

**PLAN DE NEGOCIO PARA LA UTILIZACIÓN DE AGUA DE PRODUCCIÓN  
MEJORADA CON TRATAMIENTOS NIVEL III PARA LOS CAMPOS  
PETROLEROS DE LA GERENCIA REGIONAL ORIENTE DE ECOPETROL S.A.**

**ANDRÉS MAURICIO LÓPEZ DAVILA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOMECAÑICAS  
ESCUELA DE ESTUDIOS INDUSTRIALES Y EMPRESARIALES  
MAESTRÍA EN GERENCIA DE NEGOCIOS  
BUCARAMANGA**

**2015**

**PLAN DE NEGOCIO PARA LA UTILIZACIÓN DE AGUA DE PRODUCCIÓN  
MEJORADA CON TRATAMIENTOS NIVEL III PARA LOS CAMPOS  
PETROLEROS DE LA GERENCIA REGIONAL ORIENTE DE ECOPETROL S.A.**

**ANDRÉS MAURICIO LÓPEZ DAVILA**

**Trabajo de aplicación para optar el título de Magister en Gerencia de  
Negocios**

**Director**

**AURA CECILIA PEDRAZA AVELLA**

**PhD. Ciencias Económicas**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOMECAÑICAS  
ESCUELA DE ESTUDIOS INDUSTRIALES Y EMPRESARIALES  
MAESTRIA EN GERENCIA DE NEGOCIOS  
BUCARAMANGA**

**2015**

## CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN .....	12
1. PLANTEAMIENTO Y JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA .....	15
2. OBJETIVOS.....	19
2.1 OBJETIVO GENERAL.....	19
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	19
3. ESTUDIO DE LAS REGULACIONES AMBIENTALES PARA LA UTILIZACIÓN DEL AGUA DE PRODUCCIÓN EN PROYECTOS AGROINDUSTRIALES .....	21
3.1. NORMATIVIDAD ESPECÍFICA PARA LA DISPOSICIÓN DE AGUA.....	22
3.2. LICENCIAMIENTO AMBIENTAL CAMPOS DE LA GRO .....	23
3.3. ALTERNATIVAS DE VERTIMIENTO Y CAUDALES AUTORIZADOS .....	24
3.4. ESTUDIO DE LEGISLACIÓN AMBIENTAL PARA PROYECTOS AGROINDUSTRIALES .....	27
4. PRODUCCIÓN DE AGUA Y CRUDO EN LOS CAMPOS DE LA GERENCIA REGIONAL ORIENTE .....	29
4.1. DESCRIPCION DEL AREA DE INFLUENCIA DE LA GERENCIA REGIONAL ORIENTE.....	30
4.2. COMPORTAMIENTO HISTÓRICO DE PRODUCCIÓN DE CRUDO Y AGUA EN EL CAMPO RUBIALES.....	32
4.3. IMPACTO DE LA PRODUCCIÓN DE AGUA EN COSTOS DE PRODUCCIÓN DEL CAMPO RUBIALES .....	33
4.4. COMPORTAMIENTO HISTORICO DE LIFTING COST EN EL CAMPO RUBIALES.....	34

5. ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS DEL AGUA DE PRODUCCIÓN DEL CAMPO RUBIALES.....	37
5.1. PARÁMETROS DE SALIDA DEL AGUA DE LAS PLANTAS EXISTENTES .	37
6. ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO DE AGUA PARA USO AGROINDUSTRIAL (TRATAMIENTOS NIVEL III) .....	42
6.1. PROCESOS Y OPERACIONES DE SEPARACIÓN.....	42
7. EVALUACIÓN FINANCIERA .....	48
7.1. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD .....	51
8. ANÁLISIS DE RIESGOS.....	55
9. MODELO CANVAS.....	58
10. ORGANIGRAMA PROPUESTO .....	59
11. CONCLUSIONES .....	60
BIBLIOGRAFÍA.....	62
ANEXOS .....	67

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Marco Normativo.....	22
Tabla 2. Licencias Ambientales para campos de la GRO.....	23
Tabla 3. Alternativas para la disposición de agua de producción .....	24
Tabla 4. Parámetros físico-químicos establecidos en el Decreto 1594/84 para vertimiento de agua .....	25
Tabla 5. Parámetros establecidos en la Resolución 1207 de 2014 para riego de agua establecidos .....	26
Tabla 6. Campos pertenecientes a la Gerencia Regional Oriente .....	29
Tabla 7. Caracterización general municipio Puerto Gaitán, Meta .....	31
Tabla 8. Resultados de las plantas existentes .....	40
Tabla 9. Rangos y resultados obtenidos para algunos parámetros en las plantas existentes.....	40
Tabla 10. Procesos y operaciones relacionados al tratamiento de aguas residuales .....	42
Tabla 11. Ventajas y desventajas de la ósmosis inversa .....	45
Tabla 12. Ventajas y desventajas proceso de electrodiálisis .....	46
Tabla 13. Valores para los principales parámetros agua de riego .....	46
Tabla 14. Evaluación de Riesgos.....	57

## LISTA DE FIGURAS

Pág.

Figura 1. Etapas del tratamiento de agua antes de su disposición final .....	15
Figura 2. Participación de Campos en la producción de agua de la GRO .....	16
Figura 3. Pronóstico de producción Quifa y Rubiales .....	17
Figura 4. Esquema Sombrilla de trabajo de aplicación .....	18
Figura 5. Participación de Campos en la producción de agua de la GRO .....	29
Figura 6. Mapa Físico – Político del Departamento del Meta .....	30
Figura 7. Comportamiento de producción del campo Rubiales .....	32
Figura 8. Relación Agua/Aceite campo Rubiales y Quifa.....	32
Figura 9. Componentes de costos Campo Rubiales.....	33
Figura 10. Costo de levantamiento campo Rubiales.....	34
Figura 11. Producción total de agua Campo Rubiales.....	35
Figura 12. Descripción del proceso de tratamiento de agua.....	38
Figura 13. Descripción de plantas existentes en campo Rubiales.....	39
Figura 14. Resultados Evaluación Económica (VAC) .....	49
Figura 15. Tarifas de operación .....	50
Figura 16. Incremento de Capex en 30% para tratamientos terciarios .....	51
Figura 17. Incremento de Capex en 100% para tratamientos terciarios .....	52
Figura 18. Incremento de Opex en 30% para tratamientos terciarios .....	52
Figura 19. Incremento de Opex en 220% para tratamientos terciarios .....	53
Figura 20. Ciclo de Gestión del Riesgos definido por PMI.....	55
Figura 21. Matriz de Gerencia del Riesgo definido por PMI.....	56
Figura 22. Modelo CANVAS para plan de negocio .....	58
Figura 23. Organigrama propuesto para la nueva unidad de negocio .....	59

## LISTA DE ANEXOS

**Pág.**

Anexo A. Modelo Evaluación Financiera .....	67
---	----

## RESUMEN

**TITULO:** PLAN DE NEGOCIO PARA LA UTILIZACIÓN DE AGUA DE PRODUCCIÓN MEJORADA CON TRATAMIENTOS NIVEL III PARA LOS CAMPOS PETROLEROS DE LA GERENCIA REGIONAL ORIENTE DE ECOPETROL S.A.\*

**AUTOR:** ANDRES MAURICIO LOPEZ DAVILA\*\*

**PALABRAS CLAVES:** Agua, Costo, Agroindustrial, Viabilidad, Sostenibilidad

### RESUMEN

La principal característica de los yacimientos de mayor producción en la Gerencia Regional Oriente, es que son de crudos pesados con alta producción de agua (relación mayor incluso de 20 barriles de agua por cada barril de aceite extraído). Los altos costos asociados al tratamiento y disposición final del agua, hacen necesario la búsqueda de alternativas diferentes al vertimiento e inyección, las cuales son costosas y rechazadas por las comunidades cercanas.

Las Licencias Ambientales existentes en la Gerencia, incluyen la opción de disposición de agua mediante vertimiento e inyección; solamente el campo Rubiales tiene permiso para uso del agua producida en aprovechamiento agroindustrial.

Los tratamientos existentes en el campo Rubiales cumplen con los requerimientos establecidos por las normas para inyección y vertimiento; sin embargo, el aprovechamiento agroindustrial requiere de parámetros fisicoquímicos diferentes, más exigentes. Por lo anterior se hace necesaria la instalación de un sistema de pulimento adicional que garantice la obtención de estos parámetros. De acuerdo a las propiedades del agua del campo Rubiales y la evaluación económica desarrollada, se recomienda usar las tecnologías de ósmosis inversa y electrodiálisis. Es importante anotar que en la actualidad no existe ningún campo en Colombia que le apunte al aprovechamiento agroindustrial del agua de producción asociada al crudo, solamente se han realizado pilotos, y en algunos casos la Autoridad Ambiental ha negado estos permisos.

---

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Estudios Industriales y Empresariales. Maestría en Gerencia De Negocios. Director: Aura Pedraza Avella

## SUMMARY

**TITLE:** BUSINESS PLAN FOR THE USE OF WATER TREATMENT ENHANCED PRODUCTION FOR THE OIL FIELDS OF GERENCIA REGIONAL ORIENTE OF ECOPETROL. \*

**AUTHOR:** ANDRES MAURICIO LOPEZ DAVILA \*\*

**KEYWORDS:** Treatment, Level III, Lifting Cost, Viability, Sustainability

### SUMMARY

The main feature of the major production sites in the *Gerencia Regional Oriente* (GRO) is that they are heavy crude oil with high water production (higher ratio even 20 barrels of water per barrel of oil extracted). The high costs associated with treatment and disposal of water make it necessary to search for different alternatives to dumping and injection, these options are expensive and aren't the best from the community point view, neither from environmental point view

Existing in the GRO, Environmental Licenses include the option of disposal by dumping water and injection; but Rubiales only have permission to use the water produced in farm use

Existing treatments at Rubiales meet the requirements established by the rules for injection and dumping; however, the farm use requires, most demanding different physicochemical parameters. Therefore installing an additional polishing system that ensures obtaining these parameters is necessary

According to the properties of water from the Rubiales field and economic evaluation developed, we recommend using Reverse Osmosis and electrodialysis technologies. It is important to note that there is no field in Colombia today that point to farm water use associated with oil production, but pilots have been conducted, and in some cases the Environmental Authority has denied these permissions.

---

\* Degree work

\*\* Faculty of Engineering physicomechanical. School of Industrial and Business Studies. Master of Business Management. Director: Aura Pedraza Avella

## INTRODUCCIÓN

En el negocio de producción de hidrocarburos, siempre hay asociada una producción implícita de agua, la cual podría llegar a ser relevante; esto depende principalmente del yacimiento, su energía asociada y sus características petrofísicas, del tipo de crudo, y especialmente de su gravedad API (densidad) y su viscosidad. Normalmente la producción de agua es más alta en crudos pesados (menores valores API), incluso superando relaciones de 10/1; es decir, por cada barril de petróleo se obtienen diez barriles de agua.

El agua de producción normalmente es salada, con compuestos inorgánicos disueltos, escamas suspendidas, gases disueltos, hidrocarburos dispersos, bacterias y variedad de sustancias tóxicas y radiactivas naturales.<sup>1</sup> Las características son propias de cada campo y no existe un tratamiento único que aplique en todos los casos.

Actualmente el agua producida, es dispuesta por vertimiento a fuentes hídricas o en pozos inyectoros, previo tratamiento nivel I: separación del agua del crudo, retiro de grasas y aceites y sólidos suspendidos y nivel II: Enfriamiento y retiro de fenoles (aplica para el caso vertimiento)<sup>2</sup>

En los campos petroleros de Ecopetrol en el Departamento del Meta, los cuales representan en la actualidad más del 50% de la producción de crudo, la producción de agua es del orden de 5.2 millones de barriles por día, de los cuales 3.3 millones son de la Gerencia Regional Oriente. Para entender la dimensión del volumen extraído diariamente de estos yacimientos, es importante hacer las siguientes comparaciones: el agua consumida en Bogotá diariamente también

---

<sup>1</sup> ARNOLD Ken, Surface production Operations. Houston, TX 1998, p.194.

<sup>2</sup> ECOPETROL S.A., Manejo de aguas de producción, Ingeniería Conceptual. Bogotá 2011, p.2.

equivale a 3.3 millones de barriles por día. Además, si se cargara esta producción de agua en carrotanques de 200 Bls (tractomulas), se podría ocupar la vía Bogotá-Armenia en su totalidad.

Los ejemplos de mayor relevancia en el incremento exponencial de producción de agua son los campos de Rubiales y Quifa, en donde Ecopetrol es socio con Meta Petroleum Corp. desde 2003 y 2010 respectivamente.

En la actualidad, la relación de producción agua/crudo de los campos Quifa y Rubiales es de 20 y el costo de tratamiento y disposición de agua (vía inyección en pozo de disposición ('disposal')) es de US\$/Bbl. 0.3; es decir, el costo de cada barril de crudo es de US\$ 6 solamente por la producción de agua. A medida que la relación crezca, tal y como es de esperarse, la viabilidad financiera de estos campos estará en riesgo; esto es más crítico en escenarios como los actuales, en los que el precio del crudo referencia para Colombia (WTI) incluso ha llegado a estar por debajo de los US\$50/Bbl en el 2014.

De lo anterior, es claro que el gran reto para las empresas petroleras –entre ellas Ecopetrol-, es buscar opciones viables para la disposición del agua. Esta viabilidad no solamente incluye lo referente a la legislación ambiental, también incluye factores técnicos, sociales y económicos. Desde el punto de vista técnico existen alternativas diferentes que permiten darle usos productivos a estos grandes volúmenes de agua (denominados tratamientos de nivel III).

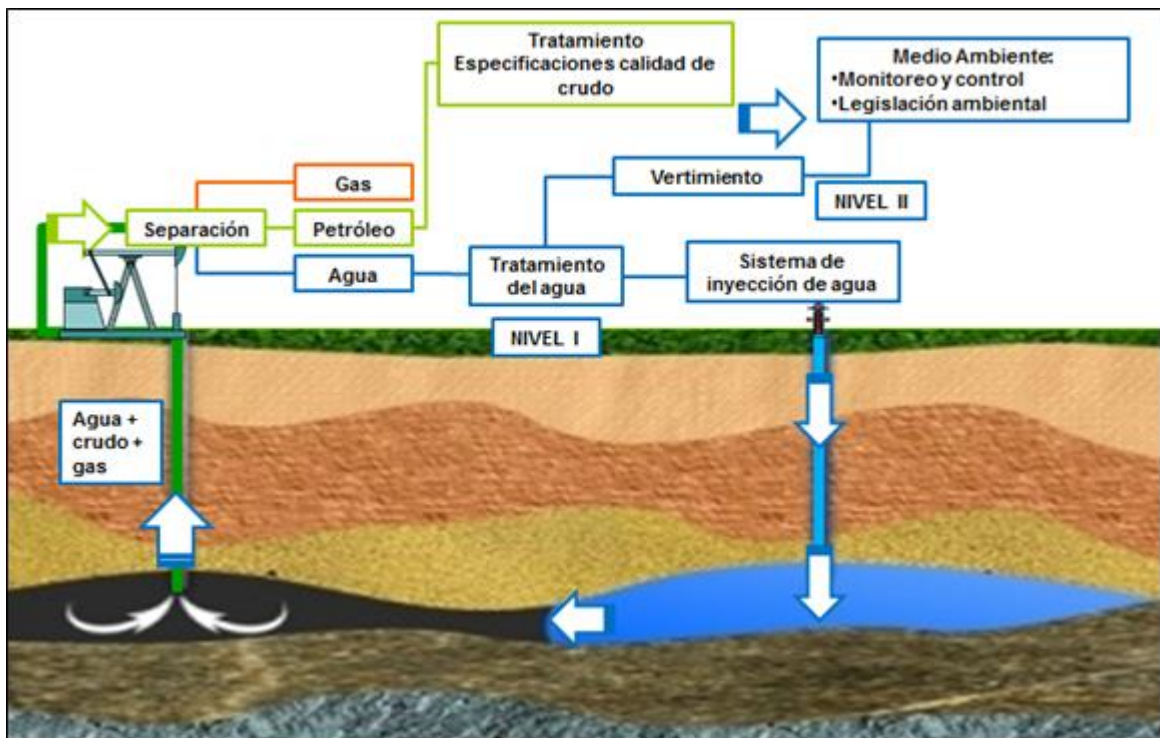
En este trabajo se busca dar claridad a la problemática de la producción y disposición de agua asociada a producción de crudo y sus consecuencias, para finalmente llegar a una propuesta en el tratamiento de agua de producción para el uso agroindustrial que aplique en los campos de la Gerencia Regional Oriente.

La propuesta está enmarcada dentro de un proyecto sombrilla que se presenta con dos compañeros del MBA, en donde se integra la viabilidad técnica con la ambiental y agroindustrial, buscando el aprovechamiento ecoeficiente del agua, lo cual será fundamental en la búsqueda de viabilidad económica de los campos de la Gerencia Regional Oriente en el mediano y largo plazo.

## 1. PLANTEAMIENTO Y JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

Tal como se mencionó anteriormente, el agua de producción está asociada a la producción de crudo. En la Figura 1 se pueden apreciar los procesos asociados y las diferentes etapas del tratamiento de agua antes de su disposición final, de acuerdo a los modelos actuales de operación en la Gerencia Regional Oriente

Figura 1. Etapas del tratamiento de agua antes de su disposición final



Fuente: Vicepresidencia de Producción. Presentación sobre Ecopetrol S.A. [CD-ROM]. [Bogotá]: La Empresa, 2013. Etapas del tratamiento de agua antes de su disposición final.

Los campos de la Gerencia Regional Oriente generan 3.3 millones de barriles por día de agua residual industrial, los cuales en su gran mayoría son reinyectados al subsuelo después de ser tratados. Esta operación de disposición (vía vertimiento y

reinyección) cuesta al año más de 800 millones de dólares. En la actualidad el crecimiento en producción de crudo de todos los campos del Meta está limitado por las restricciones existentes en las Licencias Ambientales para vertimiento e inyección de agua, puesto que, como se mencionó anteriormente, este crecimiento está ligado a un fuerte incremento en la producción de agua.

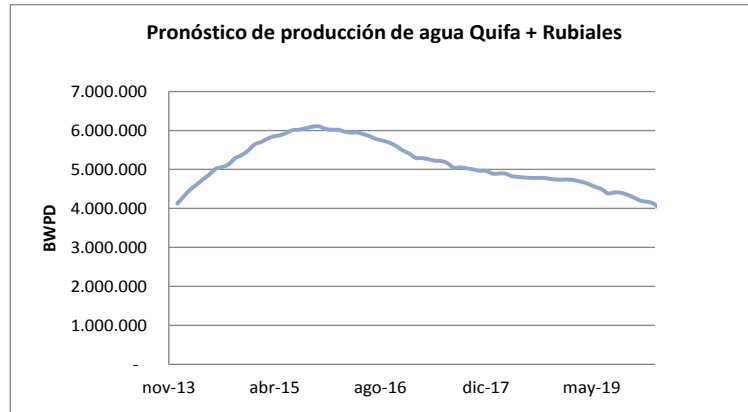
La producción de agua de la Gerencia se concentra en los campos Quifa y Rubiales, los cuales representan el 97% del total (ver Figura 2); por lo anterior, este trabajo se concentrará en estos dos campos.

Figura 2. Participación de Campos en la producción de agua de la GRO



Las proyecciones actuales muestran un crecimiento de esta producción de agua a valores superiores a los 6 millones de barriles por día en los campos Quifa y Rubiales (ver Figura 3), lo cual indica que los costos por tratamiento de agua serán mayores e incluso pondrán en riesgo la viabilidad económica de muchos campos.

Figura 3. Pronóstico de producción Quifa y Rubiales



Fuente: Gerencia Regional Oriente. Presentación sobre Ecopetrol S.A. [CD-ROM]. [Bogotá]: La Empresa, 2013. Pronostico de producción QF + RB.

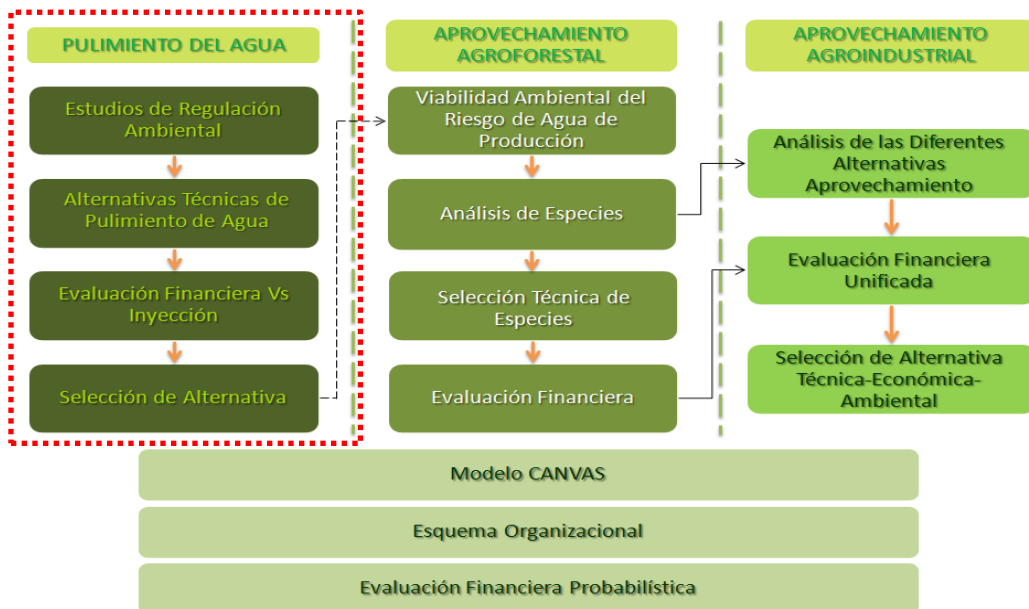
Como ya se dijo, las alternativas probadas técnicamente y que Ecopetrol utiliza como mecanismo de disposición de agua en los campos de los Llanos Orientales son el vertimiento en cuerpos de agua, y la inyección de agua en pozos *disposal*. Sin embargo, estos mecanismos han mostrado no ser los idóneos por sus altos costos y por su impacto ambiental, especialmente en el caso de vertimientos los cuales han generado rechazo general entre los habitantes del sector teniendo en cuenta que no es un agua apta para el consumo humano ni totalmente recomendable para riego; por lo anterior, se requiere una solución en el mediano plazo, eficiente e innovadora, ya que posiblemente se saldrá de los paradigmas de esta industria porque no se conoce ninguna solución a la fecha en la industria local.

A partir de esta problemática, se propone analizar diferentes alternativas para el tratamiento de agua de producción nivel III que tenga como destino la disposición ecoeficiente para el uso agroindustrial en los campos de la Gerencia Regional Oriente de Ecopetrol S.A., con la posibilidad de generar valor a través de su utilización en la creación de productos o servicios para sí misma, por ejemplo en cultivos de eucalipto, palma, o similares.

En general, la propuesta de valor es que el negocio de los tres trabajos de aplicación sombrilla, en conjunto, propongan una forma de cerrar el ciclo de producción de agua, en donde el que la produce sea el responsable de transformarla a un producto y/o servicio que genere valor y que sea también el cliente final que consiga el mayor beneficio de este proceso.

En conclusión, es una propuesta que integra soluciones técnicas, sociales y económicas en una sola, y que genera viabilidad económica y sostenibilidad a la producción de los campos petroleros de la Gerencia Regional Oriente de Ecopetrol y posiblemente a otros campos petroleros colombianos. Entre los beneficios sociales que se pueden presentar está la creación de empleos en la zona afectada; los menores impactos ambientales por menores consumos de energía que la mayoría provienen de fuentes contaminantes como la quema de gasolina, el desarrollo económico en la región a través del impulso de la agricultura como motor de crecimiento, el uso eficiente de un producto finito y generador de vida como lo es el agua, entre otros.

Figura 4. Esquema Sombrilla de trabajo de aplicación



## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GENERAL**

Construir un plan de negocio para la utilización de agua de producción mejorada con tratamientos nivel III para los campos petroleros de la Gerencia Regional Oriente de Ecopetrol S.A.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Realizar un estudio de las regulaciones ambientales vigentes para la utilización de aguas de producción de la industria petrolera en proyectos agroindustriales
- Realizar una revisión histórica de los volúmenes de agua producidos y sus sistemas de disposición final en los campos de la Gerencia Regional Oriente de la Vicepresidencia de Producción de Ecopetrol, resaltando su efecto en los costos de levantamiento.
- Analizar los parámetros fisicoquímicos de las aguas de producción de la Gerencia Regional Oriente.
- Realizar una revisión desde el punto de vista técnico y ambiental, de alternativas de tratamiento Nivel III para las aguas producidas en los campos petroleros de la Gerencia Regional Oriente, con el objetivo de que su destino de disposición sea la alternativa agrícola de aprovechamiento ecoeficiente del agua de producción.

- Analizar financieramente el negocio de tratamiento nivel III de las aguas de producción para uso agrícola de los campos petroleros de la Gerencia Regional Oriente.
- Identificar y valorar los riesgos asociados a la alternativa técnica seleccionada para tratamiento de agua nivel III.
- Formular el esquema organizativo del nuevo departamento de Ecopetrol encargado de esta nueva línea de procesos, con el objetivo de establecer la estructura jerárquica y los roles y responsabilidades a ser empleados.
- Definir el modelo de negocio del tratamiento nivel III de las aguas de producción para uso agrícola de los campos petroleros de la Gerencia Regional Oriente.

### **3. ESTUDIO DE LAS REGULACIONES AMBIENTALES PARA LA UTILIZACIÓN DEL AGUA DE PRODUCCIÓN EN PROYECTOS AGROINDUSTRIALES**

El estudio tendrá en cuenta el marco jurídico ambiental de la legislación colombiana, acogiéndose a los siguientes lineamientos normativos:

#### **Ley 99 de 1993**

Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el sector público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental SINA, y se dictan otras disposiciones.<sup>3</sup>

Tiene como objeto la planificación de los proyectos, incluyendo criterios ambientales para el diseño, construcción y operación y proporcionar los términos de referencia para la elaboración de los estudios ambientales.

#### **Código de Recursos Naturales**

Decreto 2811 de 1974 - Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente. En el cual se establecen muchas de las normas y regulaciones vigentes en Colombia, en relación con el medio ambiente.<sup>4</sup>

---

<sup>3</sup> COLOMBIA CONGRESO DE LA REPUBLICA , Ley 99 d 1993. por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA, y se dictan otras disposiciones.[en línea] [citado 10 de junio de 2015] disponible en: <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=297>

<sup>4</sup> COLOMBIA, PRESIDENCIA DE LA REPÚBLICA. Decreto 2811 de 1974 , (Diciembre 18). Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente. .[en línea] [citado 10 de junio de 2015] disponible en: <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=1551>

## Código Sanitario Nacional

Ley 9 de 1979 del Congreso de Colombia “Por el cual se dictan medidas sanitarias, de protección del medio ambiente, que se consignan en éste código y cuya aplicabilidad para la expedición de permisos en cuanto a concesión de aguas, disposición de residuos líquidos y sólidos. En cuanto a los permisos de emisiones, el Ministerio de Ambiente, mediante la Ley 99 de 1993 le concede facultades a las corporaciones autónomas regionales para otorgar dicho permiso.”<sup>5</sup>

### 3.1. NORMATIVIDAD ESPECÍFICA PARA LA DISPOSICIÓN DE AGUA

En la tabla 1 se relaciona el marco normativo específico para disposición de aguas de producción.

Tabla 1. Marco Normativo

NORMA	FECHA	ENTIDAD	REGLAMENTA
<b>VERTIMIENTO DE RESIDUOS LÍQUIDOS</b>			
Decreto 1594	26/06/84	Ministerio de Agricultura	Usos del agua y residuos líquidos. Parámetros de Vertimiento.
Resolución 273	01/04/97	MAVDT	Por la cual se fijan las tarifas mínimas de las tasas retributivas por vertimientos líquidos para los parámetros Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y Sólidos Suspendidos Totales (SST).
Resolución 372	06/05/98	MAVDT	“Por la cual se actualizan las tarifas mínimas de las tasas retributivas por vertimientos líquidos y se dictan disposiciones”.
Decreto 3100	30/10/03	MAVDT	“Por medio del cual se reglamentan la tasas retributivas por la utilización directa del agua como receptor de los vertimientos puntuales y se toman otras determinaciones”.
Decreto 3440	21/10/04	MAVDT	Modifica el Decreto 3100 de 2003 y se adoptan otras disposiciones.
Decreto 3930	25/10/10	MAVDT	Por lo cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9 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

<sup>5</sup>COLOMBIA, CONGRESO DE LA REPUBLICA. Ley 9 de 1979. (Enero 24). Por la cual se dictan Medidas Sanitarias. [en línea] [citado 10 de junio de 2015] disponible en: <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=1177>

NORMA	FECHA	ENTIDAD	REGLAMENTA
			líquidos y se dictan otras disposiciones. Plan de gestión del riesgo para el manejo de vertimientos.
Decreto 2041	15/10/2014	MADS	Establece que tipo de obras Requieren Licencia Ambiental expedida por la ANLA y aquellas obras que deben ser autorizadas por las Corporaciones autónomas regionales.
Res 1207	25/07/2014	MADS	Establece los usos establecidos para agua residual tratada (producto de la explotación de hidrocarburos)

### 3.2. LICENCIAMIENTO AMBIENTAL CAMPOS DE LA GRO

El licenciamiento ambiental para los campos de la GRO, se encuentra enmarcado por el Decreto 2041 de 2014, según el cual la licencia ambiental hace parte del normativo para poder dar inicio a las actividades propias de la Industria de los hidrocarburos. Teniendo en cuenta lo anteriormente expuesto, la GRO cuenta actualmente con las siguientes licencias para la operación de los campos referidos:

Tabla 2. Licencias Ambientales para campos de la GRO

CAMPO	AUTORIZACIÓN AMBIENTAL	OBSERVACIÓN
CAÑO SUR ESTE	Resolución 0175 de 07 de febrero de 2011.	Licencia Ambiental vigente para exploración en el APE Mago
	Resolución 0382 de 23 de abril de 2014	Modificación de Licencia Ambiental
	Resolución 0879 de 01 de agosto de 2014	Licencia Ambiental para el campo Mago. No autorizó la disposición para uso agrícola.
	Resolución 0602 de 11 de junio de 2014	Licencia Ambiental para el APE Mago Norte. No autorizó la disposición para uso agrícola.
CAMPO RUBIALES	Resolución 233 del 16 Marzo de 2001	Se otorga Licencia Ambiental al Campo Rubiales
	Resolución 1686 del 10 de	Se amplía el Volumen de

CAMPO	AUTORIZACIÓN AMBIENTAL	OBSERVACIÓN
	Noviembre de 2005	Vertimiento
	Resolución 2355 del 24 de Diciembre de 2007	Se amplía el Volumen de Vertimiento
	Resolución 1586 del 12 de Septiembre de 2008	Se autoriza la Inyección de 900.000 BWPD
	Resolución 1769 del 01 de Septiembre de 2011	Se autoriza la Inyección de 1.580.000 BWPD
	Resolución 617 del 08 de Agosto de 2012	Autoriza la Inyección de 1.980.000 BWPD
	Resolución 768 del 02 de Agosto de 2013	Autoriza la Inyección de 2.980.000 KBWPD
	Comunicado 4120-E2-28374	Autoriza la entrega de agua de producción a un receptor para uso agrícola.
CAMPO QUIFA	Resolución 2035 del 15 de Octubre de 2010.	Se otorga Licencia Ambiental para el campo Quifa. Autoriza reinyección de 925.000 BWPD
	Resolución 0987 del 30 de Mayo de 2011	Modificación de Licencia Ambiental
	Resolución 261 del 19 de Marzo de 2013	Modificación de Licencia Ambiental

### 3.3. ALTERNATIVAS DE VERTIMIENTO Y CAUDALES AUTORIZADOS

A continuación se describen las alternativas autorizadas por la Autoridad Ambiental en los campos de la Gerencia Regional Oriente, especificando los volúmenes máximos autorizados y la resolución respectiva

Tabla 3. Alternativas para la disposición de agua de producción

Alternativas de disposición de agua de producción para la GRO Corte 31 - Diciembre - 2014	CAMPOS DE PRODUCCIÓN						Total Volumen (BWPD)
	Rubiales		Quifa		Caño Sur		
	Volumen (BWPD)	Resolución	Volumen (BWPD)	Resolución	Volumen (BWPD)	Resolución	
Inyección al subsuelo	2.980.000	Res.768/13	1.550.000	Res.2035/10	150.000	-	4.680.000
Vertimiento a cuerpos de agua	300.000	Res.2355/07	-	-	-	-	300.000
Riego a Distritos o Cultivos	1.500.000	Res.1207/14	-	-	-	-	1.500.000
<b>Total</b>	<b>4.780.000</b>		<b>1.550.000</b>		<b>150.000</b>	-	<b>6.480.000</b>

Para el vertimiento de agua de producción

PARÁMETRO	UNIDADES	VALOR MAXIMO PERMITIDO
Hidrocarburos	mg/L	1
Cloruros	mg/L	250
DQO	mg/L	45
Oxígeno disuelto	mg/L	Mínimo 6.0
Dureza Total	mg/L	118
Coliformes Fecales	NMP/100mL	500
Coliformes Totales	NMP/100mL	1000

Adicional a los parámetros mencionados anteriormente, la Autoridad Ambiental requirió el cumplimiento de los parámetros físico-químicos establecidos en el Decreto 1594/84; *artículo 72 “Todo vertimiento a un cuerpo de agua deberá cumplir, por lo menos, con las siguientes normas”*, descrito a continuación:

Tabla 4. Parámetros físico-químicos establecidos en el Decreto 1594/84 para vertimiento de agua

Sustancia	Expresada como	Concentración (mg/L)
Arsénico	As	0.5
Bario	Ba	5
Cadmio	Cd	0.1
Cobre	Cu	3
Cromo	Cr+6	0.5
Compuestos fenólicos	Fenol	0.2
Mercurio	Hg	0.02
Níquel	Ni	2
Plata	Ag	0.5
Plomo	Pb	0.5
Selenio	Se	0.5
Cianuro	CN-	1

Para riego en distritos o cultivos, la Autoridad Ambiental requirió el cumplimiento de los parámetros establecidos en la Resolución 1207 del año 2014, artículo 7 “El uso de agua residual tratada deberá cumplir previamente los siguientes criterios de calidad” para uso agrícola:

Tabla 5. Parámetros establecidos en la Resolución 1207 de 2014 para riego de agua establecidos

VARIABLE	UNIDAD DE MEDIDA	DE	VALOR LÍMITE MÁXIMO PERMISIBLE
<b>FÍSICOS</b>			
pH	Unidades de pH		6,0-9,0
Conductividad	µS/cm		1.500,0
<b>MICROBIOLÓGICOS</b>			
Coliformes Termotolerantes	NMP/100 mL		1,0*E(+5)
Enterococos Fecales	NMP/100 mL		1,0*E(2)
Helminthos Parásitos Humanos	Huevos y Larvas/L		1,0
Protozoos Parásitos Humanos	Quistes/L		1,0
<i>Salmonella sp</i>	NMP/100 mL		1,0
<b>QUÍMICOS</b>			
Fenoles Totales	mg/L		1,5
Hidrocarburos Totales	mg/L		1,0
<b>Iones</b>			
Cianuro Libre	mg CN <sup>-</sup> /L		0,2
Cloruros	mg Cl <sup>-</sup> /L		300,0
Fluoruros	mg F <sup>-</sup> /L		1,0
Sulfatos	mg SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> /L		500,0
<b>Metales</b>			
Aluminio	mg Al/L		5,0
Berilio	mg Be/L		0,1
Cadmio	mg Cd/L		0,01
Cinc	mg Zn/L		3,0
Cobalto	mg Co/L		0,05
Cobre	mg Cu/L		1,0
Cromo	mg Cr/L		0,1
Hierro	mg Fe/L		5,0
Mercurio	mg Hg/L		0,002
Litio	mg Li/L		2,5
Manganeso	mg Mn/L		0,2
Molibdeno	mg Mo/L		0,07
Níquel	mg Ni/L		0,2
Plomo	mg Pb/L		5,0
Sodio	mg Na/L		200,0
Vanadio	mg V/L		0,1
<b>Metaloides</b>			
Arsénico	mg As/L		0,1
Boro	mg B/L		0,4
<b>No metales</b>			
Selenio	mg Se/L		0,02
<b>Otros parámetros</b>			
Cloro Total Residual (con mínimo 30 minutos de contacto)	mg Cl <sub>2</sub> /L		Menor a 1,0
Nitratos (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , N)	mg/L		5,0

*De lo anterior, se puede concluir que comparando los parámetros fisicoquímicos requeridos para vertimiento con los parámetros requeridos para riego, se hace indispensable aplicar una alternativa o tecnología de pulimiento o tratamiento adicional del agua de producción de los campos Rubiales, Quifa y Caño Sur, principalmente por que se requiere bajar las concentraciones de sales y de hidrocarburos totales, los cuales son parámetros fundamentales para alcanzar los parámetros establecidos para riego, principalmente la relación de adsorción de sodio (RAS, en inglés SAR).*

#### **3.4. ESTUDIO DE LEGISLACIÓN AMBIENTAL PARA PROYECTOS AGROINDUSTRIALES**

Actualmente se cuenta con la Resolución 1207 del año 2014 “*Por la cual se adoptan disposiciones relacionadas con el uso de aguas residuales tratadas*” en donde se viabiliza el reúso del agua residual tratada para riego, se realizó un análisis de la legislación ambiental nacional que apalancaba la utilización de agua de producción en distritos de riego; análisis que se describe a continuación:

**a. Decreto 3930 de 2010 – Reglamenta los usos del agua y residuos líquidos <sup>6</sup>**

**Artículo 3. – Definiciones**

- **Objetivo de Calidad:** Conjunto de parámetros que se utilizan para definir la idoneidad del recurso hídrico para un determinado uso.

---

<sup>6</sup> COLOMBIA, PRESIDENCIA DE LA REPÚBLICA. Decreto 3930 de 2010. (Octubre 25). 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. .[en línea] [citado 10 de junio de 2015] disponible en: <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=40620>

- **Reúso del agua:** Utilización de los efluentes líquidos previo cumplimiento del criterio de calidad.

**Artículo 19. Criterios de calidad.** Conjunto de parámetros y sus valores utilizados para la asignación de usos al recurso y como base de decisión para el Ordenamiento del Recurso Hídrico.

**b. Ley 373 DE 1997 – Programa para el uso eficiente y ahorro del agua<sup>7</sup>**

**ARTICULO 5o. Reúso obligatorio del agua.** Las aguas utilizadas, sean éstas de origen superficial, subterráneo o lluvias, en cualquier actividad que genere afluentes líquidos, deberán ser reutilizadas en actividades primarias y secundarias cuando el proceso técnico y económico así lo ameriten y aconsejen según el análisis socio-económico y las normas de calidad ambiental.

En conclusión, a pesar de que la normatividad ambiental vigente lo permite (Resolución 1207 de 2014), hasta la fecha sólo ha sido posible que la ANLA apruebe dentro de las licencias ambientales otorgadas a los campos de la GRO para exploración y explotación de hidrocarburos, la Actividad de disposición de aguas de producción para su uso actividades agrícolas para el campo Rubiales, por esta razón los análisis se centrarán en este campo.

---

<sup>7</sup> COLOMBIA, CONGRESO DE LA REPUBLICA. Ley 373 de 1997. (junio 6). Diario Oficial No. 43.058 de 11 de junio de 1997. Por la cual se establece el programa para el uso eficiente y ahorro del agua. [en línea] [citado 10 de junio de 2015] disponible en: [http://www.secretariassenado.gov.co/senado/basedoc/ley\\_0373\\_1997.html](http://www.secretariassenado.gov.co/senado/basedoc/ley_0373_1997.html)

#### 4. PRODUCCIÓN DE AGUA Y CRUDO EN LOS CAMPOS DE LA GERENCIA REGIONAL ORIENTE

La Gerencia Regional Oriente está compuesta por:

Tabla 6. Campos pertenecientes a la Gerencia Regional Oriente

CAMPO	OPERADOR		SOCIOS	OPERADOR
Rubiales	Metapetroleum	Contrato de Asociación Rubiales	Pacific Rubiales y Ecopetrol	Metapetroleum
Quifa	Metapetroleum	Contrato de Asociación Rubiales	Pacific Rubiales y Ecopetrol	Metapetroleum
Caño Sur	Ecopetrol	ANH (E&P)	Ecopetrol	Ecopetrol

La distribución en producción agua para la GRO es:

Figura 5. Participación de Campos en la producción de agua de la GRO



Como se puede observar, el pareto en producción de agua en la Gerencia Regional Oriente se encuentra en los campos Quifa y Rubiales. Sin embargo, teniendo en cuenta las características de los fluidos y que el Campo Caño Sur (Este) es propiedad 100% de Ecopetrol y que se encuentra aledaño a los campos mencionados, también será objeto de análisis en este trabajo.

Todos los campos petroleros de la Gerencia Regional Oriente se encuentran ubicados en el Municipio de Puerto Gaitán, Departamento del Meta. El campo más lejano es Rubiales, ubicado al sureste del Municipio, a una distancia aproximada de 160 km.

#### 4.1. DESCRIPCION DEL AREA DE INFLUENCIA DE LA GERENCIA REGIONAL ORIENTE

El Departamento del Meta se sitúa en la zona central del país, en la región de la Orinoquia. Su territorio abarca 85.770 km<sup>2</sup>, que representan el 7.5% del territorio nacional. Al Norte limita con el departamento de Cundinamarca y los ríos Upía y Meta, por el Este con el departamento de Vichada, al Sur con el departamento de Caquetá y el Río Guaviare y por el Oeste con los departamentos de Huila y Cundinamarca.<sup>8</sup>

Figura 6. Mapa Físico – Político del Departamento del Meta



<sup>8</sup> Plan de Desarrollo Municipal de Puerto Gaitán 2012-2015 “Porque Unidos Somos Más”.

Con relación al Municipio de Puerto Gaitán, se establece que tiene una extensión de 17.492 km<sup>2</sup>, aproximadamente 1.749.200 hectáreas. Se encuentra a una distancia de 194 kilómetros de Villavicencio la capital del departamento y a 281 kilómetros de Bogotá. El campo Rubiales se encuentra ubicado a 170 km de Puerto Gaitán.

Puerto Gaitán tiene un área de 1.753.600 hectáreas, de las cuales tituladas a particulares 894.259 ha; y tituladas a indígenas 167.015; lo que equivale al 61% del territorio adjudicado; el restante no está titulado (Fuente: Incoder 2012).

Las tierras de la región son de baja calidad agrológica y presentan altos niveles de acidez, lo cual hace difícil el desarrollo de actividades agrícolas competitivas y rentables (DNP 2013)

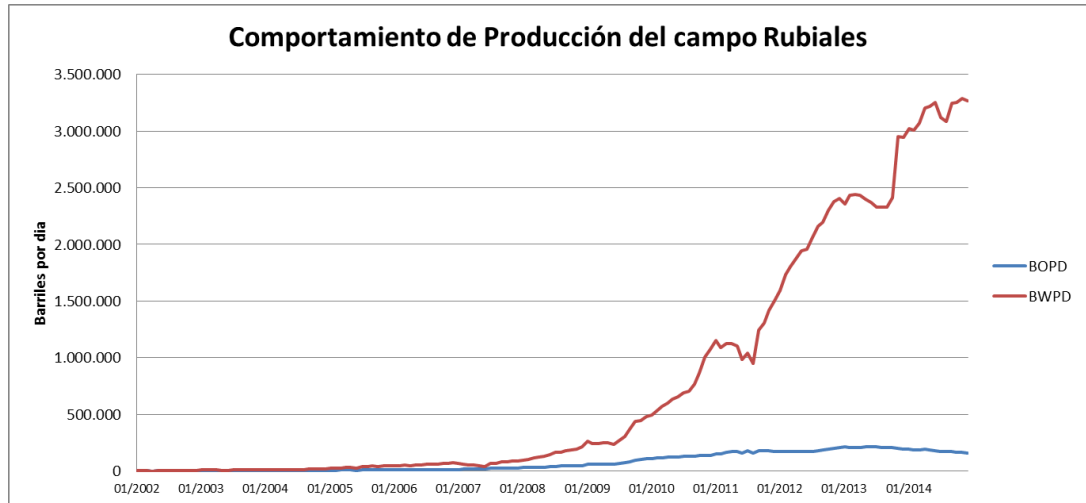
Tabla 7. Caracterización general municipio Puerto Gaitán, Meta<sup>9</sup>

GENERALIDAD	DESCRIPCIÓN	
Municipio	Puerto Gaitán	
Alcalde	Edgar Humberto Silva	
Población	17.852 Habitantes	
Superficie	17.492 km <sup>2</sup>	
Unidades Territoriales	Barrios Urbano	Casco La Esperanza, Villa Ortíz, Trampolín, Manacacías, Alto Manacacías, Villa de los Alpes, Las Palmas, Carimagua, Galán, Popular, El Triunfo, Nuevo Jerusalén, Centro, Villa Amalia, Nuevo Horizonte, Canna, Perlas del Manacacías, Perla del Manacacías, Sector 4, Paraíso Natural y Vencedores.
	Centros poblados	San Pedro de Arimena, Planas, San Miguel, El Porvenir, Puente Arimena, Tillavá, Puerto Trujillo, La Cristalina y Murujuy.
	Veredas	Alto Yucao, Bajo Yucao, Las Villas, Neblinas, Alto Manacacías, Nuevas Fundaciones, La Cristalina, Planas, Murujuy, Curimagua, Matarraton, El Porvenir, Puente Arimena, San Pedro de Arimena, San Miguel, Santa Bárbara, Guasipaty, Puerto Trujillo, El Tigre, Rincón del Indio, Tillavá, Rubiales, Santa Helena, Santa Catalina, Puerto Triunfo, Comejenal y Los Kioskos.

<sup>9</sup>ALCALDIA DE PUERTO GAITA. Acuerdo 009 del 28 de Mayo de 2012 Plan de Desarrollo Municipal de Puerto Gaitán 2012-2015 "PORQUE UNIDOS SOMOS MAS" y Acuerdo 12 del 29 de Junio de 2012, Se instituyen los centros poblados, veredas, barrios del Municipio de Puerto Gaitán.

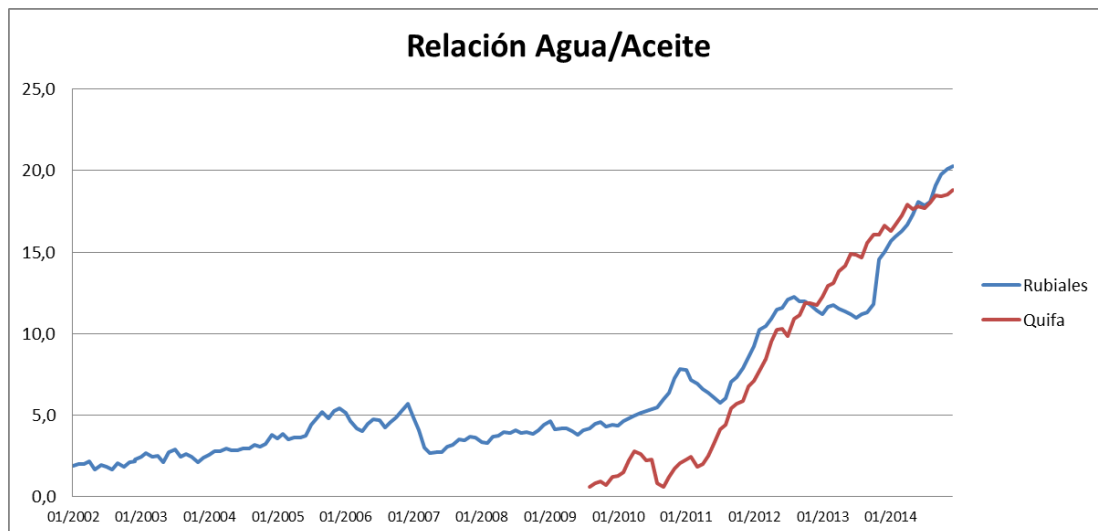
## 4.2. COMPORTAMIENTO HISTÓRICO DE PRODUCCIÓN DE CRUDO Y AGUA EN EL CAMPO RUBIALES

Figura 7. Comportamiento de producción del campo Rubiales



Como se puede observar, el crecimiento en producción de agua no es proporcional al crecimiento en crudo, la relación agua/aceite ha crecido de la siguiente manera:

Figura 8. Relación Agua/Aceite campo Rubiales y Quifa



Como se puede observar la relación de incremento de la relación agua/aceite en los últimos dos años en campo Rubiales pasó de 10 a un valor muy cercano a 20; lo cual obliga a buscar alternativas en la disposición del agua asociada a la producción de crudo, puesto que el impacto en el costo de levantamiento de un barril de aceite claramente será impactado por la elevada producción de agua.

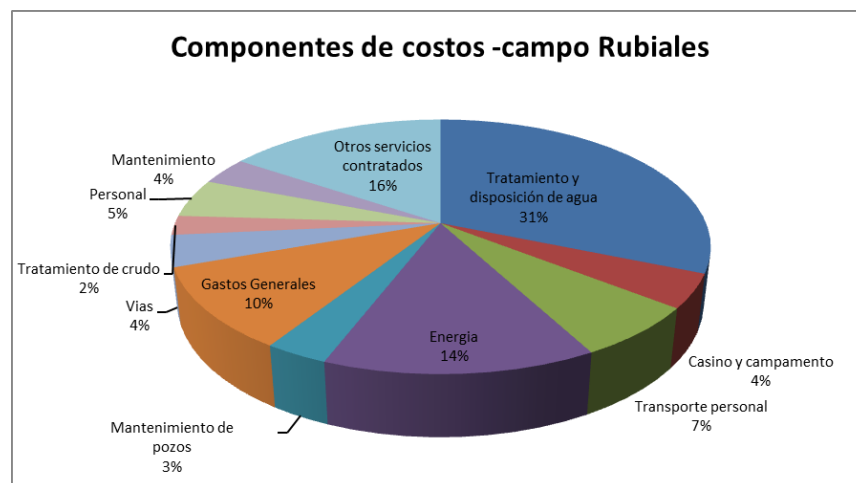
### 4.3. IMPACTO DE LA PRODUCCIÓN DE AGUA EN COSTOS DE PRODUCCIÓN DEL CAMPO RUBIALES

El costo de producción (*lifting cost*) de un barril de crudo está compuesto por todos los rubros incurridos en la extracción de crudo, gas y agua a la superficie, su recolección, tratamiento de fluidos y almacenamiento. Estos costos incluyen para el caso del agua, su disposición final.

Los principales factores que mueven el costo (*cost drivers*) en Rubiales son:

- Energía eléctrica
- Tratamiento de fluidos: crudo y agua
- Logística (transporte aéreo y terrestre, alimentación y hospedaje)

Figura 9. Componentes de costos Campo Rubiales

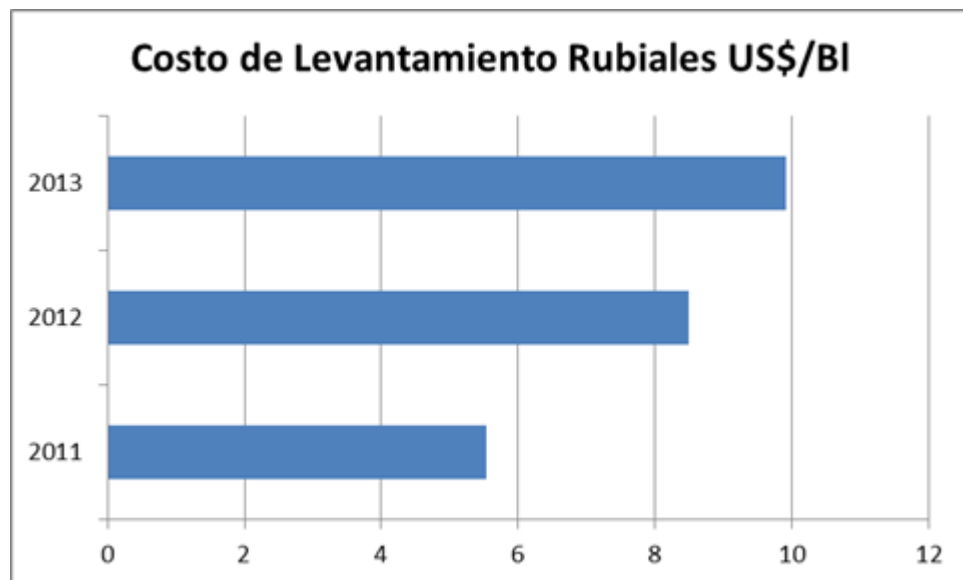


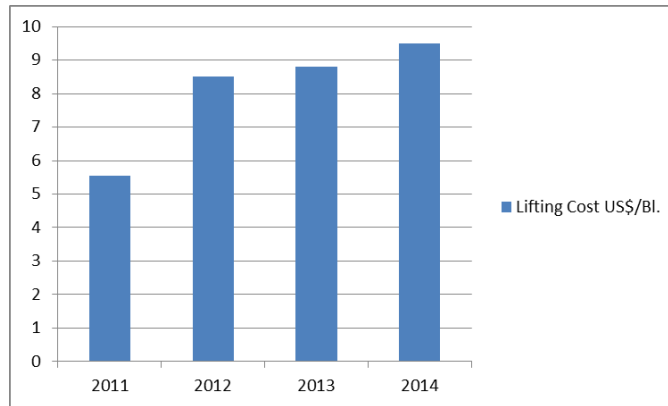
De la gráfica se puede observar que el tratamiento y disposición de agua es uno de los principales componentes del costo en el campo Rubiales; además, los costos de energía corresponden en su gran mayoría a consumo derivados de la inyección de agua, lo cual es acorde con lo mostrado en la figura 10, en la cual se muestra que por cada barril de crudo, deben ser tratados 20 barriles de agua. Esto ratifica que existe una gran oportunidad en optimización de costos, si se viabilizan alternativas de disposición diferentes a la inyección de agua en este tipo de campos.

Un ejemplo de las cifras que se manejan en la disposición de agua, es que para el año 2015 se estima que se gastarán MUS\$260 en tratamiento y disposición de agua (aprox. 45% del presupuesto de gastos)

#### 4.4. COMPORTAMIENTO HISTORICO DE LIFTING COST EN EL CAMPO RUBIALES

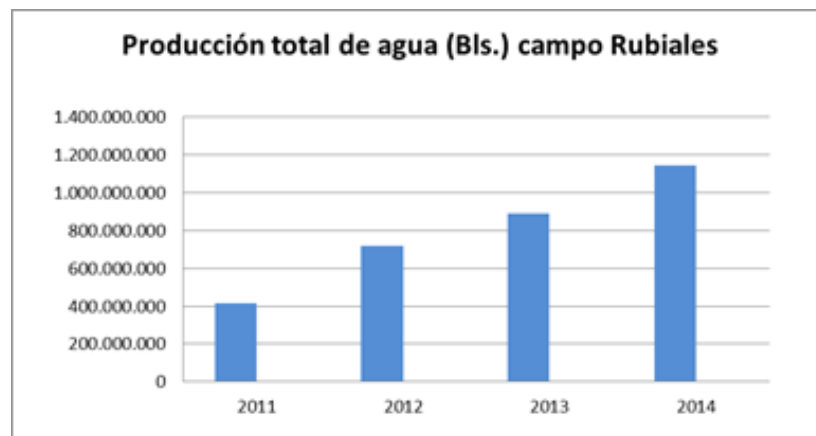
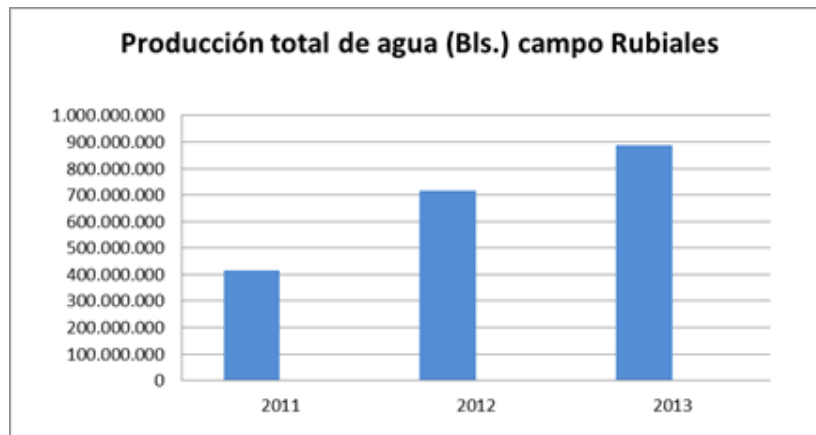
Figura 10. Costo de levantamiento campo Rubiales





El crecimiento en *lifting cost*, se debe al incremento en producción de agua. La anterior afirmación se sustenta en la información de la figura 11. En la siguiente gráfica se muestra la producción total de agua de los años 2011 al 2014

Figura 11. Producción total de agua Campo Rubiales



Para el año 2013, el costo de tratamiento e inyección de un barril de agua en el campo Rubiales fue de US\$/BI 0.26, los costos de tratamiento y disposición de agua representaron MUS\$230, equivalentes al 31% del costo total de producción, lo cual no es normal para un campo de producción en Colombia.

En conclusión, el incremento en el costo de producción está directamente relacionado con el aumento en la producción de agua. De lo anterior, es claro que el gran reto las operadoras de este tipo de campos –entre ellas Ecopetrol -, es buscar mejores opciones viables para la disposición del agua, como es el caso de los proyectos agroindustriales.

## **5. ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS DEL AGUA DE PRODUCCIÓN DEL CAMPO RUBIALES**

El uso o la disposición inadecuada de aguas de producción con características que representen un riesgo puede resultar en la contaminación de cuerpos de agua, tanto superficiales como subterráneas, así como del suelo y el subsuelo; alterando la flora, la fauna y en última instancia al ser humano por el ingreso de componentes tóxicos a diferentes cadenas alimenticias.

Si se vierte, la alta concentración de iones presentes en el agua de producción podría generar fenómenos de eutrofización por enriquecimiento de nutrientes, dando lugar a alteraciones sobre la composición, estructura y dinámica de diversos ecosistemas. En cuanto a la inyección, la formación de incrustaciones, escalas (acumulación de sedimentos) y/o colonias de bacterias, el carácter corrosivo y la presencia de gases no deseados como  $O_2$ ,  $CO_2$  y  $H_2S$  son algunos de los principales problemas que podrían presentarse en un pozo inyector si el agua de producción no es tratada previamente.

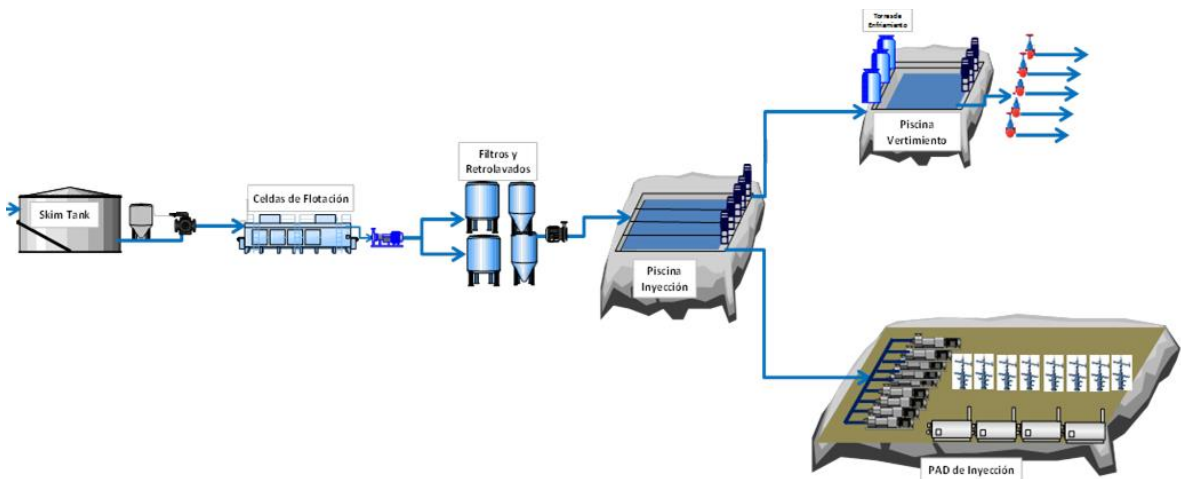
### **5.1. PARÁMETROS DE SALIDA DEL AGUA DE LAS PLANTAS EXISTENTES**

Con las plantas existentes en el campo Rubiales, se lleva el agua producida a condiciones de vertimiento e inyección. Estas plantas constan de:

- Skim Tank: Son equipos diseñadas para retirar el crudo del agua a partir de la gravedad y la coalescencia.
- Celdas de flotación: Su principal principio de separación de grasas es la coalescencia, puede usar inyección de gas o aire para optimizar el proceso

- Filtros: Pueden ser de cáscara de nuez o palma, permiten pulir el agua antes de su disposición en las piscinas
- Decantadores: Son los equipos que reciben los residuos de los retrolacados de los filtros.
- Sistemas de torres de enfriamiento (en caso de vertimiento)
- Piscinas

Figura 12. Descripción del proceso de tratamiento de agua



Si bien las plantas existentes tratan el agua para cumplir con los parámetros establecidos para su disposición vía inyección, no cumplen en su totalidad las especificaciones para poder ser empleada como agua de riego.

Las unidades de flotación por aire inducido permiten eliminar considerablemente las concentraciones de sólidos dispersos como compuestos metálicos y no metálicos, así como los líquidos inmiscibles suspendidos en la fase acuosa. En la figura 13 se observa como la concentración de grasas y aceites presenta un mayor decremento en la etapa de las celdas de flotación en comparación con la etapa de filtración; aproximadamente el 95% de grasas y aceites de la corriente de alimentación a esta etapa logra separarse. Esta separación se obtiene introduciendo finas burbujas, generalmente de aire, en la fase líquida (fase acuosa

en este caso) las cuales se adhieren a las partículas contaminantes y forman aglomerados con una densidad aparente menor a la de la fase líquida. La fuerza de empuje generada por la corriente de aire hace que las partículas suban a la superficie donde pueden ser removidas con facilidad.

Figura 13. Descripción de plantas existentes en campo Rubiales



Posterior a la etapa de flotación se encuentra la etapa de filtración, última etapa del proceso de tratamiento empleado en el campo Rubiales. En ésta se emplean filtros de cáscara de nuez para retirar las trazas de grasas/aceites y sólidos remanentes en la fase acuosa. Al final de esta etapa se pretenden alcanzar concentraciones máximas de grasas/aceites e hidrocarburos patogénicos de 10 y 5 mg/L respectivamente. En las tablas 9 y 10 se exponen los resultados para los parámetros cuantificados aguas abajo del proceso de tratamiento.

Tabla 8. Resultados de las plantas existentes

Parámetro	Unidad	Promedio
<b>Cianuro Total</b>	mg/L CN	<0,002
<b>Fenoles Totales</b>	mg/L	<0,04
<b>Arsénico</b>	mg/L	0,0003
<b>Cadmio</b>	mg/L	<0,007
<b>Cobre</b>	mg/L	<0,046
<b>Cromo Hexavalente</b>	mg/L	<0,005
<b>Mercurio</b>	mg/L	<0,0019
<b>Plata</b>	mg/L	<0,002
<b>Selenio</b>	mg/L	0,0002
<b>PCB's</b>	mg/L	<0,0001
<b>Carbamatos</b>	mg/L	<0,0001
<b>Sulfuro de Carbono</b>	mg/L	<0,0001
<b>Cloroformo</b>	mg/L	<0,00005
<b>Tricloroetileno</b>	mg/L	<0,0019
<b>Dicloroetileno</b>	mg/L	<0,0047
<b>Tetracloruro de Carbono</b>	mg/L	<0,00012
<b>Pesticidas Organoclorados</b>	mg/L	<0,0004
<b>Pesticidas Organofosforados</b>	mg/L	<0,00005

Tabla 9. Rangos y resultados obtenidos para algunos parámetros en las plantas existentes

Parámetro	Unidad	Rango	Promedio
Oxígeno Disuelto	mg/L O <sub>2</sub>	[4,3 - 7,2]	5,5
Dureza Total	mg/L CaCO <sub>3</sub>	[18,8 - 32,1]	24,9
Cloruros	mg/L Cl <sup>-</sup>	[157 - 181]	170,2
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	[3 - 9]	5,5
DQO	mg/L O <sub>2</sub>	[<10 - 53]	24,2
Bario	mg/L	[0,11 - 0,27]	0,20
Níquel	mg/L	=	<0,054
Plomo	mg/L	=	<0,05
Grasas y Aceites	mg/L	[0,63 - 3,08]	1,74
Hidrocarburos Petrogénicos	mg/L	[0,02 - 1,05]	0,31

No obstante, los resultados obtenidos por las plantas existentes no alcanzan a cumplir con la totalidad de los parámetros establecidos en la resolución 1207 de 2014 para riego de agua por lo que es necesario implementar una nueva etapa dentro del proceso de tratamiento que permita alcanzar dichos estándares. En el capítulo a continuación se describen algunas de las tecnologías aplicables.

## 6. ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO DE AGUA PARA USO AGROINDUSTRIAL (TRATAMIENTOS NIVEL III)

### 6.1. PROCESOS Y OPERACIONES DE SEPARACIÓN

Las aguas residuales son tratadas con tratamientos primarios, secundarios y ocasionalmente con tratamientos terciarios. La tabla expuesta a continuación describe algunas de las operaciones y los procesos relacionados con dichos tratamientos.

Tabla 10. Procesos y operaciones relacionados al tratamiento de aguas residuales

Tipo de Tratamiento	Proceso
Primario	Sedimentación
	Flotación
	Separación de aceites
Secundario	Filtración
	Aireación - Procesos de oxidación
Terciario o "avanzado"	Ósmosis inversa
	Electrodialisis

El tratamiento primario incluye la detección, la reducción de tamaño y las operaciones de remoción de los sólidos inorgánicos suspendidos. Por lo general, estas son operaciones que demandan una baja intensidad energética y tienen como objetivo la adecuación del agua para asegurar la eficacia de los tratamientos posteriores<sup>10</sup>.

El tratamiento secundario tiene como objeto eliminar aquellas impurezas cuyo tamaño de partícula es mucho menor al que se puede captar en el tratamiento primario, por lo que se trata el agua con impurezas orgánicas coloidales como

<sup>10</sup> A. K. Plappally and J. H. Lienhard V, "Energy requirements for water production, treatment, end use, reclamation, and disposal," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no. 7, pp. 4818–4848, Sep. 2012.

proteínas y material disuelto como carbohidratos. Los tratamientos biológicos son predominantes en esta etapa del tratamiento, sin embargo, el agua asociada a la producción de hidrocarburos contiene una mínima cantidad de estos compuestos y a su vez una gran cantidad de compuestos refractario, lo que hace difícil la degradación completa del material orgánico<sup>11</sup>. Estas impurezas son eliminadas por microorganismos heterótrofos presentes en las aguas residuales, asistidos por sistemas de aireación que garanticen la presencia de oxígeno. Para los procesos de aireación convencionales la concentración de oxígeno se encuentra entre 0.5 y 1.0 mg/L mientras que en procesos de aireación prolongada es necesaria una concentración entre 1.0 y 2.0 mg/L. De igual forma pueden llevarse a cabo procesos anaerobios (en ausencia de oxígeno) comúnmente llamados “digestiones anaerobias”.

Existe material inorgánico como metales pesados y sales disueltas que no pueden ser eliminados empleando los tratamientos primario y secundario, razón por la cual se han desarrollado e implementado los tratamientos terciarios. Entre otros, este tipo de tratamiento ha sido empleado con el fin de utilizar las aguas residuales generadas en algunas industrias como agua de riego para la agricultura<sup>12</sup>.

Los procesos aplicados en los tratamientos terciarios pueden clasificarse en dos grupos: tratamientos que no remueven sales (entre ellas, algunos tipos de membranas que difícilmente afectan la conductividad del agua) y tratamientos que incluyen la remoción de sales (entre los cuales se encuentran la nanofiltración, ósmosis inversa y la electrodiálisis).

---

<sup>11</sup> B. H. Diya'uddeen, W. M. A. W. Daud, and a. R. Abdul Aziz, “Treatment technologies for petroleum refinery effluents: A review,” *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 89, no. 2, pp. 95–105, Mar. 2011.

<sup>12</sup> J. Illueca-Muñoz, J. A. Mendoza-Roca, A. Iborra-Clar, A. Bes-Piá, V. Fajardo-Montañana, F. J. Martínez-Francisco, and I. Bernácer-Bonora, “Study of different alternatives of tertiary treatments for wastewater reclamation to optimize the water quality for irrigation reuse,” *Desalination*, vol. 222, no. 1–3, pp. 222–229, Mar. 2008.

Es necesario reducir la conductividad del agua cuando la concentración de sales en el agua residual podría dañar el cultivo. Por esta razón se estudió la capacidad de los procesos de ósmosis inversa y electrodiálisis para remover las sales disueltas presentes en el agua residual asociada a la producción de hidrocarburos. La nanofiltración no se analiza debido a que esta tecnología no está diseñada para retener iones de calcio y sodio (monovalentes), además las membranas aún no son comerciales.

### **Ósmosis Inversa**

La ósmosis inversa es una tecnología de membrana aplicada ampliamente en procesos de desalinización del agua, la producción de agua potable y más recientemente en el tratamiento terciario de aguas residuales. Esta tecnología presenta las ventajas de los procesos con membranas como la construcción modular y su pequeño tamaño lo que le permite combinarse fácilmente con otros procesos de tratamiento<sup>13</sup>.

Esta tecnología emplea membranas semipermeables que permiten separar una solución en dos corrientes: una que contiene el agua purificada que pasa a través de la membrana y otra, residual, que contiene las sales y los compuestos retenidos por la membrana, la cual necesita una opción de manejo amigable con el medio ambiente<sup>14</sup>.

---

<sup>13</sup> P. Chelme-Ayala, D. W. Smith, and M. G. El-Din, "Membrane concentrate management options: a comprehensive critical review," vol. 36, no. 6, pp. 1107 – 1119, 2009

<sup>14</sup> G. Mauguin and P. Corsin, "Concentrate and other waste disposals from SWRO plants: characterization and reduction of their environmental impact," *Desalination*, vol. 182, no. 1–3, pp. 355–364, Nov. 2005.

Tabla 11. Ventajas y desventajas de la ósmosis inversa

Ventajas	Desventajas
Remoción de sales hasta del 99%	Requiere pretratamiento
Alta calidad en agua tratada	Las membranas duran 3 años y su costo de reposición es del 30% del costo del equipo
Tratamiento limpio y confiable	
Reduce costos de operación y disposición	Alto costo inicial
Utiliza poco espacio físico	

### Electrodiálisis

Igual que la ósmosis inversa, la electrodiálisis es un proceso de tratamiento avanzado que ayuda a disminuir la conductividad de las aguas residuales gracias a la eliminación de sales disueltas. La gran mayoría de los trabajos publicados y reportados en la bibliografía se inclinan al uso de la ósmosis inversa para la remoción de los sólidos disueltos totales (TDS), aunque unos pocos han logrado tener éxito en la reducción de TDS en aguas de superficie<sup>15</sup>, aguas subterráneas<sup>16</sup>, agua salobre<sup>17</sup> y agua de mar<sup>18</sup>.

En la electrodiálisis, los electrólitos se transfieren a través de un sistema que consta de soluciones y membranas de intercambio iónico bajo la acción de un potencial eléctrico. Una pila de electrodiálisis consiste en una membrana de intercambio catiónico la cual es permeable a iones cargados positivamente pero no a aquellos cargados negativamente, y una membrana de intercambio aniónico la cual es permeable a iones cargados negativamente pero no a aquellos que

<sup>15</sup> B. Van der Bruggen, R. Milis, C. Vandecasteele, P. Bielen, E. Van San, and K. Huysman, "Electrodialysis and nanofiltration of surface water for subsequent use as infiltration water.," *Water Res.*, vol. 37, no. 16, pp. 3867–74, Sep. 2003

<sup>16</sup> [H. M. N. AlMadani, "Water desalination by solar powered electrodialysis process," *Renew. Energy*, vol. 28, no. 12, pp. 1915–1924, Oct. 2003.

<sup>17</sup> M. A. Menkouchi Sahli, S. Annouar, M. Tahaikt, M. Mountadar, A. Soufiane, and A. Elmidaoui, "Fluoride removal for underground brackish water by adsorption on the natural chitosan and by electrodialysis," *Desalination*, vol. 212, no. 1–3, pp. 37–45, Jun. 2007.

<sup>18</sup> M. Turek, "Dual-purpose production electrodialysis," vol. 153, pp. 377–381, 2002.

están cargados positivamente. En esta “pila”, las membranas de intercambio catiónico se alternan con las membranas de intercambio aniónico para formar compartimientos o celdas de solución. Cuando se aplica un potencial eléctrico entre los electrodos ubicados hacia los extremos de la pila, todos los cationes en la solución que circulan a través de la pila tienden a moverse hacia el cátodo mientras que todos los aniones tienen a migrar hacia el ánodo<sup>19</sup>.

Tabla 12. Ventajas y desventajas proceso de electrodiálisis

Ventajas	Desventajas
No requiere aditivos químicos	La eliminación de contaminantes está restringida a sodio, calcio, sulfatos, cloruros.
Alta tasa de remoción	Requiere limpieza periódica de las membranas con solución ácida, esta operación dura entre 2 y 6 horas  Menos eficiente cuando la concentración de contaminantes se incrementa en la entrada

## TECNOLOGÍAS APLICABLES

De acuerdo a las propiedades del agua del campo, y a las condiciones actuales de salida de las plantas existentes, es necesario la instalación de plantas nivel III que pulan y desmineralicen el agua, buscando llegar a parámetros indicados en la siguiente tabla 13.

Tabla 13. Valores para los principales parámetros agua de riego

Parámetro	Unidad	Valor actual	Valor requerido
pH	-	7-8	6-8
Sólidos totales disueltos (TDS)	mg/L	1300	<240
Cloruros	mg/L Cl-	150	<70
Sodio	mg/L	350	<65
Grasas y Aceites	mg/L	1-5	<0.5
Hidrocarburos Petrogénicos	mg/L	1-10	<0.5

<sup>19</sup> T. Sirivedhin, J. McCue, and L. Dallbauman, “Reclaiming produced water for beneficial use: salt removal by electrodiálisis,” *J. Memb. Sci.*, vol. 243, no. 1–2, pp. 335–343, Nov. 2004.

Es fundamental garantizar para agua de riego, que los valores de cloro y sodio se ajusten a los parámetros establecidos. Debido a que las sales que se desean remover del agua para que cumpla con los parámetros de un agua de riego son monovalentes, la tecnología primaria recomendada es ósmosis inversa.

Sin embargo, considerando que las tecnologías de ósmosis inversa y electrodiálisis le apuntan a la reducción de los parámetros establecidos en la tabla 14 se recomienda la evaluación de las dos alternativas.

A continuación se evaluará desde el punto de vista económico las dos alternativas mencionadas, y posteriormente se analizarán los riesgos asociadas a la mejor opción.

## 7. EVALUACIÓN FINANCIERA

Teniendo en cuenta que las tecnologías de ósmosis inversa y electrodiálisis son viables desde punto de vista técnico, a continuación se hará una evaluación financiera de estas alternativas que permiten el aprovechamiento agroindustrial del agua vs. la alternativa tradicional de inyección.

La evaluación financiera se basa en el concepto de valor actual de costos (VAC):

$$VAC = I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{C_t}{(1+r)^t}$$

Dónde:

$I_0$ : Inversión inicial

$C_t$ : Costos incurridos durante el periodo t

n: Horizonte de evaluación

r: Tasa social de descuento

La evaluación se realizará a 15 años, en dólares corrientes (no se consideran ajustes anuales por inflación), para un caudal constante de 1.000.000 Barriles.

Para la evaluación se realizó un Excel que consideró las siguientes premisas:

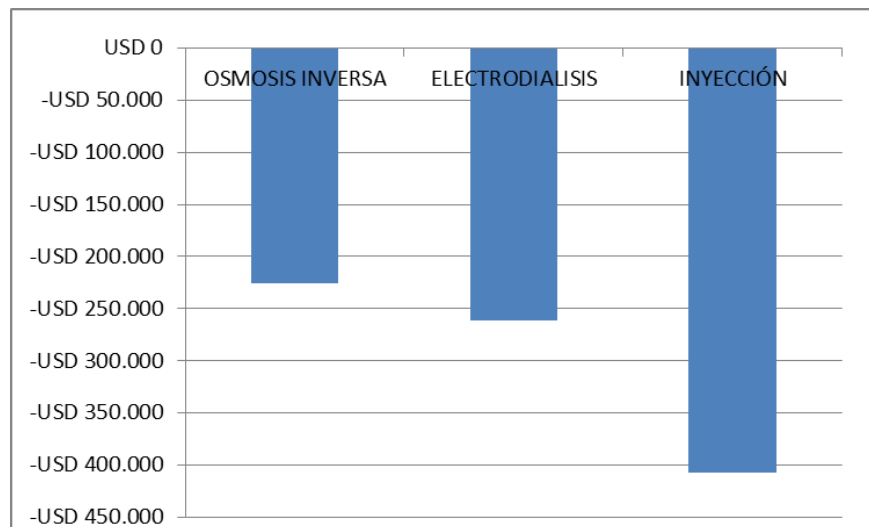
- TRM \$2.300
- Tasa impositiva del 33%
- Tasa de descuento del 11.1%

- Tiempo de depreciación 10 años
- Costos reales para la inyección de agua: costo de pozos de perforación, obras civiles, equipos de inyección, líneas de flujo, etc.
- Con la información disponible se estimaron valores de Opex (Costos de Operación y Capex (Inversión) de Osmosis Inversa y Electrodiálisis

Con el ánimo de tener un valor de comparación, se analizaron los resultados de inyección (la cual se realiza con los datos reales de campo) con las alternativas de disposición agroindustrial mediante las tecnologías de Osmosis Inversa y Electrodiálisis. En el Anexo 1 se detallan los valores utilizados.

En la figura 14 se detallan los resultados obtenidos en el modelo de Excel realizado, en donde se muestra que la mejor opción desde el punto de vista financiero es ósmosis inversa; lo cual indica que este tipo de alternativas; además de ser mejores desde el punto de vista social y ambiental, son más rentables.

Figura 14. Resultados Evaluación Económica (VAC)

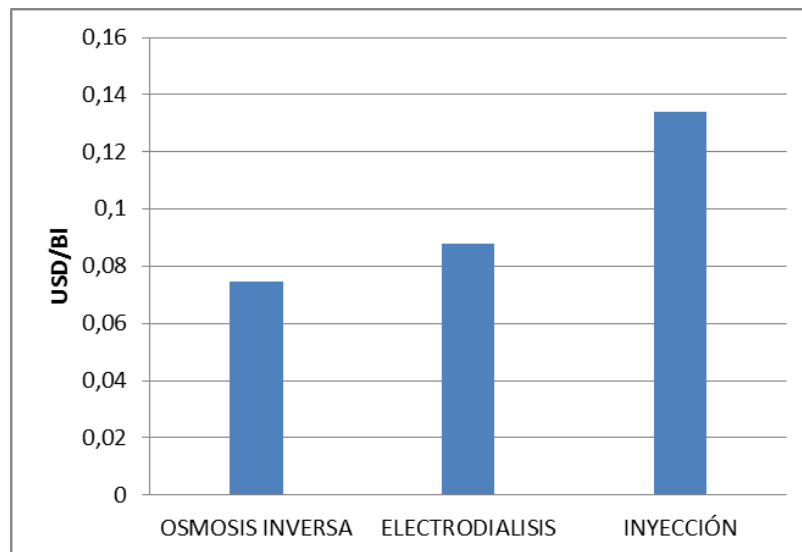


Los resultados obtenidos en tarifas de disposición de agua (en dólares/barril) para cada uno de las alternativas, muestra que las opciones de tratamiento de agua

para aprovechamiento agroindustrial son mucho mejores que la alternativa tradicional de inyección.

Desde el punto de vista Capex, el factor que más afecta a la inyección de agua es la perforación de pozos disposal, lo cual equivale a MUS\$28 por cada 1.000.000 de barriles de agua inyectados (más de 20% de la inversión). Otro factor que afecta negativamente a la inyección de agua son los costos de energía para inyectar dicho fluido, lo cual hace que el costo variable sea el doble de las otras dos alternativas. En el Anexo 1 se detalla la información

Figura 15. Tarifas de operación



De acuerdo a la Figura 15, la diferencia en los costos de operación entre ósmosis inversa e inyección es superior a US\$/Bl. 0,6, lo cual implica que si dejamos de disponer un millón de barriles en inyección y los aprovechamos en la agroindustria, se podrían tener ahorros anuales equivalentes a MUS\$27

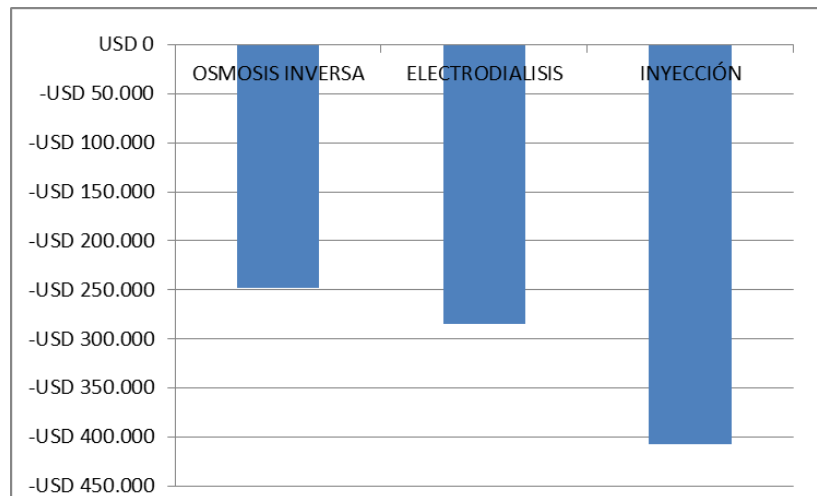
## 7.1. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Teniendo en cuenta que por tratarse de tecnologías no probadas en campos petroleros en Colombia existen incertidumbres en los valores de Capex (Costos de Inversión: Terrenos, construcciones, equipos, líneas de flujo) y Opex (costos de operación necesarios para operar las plantas: personal, energía, respuestos, etc) asociados, a continuación se presenta un análisis de sensibilidad financiera que permite determinar hasta qué nivel es aceptable el incremento de estas cifras.

Es importante mencionar que en estos escenarios los costos de inversión (CAPEX) y de operación (OPEX) para inyección se mantienen constantes, por que como ya se mencionó, son valores reales.

¿Qué pasa si el Capex se incrementa 30%? Los resultados se pueden ver en la Figura 16.

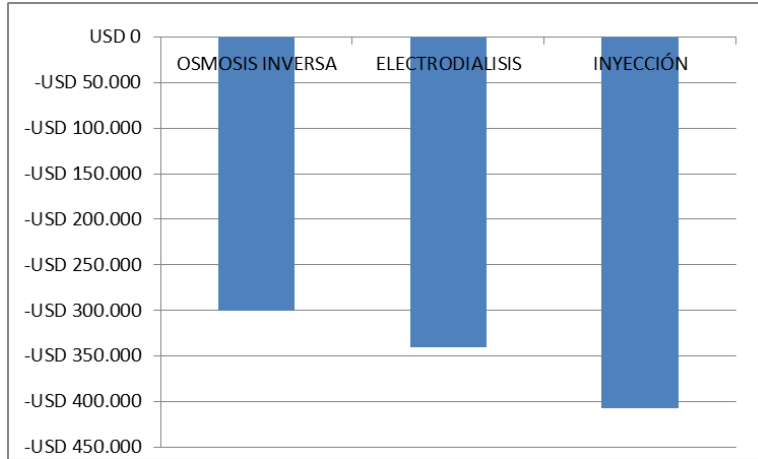
Figura 16. Incremento de Capex en 30% para tratamientos terciarios



Como se puede observar no hay un impacto importante en los resultados de Ósmosis Inversa y Electrodiálisis, si se presenta un incremento en las inversiones del 30%

¿Qué pasa si el Capex se incrementa 100%? Los resultados se pueden ver en la Figura 17.

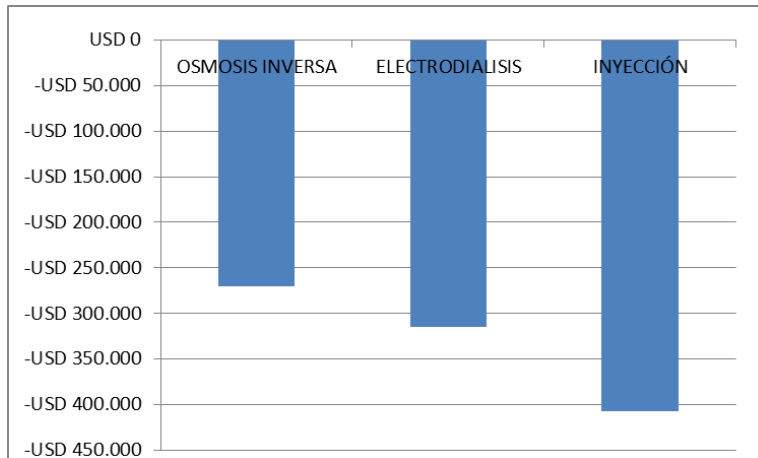
Figura 17. Incremento de Capex en 100% para tratamientos terciarios



Se puede apreciar que así el CAPEX se duplique, las opciones de tratamiento terciario del agua siguen siendo las mejores opciones desde el punto de vista económico.

Ahora bien, ¿qué pasa si manteniendo el Capex, el Opex se incrementa un 30%? La figura 18 muestra los resultados.

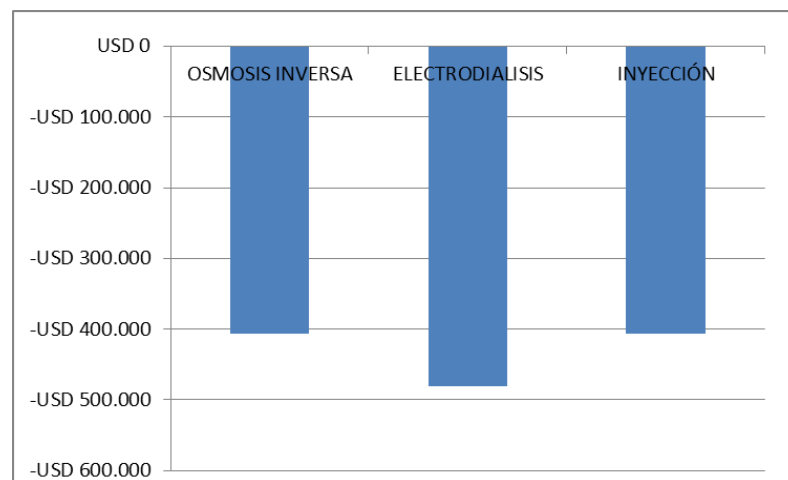
Figura 18. Incremento de Opex en 30% para tratamientos terciarios



Como se puede observar, si bien hay impacto importante en osmosis inversa y electrodiálisis al incrementar el Opex en un 30%, el impacto de dicho incremento no cambia la decisión sobre la rentabilidad en las opciones de tratamiento terciario.

En la figura 19, se ilustra el comportamiento si el Opex se incrementa un 220%.

Figura 19. Incremento de Opex en 220% para tratamientos terciarios



Cómo se puede observar, cuando existe un incremento en el OPEX del 220%, los VAC de ósmosis inversa e inyección se igualan; es decir, se requiere de una desviación demasiado alta para que los resultados económicos se afecten, adicionalmente un incremento de este tipo (muy poco probable) haría que la peor opción sea electrodiálisis.

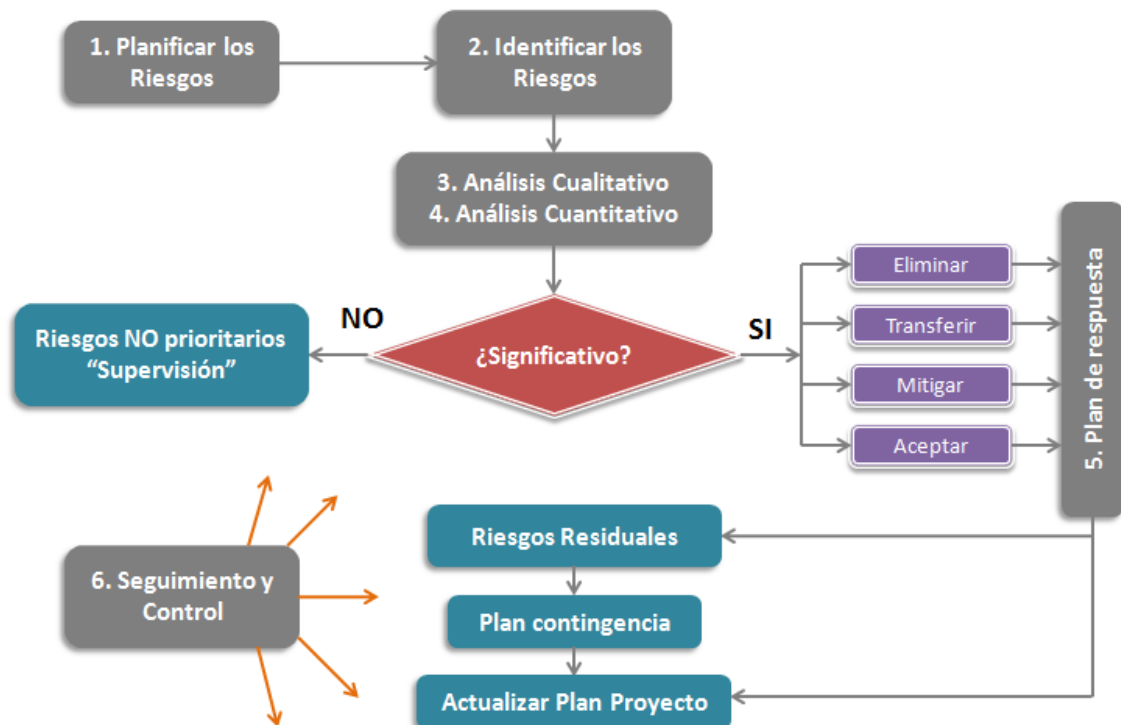
Teniendo en cuentas la evaluación realizada y las sensibilizaciones anteriores, es posible concluir que la mejor alternativa desde el punto de vista técnico y financiero es Osmosis Inversa y que, solamente variaciones abruptas en Opex y Capex, alterarían este resultado.

Si bien la alternativa de inyección de agua ha permitido el desarrollo de campos como Rubiales, existen alternativas diferentes en la disposición que pueden ser incorporadas en este y otros campos de la empresa.

## 8. ANÁLISIS DE RIESGOS

Para la elaboración de esta valoración se siguió el procedimiento establecido por Ecopetrol que sigue los lineamientos del PMI (Project Management Institute) de valoración de riesgos. El ciclo se compone de planificación, identificación, priorización, análisis cualitativo, análisis cuantitativo, plan de respuesta, y seguimiento y control de los riesgos. Esta evaluación se desarrolló para la alternativa de Osmosis Inversa.

Figura 20. Ciclo de Gestión del Riesgos definido por PMI



Fuente: PMBOK (Project Management Book of Knowledge) del PMI

Para el criterio de valoración cualitativa del riesgo se empleó la Matriz de Gerencia del Riesgo, lineamiento propuesto por el PMI y que se muestra a continuación.

Figura 21. Matriz de Gerencia del Riesgo definido por PMI

Probabilidad		Consecuencias				
		Insignificante 1	Menor 2	Moderada 3	Mayor 4	Catastrófica 5
Raro	1	Bajo	Bajo	Moderado	Alto	Alto
Improbable	2	Bajo	Bajo	Moderado	Alto	Extremo
Posible	3	Bajo	Moderado	Alto	Extremo	Extremo
Probable	4	Moderado	Alto	Alto	Extremo	Extremo
Casi seguro	5	Alto	Alto	Extremo	Extremo	Extremo

**Extremo:** Los riesgos extremos deben ponerse en conocimiento de los Directores y ser objeto de seguimiento permanente.

**Alto:** Los riesgos altos requieren la atención del Presidente / Director General / Director Ejecutivo.

**Moderado:** Los riesgos moderados deben ser objeto de seguimiento adecuado por parte de los niveles medios de Dirección.

**Bajo:** Los riesgos bajos deben ser objeto de seguimiento por parte de los supervisores.

Fuente: PMBOK (Project Management Book of Knowledge) del PMI

La valoración de los riesgos identificados para la alternativa seleccionada (Osmosis Inversa) se detalla en la tabla 15.

Tabla 14. Evaluación de Riesgos

No.	Descripción del Riesgo	Valoración Cualitativa	Plan de Respuesta
1	Restricciones en la entrega del agua de producción al tercer agricultor por fallas en el sistema de bombeo, transporte y/o tratamiento del agua tratada a las plantas de tratamiento nivel III que dejen por fuera de especificaciones el agua a entregar	<b>Extremo</b>	Aseguramiento de parámetros en el sistema de tratamiento y conducción del agua en las plantas existentes
2	Restricciones en la entrega del agua de producción al tercer agricultor por causas naturales: - Descargas eléctricas en el área de tratamiento ó en el sistema de generación que deje sin suministro de energía. - Por Sismos que afecten la Operación	<b>Alto</b>	Asegurar un sistema de apantallamiento que minimice los riesgos de tormentas eléctricas.  Construir la planta nivel III con estructuras antisísmicas
3	Restricciones en la entrega del agua de producción al tercer agricultor por catastrofes en la Operación - Incendio ó Explosión, que imposibiliten la entrega de agua	<b>Moderado</b>	Realizar la instalación de la planta cumpliendo normas RETIE e instalar un sistema contraincendios.
4	Restricciones en la entrega del agua de producción al tercer agricultor por paros - bloqueos de la comunidad/trabajadores a la Operación	<b>Alto</b>	Monitorear el entorno, establecer reuniones periódicas con los grupos de interés.
5	Por caída anticipada en el tiempo del perfil de agua producida	<b>Alto</b>	La probabilidad de que suceda es Rara, ya que este tipo de yacimientos son alimentados por un acuífero 'infinito'
6	Restricciones en la entrega del agua de producción al tercer agricultor por cambio repentino de las características fisico-químicas del agua de producción por la implementación de nuevas tecnologías de recobro: combustión in situ - inyección de vapor	<b>Extremo</b>	Seguimiento continuo a las características del agua de producción para implementar los cambios necesarios en caso de presentarse cambios en las propiedades fisico-químicas del agua.
7	Restricciones en el recibo y/o disposición del agua de producción por parte del tercer agricultor por fallas en el sistema de tratamiento nivel III que deje por fuera de especificaciones el agua a entregar al Distrito de Riego	<b>Medio</b>	Contratar con empresas líderes en el sector de plantas de tratamiento nivel III para asegurar la confiabilidad de los equipos.
8	Restricciones en el recibo y/o disposición del agua de producción por parte del tercer agricultor por causas naturales: - Efecto invernal por fuera de datos históricos que inunden los distritos de riego e imposibiliten por períodos muy prolongados de tiempo la disposición del agua de producción.	<b>Extremo</b>	El agua se debe direccionar a los pad de inyección para no afectar la producción de aceite del campo

## 9. MODELO CANVAS

A continuación se describen los componentes del modelo Canvas para el plan de negocio que tiene como objetivo el aprovechamiento agroindustrial del agua asociada al petróleo, utilizando osmosis inversa como tratamiento terciario

Figura 22. Modelo CANVAS para plan de negocio

<b>Key Partners</b> - Agricultores y la Industria Petrolera -Empresas de Desarrollo de Tecnología en tratamiento del agua, y con experiencia en Osmosis Inversa	<b>Key Activities</b> - Seguimiento a la calidad del Agua tratamiento Nivel III luego del tratamiento con Osmosis Inversa -Relación con clientes (Empresa Petrolera y Agricultores)	<b>Value Proposition</b> Plan de negocio para desarrollar el tratamiento de agua asociada a la producción de crudo para uso agroindustrial, cumpliendo las normativas ambientales	<b>Customer Relationship</b> - Face to Face - Asegurar el agua en los parámetros establecidos	<b>Customer Segments</b> - Empresas Petroleras con altas producciones de agua - Empresas petroleras con altos costos en la disposición de agua de manera convencional (vertimiento ó inyección) - Empresa de Agricultores en búsqueda de agua a bajo costo y apoyo en sus cultivos.
	<b>Key Resources</b> - Insumo: Agua asociada a producción de crudo - Personal capacitado en tratamiento de agua nivel III, específicamente en plantas de Osmosis Inversa		<b>Channels</b> Servicio es ofrecido en el Campo Petrolero y zonas aledañas.	
<b>Cost Structure</b> - Tratamiento Nivel III, Osmosis Inversa - Inversión para Infraestructura - Costos energéticos y Operativos - Riesgo por incumplimiento ambiental			<b>Revenue Streams</b> Pago por disposición por barril de agua tratada por empresas petroleras	

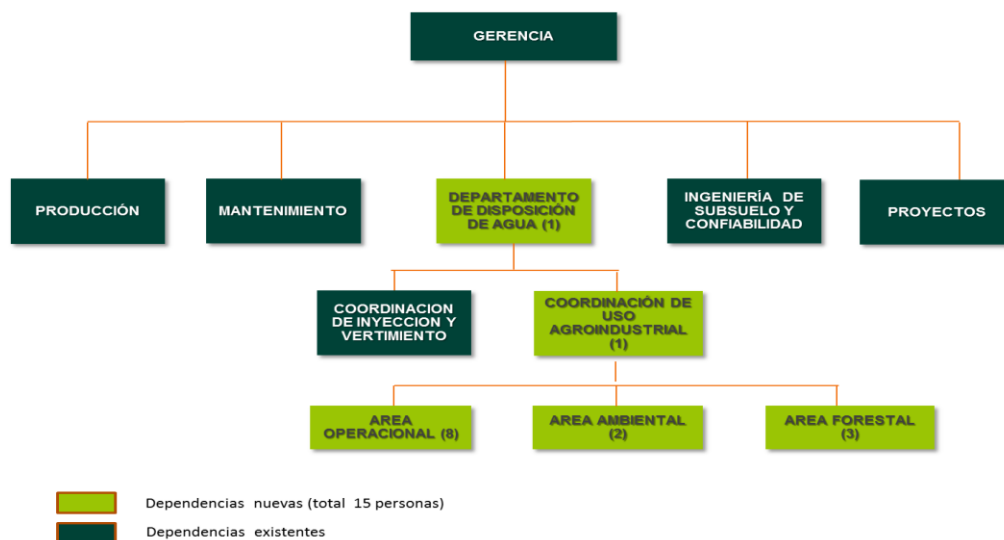
## 10. ORGANIGRAMA PROPUESTO

A continuación se describe el organigrama propuesto para la nueva unidad de acuerdo al modelo de negocios planteado, que permita tratar y reutilizar el agua para aprovechamiento agroindustrial. Las premisas de esta propuesta fueron:

- El campo será operado 100% por Ecopetrol, con personal directo y outsourcing
- Si bien se mantiene el organigrama actual de Ecopetrol en las Gerencias de Activos, se adiciona un nuevo Departamento (con 15 funcionarios directos) para el tratamiento y disposición de agua
- Teniendo en cuenta la importancia del manejo del agua en el campo Rubiales y el presupuesto anual que maneja, es necesario crear un Departamento autónomo e independiente del Departamento de Producción.

A continuación se presenta el Organigrama propuesto para disponer el agua (con las opciones de disposición de inyección y uso agroindustrial)

Figura 23. Organigrama propuesto para la nueva unidad de negocio



## 11. CONCLUSIONES

- La principal característica de los yacimientos de mayor producción en la Gerencia Regional Oriente, es que son de crudos pesados con alta producción de agua (Relación mayor incluso de 20 barriles de agua por cada barril de aceite extraído). Los altos costos asociados al tratamiento y disposición final del agua, hacen necesario la búsqueda de alternativas diferentes al vertimiento e inyección.
- Al analizar las Licencias Ambientales existentes en la Gerencia, se concluye que se cuenta con permisos de vertimiento e inyección y que solamente el campo Rubiales tiene permiso para uso del agua producida en aprovechamiento agroindustrial. Se recomienda gestionar modificaciones a las licencias existentes para buscar la aprobación correspondiente en los campos Quifa y Caño Sur.
- Los tratamientos existentes en el campo Rubiales cumplen con los requerimientos establecidos por las normas para inyección y vertimiento; sin embargo, el aprovechamiento agroindustrial requiere de parámetros fisicoquímicos diferentes, más exigentes. Por lo anterior se hace necesario la instalación de un sistema de pulimento adicional que garantice la obtención de estos parámetros. De acuerdo a las propiedades del agua del campo Rubiales, se recomienda usar las tecnologías de ósmosis inversa y electrodiálisis. Es importante anotar que en la actualidad no existe ningún campo en Colombia que le apunte al aprovechamiento agroindustrial del agua de producción asociada al crudo; solamente se han realizado pilotos, y en algunos casos la Autoridad Ambiental ha negado estos permisos.

- De acuerdo a la evaluación financiera, la mejor opción es el uso de ósmosis inversa para el pulimiento del agua para aprovechamiento agroindustrial; sin embargo, la electrodiálisis no se puede descartar como una tecnología válida para realizar el pulimiento.
- De acuerdo a las sensibilidades realizadas, solamente un incremento del OPEX en un 220% harían que los VAC de ósmosis inversa e inyección sean iguales; es decir, es económicamente viable implementar los tratamientos terciarios, en su orden: osmosis inversa y electrodiálisis
- El uso de un tratamiento terciario para disponer 1.000.000 Bls. diarios de agua en el uso agroindustrial, permitirá ahorros anuales en el campo Rubiales cercanos a los MUS 28 anuales, equivalente a una reducción de US\$0.5/Bl. en el lifting cost.
- Se incorporó el modelo CANVAS como una herramienta fácil y eficiente para la estructuración de planes de negocio, en donde se identifican rápidamente los factores y variables claves a tener en cuenta en cualquier nuevo proyecto a ser desarrollado.
- Es fundamental garantizar al interior de la organización que exista un organigrama robusto y con el nivel de decisión adecuado para garantizar que el proceso de disposición de agua sea eficiente
- La dinámica de la operación del campo y los altos volúmenes de agua producidos a diario, obligan a que la operación de osmosis Inversa para la disposición de agua vía uso agro industrial sea constante y confiable, este es uno de los principales riesgos de los tratamientos terciarios.

## BIBLIOGRAFÍA

ALCALDÍA DE PUERTO GAITÁN, “Plan de Desarrollo Municipal 2012-2015 Porque unidos somos más.”. 2012.

ALMADANI, H. “Water desalination by solar powered electrodialysis process.” Renew. Energy, vol. 28, no. 12, pp. 1915–1924, Oct. 2003.

CAÑIZARES, Pablo; BETETA, Alberto; SÁEZ, Cristina; RODRÍGUEZ, Lourdes; and RODRIGO, Manuel. “Use of electrochemical technology to increase the quality of the effluents of bio-oxidation processes. A case studied.” Chemosphere, vol. 72, no. 7, Jul. 2008.

CHELME-AYALA, Pamela.; SMITH, Daniel; and EL-DIN, Mohamed; “Membrane concentrate management options: a comprehensive critical review.” vol. 36, no. 6, 2009.

COLOMBIA CONGRESO DE LA REPUBLICA, Ley 99 d 1993. por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA, y se dictan otras disposiciones.[en línea] [citado 10 de junio de 2015] disponible en: <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=297>

COLOMBIA, CONGRESO DE LA REPUBLICA. Ley 9 de 1979. (Enero 24). Por la cual se dictan Medidas Sanitarias. [en línea] [citado 10 de junio de 2015] disponible en: <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=1177>

COLOMBIA, PRESIDENCIA DE LA REPÚBLICA. Decreto 2811 de 1974, (Diciembre 18). Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente. [en línea] [citado 10 de junio de 2015] disponible en: <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=1551>

CORPOICA. "Informe Técnico.," 2012.

DOS SANTOS, Elisama Vieira; BEZERRA ROCHA, Jessica Horacina; MEDEIROS DE ARAÚJO, Danyelle; CHIANCA DE MOURA, Dayanne; and MARTÍNEZ HUITLE, Carlos Alberto. "Decontamination of produced water containing petroleum hydrocarbons by electrochemical methods: a mini review.,".

ECOPETROL. Marco estratégico 2013-2020 Bogota. [en línea]. [citado 15 de mayo de 2015] Disponible en: URL:[http://www.ecopetrol.com.co/especiales/Reporte%20de%20sostenibilidad%202011/marco\\_estrategico\\_01.html](http://www.ecopetrol.com.co/especiales/Reporte%20de%20sostenibilidad%202011/marco_estrategico_01.html).

ECOPETROL. Datos históricos de producción de Petróleo. Bogotá. [en línea]. [citado 08 de mayo de 2015] Disponible en: <URL:[http://www.ecopetrol.com.co/especiales/Libro60anios/.../series\\_numericas.pdf](http://www.ecopetrol.com.co/especiales/Libro60anios/.../series_numericas.pdf)>.

ECOPETROL. Presentación de Comité de Desarrollo de Agroindustria en Castilla, Bogotá, 2013.

EINAV, Rachel; and LOKIECB, Fredi. "Environmental aspects of a desalination plant in Ashkelon.," vol. 156, 2003.

FAKHURU'L-RAZI, Ahmadun; PENDASHTEH, Alireza; ABDULLAH, Luqman; BIAK, Dayang; MADAENI, Sayed Siavash; and ZAINAL, Zurina. "Review of technologies for oil and gas produced water treatment.," J. Hazard. Mater., vol. 170, no. 2–3, Oct. 2009.

FINCH, Brian. "How to Write a Business Plan: Create Your Strategy: Kogan Page Ltd.," 2010.

HARVARD Bussines School. "Writing a Business Plan: The basis Harvard Bussines Review.," 2005.

HASAN, Basheer; ASHRI, Wan Mohd; and ABDUL AZIZ; A. R. "Treatment technologies for petroleum refinery effluents: A review.," Process Saf. Environ. Prot., vol. 89, no. 2, Mar. 2011.

ILLUECA-MUÑOZ, J.; MENDOZA-ROCA, J. A.; IBORRA-CLAR, A.; BES-PIÁ, A.; FAJARDO-MONTAÑANA, V.; MARTÍNEZ-FRANCISCO, F. J.; and BERNÁCER-BONORA, I. "Study of different alternatives of tertiary treatments for wastewater reclamation to optimize the water quality for irrigation reuse.," Desalination, vol. 222, no. 1–3, Mar. 2008.

LONGENECKER, Justin G. "Administración de Pequeñas Empresas.," Ciudad de México. Cengage Learning Editores, 2012.

LÓPEZ-RAMÍREZ, J. A.; SAHUQUILLO, S.; SALES, D.; and QUIROGA, J. M. "Pre-treatment optimisation studies for secondary effluent reclamation with reverse osmosis.," Water Res., vol. 37, no. 5, pp. 1177–1184, Mar. 2003.

MAUGUIN, G.; CORSIN, P. "Concentrate and other waste disposals from SWRO plants: characterization and reduction of their environmental impact.," *Desalination*, vol. 182, no. 1–3, Nov. 2005.

MEERGANZ VON MEDEAZZA, G. L. "'Direct' and socially-induced environmental impacts of desalination.," *Desalination*, vol. 185, no. 1–3, Nov. 2005.

MENESES, Monte; PASQUALINO, Jorgelina; CÉSPEDES-SÁNCHEZ, Raquel; and CASTELLS, Francesc. "Alternatives for Reducing the Environmental Impact of the Main Residue From a Desalination Plant.," *J. Ind. Ecol.*, vol. 14, no. 3., Feb. 2010.

MENKOUCHI SAHLI, M. A.; ANNOUAR, S.; TAHAIKT, M.; MOUNTADAR, M.; SOUFIANE, A.; and ELMIDAOU, A. "Fluoride removal for underground brackish water by adsorption on the natural chitosan and by electrodialysis.," *Desalination*, vol. 212, no. 1–3, Jun. 2007.

OSTERWALDER, Alex, PIGNEUR, Yves. "Business Model Generation.," 1ed. Amsterdam: Editorial Modderman Drukwerk, 2009.

PÉREZ-GONZÁLEZ, A.; URTIAGA, A. M.; IBÁÑEZ, R. and ORTIZ, I. "State of the art and review on the treatment technologies of water reverse osmosis concentrates.," *Water Res.*, vol. 46, no. 2, Feb. 2012.

PLAPPALLY, A.K.; and LIENHARD, J. H. "Energy requirements for water production, treatment, end use, reclamation, and disposal.," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no. 7, Sep. 2012.

RICHARD, Arnold. *Manejo de Producción de Agua: de residuo a recurso Bogotá*. [en línea]. [citado 11 de junio de 20145] Disponible en:

[https://www.slb.com/~media/Files/resources/oilfield\\_review/spanish04/aut04/04\\_managing\\_water.pdf](https://www.slb.com/~media/Files/resources/oilfield_review/spanish04/aut04/04_managing_water.pdf). Nuevo México: 2004, P.15.A.

SIRIVEDHIN, T.; MCCUE, J.; and DALLBAUMAN, L. "Reclaiming produced water for beneficial use: salt removal by electrodialysis.," J. Memb. Sci., vol. 243, no. 1–2, Nov. 2004.

TCHOBANOGLIOUS, G.; and BURTON, F. L. "Wastewater engineering: treatment, disposal and reuse.," 1st ed. New York: McGraw-Hill, 1979.

TUREK, Marian. "Dual-purpose desalination-salt production electrodialysis.," Desalination, vol. 153, pp. 377-381, 2002.

VAN DER BRUGGEN, B.; MILIS, R.; VANDECASTEELE, C.; BIELEN, P.; VAN SAN, E.; and HUYSMAN, K. "Electrodialysis and nanofiltration of surface water for subsequent use as infiltration water.," Water Res., vol. 37, no. 16, Sep. 2003.

# ANEXOS

## Anexo A. Modelo Evaluación Financiera

### Parámetros generales:

Concepto	Unidades	Valor	Concepto	Unidades	Valor
TRM	[COP/USD]	\$ 2.300,0	Tipo de Depreciación	Unidades Producidas	
Tasa de Int.	[%]	11,1%	Tiempo de Depreciación	[Años]	10
Tasa Impositiva	[%]	33%	Valor de Salvamento	[%]	100%
Descontar Flujos al IFA	[Año]	2015	Valoración de Predios	[Días/Año]	360
IWA	[%]	0,0%		[%]	20%

Proyecciones Macroeconómicas	Unidades	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
IPC Estimado	[% E. A.]	3,4%	3,2%	3,1%	3,0%	2,8%	2,7%	2,7%	2,7%	2,7%	2,7%	2,7%	2,7%	2,7%	2,7%	2,7%	2,7%

Concepto	Unidades	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Perfil de Agua	[Kb/VPD]		1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

Concepto	Unidades	OSMOSIS INVERSA	ELECTRODIALISIS	INYECCIÓN	5%
<b>COMPRAS Y CONSTRUCCION</b>					
Pozos				38.000	
CIVIL	[KUSD]	\$ 2.500	\$ 2.500	\$ 6.500	
ELECTRICOS	[KUSD]	\$ 1.414	\$ 1.031	\$ 1.250	
MECANICOS	[KUSD]	\$ 67.690	\$ 71.414	\$ 50.000	
TUBERIA	[KUSD]	\$ 1.500	\$ 1.500	\$ 48.000	
EDIFICACIONES (TODO INCLUIDO)	[KUSD]	\$ 73.104	\$ 76.445	\$ 143.750	
<b>SUBTOTAL COMPRAS Y CONSTRUCCION</b>	[KUSD]	\$ 73.104	\$ 76.445	\$ 143.750	
<b>AUI COMPRAS Y CONSTRUCCION</b>	[KUSD]	\$ 14.621	\$ 15.389	\$ 28.750	
<b>SUBTOTAL AUI</b>	[KUSD]	\$ 14.621	\$ 15.389	\$ 28.750	
<b>OTROS COSTOS</b>					
GERENCIA DE PROYECTO	[KUSD]	\$ 360	\$ 389	\$ 363	
<b>SUBTOTAL GERENCIA DE PROYECTO</b>	[KUSD]	\$ 360	\$ 389	\$ 363	
INGENIERIA / ESTUDIOS / DISEÑO	[KUSD]	\$ 1.581	\$ 2.030	\$ 1.270	
<b>SUBTOTAL INGENIERIA/ESTUDIOS/DISEÑO</b>	[KUSD]	\$ 1.581	\$ 2.030	\$ 1.270	
GERENCIAMIENTO DE CONSTRUCCION	[KUSD]	\$ 792	\$ 857	\$ 780	
<b>SUBTOTAL GERENCIAMIENTO CONSTRUCCION</b>	[KUSD]	\$ 792	\$ 857	\$ 780	
PCA	[KUSD]	\$ 662	\$ 716	\$ 676	
<b>SUBTOTAL PCA</b>	[KUSD]	\$ 662	\$ 716	\$ 676	
ESPECIALES	[KUSD]	\$ 456	\$ 457	\$ 456	
<b>SUBTOTAL COSTOS ESPECIALES</b>	[KUSD]	\$ 456	\$ 457	\$ 456	
CONTINGENCIA ESCALACION	[KUSD]	\$ 1.569	\$ 2.073	\$ 1.590	
<b>TOTAL COSTO ESTIMADO PROYECTO</b>	[KUSD]	\$ 94.006	\$ 99.495	\$ 178.545	



