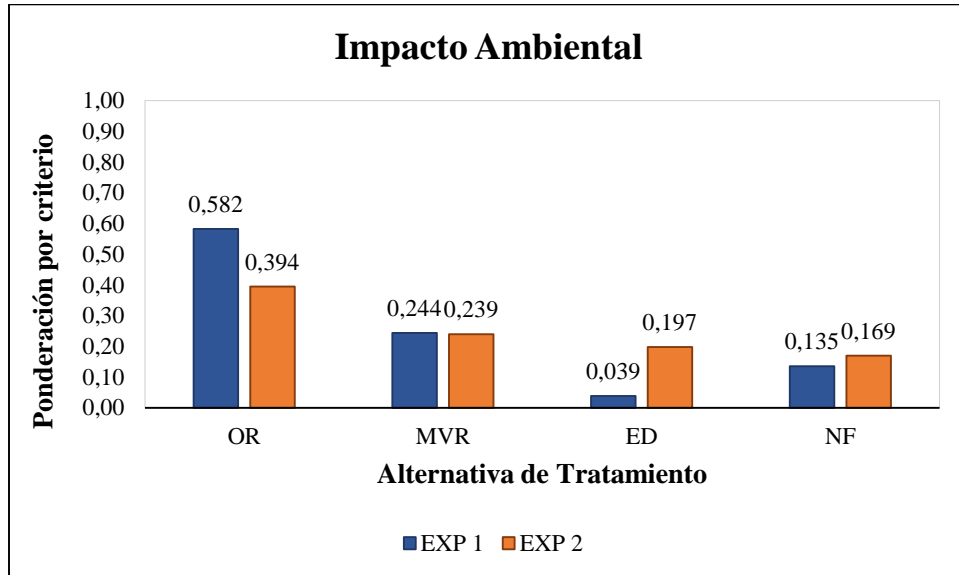
Según los resultados mostrados en el gráfico anterior se puede establecer que tanto para el experto 1 como para el experto 2 el proceso de ósmosis inversa es preferible en comparación a los otros tres procesos evaluados para el tratamiento de agua de producción con las características de este estudio, lo anterior únicamente considerando los requerimientos energéticos del mismo.



## Criterio 6:

Figura 29

Valores ponderados para cada una de las alternativas por experto para el criterio de evaluación 6 (Impacto ambiental)



*Nota.* Valores ponderados para cada una de las alternativas por experto para el criterio de evaluación 6 (Impacto ambiental)

Según los resultados mostrados en el gráfico anterior se puede establecer que tanto para el experto 1 como para el experto 2 el proceso de ósmosis inversa genera un menor impacto ambiental en comparación a los otros procesos considerados en esta investigación.

- **Fase III: priorización y síntesis:**

Ahora que se conoce el valor ponderado asignado por criterio a cada una de las alternativas y que se estableció la prioridad que representa cada uno de estos para la selección de un tratamiento (Ver tabla 37), se procede a determinar cuál es la mejor alternativa teniendo en cuenta estas dos variables como se muestra en la siguiente tabla:

**Tabla 38***Matriz para la selección de una alternativa*

<b>Criterio / Alternativa</b>	<b>CA</b>	<b>RM</b>	<b>CI</b>	<b>CO</b>	<b>RE</b>	<b>IA</b>
<b>OR</b>	0,41658	0,40949	0,56747	0,56912	0,62142	0,48842
<b>MVR</b>	0,42515	0,40145	0,20736	0,17751	0,14377	0,24138
<b>ED</b>	0,07771	0,05948	0,10049	0,07096	0,04854	0,11787
<b>NF</b>	0,08056	0,12957	0,12468	0,18241	0,18626	0,15232
<b>Ponderación</b>	0,44	0,03	0,16	0,26	0,07	0,04

*Nota. Matriz para la selección de una alternativa*

El valor asignado a cada casilla se calculó empleando la siguiente ecuación:

$$\text{Ecu. 8} \quad X = CA_{EXP 1} * 0,5 + CA_{EXP 2} * 0,5$$

Donde:

$X$ : Valor ponderado por alternativa para el  $C_n$

$CA_{Exp1}$ : Valor ponderado por alternativa para el  $C_n$  de acuerdo a la evaluación del experto 1

$CA_{Exp2}$ : Valor ponderado por alternativa para el  $C_n$  de acuerdo a la evaluación del experto 2

Una vez se establece el vector promedio para cada uno de los criterios de acuerdo a las alternativas y considerando las ponderaciones asignadas a cada criterio, se realiza la priorización de cada tratamiento multiplicando el valor obtenido para un criterio determinado respecto a una alternativa específica. A continuación, se muestra la ecuación empleada para este procedimiento

$$\text{Ecu. 9} \quad \text{Priorización } A_n = (A_n/C_1 \times 0,44) + (A_n/C_2 \times 0,03) + (A_n/C_3 \times 0,16) + (A_n/C_4 \times 0,26) \\ + (A_n/C_5 \times 0,07) + (A_n/C_6 \times 0,04)$$

En la siguiente tabla se muestra el porcentaje de prioridad de selección de cada una de las alternativas de acuerdo al criterio de los expertos.

**Tabla 39**

*Prioridad de selección para las alternativas de tratamiento*

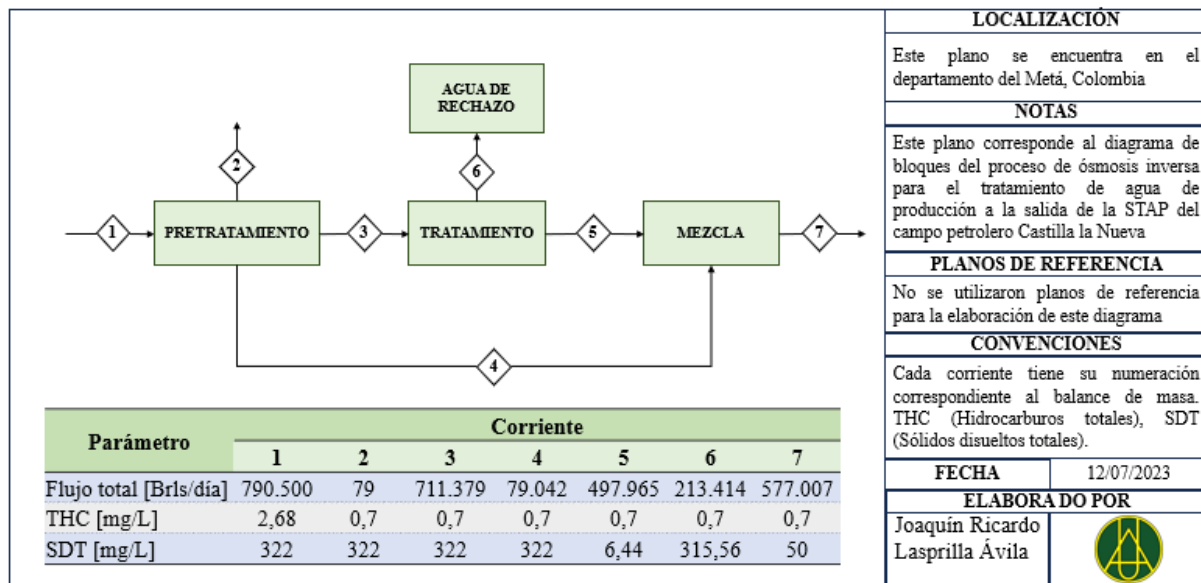
Alternativa	Prioridad	Porcentaje
OR	0,4983	49,83%
MVR	0,2968	29,68%
ED	0,0790	7,90%
NF	0,1260	12,60%

*Nota. Prioridad de selección para las alternativas de tratamiento*

De acuerdo al análisis de la evaluación realizada por los expertos y teniendo en cuenta los seis criterios de selección previamente definidos, así como su valor ponderado se establece que la mejor alternativa para el tratamiento del agua de producción generada en el campo petrolero Castilla la Nueva es el proceso de ósmosis inversa. En la siguiente figura se muestra el diagrama BFD para el tratamiento con la tecnología de ósmosis inversa y el balance de masa por corriente.

**Figura 30**

*Diagrama BFD y balance de masa para la alternativa de tratamiento seleccionada (Ósmosis inversa)*



*Nota.* El diagrama BFD y balance de masa se realizaron con base a la información presentada en la ficha técnica de la alternativa (ósmosis inversa).

Para la elaboración del balance de masa presentado en la Figura 30, se seleccionó como pretratamiento para la remoción de hidrocarburos totales (THC) el proceso de adsorción sobre

carbón activado debido a que obtiene remociones hasta del 85% (Ver tabla 27). Además, durante este proceso si bien es posible que una pequeña cantidad de agua se retenga en el lecho de carbón activado, es importante tener en cuenta que la cantidad será mínima en comparación con el volumen de agua tratada, esta retención puede ocurrir debido a la estructura porosa del carbón activado ya a las fuerzas de retención capilar.

Según la información presentada en la ficha técnica para el proceso de osmosis inversa, se establece que el porcentaje de agua de rechazo al incorporar esta tecnología es de alrededor del 30%, información esencial para determinar el balance de masa de las corrientes de salida del tratamiento. Además, a partir de la ECU. 1 presentada en el documento se determinó la relación de los volúmenes de mezcla de las corrientes (4) y (5) pudiendo establecer que el volumen de la corriente (6) está compuesto en un 86% por el volumen de la corriente (5) con un flujo de 497,965 Brls/día y un 14% por el volumen de la corriente (4) con un flujo de 79.042 Brls/día.

Finalmente se observa que el rendimiento del proceso es del 73% por lo que se obtiene un flujo de 577,007 Brls/día de agua tratada con las características adecuadas para su reúso en el sector agrícola. Según los datos presentados en la tabla 19 la demanda de agua superficial de los cultivos de palma de aceite en la zona de influencia del proyecto es de 952.563,67 Brls/día y aunque la oferta de agua de producción del campo petrolero Castilla la Nueva es de 790.500 Brls/día que cubriría el 83% de la demanda, de acuerdo a la información presentada con base en el diagrama de masa del proceso este porcentaje es inferior dado el rendimiento del proceso, por lo cual se establece que se podría cubrir máximo un 60% de la demanda de agua superficial de los cultivos de palma de aceite.

#### ***5.4.6 Modelo de Negocio Para el Reúso de Agua de Producción del Campo Petrolero Castilla la Nueva en Sistemas Agrícolas***

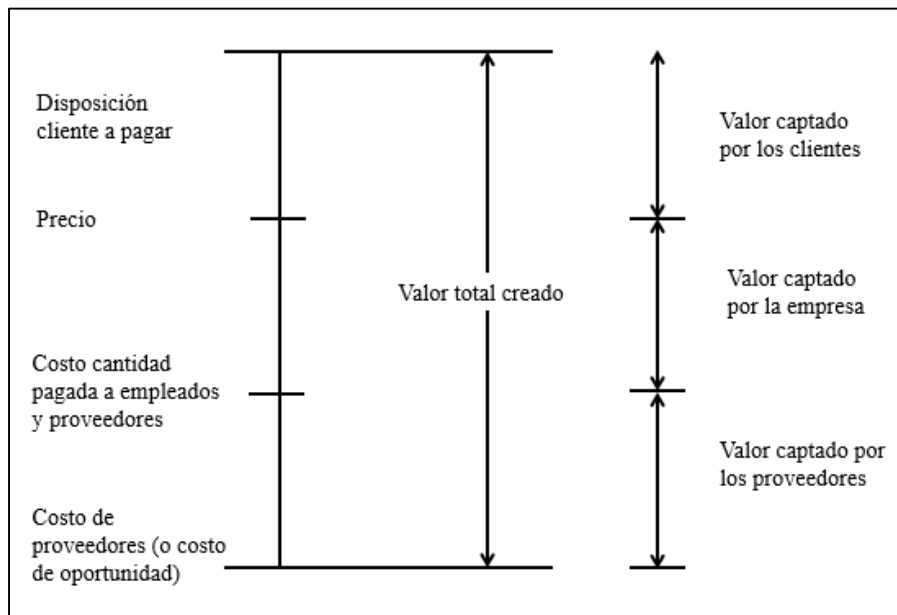
Ahora que se ha definido cuál es la mejor alternativa para el tratamiento del agua de producción del campo petrolero Castilla la Nueva, y teniendo en cuenta la metodología planteada para el desarrollo del presente estudio, es fundamental resaltar que a lo largo del documento se ha presentado una iniciativa de emprendimiento e innovación. Esta iniciativa se plantea con la

finalidad de identificar y aprovechar las oportunidades del negocio, así como de responder a las necesidades del mismo.

La idoneidad de una estrategia es fundamental para la sostenibilidad del proyecto. Para ello, se inicia definiendo un mapa estratégico. Porter (1980) enunció dos estrategias básicas: bajo costo o diferenciación y liderazgo en los productos. Cualquiera de estas estrategias implica la aplicación de los principios fundamentales ilustrados en la siguiente figura:

**Figura 31**

*Creación de valor en la cadena de abastecimiento*



*Nota.* Creación de valor en la cadena de abastecimiento Tomando de: Mapas estratégicos (Convirtiendo los activos intangibles en resultados tangibles) – Cap. 11- Adaptación de un mapa estratégico a su estrategia (p. 373), Kaplan & Norton, (2004). <https://qualitasbiblo.files.wordpress.com/2013/03/libro-mapas-estrategicos-kaplan-c2b4n-norton.pdf>

Según lo expuesto en la Figura 31, la creación de valor total se puede dividir en tres segmentos, así: primero el valor captado por los proveedores, que es el valor pagado a proveedores y empleados, menos el costo de oportunidad; segundo, el valor captado por la empresa, que se define como el precio neto recibido por el cliente menos el precio pagado a proveedores y empleados por los productos o servicios vendidos y tercero, el valor captado por el cliente, es la diferencia entre

el precio máximo que está dispuesto a pagar el cliente por el servicio o producto y los precios reales pagados (Kaplan, 2004).

Para definir el mapa estratégico de este proyecto, se utilizó un modelo genérico expuesto por Robert Kaplan (2004) en su libro “Mapas estratégicos”, en conjunto con un análisis de las condiciones externas e internas del proyecto. Este análisis permitió aprovechar sus fortalezas, revisar y prevenir el efecto de las debilidades, anticiparse y prepararse para aprovechar las oportunidades y prevenir el efecto de las amenazas, lo cual se materializó a través de un análisis FODA.

De acuerdo con lo expuesto por Serna (2014), se definió una fortaleza, como la actividad o atributo interno del proyecto que contribuye a logro del mismo; una debilidad, como la actividad o atributo del proyecto que inhibe el desarrollo del mismo; una oportunidad como el evento o hecho que se da en el entorno del proyecto y que podría facilitar o beneficiar el desarrollo de este y una amenaza, como el evento, hecho o tendencia en el entorno del proyecto que obstaculiza el desarrollo del mismo.

El análisis interno del proyecto se evaluó a través de las siguientes capacidades:

- Capacidad financiera
- Capacidad tecnológica
- Capacidad de talento humano

Donde la escala de valoración se muestra en la tabla 40:

**Tabla 40***Escala de valoración FODA*

ESCALA DE VALORACION FODA	
Alta	Si el hecho llegase a presentarse las consecuencias serían favorables
Media	Si el hecho llegase a presentarse las consecuencias serían medianamente favorables
Baja	Si el hecho llegase a presentarse las consecuencias serían poco favorables

*Nota. Escala de valoración FODA*

La evaluación de las capacidades de llevo a cabo mediante la selección de preguntas clave y la asignación de valoraciones clave, así:

**Tabla 41***Capacidad financiera*

Capacidad Financiera	Fortaleza	Debilidad	Impacto		
			A	M	B
Acceso a capital	X		X		
Grado de endeudamiento	X		X		
Facilidad para salir al mercado		X			X
Rentabilidad y retorno de inversión	X		X		
Liquidez y disponibilidad de fondos internos	X			X	
Elasticidad de la demanda con respecto a los precios		X			X
Estabilidad de costos		X	X		
Habilidad para competir en precios		X			X

*Nota. Capacidad financiera*

**Tabla 42***Capacidad financiera*

Capacidad Tecnológica	Fortaleza	Debilidad	Impacto		
			A	M	B
Innovación	X			X	
Nivel de tecnología usada	X		X		
Efectividad en la producción	X		X		
Valor agregado al producto	X		X		
Flexibilidad en la producción	X		X		
Economía de Escala	X		X		
Nivel de coordinación entre áreas	X			X	
Impacto al ambiente	X		X		

*Nota. Capacidad financiera***Tabla 43***Talento humano*

Capacidad del Talento Humano	Fortaleza	Debilidad	Fortaleza		
			A	M	B
Nivel académico	X			X	
Experiencia Técnico	X		X		
Estabilidad	X		X		
Rotación	X		X		
Motivación	X		X		
Accidentalidad	X		X		
Índices de desempeño	X		X		
Pertenencia	X		X		

*Nota. Talento humano*

En lo referente al análisis externo, los factores evaluados para el proyecto se listas a continuación:

- Factores económicos
- Factores políticos
- Factores sociales
- Factores tecnológicos
- Factores geográficos



**Tabla 44***Factores económicos*

Factores Económicos	Oportunidad	Amenaza	Impacto		
			A	M	B
Apertura Económica		X			X
Creación de nuevos impuestos		X			X
Ley de moderación		X		X	
Modelo de gobierno		X		X	
Estabilidad de política colombiana		X			X
Expectativas del crecimiento real del PIB		X			X
Política Fiscal	X		X		
Tendencia de reducir la inflación		X			X

*Nota. Factores económicos***Tabla 45***Factores Políticos*

Factores Políticos	Oportunidad	Amenaza	Impacto		
			A	M	B
Política del país		X			X
Debilitamiento de los dogmas políticos		X			X
Renovación de la clase dirigente	X			X	
Descoordinación entre los frentes políticos		X		X	
Falta de credibilidad en algunas instituciones		X			X
Falta de madurez en la clase política		X			X
Políticas claras en reuso de aguas	X		X		
Políticas claras para sector agrícola en lo referente a captación de aguas		X	X		

*Nota. Factores Políticos*

**Tabla 46***Factores sociales*

Factores Sociales	Oportunidad	Amenaza	Impacto		
			A	M	B
Paz Social	X				X
Reformas del sistema de seguridad social		X			X
Presencia de clase media	X			X	
Liderar proyectos innovadores con impacto social	X			X	
Bajo nivel de empleo		X			X
Aumento de inversión social	X				X
Incremento del índice de desempleo		X	X		
Crisis de valores		X			X
Incoherencia de los medios de comunicación		X			
Conformismo de la sociedad		X			

*Nota. Factores sociales***Tabla 47***Factores tecnológicos*

Factores Tecnológicos	Oportunidad	Amenaza	Impacto		
			A	M	B
Telecomunicaciones	X		X		
Automatización de procesos	X		X		
Facilidad de acceso a la tecnología	X		X		
Velocidad del desarrollo tecnológico	X				
Resistencia a cambios		X			X

*Nota. Factores tecnológicos***Tabla 48***Factores geográficos*

Factores Geográficos	Oportunidad	Amenaza	Impacto		
			A	M	B
Precipitaciones	X				X
Huella Hídrica	X			X	
Indicé Vulnerabilidad hídrica	X				X
Dificultad del transporte		X			

*Nota. Factores geográficos*

Con base al análisis interno y externo se realizó la agrupación de los factores clave de cada uno de estos y se establecieron las estrategias cruzando fortalezas con amenazas (FA), fortalezas con oportunidades (FO), debilidades con oportunidades (DO) y debilidades con amenazas (DA) como se puede observar en la siguiente tabla:

**Tabla 49**

*Factores geográficos*

<b>FODA</b>	<b>OPORTUNIDADES</b>	<b>AMENAZAS</b>
		Política clara en reúso de aguas Paz Social Liderar proyectos innovadores sociales Facilidad acceso a la tecnología Validación del desarrollo tecnológico Índice HH. IHV Precipitaciones
Enumerar las de mayor impacto Factores Claves de éxito		
<b>FORTALEZAS</b>	<b>ESTRATEGIAS FO</b>	<b>ESTRATEGIAS FA</b>
Rentabilidad y retorno de inversión Acceso a capital Nivel de tecnología Usada Efectividad en la producción Economía de Escala Impacto al ambiente	Reusar las aguas de producción en la zona de influencia, logrando aumentar la producción de crudo,	Dar en concesión las aguas de producción para generar una empresa de servicio público
<b>DEBILIDADES</b>	<b>ESTRATEGIA DO</b>	<b>ESTRATEGIA DA</b>
Facilidad para salir al mercado Elasticidad de la demanda con respecto a los precios Nivel de coordinación entre las áreas Habilidad para competir precios	Genera alianzas estratégicas con el sector palmicultor y agropecuario aumentando su producción y disminuyendo su impacto ambiental	Asegurarse de cumplir con todas las regulaciones y normativas ambientales y de salud relacionadas con el reuso de agua en el cultivo de aceite de palma

*Nota. Factores geográficos*

Una vez se realizó el análisis FODA junto con las estrategias, se generó un mapa estratégico tabla 50 usando elementos de la estrategia de bajo costo y liderazgo de producto. En la estrategia de bajo costo, los elementos seleccionados fueron la eficiencia operativa que juega un papel protagónico, la alta calidad y la capacidad de reacción. En la estrategia de liderazgo de productos, la innovación es el factor fundamental, donde la rápida aprobación de los entes reguladores, desempeño excelente en dimensiones de exactitud, consumo de energía e investigación son primordiales. La propuesta de valor de este proyecto está enfocada en llevar a las industrias petroleras y agrícolas a mejorar sus características funcionales, a ser los primeros en la innovación, minimizando el impacto al medio ambiente.

**Tabla 50**

*Mapa estratégico del proyecto*

Perspectiva financiera	<b>Valor a largo plazo para el accionista</b>		
	<b>Estrategia productiva:</b> Sector petrolero: reusar las aguas de producción en la zona de influencia, logrando aumentar la producción de crudo, Dar en concesión las aguas a un tercero para que genere una empresa de servicios públicos. Reducción de costo del barril de crudo.  Sector Palmicultor: Mantener un flujo constante de agua en los meses de sequía, manteniendo su producción y expandiendo el cultivo a áreas circundantes debido a que la disponibilidad del agua aumenta.	<b>Estrategia de aumento de ingresos:</b> Sector petrolero: mayor producción de crudo Sector Palmicultor: mayor producción de semilla y expansión del cultivo Alianza estratégica entre las industrias. Producción de biocombustible	
Perspectiva del cliente	<b>Ofrecer productos y servicios de bajo impacto ambiental y de bajo costo</b>		
	<b>Calidad &amp; Ambiente:</b> Sector petrolero: Optimiza la calidad de sus vertimientos y cumple con los volúmenes de vertimiento. Aplicación de economía circular Sector Palmicultor: Protege el recurso hídrico	<b>Productos de alto desempeño:</b> Sector petrolero & Palmicultor: Aceptación de la comunidad y de los entes regulatorios	
Perspectiva de los	<b>Gestión operaciones</b>	<b>Innovación</b>	<b>Reguladores y sociales</b>

procesos internos	<b>Sector petrolero:</b> Aumento de la producción, mejora la eficiencia operativa, respuesta rápida contingencia operativas, incrementar el plan perforación, Cero errores, Nueva tecnología (Biocombustible) <b>Sector Palmicultor:</b> Optimización del proceso productivo, capacidad de expansión, diversificación a otras zonas donde exista la industria del petróleo	<b>Sector Petrolero:</b> Aplicación de economía circular por el reusó de aguas Modelo ambiental para el manejo de las aguas <b>Sector Palmicultor:</b> Uso de aguas industriales.	<b>Sector Petrolero &amp; Palmicultor</b> Evita accidentes ambientales, contribuye con la comunidad, Minimiza la responsabilidad ambiental y de seguridad, protección de la industria, atracción de entidades gubernamentales, generación de trabajos.
<b>Fuerza de trabajo capaz, motiva y tecnológicamente preparada</b>			
Perspectiva de aprendizaje crecimiento	<b>Capital Humano:</b> Sector Petrolero & Palmicultor. Capacidades mejoran Trabajo en equipo Crean relaciones	<b>Capital de información</b> Sector Petrolero & Palmicultor.	<b>Capital organizacional</b> Sector Petrolero & Palmicultor. Compartir y aplicar mejores prácticas Diseño y creatividad Innovación

*Nota. Mapa estratégico del proyecto*

El mapa estratégico expuesto muestra las interrelaciones entre los procesos internos de la organización y los activos intangibles que generan una ventaja competitiva. Ahora bien, el proyecto tiene como objeto apalancarse esencialmente en el aumento de la producción de crudo debido a la capacidad de separar agua del aceite aumenta.

Según los datos expuestos en la tabla 19 la demanda de agua diaria en el sector palmicultor es superior al volumen de agua producida por el campo petrolero, lo que brinda una solución ambiental y sostenible para ambas industrias. Si se tratan 790.500 barriles día de agua y según la referencia de corte de agua de 1: 13, la producción aumentaría en aproximadamente 60,000 barriles

día, lo que significa un ingreso adicional de 4.560.576,923 con un costo promedio del barril de US\$ 75 diario (Statista, 2023).

A este número hay que sumarle los ingresos adicionales al mantener la producción del cultivo en los tiempos de sequía, la posibilidad de la generación de biocombustible y de incrementar la producción de aceite de palma. Ahora bien, si Ecopetrol da en concesión a un tercero estas aguas y este tercero crea una empresa de servicios públicos, esta puede ser comercializada y obtener otra fuente de financiación.

Para calcular los costos tarifarios de acueducto y alcantarillado para zonas rurales y pequeñas municipalidades de menos de 2.500 suscriptores según lo enunciado el numeral 4.1.16.1 es necesario tener en cuenta factores como existencia de micromedición, información básica de las inversiones realizadas y de las necesidades de inversión futura, existencia de estratificación socioeconómica y su aceptación por parte de los usuarios, cultura de pago al interior de las comunidades, calidad de servicio en cuanto cantidad, frecuencia y calidad de agua, identificación de los distintos grupos de interés y actitudes al interior de las comunidades para el cobro del servicio de acueducto a través de la tarifa no se convierta en un factor de presiones políticas y modificación de usos y costumbres frente al uso del agua (Comisión de regulación de Agua Potable, 2023) y Saneamiento Básico, y lo demás expuesto en la ley 142 de 1994, lo que no se encuentra dentro del alcance de esta investigación

- ***Lienzo de Modelo de Negocio (CANVAS):***

Se lleva a cabo el análisis de la idea de negocio mediante la metodología “CANVAS”, con la cual se pretende observar el modelo de negocio en conjunto con todos los aspectos que forman parte del mismo. Para facilitar este ejercicio se realiza una reflexión exhaustiva desde nueve puntos de vista, los cuales son: segmento de clientes, propuesta de valor, canales, relaciones con clientes, fuente de ingresos, actividades clave, recursos clave y asociaciones clave.

**1. Segmento de clientes:** según la metodología CANVAS en esta sección del plano o croquis se busca responder a la pregunta ¿para quién se crea valor? Este bloque se enfoca en identificar y

describir los diferentes grupos de personas o entidades a las que se dirige el negocio para ofrecerles una propuesta de valor (Carretto et. al, 2015).

De acuerdo con lo anterior, se identifican tres grupos de clientes para el negocio, así: en primer lugar, la compañía Ecopetrol, vinculada al Ministerio de Minas y Energía, la cual participa en todos los eslabones de la cadena de hidrocarburos (exploración, producción, transporte, refinación y comercialización). El proyecto está dirigido específicamente al eslabón de producción en el campo petrolero Castilla la Nueva, debido a que el agua de producción generada durante este proceso luego de ser tratada en la STAP es vertida al Río Guayuriba, sin embargo, este vertimiento es limitado por la normativa del país, obstaculizando la capacidad productiva del campo cuando se supera el límite de vertimiento de 850.000 barriles diarios de agua producida según lo estipulado en la Resolución No. 2-6.07.0904 de 2007 modificada y prorrogada por la Resoluciones No. PSGJ.1.2.6.010.2471 de 2010, PSGJ.1.2.6.011.1745 de 2011 y PSGJ.1.2.6.16.1012 de 2016.

Como se mencionó anteriormente en la estrategia de negocio, el implementar un tratamiento adicional que permita al agua cumplir todas las especificaciones para su reusó en el sector agrícola, representaría para Ecopetrol la oportunidad de aumentar su capacidad de producción, así como sus ingresos por esta actividad, sin embargo, hay que mencionar que este cliente tendría que asumir los costos de implementar la tecnología (CAPEX), así como el costo operacional (OPEX).

En segundo lugar, se identifica como cliente el sector agricultor, esto debido a que el índice de escasez de la HH Azul en el tramo 1 del río Guayuriba se presenta en los meses de enero, febrero y marzo, específicamente en las Unidades Hidrográficas Nivel 1 (UHN1) : Caño la mora, La Sierra, caño San Cristóbal, caño las Animas y Río Guayuriba-Puerto López (Ada Tovar-Hernández et al., 2017), lo que genera una afectación sobre el cultivo de palma y su rendimiento en este periodo de tiempo, pues no se cuenta con la disponibilidad del recurso en estos meses, con el desarrollo del presente proyecto este grupo de interés se vería beneficiado, debido a que se garantizaría la disponibilidad del recurso durante todo el año. Además, es importante mencionar que este sector contribuye con la demanda del 43,1% del agua en el país (ENA, 2018), por lo que el reuso del agua de producción para riego de los cultivos de aceite de palma contribuye con la preservación del recurso hídrico y el cuidado del medio ambiente.

Por último, se identifican como grupo de clientes otros sectores industriales, ya que la propuesta para la continuidad del proyecto en el largo plazo, es proponer alternativas para el tratamiento de estas aguas de producción que permitan obtener la calidad de saturación (NFS), esto con el objetivo de reusar este tipo de agua en otros sectores como el ganadero y pecuario, satisfaciendo la demanda de agua correspondiente a sus actividades y a su vez implementando procesos sostenibles que contribuyan con el cuidado del medio ambiente.

**2. Propuesta de valor:** este bloque representa el conjunto de beneficios y valores que el modelo de negocio ofrece a sus clientes para satisfacer sus necesidades y resolver sus problemas de una forma única y diferenciada respecto a la competencia (Carretto et. al, 2015). Con esto en mente se establece que la idea de negocio genera valor desde tres enfoques diferentes. En primer lugar, para los tres clientes identificados la propuesta corresponde al desarrollo de procesos sostenibles y amigables con el ambiente, más específicamente aportando a la conservación del recurso hídrico.

En segundo lugar, para Ecopetrol esta innovación, representa la posibilidad de aumentar la producción de barriles de crudo diaria, lo que se vería reflejado en su rendimiento y el aumento de los ingresos. Por último, en cuanto al sector agrícola, este proyecto aporta valor al garantizar la oferta de agua durante todo el año, lo que permite el adecuado desarrollo del cultivo, que se refleja como ganancias económicas y aumento de los ingresos.

**3. Canales de distribución:** este bloque es una parte importante del lienzo de modelo de negocio CANVAS, debido a que representan los medios o vías a través de los cuales se llevara la idea de negocio a los clientes, así como su propuesta de valor (Carretto et. al, 2015). Dicho esto, se establecen los siguientes canales:

-Gobierno y entidades regulatorias: es primordial establecer alianzas con el gobierno y entidades ambientales regulatorias, pues estas pueden proporcionar apoyo y respaldo para el proyecto, así como facilitar la implementación y cumplimiento de las regulaciones.

-Asociaciones y organizaciones agrícolas: colaborar con asociaciones y organizaciones agrícolas como Fedepalma permitiría tener acceso directo a redes extensas de agricultores, que pueden ser un canal efectivo para difundir información sobre los beneficios del reúso del agua, y más



específicamente como se verían beneficiados los cultivos al emplear este tipo de agua como alternativa para de riego.

-Eventos y talleres: la organización de eventos, charlas o talleres relacionados con el reúso de este tipo de agua en la agricultura, permite atraer agricultores interesados en las ventajas y beneficios del proyecto, así como atrae la atención de uno de los interesados clave del proyecto, la compañía Ecopetrol y la de las comunidades ubicadas en la zona de influencia, que se verían beneficiadas.

-Acercamiento directo con los clientes: en el caso específico de Ecopetrol, es fundamental lograr un acercamiento directo con el cliente, ya que interactuar directamente con esta compañía permitiría obtener información valiosa sobre sus necesidades, preferencias, problemas y expectativas; llevando a crear una conexión cercana, que puede generar confianza y lealtad hacia la idea de negocio. Los clientes se sienten valorados cuando se toma el tiempo para escuchar sus opiniones y preocupaciones.

-Plataformas en línea y redes sociales: emplear plataformas en línea y redes sociales, puede ser beneficioso para el proyecto al permitir promocionar y dar a conocer el mismo. Crear un sitio web informativo y participar en foros puede ayudar a difundir el mensaje, y generar tanto interés como aprobación por parte de la comunidad al involucrarlos en el paso a paso del desarrollo del proyecto.

En cuanto a las comunicaciones es fundamental destacar los beneficios ambientales y económicos del reúso de agua de producción generada en el campo petrolero Castilla la Nueva en los cultivos de palma de la zona de influencia, y presentar evidencia sólida de su viabilidad y eficacia. La comunicación efectiva con Ecopetrol y la colaboración con diferentes actores del sector agrícola serán clave para el éxito en la implementación y adopción del proyecto.

**4. Relaciones con clientes:** en este bloque se busca identificar el tipo de relación que se pretende construir con cada uno de los clientes, así como la participación que tendrán en la propuesta de valor y la coherencia de esta relación con la comunicación y el posicionamiento de la idea de negocio (Carretto et. al, 2015). Para el caso de este proyecto se determina que deberá establecerse un tipo de relación diferente con cada uno de los clientes.

De este modo en cuanto a la compañía Ecopetrol, se debe implementar una relación de asistencia personal dedicada, buscando establecer un vínculo de largo plazo directo con el cliente, además es de vital importancia tener disponibilidad para resolver todas las dudas, inquietudes y necesidades del proyecto. En este punto es fundamental destacar que Ecopetrol podría considerarse el stakeholder más importante para la ejecución del proyecto, debido es el propietario del campo petrolero Castilla la Nueva quien suministrara el agua para ser tratada, además que se espera que esta compañía asuma parte los costos.

Para los clientes del sector agrícola se propone un relacionamiento mediante comunidades, lo que permite un mayor nivel de involucramiento del cliente, así como el establecimiento de una relación colaborativa entre los diferentes miembros de la comunidad.

**5. Fuentes de ingresos:** este bloque hace referencia a las diferentes formas con las que se espera generar ingresos a través de la propuesta de valor del proyecto y sus actividades. Es esencial identificar y diversificar las fuentes de ingresos para mantener la viabilidad financiera del negocio y asegurar su sostenibilidad en el largo plazo (Carretto et. al, 2015). Dicho esto, se pueden identificar diferentes fuentes de ingreso para esta propuesta de innovación, como se ha mencionado anteriormente con la implementación del proyecto Ecopetrol podría aumentar la producción de barriles de crudo diaria, que a su vez genera mayores ingresos para la compañía y permite la disminución del costo operativo asociado a la producción de crudo.

Por otro lado, se espera recibir ingresos por la venta de agua trata con un precio competitivo al sector agricultor, así como el crecimiento de los ingresos de este sector gracias al aumento de la producción de semilla de palma debido al riego constante, pues el sector contaría con la disponibilidad de agua para riego durante todos los meses del año. Adicionalmente, se obtienen beneficios tributarios por la implementación de economía circular tanto en la producción de crudo como en las actividades desarrolladas por el sector palmicultor. Es importante destacar que se plantea la expansión del reúso de este tipo de agua tratada a otras industrias, lo que traería como conciencia la generación de ingresos desde otros sectores.

**6. Recursos clave:** el objetivo de este bloque es describir los activos más importantes requeridos para hacer trabajar el modelo de negocio, en esta sección se busca responder las siguientes preguntas ¿Qué recursos clave requiere la propuesta de valor? ¿Qué recursos clave requiere la relación con los clientes? (Carretto et. al, 2015).

El recurso principal para el desarrollo de la propuesta de valor es el agua producida, ya que este se podría considerar el activo fundamental para el desarrollo del proyecto, también es necesario contar con los recursos financieros, pues el proyecto requiere inversión en capital para la adquisición de equipos de tratamiento, infraestructura y capacitación del personal. Adicionalmente, contar con los permisos y cumplir con las regulaciones ambientales y de salud que rigen el reuso de agua en el sector agrícola es indispensable. Por último, la mano de obra necesaria tanto para el montaje como para la operación de la planta de tratamiento.

En cuanto a los recursos clave para la relación con los clientes, establecer alianzas con autoridades gubernamentales, instituciones agrícolas y otros actores relevantes es de gran importancia para el proyecto. Es importante contar con el apoyo y la aceptación de la comunidad local y de agricultores para garantizar el éxito y la aceptación del proyecto.

**7. Actividades clave:** en esta sección se describen las cosas más importantes que se deben llevar a cabo para hacer funcionar el modelo de negocio (Carretto et. al, 2015). En este sentido, para el éxito del proyecto se requiere inicialmente plantear una correcta gestión y venta de la propuesta de valor entre Fedepalma y Ecopetrol, posteriormente será fundamental determinar la fuente de financiación del proyecto, para efectuar el montaje y operación de la planta de tratamiento.

Una vez se completen estas actividades, será esencial establecer un sistema de control y monitoreo para supervisar la calidad del agua, así como llevar un registro de los ingresos, costos y gastos que permita determinar el periodo de tiempo en el que se recuperara la inversión y finalmente se espera generar una ponencia legal para la creación de una normatividad para el reuso de aguas industriales en otro tipo de servicios, lo anterior con el objetivo de darle continuidad al negocio y ampliar el segmento de clientes.

**8. Alianzas clave:** este bloque de la metodología CANVAS, tiene como objetivo identificar los socios clave que permitirán el desarrollo exitoso del modelo de negocio. Para esto se proponen las siguientes preguntas ¿Quiénes son los aliados clave? ¿Qué recursos clave se adquieren desde los aliados? ¿Qué actividades clave realizan los aliados? (Carretto et. al, 2015).

A partir de estas tres preguntas se identifican tres aliados clave para el negocio, en primer lugar, las autoridades ambientales, que pueden ser aliados para proporcionar apoyo regulatorio, permisos y financiamiento en el proyecto. Un valor adicional de estas entidades es la generación de confianza por parte de las comunidades, así como el aporte a la credibilidad y reputación del proyecto.

Las comunidades también son identificadas como socios clave para el proyecto, tener una excelente relación con las comunidades permitirá el desarrollo éxito del mismo, así como la divulgación y conocimiento de este. Generar una buena relación con las comunidades disminuirá PQRs por el recurso hídrico y el impacto ambiental. Además, el negocio puede contribuir al desarrollo de la economía mediante la generación de empleo. Por último, las políticas del estado como el CONPES 4004, actúan como aliados clave del proyecto, debido a que este tipo de documentos buscan disminuir la huella hídrica e impulsar proyectos con economía circular en el uso del recurso.

**9. Estructura de costos:** esta estructura corresponde a todos los gastos y costos involucrados en el funcionamiento del negocio y la entrega de su propuesta de valor. Esta sección es clave para comprender la viabilidad financiera del negocio y para identificar cómo se distribuyen los recursos financieros (Carretto et. al, 2015).

Para la estructura de costos se tienen en cuenta el Capex (gasto en capital) y el Opex (costo permanente). El Capex es la inversión en capital o inmovilizado fijo que realiza una compañía para adquirir, mantener o mejorar su activo corriente, mientras que el Opex es un costo permanente relacionado al funcionamiento del sistema, puede traducirse como gasto de funcionamiento, gastos operativos, o gastos operacionales (Enrique et al., 2020).

En el caso de este proyecto el Capex está asociada al costo de construcción y montaje de la planta, adquisición de equipos, infraestructura y diseño e ingeniería. Por otro lado, el Opex está compuesto por los gastos operativos y recurrentes necesarios para mantener el funcionamiento y operación de la planta una vez está en marcha. Estos costos incluyen: gastos de energía, mantenimiento y reparaciones, personal y salarios, monitoreo y análisis, seguros y licencias y gastos administrativos.

Deutsche Gesellschaft For Internationale Zusammenarbeil (GIZ) GmbH en su estudio “Evaluación económica entre ósmosis inversa (OR) y destilación solar térmica” propone las siguientes cifras características de performance y de costos para la tecnología de osmosis inversa.

**Tabla 51**

*Costos asociados al proceso al tratamiento de agua de producción empleando la tecnología de ósmosis inversa*

<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor</b>
Producción diaria	m <sup>3</sup> /d	45.000
Tecnología		RO, pretratamiento
Consumo de energía	kWh/m <sup>3</sup>	4,0
CAPEX	US\$/m <sup>3</sup> /d	1.300
OPEX (Costos fijos, excluido electricidad)	US\$/m <sup>3</sup>	0,25

*Nota.* Evaluación económica entre ósmosis inversa (OR) y destilación solar térmica (p. 21), GIZ, (2015).

Ahora bien, con base en los datos presentados en la tabla 51 y teniendo en cuenta que el volumen de alimento a la planta de tratamiento es equivalente a 790.000 brls/día o 125.675,60 m<sup>3</sup>/día se presentan en la siguiente tabla los valores para este proyecto.

**Tabla 52**

*Costos asociados al proceso al tratamiento de agua de producción del campo petrolero Castilla la Nueva mediante un proceso de ósmosis inversa*

<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor</b>
Producción diaria	m <sup>3</sup> /d	125.676
Tecnología		RO, pretratamiento
Consumo de energía	kWh/m <sup>3</sup>	4,0
CAPEX	US\$	163.378.378
OPEX (Costos fijos, excluido electricidad)	US\$/día	31.418,92

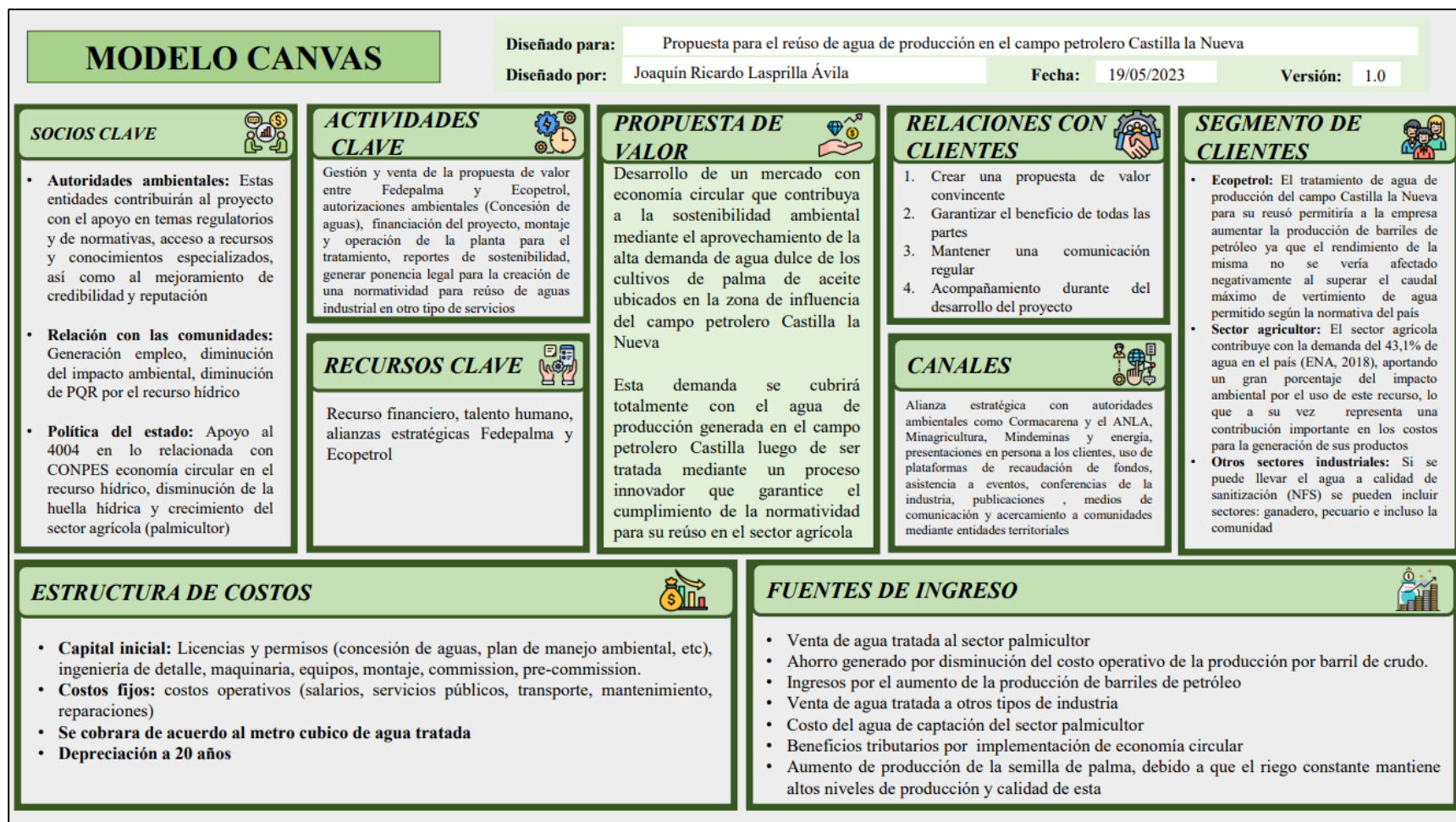
*Nota. Costos asociados al proceso al tratamiento de agua de producción del campo petrolero Castilla la Nueva mediante un proceso de ósmosis inversa*

De acuerdo a la información presentada se establece que el costo para el diseño, construcción y adquisición de equipos para la planta de tratamiento de ósmosis inversa tiene un costo de \$US 163.378.378 y para la producción de agua tratada tiene un costo diario de 31.418,92 \$UD.

El resultado del proceso antes mencionado se evidencia en el lienzo que se muestra a continuación, donde se expone el modelo de negocio simplificando las cuatro grandes áreas a tener en cuenta en cualquier empresa: clientes, oferta, infraestructura y viabilidad, mediante un cuadro conformado por los nueve módulos mencionados anteriormente donde se pueden apreciar claramente dichas áreas y sus interrelaciones.

**Figura 32**

*Modelo de negocio CANVAS para el reúso de agua de producción generada en el campo petrolero Castilla la Nueva en el cultivo de palma de aceite de la zona de influencia*



*Nota. Modelo de negocio CANVAS para el reúso de agua de producción generada en el campo petrolero Castilla la Nueva en el cultivo de palma de aceite de la zona de influencia*

A partir de lo expuesto en la Figura 32 se evidencia el planteamiento de una propuesta de valor que se basa en los principios de la economía circular, ya que se presenta un modelo económico con el cual se busca maximizar la eficiencia de recursos, minimizar los residuos y reducir la degradación ambiental, lo anterior mediante el reúso del agua de producción generada en el Campo petrolero Castilla la Nueva y la disminución de la demanda del recurso hídrico por parte del sector palmicultor en la zona de influencia, generando un beneficio económico. Dicho esto, es fundamental hacer énfasis en que esta propuesta de valor tiene miras de expansión para el futuro, pues la continuidad del negocio se plantea mediante dos puntos: el primero llevar el agua a calidad de sanitización (NFS) para su reúso en otros sectores y el segundo utilizar la metodología expuesta en el documento en otros campos petroleros.



## 6 CONCLUSIONES

A partir de la investigación y el análisis realizado se caracterizó el recurso hídrico para uso potencial en la zona de influencia, donde con base a los datos registrados (Ver tabla 19) se evidencia que la demanda de agua superficial (HH azul) de la industria de palma ubicada en el área de influencia del proyecto equivalente a 952.562,67 Brls/día para el año 2020 supera la oferta de agua de producción del campo petrolero Castilla la nueva (790.500 Brls/día). Adicionalmente, según lo reportado en el balance de masa (Ver Figura 30), se establece que se obtiene luego del proceso de tratamiento un volumen de agua tratada equivalente a 577,007 Bls/día por lo que se podría cubrir máximo el 60% de la demanda de agua del sector agrícola.

El impacto ambiental tanto de la industria petrolera como la del sector palmicultor disminuiría desde el punto de vista hídrico, debido a que en el primero la calidad del agua de vertimiento mejora y el volumen de vertimiento disminuye; mientras que para el sector Palmicultor la captación de agua de fuentes naturales podría reducirse hasta en un 60% protegiendo este recurso natural. Lo anterior generaría un beneficio mutuo tanto económico como ambiental en estos sectores industriales, así como gran aceptación social en los grupos de interés.

De otra parte, al comparar la calidad del agua de producción efluente de la STAP de la Estación Acacias al Río Guayuriba (Km 22) con la legislación vigente para el reúso de agua en el sector agrícola (Ver tabla 24) se determinó que hay dos parámetros que se encuentran fuera del límite máximo permisible y deben ser mejorados, los cuales son: sólidos disueltos totales (SDT) e hidrocarburos totales (THC). Así mismo de acuerdo a la legislación se estableció como meta de tratamiento una concentración de 1,0 mg/L para hidrocarburos totales (THC) y de 50 mg/L para sólidos disueltos totales (SDT). Posteriormente acorde a estas metas de tratamiento se determinó que es posible alcanzar estas condiciones a través de cuatro procesos: ósmosis inversa (OR), recompresión mecánica de vapor (MVR), electrodiálisis (ED) y Nanofiltración (NF).

De acuerdo a lo anterior los expertos que participaron del estudio a través del análisis jerárquico (AHP) seleccionaron la tecnología de ÓSMOSIS INVERSA con un porcentaje de favorabilidad del 49,83%, como el proceso idóneo para implementar en este caso de estudio donde los criterios

de evaluación entre las alternativas fueron la calidad del agua con una ponderación de importancia del 44%, costo de operación (26%), costo inicial (16%), eficiencia energética (7%), impacto ambiental (4%) y requerimiento de mantenimiento (3%). Destacando que los tratamientos de Recompresión (MVR) con un porcentaje de favorabilidad de 29,68% y Electrodiálisis (ED) con un porcentaje de favorabilidad de 7,70%, se vieron fuertemente desfavorecidos por su alto requerimiento de energía y costo inicial a pesar de su alta capacidad de tratamiento y volumen de agua a tratar.

Así mismo, se concluye que tanto la tecnología de ósmosis inversa (OS) como la de Nanofiltración (NF) requieren procesos complementarios ya sea para el ingreso del agua al equipo (pretratamiento) o para el tratamiento de residuos generados en el proceso, y que los cuatro procesos estudiados obtienen como producto un agua permeada por lo que es necesario desviar parte del agua obtenida como efluente del pretratamiento para su posterior mezcla con el agua que se obtiene como efluente del proceso en una relación que garantice el cumplimiento de la meta de tratamiento.

En cuanto a los procesos adicionales, para el caso de ósmosis inversa (OS), electrodiálisis (ED) y nanofiltración (NF) es necesario disminuir la concentración de hidrocarburos totales (THC) en el agua de alimento al equipo e incluir un proceso para el tratamiento de las aguas de rechazo. Ahora bien, para el proceso de ósmosis inversa con base al diagrama BFD y balance de masa realizados, con la implementación de un proceso de pretratamiento mediante adsorción sobre carbón activado y de acuerdo a la capacidad de recuperación de agua de la unidad de osmosis inversa, se determina que el rendimiento del proceso es de aproximadamente el 73%.

Desde otro punto de vista, se definió la estrategia de negocio a través de un análisis FODA, en el que se evaluaron tres factores internos del proyecto capacidad financiera, capacidad tecnológica y capacidad de talento humano, y cinco factores externos, factores económicos, factores políticos, factores sociales, factores tecnológicos y factores geográficos. A partir de la información obtenida en estos procesos se determina que si se tratan 790.500 barriles día de agua y según la referencia de corte de agua de 1: 13, la producción aumentaría en aproximadamente 60,000 barriles día, lo

que significa un ingreso adicional de \$US 4.560.576,923 con un costo promedio del barril de US\$ 75 diario (Statista, 2023).

De la formulación del modelo de negocio empleando la metodología CANVAS se concluye que para la ejecución del proyecto es fundamental crear acuerdos entre el sector Palmicultor y Petrolero que faciliten el desarrollo de la idea de negocio, así como se evidencia el beneficio no solo de las dos industrias, sino que también de varios actores como son la comunidad resaltando la generación de empleo, disminución de PQR, aumento de la favorabilidad, aceptación de los stakeholders y mejora en la calidad del medio ambiente. Otro punto crítico en el cual es relevante hacer hincapié es el papel que juegan las entidades ambientales en el desarrollo de la idea de negocio, como entes reguladores y líderes en temas de invocación ambiental, donde la educación a la comunidad y gestión entre dos tipos de industrias podrías ser definitivas para proyectos similares en otras regiones y convertirse en modelo de negocios para casos similares.

En lo referente a la estructura de costos presentada en la Tabla 52 se puede establecer que el costo para el diseño, construcción y adquisición de equipos, Capex para la planta de tratamiento de ósmosis inversa es de \$US 163.378.378 y para la producción de agua tratada (Opex) tiene un costo diario de \$US 31.418,92. Finalmente, de acuerdo con las proyecciones de crecimiento de la población y por ende la necesidad de más alimento seguro y de agua limpia, se hace indispensable que las industrias busquen que sus negocios sean más sostenibles, con menor impacto ambiental, favoreciendo y conservando la vida humana para poder ser empresas que perduren en el tiempo.

## BIBLIOGRAFÍA

- Abdallah Edmonton, W., Canadá, A., Buckley, J. S., Carnegie, A., Lumpur, K., Bernd, J. E., Muscat, H., Graue, A., Habashy, T., Seleznev, N., Signer, C., & Hussain, H. (s.d.). THE FUNDAMENTALS OF WETTING.
- Abdou, M., Carnegie, A., Mathews, S. G., Houston, K. M., O', M., Londres, K., Raghuraman, I. B., Wei, W., Houston, C., Cheng, T., & Xian, G. (2011). *FORMATION WATER VALUE*.
- Abdulrazzaq, R. S., Al-Juboury, A. I., & Kadhim, N. M. (2019). Review of treatment methods for produced water. *Journal of Water Process Engineering*, 30, 100631.
- Ada Tovar-Hernández, N., Manuel Trujillo-González, J., Iván Muñoz-Yáñez, S., Aurelio Torres-Mora, M., & Zárate, E. (2017). Evaluation of Sustainability of Rice and Palm Oil Crops in the Guayuriba River Basin (Meta, Colombia), through water footprint evaluation Avaliação da Sustentabilidade das Culturas de Arroz e Óleo de Palma Na Bacia do Rio Guayuriba (Meta, Colombia) Através da Avaliação da Pegada Hídrica. In Meta. Colombia (T. 21, Numerus 1).
- Adel, M., Cristian, S., Daniel, P., & David, G. (2019). Application of the Analytical Hierarchy Process (AHP) for decision-making with expert judgment. *Ingeniare*, 27(3). <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-33052019000300348>
- Adnan, A., Farooq, R., Naeem, A., Saeed, R., & Ahmad, R. (2020). Nanofiltration technology for produced water treatment: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(6), 104356.
- Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH). (2020). Producción Fiscalizada Crudo 2020. [https://www.anh.gov.co/documents/669/Produccion\\_Fiscalizada\\_Crudo\\_2020\\_.xlsx](https://www.anh.gov.co/documents/669/Produccion_Fiscalizada_Crudo_2020_.xlsx)

Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH). (2021). Producción Fiscalizada Crudo 2021. [https://www.anh.gov.co/documents/4495/Producci%C3%B3n\\_Fiscalizada\\_Crudo\\_2021.xlsx](https://www.anh.gov.co/documents/4495/Producci%C3%B3n_Fiscalizada_Crudo_2021.xlsx)

Ahumada, O. (2020, iunius 3). *Resbalón de Rubiales como rey de los campos petroleros del País*. El Tiempo. <https://www.eltiempo.com/economia/sectores/el-resbalon-de-rubiales-en-su-reinado-en-produccion-petrolera-de-colombia-502880>

Akob, D. M., Mumford, A. C., Orem, W., Engle, M. A., Klinges, J. G., Kent, D. B., & Cozzarelli, I. M. (2016). Wastewater Disposal from Unconventional Oil and Gas Development Degrades Stream Quality at a West Virginia Injection Facility. *Environmental Science and Technology*, 50(11), 5517–5525. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b00428>

Al-Bastaki, N., Al-Ghouti, M. A., Al-Batati, R., Al-Hashimi, A., & Abu Amr, S. S. (2015). Removal of total dissolved solids from produced water by electrochemical process. *Journal of Water Process Engineering*, 8, 66-72. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2015.08.004>

Al Bazed, G., Ettouney, R. S., Tewfik, S. R., Sorour, M. H., & El-Rifai, M. A. (2014). Salt recovery from brine generated by large-scale seawater desalination plants. *Desalination and Water Treatment*, 52(25-27), 4689-4697. <https://doi.org/10.1080/19443994.2013.810381>

Al-Mamun, A., Ahmed, M. A., & Al-Battashi, H. (2017). Profitability assessment of nanofiltration technology for produced water treatment in the petroleum industry: A case study in Oman. *Journal of Cleaner Production*, 162, 386-394.

Almansa-Manrique, É. F., Velásquez-Penagos, J. G., & Rodríguez-Yzquierdo, G. A. (2018). Efecto del uso de aguas provenientes de la producción petrolera en actividades agrícolas y pecuarias. In *Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria* (T. 19, Numerus 2, pp. 403–420). Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria Corpoica. [https://doi.org/10.21930/rcta.vol19\\_num2\\_art:1016](https://doi.org/10.21930/rcta.vol19_num2_art:1016)

- Alzahrani, S., Mohammad, A. W., Abdullah, P., & Jaafar, O. (2013). Potential tertiary treatment of produced water using highly hydrophilic nanofiltration and reverse osmosis membranes. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 1(4), 1341–1349. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2013.10.002>
- Atzori, G., Guidi Nissim, W., Caparrotta, S., Santantoni, F., & Masi, E. (2019). Seawater and water footprint in different cropping systems: A chicory (*Cichorium intybus* L.) case study. *Agricultural Water Management*, 211(September 2018), 172–177. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.09.040>
- Amani, M., Saghafi, H., & Etemadi, M. (2019). Removal of Total Dissolved Solids and Total Petroleum Hydrocarbons from Oil Field Produced Water Using Nanofiltration. *Separation Science and Technology*, 54(1), 80-89.
- Autoridad Ambiental en el Departamento del meta, CORMACARENA (2018), Expediente 97-0023, pág. 15-19.
- Avendaño, A., & Diana, V. (2019). Colombia: escasez de agua por palma y petróleo en Puerto Gaitán. Mongabay. <https://es.mongabay.com/2019/10/palma-de-aceite-en-colombia-afectaciones-agua-en-vereda-petrolera/>
- Banco mundial. (2022, October 5). El agua en la agricultura. Banco Mundial. <https://onx.la/a1b5d>
- Basile, A. & Nunes, S.P. (2011). *Advanced Membrane Science and Technology for Sustainable Energy and Environmental Applications*, Elsevier, 2011, p.848. [https://itoeste.com/herramientas/url/?gclid=Cj0KCQjw3JanBhCPARIsAJpXTx6HIYwFIOuNKm\\_tAoKIWF80taRjZgFQJvkb1Jbz\\_mILWNCxZZT8yUaAoFDEALw\\_wcB](https://itoeste.com/herramientas/url/?gclid=Cj0KCQjw3JanBhCPARIsAJpXTx6HIYwFIOuNKm_tAoKIWF80taRjZgFQJvkb1Jbz_mILWNCxZZT8yUaAoFDEALw_wcB)
- Bakke, T., Klungsøyr, J., & Sanni, S. (2013). Environmental impacts of produced water and drilling waste discharges from the Norwegian offshore petroleum industry. *Marine Environmental Research*, 92, 154–169. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2013.09.012>

CAR, Corporinoquia, & UTGS. (2018). POMCA Río Guayuriba Actualización Capítulo 13  
Caracterización Flora.

[https://drive.google.com/file/d/1zc\\_rdONCjClhfugqXWxZuL9rjIenbuf4/view](https://drive.google.com/file/d/1zc_rdONCjClhfugqXWxZuL9rjIenbuf4/view)

Carretto, D.I., Harispe, M. & Vaz, D.I. (2015). The Business Model Canvas. Taller Encarré.  
[http://www.fadu.edu.uy/marketing/files/2013/04/BMC\\_2015.pdf](http://www.fadu.edu.uy/marketing/files/2013/04/BMC_2015.pdf)

Castañeda, D. (2022). Informe técnico de caracterización fisicoquímica, microbiológica, hidrobiológica y toxicológica de aguas residuales industriales tratadas de la estación Acacias y cuerpo de agua receptor del vertimiento (río Guayuriba) monitoreo 1er trimestre-febrero 2022 gerencia de operaciones de desarrollo y producción castilla (gdt)-Estación Acacias Acacias-Meta.

Castaño, R. S., & Torres, J. A. (2021). Reporte de Análisis Regional de la SZH de los ríos: Guayuriba y Negro. <https://s.itoeste.com/bj8>

Claudia Muro FRaMadCDa. Membrane Separation Process in Wastewater Treatment of Food Industry. In: Valdez B, editor. Food Industrial Processes – Methods and Equipment 2012.

Cormacarena, & Ecopetrol. (2010). Plan de ordenamiento y manejo de la Cuenca Hidrográfica del Río Guayuriba.

Cormacarena, & Ecopetrol. (2010b). POMCA RESUMEN EJECUTIVO - RIO GUAYURIBA.  
[https://drive.google.com/file/d/12wHL9PJgKgJukNUBior9xqVz2Hm4N\\_-x/view](https://drive.google.com/file/d/12wHL9PJgKgJukNUBior9xqVz2Hm4N_-x/view)

Cormacarena. (2020). RESOLUCION N° PS - GJ.1.2.6.20 1671.  
[https://cormacarena.micolombiadigital.gov.co/sites/cormacarena/content/files/000028/1386\\_resolucion-1671.pdf](https://cormacarena.micolombiadigital.gov.co/sites/cormacarena/content/files/000028/1386_resolucion-1671.pdf)

CORMACARENA (2021). Resolución N° PS-GJ 1.2.6.21.1372.  
<https://vlex.com.co/vid/resolucion-n-ps-gj-877438475>

CORMACARENA. (2021). TR-CORMACARENA 001-21-Estado de Calidad y Línea Base  
TRAMO 1-RIO GUAYURIBA.  
[https://drive.google.com/file/d/1G2gyMhddTWbHkt0WMGO8E8aibgNaQi\\_0/view](https://drive.google.com/file/d/1G2gyMhddTWbHkt0WMGO8E8aibgNaQi_0/view)

Cormacarena, Cidea, & Omacha, F. (2021). Plan Decenal de Educación Ambiental - Meta 2021 - 2031.

Cormacarena. (2022). Cormacarena realiza seguimiento a Palmicultores para la regulación del uso del agua, 31 de Marzo. <https://www.cormacarena.gov.co/cormacarena-realiza-seguimiento-a-palmicultores-para-la-regulacion-del-uso-del-agua/>

Corpoguavio, Car, CORMACARENA, Corporinoquia & UTS. (2018). POMCA Río Guayuriba Actualización.

Danforth, C., Chiu, W. A., Rusyn, I., Schultz, K., Bolden, A., Kwiatkowski, C., & Craft, E. (2020). An integrative method for identification and prioritization of constituents of concern in produced water from onshore oil and gas extraction. *Environment International*, 134. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105280>

Departamento Nacional de Planeación. (2020). Documento CONPES 4004. Consejo Nacional de Política Económica y Social. <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Economicos/4001.pdf>

Delgado-García, S. (2017). GESTIÓN DEL AGUA EN COMUNIDADES RURALES; CASO DE ESTUDIO CUENCA DEL RÍO GUAYURIBA, META-COLOMBIA. <https://www.redalyc.org/journal/3217/321753629005/>

Dutta, A., Chakma, S., Bhattacharyya, B., & Reza, M. S. (2019). Techno-economic analysis of zero liquid discharge (ZLD) system for the treatment of RO brine water. *Journal of Water Process Engineering*, 30, 100549.



Ecopetrol. (2020). Reporte Integrado de gestión Sostenible 2019. <https://s.itoeste.com/bG1>

Ecopetrol. (2023). *Eficiencia operativa en el manejo del agua*. Ecopetrol. <https://s.itoeste.com/bh9>

Elmobarak, W.F.; Hameed, B.H.; Almomani, F.; Abdullah, A.Z (2021). A Review on the Treatment of Petroleum Refinery Wastewater Using Advanced Oxidation Processes. *Catalysts* 11, 782. <https://doi.org/10.3390/catal11070782>

Ersahin, M. E., Ozgun, H., Kaya, R., Kose Mutlu, B., Kinaci, C., & Koyuncu, I. (2018). Treatment of produced water originated from oil and gas production wells: a pilot study and cost analysis. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(7), 6398–6406. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0961-7>

Fases De La Producción Petrolera [34m71gw92p46]. (n.d.). <https://idoc.pub/documents/idocpub-34m71gw92p46>

Fedegan. (2019). Primer ciclo de vacunación.

Fedepalma. (2022). La palma de aceite en Colombia | Fedepalma. <https://web.fedepalma.org/la-palma-de-aceite-en-colombia-departamentos>

Folger, P., & Tiemann, M. (2016). Human - Induced Earthquakes from Deep - Well Injection : A Brief Overview.

Fuston R, Ganesh R, Leong LY. Evaluation of technical and economic feasibility of treating oilfield produced water to create a “new” water resource. Ground Water Protection Council (GWPC), Colorado Spring, US 2002:16-7.

Gabelich, C. J. (2001). Membrane processes: a technology review with hyperlinks. *Journal of Membrane Science*, 181(1), 29-42.

- Gallagher, T. J. (2016). Starting and running a small business for Canadians for dummies. John Wiley & Sons.
- Gallup, D. L., Isocoff, E. G., & Iii, D. N. S. (1996). Use of Anbersorb Carbonaceous Adsorbent for Removal of BTEX Compounds from Oil-Field Produced Water (T. 15, Numerus 3).
- García, J., Herrera, S., y Cabarcas, M. Manejo del agua de producción para proyectos de gas en aguas profundas y ultraprofundas del caribe colombiano. *El Reventón Energético*, 15(2), 89-105, 2017. <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistafuentes/article/view/7686/8698>  
DOI: <https://doi.org/10.18273/revfue.v15n2-2017008>
- Geoffrey, S. (2022). Cleaning-In-Place (CIP). *Encyclopedia of Dairy Sciences*, 219–221. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818766-1.00374-3>
- Gil, C., & Mendoza, B. (2019). Diseño de un modelo de ingeniería para la gestión del agua excedente del campo castilla a fin de disponerla en cultivos que generan biocombustibles, según la RESOLUCIÓN 1207 DE 2014. Fundación Universidad de América.
- Gibson, R. B. (2015). Environmental assessment and management in the food industry: Life cycle assessment and related approaches. Woodhead Publishing.
- Gómez Ortiz, E. (2016). Análisis de los conflictos ambientales del área de influencia de extracción de Materiales Pétreos en la zona media de la cuenca del río Guayuriba - Departamento del Meta. 156.  
<https://repositorio.unillanos.edu.co/bitstream/handle/001/1202/runillanos%20m-?sequence=1>
- Gordon, G. (2018). Water quality: Principles and practices of water supply operations. CRC Press.
- GRAIN. (2020). GRAIN | Ríos tóxicos La lucha por recuperar el agua acaparada por las plantaciones de palma aceitera en Indonesia. <https://grain.org/es/article/6582-rios-toxicos->

la-lucha-por-recuperar-el-agua-acaparada-por-las-plantaciones-de-palma-aceitera-en-indonesia

Grupo Banco Mundial. (2017). El agua en la agricultura. <https://www.bancomundial.org/es/topic/water-in-agriculture>

Hackney, J., & Wiesner, M. R. (1996). Cost assessment of Produced Water Treatment. <https://s.itoeste.com/bHZ>

Hassan, A. A., Naeem, H. T., & Hadi, R. T. (2018). DEGRADATION OF OILY WASTE WATER IN AQUEOUS PHASE USING SOLAR (ZnO, TiO<sub>2</sub> and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) CATALYSTS. J. Biotechnol, 15(4), 927–934. [www.pjbt.org](http://www.pjbt.org)

Hickenbottom, K. L., Hancock, N. T., Hutchings, N. R., Appleton, E. W., Beaudry, E. G., Xu, P., & Cath, T. Y. (2013). Forward osmosis treatment of drilling mud and fracturing wastewater from oil and gas operations. Desalination, 312, 60–66. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2012.05.037>

Hou, L., Yang, S., Li, D., & Zeng, F. (2021). Membrane distillation coupled with mechanical vapor recompression for the treatment of high-salinity wastewater: A review. Journal of Membrane Science, 625, 119161.

IDEAM. (2015). *Estudio Nacional del Agua* (IDEAM, Cur.). IDEAM. [www.ideam.gov.co](http://www.ideam.gov.co)

IDEAM. (2019). *Estudio Nacional del Agua*. IDEAM. [www.ideam.gov.co](http://www.ideam.gov.co)

IDEAM. (2022). *Demanda y uso*. IDEAM. [www.ideam.gov.co](http://www.ideam.gov.co)

Igunnu, E. T., & Chen, G. Z. (2014). Produced water treatment technologies. International Journal of Low-Carbon Technologies, 9(3), 157–177. <https://doi.org/10.1093/ijlct/cts049>

- Intagri. (2021). Clasificación de Aguas para Riego Agrícola. <https://www.intagri.com/articulos/agua-riego/clasificacion-de-aguas-para-riego-agricola> -
- International Water Association (IWA). (2016). Produced Water: Treatment and Disposal. <https://iwa-network.org>
- ISD & CORMACARENA. (2020). Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica (POMCH) del Río Guayuriba. Villavicencio.
- IPIECA. Petroleum refining water/wastewater use and management. London, United Kingdom;
- IPIECA Operation Best Practice Series: 2010.
- Jafari, A., Ghaemi, N., & Rezania, S. (2018). Treatment of reverse osmosis (RO) concentrate by integrated membrane processes and crystallization: A review. *Journal of Water Process Engineering*, 22, 50-70.
- Jafari, M. R., Mehrnia, M. R., & Torabian, A. (2019). Removal of total dissolved solids from produced water using nano-filtration membrane. *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua*, 68(3), 207-216.
- Jafari, Y., Mahvi, A. H., Mesdaghinia, A. R., Nasser, S., Nabizadeh, R., & Alimohammadi, M. (2019). Application of electro-dialysis process for removing total petroleum hydrocarbons (TPHs) from oil field produced water. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(17), 17615-17627.
- Jafarnejad S. (2016) *Petroleum Waste Treatment and Pollution Control*: Butterworth-Heinemann.
- Jafarnejad, S. (2017). Jafarnejad S. A Comprehensive Study on the Application of Reverse Osmosis (RO) Technology for the Petroleum Industry Wastewater Treatment. *J. Water Environ.*

Nanotechnol, 2(4), 243–264. <https://doi.org/10.22090/jwent.2017.04.003>

Jafarinejad, S., & Esfahani, M. R. (2021). A review on the nanofiltration process for treating wastewaters from the petroleum industry. In *Separations* (Vol. 8, Issue 11). MDPI. <https://doi.org/10.3390/separations8110206>

Johnson, R., Thompson, S., & Martinez, E. (2019). Characterization and Treatment of Nanofiltration Reject Water in Petroleum Field Operations. *Journal of Water Process Engineering*, 28, 254-262.

Jim, C. (2011). Mechanical Vapor Recompression Evaporation. An eco-friendly wastewater treatment process. <https://www.ptonline.com/articles/mechanical-vapor-recompression-evaporation>

Juan, I. A., & Sánchez, C. (2020). ‘Riego en el cultivo de palma de aceite: consideraciones técnicas para alcanzar el potencial productivo’ ‘LA PALMICULTURA SOSTENIBLE, NUESTRO COMPROMISO’.

Kaplan, R.S. & Norton, D.P. (2004). *Mapas estratégicos: convirtiendo activos intangibles en resultados tangibles*. Gestión 200

Katzir, L., Volkmann, Y., Daltrophe, N., Korngold, E., Mesalem, R., Oren, Y., Gilron, J., 2010. WAIV e wind aided intensified evaporation for brine volume reduction and generating mineral byproducts. *Desalination and Water Treatment* 13, 63-73.

Kaya, Y., Ölmez-Hancı, T., & Başakçılardan-Kabakçı, S. (2016). Electrochemical removal of total petroleum hydrocarbons from synthetic oily wastewater using graphite electrodes. *Separation Science and Technology*, 51(14), 2361-2368.

- Khan, N. A., Engle, M., Dungan, B., Holguin, F. O., Xu, P., & Carroll, K. C. (2016). Volatile-organic molecular characterization of shale-oil produced water from the Permian Basin. *Chemosphere*, 148, 126–136. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.12.116>
- Khan, S., Yusoff, M. S., & Abakr, Y. A. (2019). Electrokinetic-enhanced electrodiaysis for produced water treatment: A review. *Journal of Environmental Management*, 233, 661-674.
- Korkmaz, K. S., İnci, İ., & Çiftçi, H. (2015). A review of electrodialysis for desalination of brackish water. *Desalination and Water Treatment*, 55(5), 1163-1175.
- Kotas, T. J. (2015). *The exergy method of thermal plant analysis*. Elsevier.
- Kundu, S., Gupta, S., & Ghosh, S. K. (2019). Review on electro-dialysis process for produced water treatment. *Separation Science and Technology*, 54(2), 267-282.
- LaRepublica. (2021, ianuaris 18). *Cinco empresas son responsables de 85% de la producción de petróleo en Colombia*. LaRepublica. <https://s.itoeste.com/bUD>
- LaRepublica. (2022, maius 18). *Petroleras y cementeras crecen en el primer trimestre, impulsadas por alza de precios*. LaRepublica. <https://s.itoeste.com/bwW>
- Lenntech. (2022). ED / EDR - Zero Liquid Discharge. Lenntech. <https://www.lenntech.es/processes/Brine-Treatment/conventional-brine-treatment/edr.htm>
- López, R. C., Luque, S., & Hernández, A. (2018). Electrodiálisis para la recuperación de metales: una revisión. *Journal of Membrane Science*, 550, 137-151. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2017.10.066>
- Li, G., An, T., Chen, J., Sheng, G., Fu, J., Chen, F., Zhang, S., & Zhao, H. (2006). Photoelectrocatalytic decontamination of oilfield produced wastewater containing

- refractory organic pollutants in the presence of high concentration of chloride ions. *Journal of Hazardous Materials*, 138(2), 392–400. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.05.083>
- Li, W., Shang, X., Wang, X., Zhang, H., & Liu, C. (2016). Characteristics and treatment of oilfield produced water with high total dissolved solids by nanofiltration. *Desalination and Water Treatment*, 57(27), 12796-12806.
- Li, W., Yan, H., Zhang, Y., & Xie, Y. (2020). Nanofiltration membrane for water treatment: a review. *Journal of Water Process Engineering*, 37, 101516.
- Luo, M., Wang, Z. (2001). Complex fouling and cleaning-in-place of a reverse osmosis desalination system. In *DESALINATION* (Vol. 141). [www.elsevier.com/locate/desal](http://www.elsevier.com/locate/desal)
- Ma, G., Geza, M., Cath, T. Y., Drewes, J. E., & Xu, P. (2018). iDST: An integrated decision support tool for treatment and beneficial use of non-traditional water supplies – Part II. Marcellus and Barnett Shale case studies. *Journal of Water Process Engineering*, 25, 258–268. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2018.08.007>
- Macedonio, F., Ali, A., Poerio, T., El-Sayed, E., Drioli, E., & Abdel-Jawad, M. (2014). Direct contact membrane distillation for treatment of oilfield produced water. *Separation and Purification Technology*, 126, 69–81. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2014.02.004>
- Madwar, K., & Tarazi, H. (2003). Desalination techniques for industrial wastewater reuse. *Desalination*, 152(1-3), 325–332. doi:10.1016/s0011-9164(02)01080-9
- Mejía, J. (2000). Consumo de agua por la palma de aceite y efectos del riego sobre la producción de racimos, una revisión de literatura (T. 21, Numerus 1).
- Mesa, J., & Azuero, A. F. (2021). Balance 2020 y perspectivas 2021 de la agroindustria de la palma de aceite [Powerpoint]. Fedepalma, 1–41. [http://web.fedepalma.org/sites/default/files/files/Fedepalma/03032021\\_Balance\\_y\\_perspectivas\\_de\\_la\\_agroindustria\\_de\\_la\\_palma\\_de\\_aceite\\_2020-2021\\_CMG\\_ASM.pdf](http://web.fedepalma.org/sites/default/files/files/Fedepalma/03032021_Balance_y_perspectivas_de_la_agroindustria_de_la_palma_de_aceite_2020-2021_CMG_ASM.pdf)

- Mesa, S. L., Orjuela, J. M., Ortega Ramírez, A. T., & Sandoval, J.-A. (2018). Revisión del panorama actual del manejo de agua de producción en la industria petrolera colombiana. *Gestión y Ambiente*, 21(1), 87–98. <https://doi.org/10.15446/ga.v21n1.69792>
- Minambiente. (2010). Política Nacional Para La Gestión Integral del Recurso Hídrico. <https://s.itoeste.com/bz6>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). Decreto 1076 de 2015 Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible - Gestor Normativo - Función Pública. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=78153>
- Minambiente. (2021). Gestión Integral del Recurso Hídrico. <https://www.minambiente.gov.co/index.php/gestion-integral-del-recurso-hidrico>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2022). *GLOSARIO-Índice de Vulnerabilidad Hídrica (IVH)*. <https://accionclimatica.minambiente.gov.co/glossary/indice-de-vulnerabilidad-hidrica-ivh/>
- Minambiente. (2023). Política Nacional Para La Gestión Integral del Recurso Hídrico. <https://s.itoeste.com/bz6>
- Minambiente. (2023). TARIFA MÍNIMA TASA RETRIBUTIVA POR VERTIMIENTOS PUNTUALES AL AGUA. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. <https://s.itoeste.com/bb7>
- Mintcheva, N., Gicheva, G., & Panayotova, M. (2022). Reduction of Heavy Hydrocarbons from Oilfield Produced Water. *Pollutants*, 2(2), 234–251. <https://doi.org/10.3390/pollutants2020016>



- Mickley, M.C., 2001. Membrane Concentrate Disposal: Practices and Regulation. Bureau of Reclamation, Denver, CO. Water Treatment Engineering and Research Group; Mickley and Associates, Boulder, CO.
- Mobley, R. K. (2014). Maintenance fundamentals. Butterworth-Heinemann.
- Mousavi, S. M., Nasiri, M., & Mahmoudi, M. (2015). Electrochemical treatment of oily wastewater: a review. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 13(1), 62.
- Moreno, J. (2002). El proceso analítico jerárquico (AHP). Fundamentos, metodología y aplicaciones. *Rect@ Revista Electrónica de Comunicaciones y Trabajos de ASEPUMA*, 1, 28-77.
- Nasiri, M., Jafari, I., & Parniankhoy, B. (2017). Oil and Gas Produced Water Management: A Review of Treatment Technologies, Challenges, and Opportunities. *Chemical Engineering Communications*, 204(8), 990–1005. <https://doi.org/10.1080/00986445.2017.1330747>
- Ning, R.Y., Troyer, T.L., 2009. Tandem reverse osmosis process for zero-liquid discharge. *Desalination* 237, 238-242.
- Ning, R.Y., Tarquin, A.J., Balliew, J.E., 2010. Seawater RO treatment of RO concentrate to extreme silica concentrations. *Desalination and Water Treatment* 22, 286e291
- OBSERVATORIO PIRENAICO DEL CAMBIO CLIMÁTICO. (2020). *Clima pasado y actual*. <https://www.opcc-ctp.org/es/sector/clima-pasado-actual>
- Ortega, A. T. (2019). 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 [Fundación Universidad de América]. <https://hdl.handle.net/20.500.11839/7693>

- Pavlović, M., Mihajlović, I., & Lević, Z. (2016). Economic feasibility of solar-evaporation ponds for low-concentration brines. *Journal of Cleaner Production*, 112, 4259-4272.
- Penagos -- Mosquera, (Colombia): AGROSAVIA, (2020). Sistemas productivos agrícolas y aguas tratadas asociadas a la extracción del petróleo. <https://s.itoeste.com/bz6>
- Pérez-González, A., Urtiaga, A. M., Ibáñez, R., & Ortiz, I. (2012). State of the art and review on the treatment technologies of water reverse osmosis concentrates. In *Water Research* (Vol. 46, Issue 2, pp. 267–283). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.10.046>
- Potter, L. (2020). Colombia's oil palm development in times of war and 'peace': Myths, enablers and the disparate realities of land control. In *Journal of Rural Studies* (Vol. 78, pp. 491–502). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2019.10.035>
- Randall, D. G., Nathoo, J., & Lewis, A. E. (2011). A case study for treating a reverse osmosis brine using Eutectic Freeze Crystallization-Approaching a zero waste process. *Desalination*, 266(1–3), 256–262. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.08.034>
- RESOLUCIÓN 1207 de 2014, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible 1 (2014). <https://www.minambiente.gov.co/documento-entidad/resolucion-1207-de-2014/>
- RESOLUCIÓN 00916 de 2016, ANLA 1 (2016). <https://s.itoeste.com/bT3>
- RESOLUCION 0854 de 2022. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2022/08/Resolucion-0854-de-2022.pdf>
- RESOLUCIÓN N° PS-GJ 1.2.6.21.1127. Corporación para el Desarrollo Sostenible del Área de Manejo Especial La Macarena "CORMACARENA". [https://www.asuntoslegales.com.co/edictos/detalle/003\\_VEF\\_218-1-1](https://www.asuntoslegales.com.co/edictos/detalle/003_VEF_218-1-1)

- Salem, F., & Thiemann, T. (2022). Produced Water from Oil and Gas Exploration—Problems, Solutions and Opportunities. *Journal of Water Resource and Protection*, 14(02), 142–185. <https://doi.org/10.4236/jwarp.2022.142009>
- SAATY, T.L. (1990). An exposition of the AHP. In reply to the paper “Remarks on the analytic hierarchy process”. *Management Science* 36(3), 259-268.
- Statista. (2023, 17 abril). Precio medio del crudo fijado por la OPEP 1960-2023. <https://es.statista.com/estadisticas/635114/precio-medio-del-crudo-fijado-por-la-oep/>
- Scanlon, B. R., Ikonnikova, S., Yang, Q., & Reedy, R. C. (2020). Will Water Issues Constrain Oil and Gas Production in the United States? *Environmental Science and Technology*, 54(6), 3510–3519. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b06390>
- Scanlon, B. R., Reedy, R. C., Xu, P., Engle, M., Nicot, J. P., Yoxheimer, D., Yang, Q., & Ikonnikova, S. (2020). Can we beneficially reuse produced water from oil and gas extraction in the U.S.? *Science of the Total Environment*, 717(February), 137085. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137085>
- Sebastián, C., Rojas, J., Molina, F., & Betancur, T. (2011). ÍNDICES DE ESCASEZ Y DE CALIDAD DEL AGUA PARA LA PRIORIZACIÓN DE CUERPOS DE AGUA EN LOS PLANES DE ORDENACIÓN DEL RECURSO HÍDRICO. APLICACIÓN EN LA JURISDICCIÓN DE CORANTIOQUIA. In *Revista Ingenierías Universidad de Medellín* (T. 10, Numerus 19).
- Semana. (2022). Agricultura, el sector que más agua demanda en el país. *Semana*. <https://www.semana.com/medio-ambiente/articulo/agricultura-el-sector-que-mas-agua-demanda-en-el-pais/43450/>
- Serna, H. (2014). *Gerencia estrategica*. Bogota: Panamericana Editores.

- Shokrollahzadeh, S., Golmohammad, F., Naseri, N., Shokouhi, H., & Arman-Mehr, M. (2012). Chemical oxidation for removal of hydrocarbons from gas-field produced water. *Procedia Engineering*, 42, 942–947. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.487>
- SIAC. (2022). Cifras y Estadísticas Ambientales. SISTEMA DE INFORMACIÓN AMBIENTAL DE COLOMBIA. [http://cifras.siac.gov.co/Portal-SIAC-web/faces/agua\\_inicio.xhtml](http://cifras.siac.gov.co/Portal-SIAC-web/faces/agua_inicio.xhtml)
- Smith, J., Johnson, A., & Rodriguez, M. (2018). Impact of Total Hydrocarbons on Nanofiltration Performance in Produced Water Treatment. *Journal of Environmental Engineering*, 144(3), 04018010.
- Singh, M., & Pinnau, I. (2014). Membrane cleaning in membrane technology: A review. *Separation and Purification Technology*, 133, 13-28.
- Solis, M. (2017). Sistema de tratamiento de aguas mediante osmosis inversa. <https://s.itoeste.com/bSZ>
- SOSTENIBLE, U. T. G. (2018). Capítulo 9 hidrología, oferta y demanda de agua. <https://s.itoeste.com/bhU>
- Subramaniam, V., Hashim, Z., Loh, S. K., & Astimar, A. A. (2020). Assessing water footprint for the oil palm supply chain- a cradle to gate study. *Agricultural Water Management*, 237, 106184. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106184>
- Sun, D., Zhang, H., Chen, J., Wei, Y., & Zhu, Y. (2020). Performance evaluation of mechanical vapor recompression for treating oilfield produced water. *Journal of Water Process Engineering*, 38, 106370.
- T, H., B, H., P, H., J, E., James, W., & B, S. (2014). Mechanical Vapor Recompression for the Treatment of Shale-Gas Flowback Water. *Society of Petroleum Engineers*, 54–62. <https://s.itoeste.com/bCH>

Taha, H. (2003). *Operations Research. An Introduction*. Upper Saddle River: Prentice Hall.

Tarnacki, K., Meneses, M., Melin, T., van Medevoort, J., & Jansen, A. (2012). Environmental assessment of desalination processes: Reverse osmosis and Memstill®. *Desalination*, 296, 69–80. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2012.04.009>

Tiehm, A., Stieber, M., Werner, P., & Frimmel, F. H. (2001). Combination of biological treatment and electrochemical remediation for PAH-contaminated soil leachate. *Journal of Soils and Sediments*, 1(1), 9-12.

TR-CORMACARENA (2021). Estado de calidad de agua y determinación de línea base en el Tramo 1-Río Guayuriba, 1-20.

Vargas, L. (2020). Impactos ambientales de la producción petrolera en Colombia y su relación con la innovación tecnológica en los últimos quince años. [Tesis para optar por el título de especialista en gestión ambiental]. Universidad de América. <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/7843/1/463974-2020-I-GA.pdf>

Velásquez, J., & Almansa, E. (2020). Conceptualización de la calidad de agua asociada a la extracción del petróleo. <https://s.itoeste.com/buk>

Veil, J.A. 2008. Thermal Distillation Technology for Management of Produced Water and Frac Flowback Water. Water Technology Brief #2008-1, Contract No. DE-AC02-06CH11357, Argonne National Laboratory, Lemont, Illinois (13 May 2008).

Yang, Z., Li, M., Guo, M., Zhu, L., & Zhang, Q. (2021). Efficiency analysis of mechanical vapor recompression for treatment of oilfield produced water. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(1), 1259-1269.

- YASA ET. (2022, september 26). Reverse Osmosis Reject and Brine Treatment for Desalination Plants | Zero Liquid Discharge Solutions. YASA Environmental Technology. <https://s.itoeste.com/btv>
- Wang, C., Yang, Y., Dong, W., Cui, Y., & Xue, L. (2019). Performance of the mechanical vapor compression (MVC) system with different types of feedwater. *Water*, 11(1), 181.
- Wang, X., & Zhou, Y. (2019). Nanofiltration membrane technology for treatment of oilfield produced water: A review. *Journal of Environmental Management*, 231, 634-645. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.10.029>
- Wastewater Treatment. *J. Water Environ. Nanotechnol.*, 2017; 2(4): 243-264. DOI: 10.22090/jwent.2017.04.003
- Wei, L., Chen, M., Li, M., & Liu, J. (2019). Evaluation of nanofiltration technology for produced water treatment in the petroleum industry. *Journal of Cleaner Production*, 208, 731-737.
- Zarei, H., Asghari, M., Khoshandam, B., & Zarrabi, M. (2018). Performance evaluation of electro-dialysis process in removal of heavy metals, salts and hydrocarbons from produced water in the oil industry. *Journal of Water and Environmental Nanotechnology*, 3(4), 281-290.
- Zhang, M., Zhang, J., Wang, Y., & Zhao, Q. (2020). Pilot-scale study of electro-dialysis for the treatment of produced water from an oil field. *Separation Science and Technology*, 55
- Zea, N. (2020). El sector agropecuario creció 6,8% e impulsó la economía colombiana en el primer trimestre de 2020. *Minagricultura*. <https://www.minagricultura.gov.co/noticias/Paginas/El-sector-agropecuario-creció-6,8-e-impulsó-la-economía-colombiana-en-el-primer-trimestre-de-2020-.aspx>

## **ANEXOS**

**ANEXO 1**  
**INSTRUMENTO APLICADO A EXPERTOS**  
  
**MATRIZ DE EXPERTOS**  
**MAESTRIA EN GESTIÓN AMBIENTAL PARA LA COMPETITIVIDAD**  
**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA**  
**I-2023**

**Título del Proyecto:** “Propuesta para el reúso de agua de producción en el campo petrolero Castilla la nueva”

**Nombre del Estudiante:** Joaquín Ricardo Lasprilla Ávila

**Dirección:** Harvey Andrés Milquez Sanabria

**Descripción de la Herramienta:** Usted ha sido seleccionado como un perfil experto en temas relacionados con el tratamiento de agua de producción generada en campos petroleros para su reúso, por ende, de acuerdo a la información que se le proporciona a continuación esperamos pueda completar seis matrices que se encuentran al final de este documento siguiendo el proceso de análisis jerárquico (AHP), desarrollado por Thomas L. Saaty.

**Antecedentes:**

En el campo petrolero Castilla la Nueva de Ecopetrol para el año 2019 se estimó una producción de 1.040.000 BWPD (Barriles de agua de producción por día) (Gil & Mendoza, 2019), de los cuales de acuerdo al análisis realizado durante el desarrollo de este estudio se vierten alrededor de 790.500 BWPD. Ahora bien, es importante destacar que Ecopetrol realiza un tratamiento a estas aguas antes de ser dispuestas para su vertimiento, el cual se lleva a cabo mediante una separación primaria de aceite/agua donde se hace uso de un interceptor de capa corrugada (CPI) y una separación secundaria de aceite/agua empleando un operación unitaria de clarificación por gas



disuelto (DGF), para posteriormente realizar un tratamiento secundario en el que se emplean filtros a base de cascarilla de nuez negra con propiedades oleofílicas; el tratamiento finaliza con el enfriamiento de la corriente de agua tratada (Velásquez & Almansa, 2020).

Este proceso llevado a cabo en la STAP del campo Castilla permite la obtención de agua con muy buena calidad (Ecopetrol, 2022), reflejando su viable reúso en otras actividades industriales, por lo cual de acuerdo a las actividades económicas desarrolladas en la zona de influencia se determinó que esta agua tiene potencial reúso para riego de los cultivos de palma de aceite. Sin embargo, para este fin el efluente de la STAP incumple algunos de los parámetros establecidos en la normativa por lo que se debe implementar un proceso terciario o de pulido que permita al agua alcanzar las propiedades necesarias. En la siguiente tabla se observan cuáles son los parámetros, así como los valores que tiene el agua que se obtiene como efluente de las STAP y las metas de tratamiento que se establecen en esta investigación para el proceso.

**Tabla 1**

*Parámetros fisicoquímicos para el agua de producción y sus valores establecidos como meta de tratamiento*

<b>Parámetro</b>	<b>Unidad de Medida</b>	<b>Agua de Producción Tratada Campo Castilla</b>	<b>Meta de tratamiento</b>
Hidrocarburos Totales	mg/L	2,68	1,0
Sólidos Disueltos Totales (SDT)	mg/L	322	50,0

*Nota. Parámetros fisicoquímicos para el agua de producción y sus valores establecidos como meta de tratamiento*

De acuerdo a la investigación desarrollada se establecieron cuatro posibles alternativas de tratamiento: 1. Ósmosis Inversa (OR), 2. Re-compresión Mecánica de Vapor (MVR), 3. Electrodiálisis (ED) y 4. Nanofiltración (NF). Estas son evaluadas mediante seis matrices, cada una correspondiente a un criterio establecido para la evaluación de las alternativas, los cuales son: 1. Calidad del agua (CA), 2. Requerimiento de Mantenimiento (RM), 3. Capital inicial (CI) 4. costo operativo (CO), 5. Requerimiento de Energía (RE) y 6. Impacto ambiental (IA).

### **Ejecución de la Matriz de Expertos**

Con base a sus amplios conocimientos y experiencia en el tratamiento de agua de producción del sector petrolero para su reúso complete las cinco matrices que se muestran a continuación. Para este fin tenga en cuenta que se denominan **parámetro (A)** a aquellos que se encuentran en la primera columna de la matriz identificados con color amarillo y **parámetro (B)** a aquellos que se encuentran en la primera fila de la matriz identificados con color azul, para completar la matriz se recurre a la escala de evaluación según el AHP que es de 1 a 9, donde cada valor corresponde a los siguientes planteamientos:

**Tabla 2**

*Escala de referencias en casa de que el parámetro A sea preferible sobre el parámetro B*

Planteamiento verbal de la Alternativa	Calificación Numérica
El parámetro A es extremadamente preferible sobre el parámetro B	9
El parámetro A es entre muy fuerte y extremadamente preferible sobre el parámetro B	8
El parámetro A es muy fuertemente preferible sobre el parámetro B	7
El parámetro A es entrefuertemente y muy fuertemente preferible sobre el parámetro B	6
El parámetro A es fuertemente preferible sobre el parámetro B	5
El parámetro A es entre moderadamente y fuertemente preferible sobre el parámetro B	4
El parámetro A es moderadamente preferible sobre el parámetro B	3
El parámetro A es entre igualmente y moderadamente preferible sobre el parámetro B	2
El parámetro A es igualmente preferible sobre el parámetro B	1

*Nota.* Escala de referencias en casa de que el parámetro A sea preferible sobre el parámetro B. Tomado de: Application of the Analytical Hierarchy Process (AHP) for decision-making with expert judgment (2019). [https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0718-33052019000300348](https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-33052019000300348)

**Tabla 3**

*Escala de referencias en casa de que el parámetro B sea preferible sobre el parámetro A*

Planteamiento verbal de la Alternativa	Calificación Numérica
El parámetro B es extremadamente preferible sobre el parámetro A	1/9
El parámetro B es entre muy fuerte y extremadamente preferible sobre el parámetro A	1/8
El parámetro A es muy fuertemente preferible sobre el parámetro B	1/7

El parámetro B es entrefuertemente y muy fuertemente preferible sobre el parámetro A	1/6
El parámetro B es fuertemente preferible sobre el parámetro A	1/5
El parámetro B es entre moderadamente y fuertemente preferible sobre el parámetro A	1/4
El parámetro B es moderadamente preferible sobre el parámetro A	1/3
El parámetro B es entre igualmente y moderadamente preferible sobre el parámetro A	1/2
El parámetro B es igualmente preferible sobre el parámetro A	1

**Nota.** Escala de referencias en casa de que el parámetro B sea preferible sobre el parámetro A. Tomado de: Application of the Analytical Hierarchy Process (AHP) for decision-making with expert judgment (2019). [https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0718-33052019000300348](https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-33052019000300348)

**Matriz 1:** Tenga en cuenta que en esta matriz se valoran las cuatro alternativas de tratamiento (RO, MVR, ED y NF) con base al primer criterio de evaluación correspondiente a calidad del agua (AC).

Calidad del Agua				
Parámetros	OR	MVR	ED	NF
OR				
MVR				
ED				
NF				

**Matriz 2:** Tenga en cuenta que en esta matriz se valoran las cuatro alternativas de tratamiento (RO, MVR, ED y NF) con base al segundo criterio de evaluación correspondiente a requerimiento de mantenimiento (RM).

Requerimiento de Mantenimiento				
Parámetros	OR	MVR	ED	NF
OR				
MVR				
ED				
NF				

**Matriz 3:** Tenga en cuenta que en esta matriz se valoran las cuatro alternativas de tratamiento (RO, MVR, ED y NF) con base al tercer criterio de evaluación correspondiente a capital inicial (CI).

Capital Inicial				
Parámetros	OR	MVR	ED	NF
OR				
MVR				
ED				
NF				

**Matriz 4:** Tenga en cuenta que en esta matriz se valoran las cuatro alternativas de tratamiento (RO, MVR, ED y NF) con base al tercer criterio de evaluación correspondiente a costo operativo (CO).

Costo Operativo				
Parámetros	OR	MVR	ED	NF
OR				
MVR				
ED				
NF				

**Matriz 5:** Tenga en cuenta que en esta matriz se valoran las cuatro alternativas de tratamiento (RO, MVR, ED y NF) con base al quinto criterio de evaluación correspondiente al requerimiento de energía (RE).

Requerimiento de Energía				
Parámetros	OR	MVR	ED	NF
OR				
MVR				
ED				
NF				

**Matriz 6:** Tenga en cuenta que en esta matriz se valoran las cuatro alternativas de tratamiento (RO, MVR, ED y NF) con base al sexto criterio de evaluación correspondiente a impacto ambiental (IA).

Impacto Ambiental				
Parámetros	OR	MVR	ED	NF
OR				
MVR				
ED				
NF				

## **ANEXO 2**

### **RECOMENDACIONES**

Para dar continuidad a este proyecto se recomienda implementar una metodología de análisis jerárquico (AHP) que tenga como objetivo la selección de un método de pretratamiento para el proceso de ósmosis inversa, así como una que tenga como objetivo la selección de una alternativa para el tratamiento del agua de rechazo generada en el proceso de ósmosis inversa.

Se evidencio que existe una oferta de agua de producción mayor a la demanda necesaria para el sector Palmicultor, por lo que se recomienda usar estas aguas en otro tipo de cultivo como lo es el de arroz o en el sector ganadero, e incluso se podría estudiar la implementación de un ten de tratamiento que permita usar este tipo de aguas en el consumo humano de acuerdo a los parámetros de la National Science Foundation (NSF).

Para ampliar el reúso de aguas de producción para el consumo humano es fundamental que las entidades ambientales locales realicen un análisis de estos casos, así como de los límites máximos permisibles de cada uno de los parámetros que permita emitir la legislación pertinente y contar con un proceso regulado.

Para la continuidad del negocio se recomienda tener en cuenta dos puntos: el primero llevar el agua a calidad de sanitización (NFS) para su reúso en otros sectores y el segundo utilizar la metodología expuesta en el documento en otros campos petroleros.