

**ESTUDIO DE LA VIABILIDAD ADMINISTRATIVA Y FINANCIERA DE LA  
OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE  
AGUAS DE VERTIMIENTO POR EL PROCESO DE OSMOSIS INVERSA EN  
CAMPO RUBIALES.**

**WILLIAM ANDRÉS VICUÑA GIRALDO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE FISICO-QUIMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETROLEOS  
ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA DE HIDROCARBUROS  
BUCARAMANGA**

**2016**

**ESTUDIO DE LA VIABILIDAD ADMINISTRATIVA Y FINANCIERA DE LA  
OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE  
AGUAS DE VERTIMIENTO POR EL PROCESO DE OSMOSIS INVERSA EN  
CAMPO RUBIALES.**

**WILLIAM ANDRÉS VICUÑA GIRALDO**

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE ESPECIALISTA EN  
GERENCIA EN HIDROCARBUROS**

**DIRECTOR**

**JULIO CESAR PEREZ AGUDELO  
INGENIERO DE PETROLEOS**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE FISICO-QUIMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETROLEOS  
ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA DE HIDROCARBUROS  
BUCARAMANGA**

**2016**

## TABLA DE CONTENIDO

	<b>Página</b>
INTRODUCCIÓN	11
1. RESEÑA DEL PROYECTO	12
2. MARCO TEORICO	13
2.1 CAMPO RUBIALES	13
2.2 PRODUCCIÓN DE CRUDO-AGUA	14
2.2.1 Agua de Producción.	15
2.3 TRATAMIENTO DEL AGUA DE PRODUCCIÓN	17
2.3.1 Normatividad ambiental para el reúso de aguas residuales.	17
2.4 PARÁMETROS AGUA EFLUENTE	19
2.5 TRATAMIENTO DEL AGUA DE PRODUCCIÓN PARA EL REÚSO	19
2.5.1 Pretratamiento.	20
2.5.2 Tratamiento: ósmosis inversa.	23
3. COSTOS FIJOS	25
3.1 NOMINA	25
3.2 CONTRATOS DE SERVICIOS GENERALES	27
3.3 CONSUMIBLES	31
4. COSTOS VARIABLES	33
4.1 CONSUMO DE ENERGÍA	33
4.2 PRODUCTOS QUÍMICOS	34
4.3 REPUESTOS Y MATERIAL FUNGIBLE	35
5. ANALISIS ECONÓMICO	36
5.1 ESCENARIO OPTIMO	37
5.2 ESCENARIO CON AGUA FUERA DE ESPECIFICACIONES	39
6. CONCLUSIONES	41

7. RECOMENDACIONES

42

BIBLIOGRAFIA

43

## LISTA DE TABLAS

	<b>Página</b>
Tabla 1. Caracterización del agua de producción Campo Rubiales.	16
Tabla 2. Parámetros del agua tratada acordados.	19
Tabla 3. Personal en planta	25
Tabla 4. Costo de Nomina.	26
Tabla 5. Costo alquiler de vehículos	28
Tabla 6. Alquiler de contenedores para dormitorios	29
Tabla 7. Costo contratos de mantenimiento	30
Tabla 8. Costos de comunicación.	30
Tabla 9. Costo filtro de cartuchos	31
Tabla 10. Costo de las membranas	32
Tabla 11. Costo consumo de energía	33
Tabla 12. Productos químicos de proceso	34
Tabla 13. Limpieza de membranas con ensuciamiento por materia orgánica	34
Tabla 14. Costo de los productos químicos para limpieza.	35
Tabla 15. Costo de O&M escenario optimo	38
Tabla 16. Costo de producción barril de agua escenario óptimo.	38
Tabla 17. Costo de O&M escenario con agua fuera de especificaciones.	39
Tabla 18. Costo de producción barril de agua escenario con agua fuera de especificaciones	40

## LISTA DE TABLAS

	<b>Página</b>
FIGURA 1. Producción diaria de crudo y agua en Campo Rubiales.	14
FIGURA 2. Esquema de tratamiento de aguas de producción en Campo Rubiales	17
FIGURA 3. Esquema de tratamiento de aguas para reúso.	20

## RESUMEN

**TITULO:** ESTUDIO DE LA VIABILIDAD ADMINISTRATIVA Y FINANCIERA DE LA OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS DE VERTIMIENTO POR EL PROCESO DE OSMOSIS INVERSA EN CAMPO RUBIALES.\*

**AUTOR:** WILLIAM ANDRÉS VICUÑA GIRALDO.\*\*

**PALABRAS CLAVE:** tratamiento de aguas, ósmosis inversa, operación, mantenimiento, agua de producción, barril.

### **DESCRIPCIÓN:**

El presente trabajo de monografía desarrolla un estudio de la operación y el mantenimiento de una planta de tratamiento de aguas de producción que opera con el proceso de ósmosis inversa, dicho estudio va dirigido a conocer cuánto es el costo neto de producir un barril de agua en las condiciones establecidas dentro del contrato.

El trabajo inicia con una reseña de lo que fue el proyecto y sigue con una descripción breve del campo dónde se construyó la planta, posteriormente hace una introducción sobre el agua de producción, cuales son los parámetros del agua a tratar y cuáles son los parámetros del agua efluente según la normatividad ambiental. Además, menciona las unidades de proceso de la planta así como su función en la misma.

A continuación se presenta una descripción de los costos fijos que son asociados a la operación y mantenimiento de la planta, como lo son: la nómina, los contratos de servicios generales y los consumibles. Seguido a esto presenta los costos variables de la planta, como los son: El consumo de energía, los productos químicos para la operación y los repuestos.

Finalmente se hace un análisis económico de la operación y el mantenimiento de la planta para un año de operación y con la información anterior se calcula el costo de producir un barril de agua, analizando dos escenarios posibles que se pueden presentar durante el funcionamiento de la planta; un escenario óptimo y un escenario para tratar un agua fuera de especificaciones.

---

\* Monografía.

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director: Julio Cesar Pérez Agudelo, Ingeniero de Petróleos.

## ABSTRACT

**TITLE:** ADMINISTRATIVE AND FINANCIAL FEASIBILITY STUDY OF OPERATION AND MAINTENANCE OF WATER TREATMENT PLANT BY REVERSE OSMOSIS PROCESS IN FIELD RUBIALES.\*

**AUTHOR:** WILLIAM ANDRÉS VICUÑA GIRALDO.\*\*

**KEYWORDS:** Water treatment, reverse osmosis, operation, maintenance, produced water, barrel.

### DESCRIPCIÓN:

This working paper develops a study of operation and maintenance for produced water treatment plant, operating with reverse osmosis process, the study is aimed to know how is the net cost of producing a water barrel in the conditions set out in the contract.

The work begins with a review of what was the project and continues with a brief description about oil field where the plant was built, makes an introduction on produced water concept, review water parameters from water to be treated and review parameters from effluent water, this according to environmental regulations. Also mentions the processing units and its role in the plant.

A description of fixed costs that are associated with the operation and maintenance of the plant is presented, such as: payroll, general service contracts and consumables. Following presents the variable costs, such as: energy, chemicals for operation and spare parts.

Finally an economic analysis of the operation and maintenance for a year of operation is done and the barrel cost is calculated by analyzing two possible scenarios that can occur during operation of the plant, an optimal scenario and a scenario to treat water out of specifications.

---

\* Monograph.

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director: Julio Cesar Pérez Agudelo, Ingeniero de Petróleos.

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad, se ha vuelto recurrente el problema de la alta producción de agua en los campos maduros, ya sea por el uso de agua como medio para generar presión o porque adicionalmente los campos son acuíferos activos. Se estima que la proporción agua-crudo en los campos colombianos está entre 3-10 barriles de agua producida por uno de petróleo, y esta proporción va en aumento.

Debido a la regulación ambiental colombiana, el agua de producción no puede ser vertida directamente a las fuentes hídricas sin su debido tratamiento. Es por esto que las compañías petroleras hoy hacen un tratamiento previo al vertimiento con el fin de cumplir la regulación vigente.

Las compañías petroleras también reutilizan un porcentaje del agua, dependiendo del campo este porcentaje puede cambiar, para hacer reinyección de la misma con dos fines principales, generación de presión y disposición, pero para hacerlo también deben hacer un pretratamiento para evitar problemas de taponamiento de pozos.

Un aumento de la cantidad de agua de producción hace que el lifting cost aumente debido a la mayor cantidad de agua a tratar, es por esto que se han puesto en marcha proyectos a nivel mundial para reutilizar el agua producida y así darle un valor agregado a lo que antes era considerado un residuo.

El presente trabajo pretende hacer un análisis administrativo y financiero de una planta de tratamiento de agua producida por el proceso de osmosis inversa para reusar dicha agua en riego de cultivos no alimenticios en campo rubiales meta, respondiendo a la necesidad de estimar el costo de tratar un barril de agua producida, cuyo producto tenga las características físico-químicas para riego.

## 1. RESEÑA DEL PROYECTO

En el año 2012 mediante un proceso de licitación abierta se adjudicó la construcción, operación y mantenimiento de una planta de tratamiento de aguas de producción para su reúso en campo rubiales, departamento del Meta. Debido a retrasos por entrega de predios, terminación de la obra civil, traslado de materiales y otros; la construcción de la planta no había terminado para mediados del año 2015.

En el proceso de licitación se hizo una evaluación del costo unitario por barril tratado para presentar como propuesta, pero dados los cambios presentados en el mercado nacional e internacional, cambios de ingeniería y de asignación de presupuestos; es necesario realizar una nueva evaluación administrativa y financiera para estimar cual será el costo de producir un barril de agua para reúso en el año 2016. Además conocer que factores adicionales aportan al costo del barril que no se tuvieron en cuenta en la primera evaluación.

Se debe calcular el costo del personal, de los insumos químicos, de recambio de membranas y filtros, del alojamiento del personal, del consumo de energía. Todo lo anterior para encontrar el precio neto de producción de un barril de agua.

De no realizar la evaluación, las proyecciones de costos de operación y mantenimiento pueden ser erradas y se tendría un costo neto errado del barril producido, lo que ocasionaría en una falta de capital para el sostenimiento de la operación y sobre costos por no estudiar bien diferentes ofertas de compra. Derivando en la no viabilidad a futuro del proyecto.

## 2. MARCO TEORICO

### 2.1 CAMPO RUBIALES

El campo se encuentra ubicado en jurisdicción del municipio de Puerto Gaitán, a 171 kilómetros del casco urbano de este municipio, en el departamento del Meta. La estructura del campo Rubiales está constituida por un monoclinal orientado regionalmente en una dirección N50°E. El entrampamiento de hidrocarburo en campo Rubiales se da gracias a una combinación de factores estratigráficos (ríos trezados) e hidrodinámicos (empuje de agua fresca que genera un contacto agua-aceite inclinado 0.35°C al NW). Sin embargo existen diferencias al establecer cuál de los factores es el principal limitante de la acumulación de hidrocarburos.

El pozo rubiales 1 fue perforado por la compañía Intercol en 1981 y alcanzó una profundidad de 3100 pies. Probó petróleo de 13.5 °API en las areniscas basales de carbonera. El pozo Rubiales 4 operado por Tuskar, alcanzó una profundidad de 3140 pies y probó crudo pesado de 14 °API en C7.

La historia de producción del campo Rubiales incluye los pozos de la Asociación pirito. La producción inició en 1992. Se cerró en 1997 y comenzó de nuevo en 2001 a una tasa promedio de 1700 barriles de petróleo/día con tendencia a subir, debido a la campaña de perforación de nuevos pozos. A diciembre de 2005 la producción del campo fue de 8420 barriles/día con una corriente de agua de 80% al 87%. La producción inicial por pozo está en un rango de 250 a 300 barriles/día con un porcentaje de agua de 30%. El mecanismo de producción es empuje hidrodinámico de agua.<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> ANH, Cuenca llanos orientales. Estudio integrado-Crudos pesados [en línea]

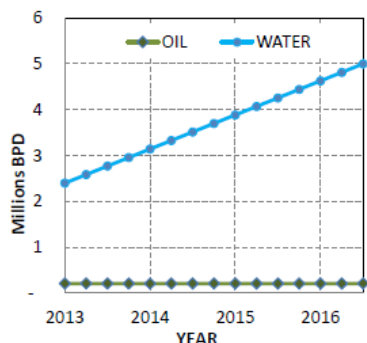
## 2.2 PRODUCCIÓN DE CRUDO-AGUA

Según la U.S. Energy Information Administration, la producción mundial de petróleo a 2014 fue de 93 millones de barriles/día. La capacidad global de agua de producción proveniente de la producción de petróleo on-shore está estimada en 300 millones de barriles/día (2013) y se espera que crezca aproximadamente a 500 millones de barriles/día para el 2020<sup>2</sup>. Se estima que actualmente el 75% del agua de producción es reinyectada a pozos, mientras el 15% es descargado a ríos y océanos<sup>3</sup>. Solo el 3% del agua de producción es reusada con propósitos benéficos<sup>4</sup>.

A 2013, la producción de crudo de campo Rubiales era de 210.000 barriles/día de crudo pesado (12 °API); además la producción de agua era de 2.200.000 barriles/día. Para 2016 la producción de agua será de 5.000.000 barriles/día.<sup>5</sup>

FIGURA 1. Producción diaria de crudo y agua en Campo Rubiales.

(Tomado de Simmard J. et al. 2013)



<sup>2</sup> LEVY R, HABERMAN A. OILFIELD PRODUCED WATER DESALINATION USING INNOVATIVE PROCESS – FROM PILOT TO FULL-SCALE PROJECT IN COLOMBIA. En The International Desalination Association World Congress on Desalination and Water Reuse. 2015. p. 2.

<sup>3</sup> SUMANGALI R. Water Technology Unlocks Future Oil and Gas Reserves. Lux Research 2010

<sup>4</sup> Levy, R. et al. Op cit., p. 2.

<sup>5</sup> SIMMARD J. et al. Innovative Technology to Produce Green Petroleum. IDA's conference on Water Recycling and Desalination for the Oil & Gas Industry, Banff 2013.

**2.2.1 Agua de Producción.** El agua de producción o también llamada de vertimiento es agua atrapada en formaciones subterráneas que se suele traer a la superficie durante la exploración y producción de petróleo y gas. En los pozos de petróleo y gas tradicionales, el agua producida se lleva a la superficie junto con petróleo o gas. Debido a que el agua ha estado en contacto con la formación de hidrocarburos desde hace siglos, que tiene algunas de las características químicas de la formación y propia de los hidrocarburos. Se puede incluir agua desde un depósito, el agua se inyecta en la formación, y cualquier producto químico añadido durante los procesos de perforación, producción, y tratamiento. El agua de producción también se puede llamar "salmuera", "agua salada", o "agua de formación".

Las propiedades físicas y químicas del agua de producción varían considerablemente dependiendo de la ubicación geográfica del campo, la formación geológica de la que proviene, y el tipo de hidrocarburo que se está produciendo. Las propiedades del agua producida y el volumen pueden incluso variar a lo largo del curso de la vida de un yacimiento.

Los principales componentes de interés en el agua de producción son:

Contenido de sal: El contenido de sal se puede expresar como la salinidad, sólidos disueltos totales, o la conductividad eléctrica. El contenido de sal en el agua de producción varía ampliamente, desde cercana al agua dulce a niveles de sal hasta diez veces mayor que el agua de mar.

Aceites y grasas: los aceites y las grasas no son un producto químico individual. Más bien, el término "aceite y grasa" se refiere a un método de ensayo común que mide muchos tipos de productos químicos orgánicos que colectivamente representan una propiedad "aceitosa" en el agua.

Varios productos químicos inorgánicos y orgánicos: Estos productos químicos se encuentran naturalmente en la formación, se transfieren al agua a través de contacto a largo plazo con el hidrocarburo, o son aditivos químicos utilizados durante la perforación y operación del pozo. La presencia de productos químicos específicos y las concentraciones de los productos químicos varían ampliamente entre diferentes muestras de agua de producción<sup>6</sup>.

Actualmente, el operador del campo está reinyectando en acuíferos profundos toda el agua de producción. Las características del agua de producción de campo Rubiales son las siguientes:

Tabla 1. Caracterización del agua de producción Campo Rubiales.  
(Tomado de Simmard J. et al. 2013)

<b>Parámetros principales</b>	<b>Unidad</b>	<b>Rango</b>
<b>pH</b>	-	7-8
<b>Temperatura</b>	°C	28-40
<b>Turbidez</b>	NTU	15-30
<b>TSS</b>	ppm	20
<b>TSD</b>	ppm	1300
<b>Cloruros</b>	ppm	150
<b>Sodio</b>	ppm	350
<b>Sílice</b>	ppm	30-46
<b>Hidrocarburos totales</b>	ppm	1-5
<b>Grasas y aceites</b>	ppm	1-10

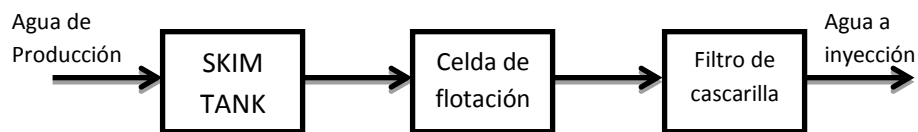
---

<sup>6</sup> Colorado School of Mines / Advanced Water Technology Center [En línea]

## 2.3 TRATAMIENTO DEL AGUA DE PRODUCCIÓN

El operador del campo realiza un tratamiento previo al agua de producción antes de reinyectarla a los acuíferos profundos. Este tratamiento consiste en unidades skim tank, el cual separa el agua del crudo por densidades, celdas de flotación con aire inducido y filtros de cascarilla de nuez, para posteriormente reinyectar el agua.

FIGURA 2. Esquema de tratamiento de aguas de producción en Campo Rubiales



**2.3.1 Normatividad ambiental para el reúso de aguas residuales.** Debido a que el reúso de aguas industriales puede causar perjuicio sobre la salud humana, el ministerio de medio ambiente ha formulado una resolución donde establece la normatividad para la disposición de este tipo de aguas.

La resolución 1207 DE 2014 (Julio 25) establece las disposiciones relacionadas con el uso del agua residual tratada y no aplica para su empleo como fertilizante o acondicionador de suelos.

El Artículo 6° de la resolución establece el uso para agua residual tratada.

Las aguas residuales tratadas se podrán utilizar en los siguientes usos:

a. Uso Agrícola. Para el riego de:

- Cultivos de pastos y forrajes para consumo animal.
- Cultivos no alimenticios para humanos o animales.
- Cultivos de fibras celulósicas y derivados.

- Cultivos para la obtención de biocombustibles (biodiesel y alcohol carburante) incluidos lubricantes.
- Cultivos forestales de madera, fibras y otros no comestibles.
- Cultivos alimenticios que no son de consumo directo para humanos o animales y que han sido sometidos a procesos físicos o químicos.
- Áreas verdes en parques y campos deportivos en actividades de ornato y mantenimiento.
- Jardines en áreas no domiciliarias.

b. Uso Industrial. En actividades de:

- Intercambio de calor en torres de enfriamiento y en calderas.
- Descarga de aparatos sanitarios.
- Limpieza mecánica de vías.
- Riego de vías para el control de material particulado.
- Sistemas de redes contraincendios.

El Artículo 7° define los Criterios de calidad del agua para reúso, entre ellos el agrícola.

Uso agrícola

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

El Artículo 8° establece las distancias mínimas de retiro para el desarrollo del reúso.<sup>7</sup>

## 2.4 PARÁMETROS AGUA EFLUENTE

En el contrato de operación de la planta para tratar 500.000 barriles de agua día se pactaron los siguientes parámetros de agua a entregar:

Tabla 2. Parámetros del agua tratada acordados.

(Tomado de Pacific Rubiales Energy, Contrato Agrocascada 8500000007)

<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor máximo por Barril en agua de salida</b>
<b>pH</b>		6 – 8
<b>Conductividad</b>	uS/cm	300
<b>Sólidos Disueltos Totales</b>	mg/l	240
<b>Sodio</b>	mg/l	<65
<b>Grasas y Aceites</b>	mg/l	0.5
<b>Hidrocarburos Totales</b>	mg/l	0.5
<b>Cloruros</b>	mg/l	<70

Comparando los parámetros de la resolución del ministerio del medio ambiente con los parámetros en contrato, se puede decir que los parámetros pactados son más exigentes que los de la resolución.

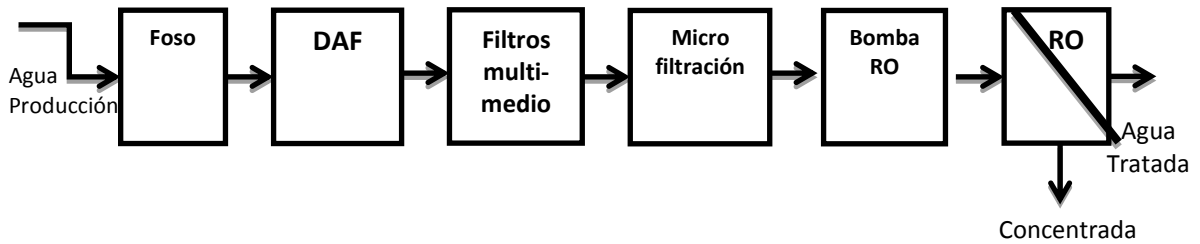
## 2.5 TRATAMIENTO DEL AGUA DE PRODUCCIÓN PARA EL REÚSO

Dados los parámetros a los que se quiere llevar el agua, tratamiento de la Planta para tratar Aguas de producción incluye los siguientes procesos. Para una planta que procesará 500 KBPD.

---

<sup>7</sup> Ministerio de Medio Ambiente, RESOLUCIÓN 1207 DE 2014 [En línea]

FIGURA 3. Esquema de tratamiento de aguas para reúso.



- Cámara de bombeo de agua bruta, o foso de entrada
- Pretratamiento por DAF (dissolve air flotation)
- Bombeo intermedio de agua a filtros multimedio
- Pretratamiento por filtros multimedio a presión.
- Pretratamiento por doble etapa de microfiltración con filtros de cartucho (convencional+oleófila)
- Pretratamiento químico
- Tratamiento mediante OI, tres etapas.
- Post-tratamiento mediante dosificación química (si es necesaria).

**2.5.1 Pretratamiento.** El desempeño y la operación exitosa de un sistema de ósmosis inversa dependen directamente de la calidad del agua de alimentación de la RO. La naturaleza de los componentes del agua de alimentación puede influir en el rendimiento de la membrana provocando incrustaciones ensuciamiento o la degradación de la membrana.

Mediante las etapas del pretratamiento, se acondiciona el agua con objeto de que tenga unas condiciones óptimas antes de su llegada a las membranas de ósmosis inversa, cumpliendo unas características físicas y químicas definidas.

Para asegurar un adecuado rendimiento, se diseña y construye un pretratamiento con las siguientes etapas: pretratamiento físico-químico (flotación), pretratamiento físico (filtración en arena-antracita y filtros oleófilos) y pretratamiento químico.

Las características principales de estas instalaciones son:

- Bombeo de alimentación, formado por seis (6) bombas centrífugas horizontales de 553 m<sup>3</sup>/h. Se dispone un equipo de reserva.
- Flotación sistema DAF, en seis (6) líneas, equipados cada uno de ellos con los siguientes equipos de presurización:

Seis (12) bombas de presurización, dos por flotador, Manteniéndose una bomba en reserva.

- Pretratamiento físico, filtración

Las instalaciones de pretratamiento físico, filtración, se diseñan para un caudal de 3.308 m<sup>3</sup>/h en los filtros cerrados multimedios y microfiltros, que constan de:

- Almacenamiento de agua clarificada en un depósito de 400 m<sup>3</sup> de volumen unitario.
- Impulsión a filtros cerrados de arena mediante seis (6) bombas centrífugas horizontales, de 800 m<sup>3</sup>/h de caudal unitario, equipadas con variador electrónico de frecuencia. Se dispone un equipo de reserva en el almacén de la planta.
- Filtración multimedio, mediante seis (6) filtros cerrados.

Los filtros multimedio están diseñados para reducir la turbidez y coloides en el agua. Estos filtros pueden eliminar partículas de hasta aproximadamente 10 micrómetros de tamaño. Si un coagulante se añade a la corriente influente del filtro, se puede lograr la reducción de partículas de hasta 1-2 micras. Eficiencia de eliminación típica para filtros multimedio es de aproximadamente 50% de partículas entre un rango de 10 - 15 micras. La turbidez influente para los filtros se limita a aproximadamente 10 NTU. Con una turbidez superior a 10 NTU, estos filtros deben retrolavarse con demasiada frecuencia para proporcionar la calidad del efluente constante.

Los filtros multimedio contienen capas de antracita en la parte superior, arena en el medio y garnete abajo.<sup>8</sup>

- Equipos de lavado de los filtros se hace con aire, rechazo de ósmosis y agua clarificada formados por:
  - tres (3) bombas centrífugas horizontales de agua de lavado, una en reserva, de 510 m<sup>3</sup>/h de caudal unitario.
  - Dos (2) soplantes de émbolos rotativos, una en reserva, de 2.872 Nm<sup>3</sup>/h de caudal unitario.
  
- Filtración de seguridad por cartuchos convencionales mediante siete (7) filtros, equipados cada uno de ellos con 250 cartuchos.

Los filtros de cartucho se utilizan generalmente para tratar previamente el agua influente justo antes de las membranas de ósmosis inversa. Los filtros de cartucho están diseñados para evitar que resinas y/o los medios que pueden haber sido arrastrados de los ablandadores aguas arriba y filtros, lleguen a la bomba de alimentación de RO y dañen el impulsor, así como el bloqueo de las tuberías de alimentación. También están diseñados para eliminar macropartículas que podrían dañar físicamente o penetrar la capa de las membranas.

Los filtros de cartucho se encuentran en un rango generalmente de 5 micras nominal (aunque se recomienda absoluto), que es demasiado grande para la eliminación de sólidos que contribuyen a turbidez en el agua. Los filtros de cartucho con una calificación de 1 a 3 micras absolutas se utilizan en cuando la sílice o metales de silicatos coloidales están presentes<sup>9</sup>.

---

<sup>8</sup> KUCERA J. Reverse Osmosis. Design, Processes, and Applications for Engineers. Co-published by John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, New Jersey, and Scrivener Publishing LLC, Salem, Massachusetts. 2010. USA. p. 151.

<sup>9</sup> Ibid., p. 97

- Filtración de seguridad por cartuchos oleófilos mediante siete (7) filtros, equipados con 250 cartuchos de filtración.

**2.5.2 Tratamiento: ósmosis inversa.** La ósmosis inversa (RO) es una técnica basada en membranas para la desmineralización para separar los sólidos disueltos, tales como iones, a partir de una solución (la mayoría de las aplicaciones implican soluciones a base de agua). Las membranas en general actúan como barreras semi-permeables selectivas, barreras que permiten a algunas especies (como el agua) permeen de manera selectiva a través de ellas, reteniendo selectivamente otras especies disueltas (como iones). RO ofrece la mejor filtración disponible actualmente, el mejor rechazo de sólidos disueltos, así como sólidos en suspensión<sup>10</sup>.

Las instalaciones de ósmosis inversa se diseñan para un caudal de 3.095 m<sup>3</sup>/h y constan de:

- Instalación de ósmosis inversa
- Bombeo de alimentación mediante seis (6) bombas centrífugas horizontales, de 610 m<sup>3</sup>/h, equipadas con variador electrónico de frecuencia. Se dispone un equipo de reserva en el almacén de la planta.
- Bastidor de ósmosis inversa, seis (6) líneas configuradas en 3 etapas, equipadas con 72 tubos de presión de 8 elementos por línea en 1<sup>a</sup> etapa, 42 tubos de presión de 8 elementos por línea en 2<sup>a</sup> etapa y 20 tubos de presión de 8 elementos por línea en 3<sup>a</sup> etapa.
- Bombeo booster de 3<sup>a</sup> etapa, formado por seis (6) bombas centrífugas horizontales de 125 m<sup>3</sup>/h, equipadas con variador electrónico de frecuencia. Se dispone un equipo de reserva en el almacén de la planta.
- Instalación de limpieza de membranas formada por:

---

<sup>10</sup> Ibid., p. 3

- Un (1) depósito de preparación de los reactivos de limpieza de 40 m<sup>3</sup> de capacidad, equipado con resistencia de caldeo.
- Dos (4) bombas centrífugas horizontales, una en reserva, de 180 m<sup>3</sup>/h de caudal unitario, equipadas con variador electrónico de frecuencia.
- Un (1) filtro de cartuchos equipado con 130 cartuchos de filtración.

### 3. COSTOS FIJOS

Los costos fijos son aquellos relacionados con la operación de la planta, pero no varían significativamente con la producción de agua. Incluyen:

- Nomina, salarios y prestaciones
- Contratos de servicios generales
- Gastos generales
- Consumibles

#### 3.1 NOMINA

El mantenimiento y operación de una planta de estas dimensiones necesita un equipo interdisciplinario de personas. Para una mejor comprensión de la organización del personal de planta, dividiremos al personal en dos grupos, “personal a turno general” y “personal a turno rotativo”. Cada grupo estará compuesto por:

**Tabla 3.** Personal en planta

<b>Personal a turno general</b>	<b>Cantidad</b>
Jefe de planta	1
Analista de laboratorio	2
Personal de mantenimiento	6
Responsable de seguridad y salud	1
Coordinador de logística en campo	1
<b>Personal a turno rotativo</b>	<b>Cantidad</b>
Operadores de Planta	8
Patiero	3

Para el mantenimiento se contratarán tecnólogos en mantenimiento mecánico, eléctrico e instrumentación. Los operadores serán técnicos en las mismas tres disciplinas para que puedan dar soporte a los encargados del mantenimiento.

Los turnos para todo el personal serán 14x7, 14 días de trabajo y 7 de descanso. Con objeto de prestar un correcto control de la planta, será necesario cubrir 24 horas de servicio durante los 365 días del año, para ello, el personal operador trabajará en turnos rotativos, se establecen dos turnos de trabajo (día y noche) de 12 horas cada uno.

- Turno de día: de 6:00 am a 6:00 p.m.
- Turno de noche: de 6:00 p.m. a 6:00 am.

Los salarios serán pactados con el operador del campo, se toma como base la última tabla salarial de Ecopetrol. La siguiente es la tabla base para el costo de la nómina en pesos colombianos.

**Tabla 4.** Costo de Nomina.

Cargo	Experiencia años	Cant	Sueldo/Mes	Año
Jefe de planta	6	1	\$ 6.704.790	\$ 80.457.480
Personal de mantenimiento	5	6	\$ 3.898.170	\$ 280.668.240
Coordinador de campo	5	1	\$ 2.590.860	\$ 31.090.320
Personal de HSE	5	2	\$ 2.590.860	\$ 62.180.640
Analista de Laboratorio	3	2	\$ 2.590.860	\$ 62.180.640
Operador	3	8	\$ 2.590.860	\$ 248.722.560
Patiero	2	3	\$ 2.313.270	\$ 83.277.720

<b>TOTAL BASICO AÑO</b>				\$ 848.577.600
<b>CON PROVISION</b>	60%	23		<b>\$ 1.357.724.160</b>

Será obligatorio el uso de ropa de trabajo para todos los trabajadores de la planta, así como el empleo de los EPIs necesarios según el área y actividad a realizar. Ambos serán provistos por la empresa cada año o cuando sea absolutamente necesario.

El uniforme estará compuesto por:

- Camisa.
- Pantalones.
- Traje impermeable para lluvia.
- Zapatos de seguridad.
- Botas de agua.
- Bata de laboratorio (personal de laboratorio).

Se proveerá a todo el personal con los siguientes EPIs:

- Casco
- Protectores oculares.
- Protectores auditivos.
- Guantes de seguridad (goma y cuero).
- Mascarillas para polvo
- Mascarillas para vapores inorgánicos.

Se destinarán \$ 800.000 COP por persona para suplir los gastos de dotación para un total de \$ 18.400.000 COP/año.

### **3.2 CONTRATOS DE SERVICIOS GENERALES**

#### **Traslados a Campo Rubiales**

El operador de campo proveerá el servicio de transporte aéreo del personal de la planta desde Bogotá D.C. a Campo Rubiales y de Campo Rubiales a Bogotá D.C. con una tarifa estándar de \$200 USD por trayecto.

De acuerdo al cronograma de turno, cada trabajador hará dos trayectos en 21 días por lo que se puede asumir que un trabajador hará 18 vuelos anuales desde y hacia Campo Rubiales. Siendo así, el costo del transporte del personal será \$165.600 USD.

### **Transporte Interno**

Se contratará una compañía de transporte terrestre, la cual se encargará de proveer una camioneta tipo Pickup y una minivan para transportar el personal con sus respectivos conductores. Contratar el servicio de transporte tiene la ventaja de que no hay que preocuparse por el mantenimiento de los vehículos, en un sitio con condiciones difíciles como lo son en este campo, el mantenimiento puede llegar a ser un problema recurrente.

El costo de alquiler de los vehículos se presenta en la siguiente tabla:

**Tabla 5.** Costo alquiler de vehículos

<b>Costo por vehículo en US Dólar</b>		<b>Cantidad</b>	<b>USD/Mes</b>	<b>USD/AÑO</b>
<b>Pickup truck</b>	\$ 3.333,33	1	\$ 3.333,33	\$ 40.000,00
<b>Minivan</b>	\$ 6.000,00	1	\$ 6.000,00	\$ 72.000,00
<b>TOTAL</b>				<b>\$ 112.000,00</b>

### **Contenedores para dormitorios**

Se alquilará el servicio de dormitorio en contenedores de 40 pies, cada uno con dos habitaciones donde se acomodaran 2 personas por habitación, esto con el fin de que los trabajadores tengan un espacio más cómodo para descansar en sus

horas no laborales. La siguiente tabla presenta los costos del alquiler de los dormitorios.

**Tabla 6.** Alquiler de contenedores para dormitorios

<b>Contenedor para 4 personas</b>		<b>Cantidad</b>	<b>USD/Mes</b>	<b>USD/Año</b>
<b>Alquiler contenedor</b>	\$ 400,00	6	\$ 2.400,00	\$ 28.800,00

### **Programa de Mantenimiento y Mantenimiento especializado**

Se entiende por PROGRAMA DE MANTENIMIENTO al conjunto de trabajos de reparación y revisión planificados necesarios en aras de asegurar la buena marcha y la buena conservación de los equipos de proceso, servicios e instrumentación de la planta.

Sus objetivos fundamentales por tanto serán asegurar la competitividad y el buen funcionamiento dentro de parámetros óptimos de la planta por medio de:

- Mantenimiento predictivo
- Mantenimiento preventivo
- Mantenimiento correctivo

Es por esto que se va a contratar un proveedor de software, el cual va a ser la herramienta principal para llevar el mantenimiento en la planta. Adicional a esto se va a asignar un presupuesto para la realización de mantenimientos especializados, como por ejemplo el mantenimiento a las bombas sumergibles de foso de entrada, ya que éstas bombas vienen totalmente selladas de fábrica y pierden su garantía si se violan los sellos.

La siguiente tabla presenta los costos de los respectivos contratos:

**Tabla 7.** Costo contratos de mantenimiento

	<b>USD/Año</b>
<b>Software</b>	\$ 20.000,00
<b>Mantenimiento especializado</b>	\$ 250.000,00
<b>TOTAL</b>	\$ 270.000,00

### **Contratos de Comunicaciones**

Para mantener actualizada a la casa matriz de lo que sucede en durante la operación en tiempo real, se hace necesario mantener en línea, vía internet los datos generados por la planta. Es por esto que se debe contratar un proveedor de internet vía satélite con un ancho de banda que permita no solo conectar los equipos propios de la planta, sí no que permita que todos los trabajadores puedan acceder a internet al mismo tiempo sin importar que estén descargando información de multimedia.

También debe existir una comunicación constante entre el personal que se encuentre en campo, ya sea que estén de turno o no, para el caso de personal de manteniendo y el jefe de planta. Por lo anterior se debe contratar un proveedor del servicio de radio teléfonos, ya que por normas del sector, otro tipo de comunicación no está permitido en las facilidades de producción. La siguiente tabla presenta los costos de estos servicios.

**Tabla 8.** Costos de comunicación.

<b>Servicio</b>	<b>Cantidad</b>	<b>COP/mes</b>	<b>Total COP/mes</b>	<b>Total COP/año</b>
<b>Internet</b>	1	\$ 1.200.000,00	\$ 1.200.000,00	\$ 14.400.000,00
<b>Radio teléfono</b>	7	\$ 500.000,00	\$ 3.500.000,00	\$ 42.000.000,00
			<b>TOTAL</b>	<b>\$ 56.400.000,00</b>

### 3.3 CONSUMIBLES

Dentro de los consumibles más importantes y de más peso que tendrá esta planta, se encuentran los cartuchos de filtración y las membranas.

#### Filtros de Cartuchos

Como se mencionó anteriormente, la planta se diseñó con un sistema de filtración de seguridad por cartuchos convencionales y un sistema de filtración por cartuchos oleófilos, que consta de siete (7) filtros en paralelo seguidos por otros siete (7) también en paralelo, equipados cada uno de ellos con 250 cartuchos. El principal proveedor de este tipo de filtros es General Electric. La siguiente tabla presenta los costos de los filtros de cartucho:

**Tabla 9.** Costo filtro de cartuchos

<b>Tipo de cartucho</b>	<b>Filtros de cartuchos</b>	<b>USD/unidad</b>	<b>USD/AÑO</b>
<b>Cartuchos convencionales</b>	1750	\$ 23,33	\$ 1.960.000,00
<b>Cartuchos Oleófilos</b>	1750	\$ 40,00	\$ 3.360.000,00
<b>TOTAL</b>			\$ 5.320.000,00

#### Membranas

La planta se diseñó con seis (6) líneas configuradas en 3 etapas, equipadas con 72 tubos de presión de 8 elementos por línea en 1ª etapa, 42 tubos de presión de 8 elementos por línea en 2ª etapa y 20 tubos de presión de 8 elementos por línea en 3ª etapa. De acuerdo al diseño de la planta se ha previsto realizar un cambio anual, serán necesarias 5712 membranas, el proveedor y el tipo de membranas

escogido para el diseño de la planta son las cpa5-ld del fabricante Hydranautics. La siguiente tabla presenta los costos de las membranas:

**Tabla 10.** Costo de las membranas

<b>Membranas</b>	<b>Cantidad</b>	<b>USD/Unidad</b>	<b>USD/AÑO</b>
<b>Membranas Hydranautics</b>	5712	\$ 500,00	\$ 2.856.000,00

## 4. COSTOS VARIABLES

Los costos variables son aquellos que tienen relación directa con la producción de agua, el contrato establece que la producción de la planta debe ser de 500.000 bpd, pero también crea la posibilidad de que el operador pueda exigir aumentar en un 10% la producción si el contratista tiene la capacidad. Los costos variables incluyen lo siguiente:

- Consumo de energía
- Productos químicos
- Repuestos y material fungible

### 4.1 CONSUMO DE ENERGÍA

Se analizó el consumo de energía de los equipos principales de la planta, las bombas sumergibles, las bombas a filtros de arena, las bombas de alta y baja presión de los bastidores de ósmosis inversa y las bombas de limpieza de químicos. Se estableció un promedio de consumo energético por producción de un barril de agua igual a 0,19104 KW-h/b.

El contrato establece un costo de \$ 260 COP/KW-h lo que permite completar la siguiente tabla:

**Tabla 11.** Costo consumo de energía

<b>COP/KW-h</b>	<b>bpd</b>	<b>KW-h/barril</b>	<b>Total</b>
\$ 260,00	500.000	0,19104	\$ 24.835.200,00
		<b>Total Año</b>	<b>\$ 9.064.848.000,00</b>

## 4.2 PRODUCTOS QUÍMICOS

Existen dos tipos de productos químicos, los que se utilizan para la operación de la planta o productos químicos de proceso y los que se utilizan para el mantenimiento, en este caso la limpieza de las membranas, llamados de limpieza. La siguiente tabla presenta el costo de los productos químicos de proceso:

**Tabla 12.** Productos químicos de proceso

	<b>Producto puro [mg/l]</b>	<b>Calidad comercial [kg/año]</b>	<b>USD/Año</b>
<b>Hipoclorito sódico</b>	3	243.701,01	\$ 121.850,51
<b>Ácido Clorhídrico</b>	5	406.168,35	\$ 947.726,15
<b>Cloruro Férrico</b>	5	203.084,18	\$ 101.542,09
<b>Bisulfito sódico</b>	1,5	48.740,20	\$ 48.740,20
<b>Dispersante</b>	2	64.986,94	\$ 368.259,30
<b>Soda Caustica</b>	1	36.103,85	\$ 30.086,54
<b>TOTAL</b>			<b>\$ 1.618.204,79</b>

El fabricante de las membranas recomienda las siguientes dosificaciones y productos para la limpieza de las membranas, ya que está previsto que el ensuciamiento de las membranas sea por materia orgánica:

**Tabla 13.** Limpieza de membranas con ensuciamiento por materia orgánica

<b>Tipo de ensuciamiento</b>	<b>Tipo de limpieza</b>
Ensuciamiento por materia Orgánica	Soda caustica al 0,1%, pH 12, 40 C Seguido por ácido clorhídrico al 0,2%, pH 2, 40 C

Con la anterior información y de acuerdo a la frecuencia de lavados de las membranas se puede construir la siguiente tabla:

**Tabla 14.** Costo de los productos químicos para limpieza.

	<b>Cantidad por limpieza [kg]</b>	<b>Cantidad comercial[kg/yr]</b>	<b>USD/año</b>
<b>Ácido clorhídrico</b>	564,28	27.100,29	\$ 63.234,00
<b>Soda caustica</b>	282,14	6.022,29	\$ 5.018,57
		<b>TOTAL</b>	<b>\$ 68.252,57</b>

### **4.3 REPUESTOS Y MATERIAL FUNGIBLE**

Se ha previsto proveer al almacén de un número suficiente de piezas de repuesto para mantener un stock de material fungible según la facilidad con la que se encuentran estas piezas en el mercado.

Se establecerá una dotación de Repuestos que asegure la operatividad del servicio en todas las instalaciones. Haciendo especial énfasis en aquellos equipos Críticos.

La planificación definitiva del almacén de repuestos se elaborará durante los tres primeros meses de la operación, conocida la presencia y disponibilidad de proveedores locales y/o regionales y el estado cada uno de los equipos.

Debido a lo anterior, se va a tener un presupuesto de \$ 150.000 USD/año, esperando al periodo de commissioning, puesta en marcha y estabilización de la plan para empezar la compra de stock y conocer el real presupuesto del mismo.

## 5. ANALISIS ECONÓMICO

Los costos de operación y mantenimiento de una planta de osmosis inversa pueden cambiar por dos razones principales, la primera es por la cantidad de agua a tratar y la segunda es por la calidad de agua a tratar.

Las plantas normalmente se diseñan para un caudal promedio, con un rango de más o menos del 10% o 15% para suplir la demanda de agua, en este caso la demanda de tratamiento del agua por parte del operador. Pero el aumento o disminución de la producción no resulta en un cambio significativo en el costo de producción de un barril de agua, comparado como lo puede hacer la calidad de la misma.

Por tratarse de agua de producción, el cambio de membranas, que normalmente se hace en promedio cada 5 años, se ha estimado para cambios anuales.

El agua de producción tiene una alta cantidad de sílice, que en porcentajes de recuperación tan altos como el actual, puede causar el daño irreversible de las membranas en un tiempo corto. Otro factor que puede dañar las membranas es la cantidad de grasas y aceites, este parámetro tiene el mismo efecto de la sílice en las membranas.

Por lo anterior, si los parámetros del agua de entrada cambian un poco por encima de los parámetros de diseño, pueden hacer que el cambio de las membranas se tenga que hacer dos veces al año, haciendo que el costo de operación y mantenimiento aumente.

Si bien, las membranas se ven afectadas, al cambiar los parámetros del agua también se ven afectados los filtros de cartucho. Suponiendo que aumenten las

grases y aceites en el agua al mismo tiempo que la sílice, los filtros de cartuchos oleófilos tendrán que cambiarse en la mitad del tiempo para proteger las membranas solo por este factor.

Dado que en las pruebas piloto se observó cambios repentinos en los parámetros del agua que afectaban drásticamente el proceso, se analizará el costo de producción de un barril de agua en un escenario óptimo, donde los parámetros del agua son los mismos que los parámetros de diseño y un segundo escenario donde el agua está fuera de especificaciones y se debe acortar el tiempo del cambio de las membranas y los filtros de cartucho oleófilos a la mitad.

## **5.1 ESCENARIO OPTIMO**

Escenario cuando los parámetros del agua son iguales a los parámetros de diseño de la planta.

Los datos generados en los capítulos anteriores, son la base para analizar cuanto es el costo de producir agua para uso agrícola, a partir de agua de producción o vertimiento, que cumpla con los parámetros exigidos por ley.

Los costes de operación y mantenimiento se van a trabajar en dólares de Estados Unidos ya que la tarifa que se va a pactar con el operador del campo está en dólares de Estados Unidos. La tasa de cambio es de \$3000 COP por USD.

La siguiente tabla presenta un resumen de los costos de O&M en el primer escenario.

**Tabla 15. Costo de O&M escenario optimo**

<b>COSTOS FIJOS</b>	<b>AÑO 1</b>
Costo del personal	\$ 452.574,72
Dotación	\$ 6.133,33
Traslados aéreos	\$ 165.600,00
Transporte interno	\$ 112.000,00
Dormitorios	\$ 28.800,00
Mantenimiento especializado	\$ 270.000,00
Comunicaciones	\$ 18.800,00
Filtros de cartucho	\$ 5.320.000,00
Membranas	\$ 2.856.000,00
<b>COSTOS VARIABLES</b>	
Energía	\$ 3.625.939,20
Productos químicos	\$ 1.618.204,79
Productos de limpieza	\$ 68.252,57
Repuestos	\$ 150.000,00
Imprevistos 15%	\$ 2.203.845,69
<b>COSTO DE O&amp;M</b>	<b>\$ 16.896.150,31</b>

Como se ve en la tabla anterior, el costo anual de operación y mantenimiento de una planta para el tratamiento de aguas de producción por medio de la tecnología de osmosis inversa, es de \$ 16.896.150 USD.

Ahora para calcular el costo de producir un barril se tiene que dividir el costo de la operación y mantenimiento por el número de barriles producidos en el año. La base utilizada fue de 500.000 BPD, por consiguiente, el costo de producir un barril de aguas es:

**Tabla 16. Costo de producción barril de agua escenario óptimo.**

COSTO DE O&M	\$ 16.896.150,31
COSTO DE PRODUCIR UN BARRIL	\$ 0,09

La tabla anterior es un estimado de lo que puede costar producir un barril de agua en las condiciones específicas para el proyecto en campo Rubiales. Ya que las corrientes efluentes, todas son recibidas por el operador del campo. Los costos de

los contratos de transporte, comunicaciones y energía están hechos basándose en contratos reales que rigen para la zona.

## 5.2 ESCENARIO CON AGUA FUERA DE ESPECIFICACIONES

Escenario cuando el agua que alimenta la planta está fuera de especificaciones.

Se actualizaron los costos de cambio de membranas, filtros de cartucho y productos químicos de limpieza. El último costo mencionado presenta una variación debido al aumento de la frecuencia con la que se deben limpiar las membranas cuando el agua está fuera de especificaciones. La nueva tabla de costos es la siguiente:

**Tabla 17. Costo de O&M escenario con agua fuera de especificaciones.**

<b>COSTOS FIJOS</b>		<b>AÑO 1</b>
Costo del personal	\$	452.574,72
Dotación	\$	6.133,33
Traslados aéreos	\$	165.600,00
Transporte interno	\$	112.000,00
Dormitorios	\$	28.800,00
Mantenimiento especializado	\$	270.000,00
Comunicaciones	\$	18.800,00
Filtros de cartucho	\$	8.680.000,00
Membranas	\$	5.712.000,00
<b>COSTOS VARIABLES</b>		
Energía	\$	3.625.939,20
Productos químicos	\$	1.618.204,79
Productos de limpieza	\$	213.408,77
Repuestos	\$	150.000,00
Imprevistos 15%	\$	3.158.019,12
<b>COSTO DE O&amp;M</b>	\$	<b>24.211.479,94</b>

Como se ve en la tabla anterior, el costo anual de operación y mantenimiento de una planta para el tratamiento de aguas de producción por medio de la tecnología

de osmosis inversa con agua fuera de especificaciones aumenta a \$24.211.479 USD.

Ahora el costo de producir un barril de agua con esta condición es:

**Tabla 18. Costo de producción barril de agua escenario con agua fuera de especificaciones**

COSTO DE O&M	\$	24.211.479,94
COSTO DE PRODUCIR UN BARRIL	\$	0,13

## 6. CONCLUSIONES

- El estudio permitió cumplir con el objetivo principal de conocer cuál es el costo neto de tratar un barril de agua, \$ 0,09 USD/barril en condiciones normales de operación.
- En la operación y mantenimiento de este proceso, debe tenerse en cuenta la calidad del agua que se va a tratar, una variación en los parámetros del agua de entra va a generar sobre costos de O&M, para el caso puntual planteado el costo neto del barril puede llegar a \$ 0.13 USD/barril.
- Durante el primer año de operación de esta planta, por tratarse de una tecnología emergente para esta aplicación, se va a presentar una mayor cantidad de problemas que hará necesaria una nueva evaluación administrativa y financiera con el fin de actualizar los costos de O&M.
- En relación a la conclusión anterior, debido a la complejidad de la operación, el estudio permitió establecer la necesidad de más personal de mantenimiento y de logística que no se contemplaron en el manual preliminar de O&M de la planta.
- La operación y el mantenimiento de esta planta que está previsto por 10 años tiene un componente social y ambiental importante, ya que genera empleos para la comunidad en el reusó agrícola del agua que antes representaba un problema.

## 7. RECOMENDACIONES

- Se recomienda proyectar la instalación de más unidades de pulimiento en el pretratamiento en un futuro muy cercano, ya que la calidad del agua de producción está cambiando rápidamente. Lo que implica hacer un nuevo análisis con capex y opex.
- Para realizar un proyecto de este tipo en otros campos es necesario hacer primero un análisis del costo/beneficio de la construcción, operación y mantenimiento no solo de la planta de tratamiento del agua, también tiene que analizarse la rentabilidad de los cultivos aguas abajo.
- Es normal manejar una cantidad de agua tan grande en la cuenca de los llanos, por ser un acuífero activo. Con el aumento de la relación de agua aceite, se recomienda hacer una ampliación o construcción de una planta adicional; esto permitirá hacer disminuir los costos de O&M.

## BIBLIOGRAFIA

ANH, Cuenca llanos orientales. Estudio integrado-Crudos pesados URL: <http://www.anh.gov.co/Informacion-Geologica-y-Geofisica/Estudios-Integrados-y-Modelamientos/Presentaciones%20y%20Poster%20Tcnicos/Campos.pdf#search=campo%20rubiales>, Accedido en 15 de mayo de 2014.

Colorado School of Mines / Advanced Water Technology Center. Produced Water. URL: [http://aqwatec.mines.edu/produced\\_water/intro/pw/](http://aqwatec.mines.edu/produced_water/intro/pw/), Accedido en 15 de mayo de 2014.

KUCERA J. Reverse Osmosis. Design, Processes, and Applications for Engineers. Co-published by John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, New Jersey, and Scrivener Publishing LLC, Salem, Massachusetts. 2010. USA.

LEVY R, HABERMAN A. Oilfield produced water desalination using innovative from pilot to full-scale project in Colombia. En: The International Desalination Association World Congress on Desalination and Water Reuse. 2015.

Ministerio de Medio Ambiente, RESOLUCIÓN 1207 DE 2014 URL: <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=59135>, Accedido 25 Julio 2014.

Pacific Rubiales Energy, An initiative for reusing produced water from the hydrocarbon sector. Enero 2015.

Pacific Rubiales Energy, Contrato No. 8500000007 de ingeniería, compra de materiales, construcción, operación y mantenimiento de una planta de tratamientos con capacidad para tratar 500.000 barriles de agua día. 2012.

SIMMARD J. et al. Innovative Technology to Produce Green Petroleum. En: IDA's conference on Water Recycling and Desalination for the Oil & Gas Industry, Banff 2013.

SUMANGALI R. Water Technology Unlocks Future Oil and Gas Reserves. Lux Research 2010.