

**DISEÑO DE UNA PLANTA MODELO PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA DE  
PRODUCCIÓN MEDIANTE LA COMBINACIÓN DE TECNOLOGÍAS DE  
FLOTACIÓN Y PROCESOS DE OXIDACIÓN AVANZADA**

**BRAYAN STEVEN GONZALEZ VARGAS  
DIEGO FELIPE JAIMES MEZA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANTER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS  
BUCARAMANGA**

**2018**

**DISEÑO DE UNA PLANTA MODELO PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA DE  
PRODUCCIÓN MEDIANTE LA COMBINACIÓN DE TECNOLOGÍAS DE  
FLOTACIÓN Y PROCESOS DE OXIDACIÓN AVANZADA**

**BRAYAN STEVEN GONZALEZ VARGAS**

**DIEGO FELIPE JAIMES MEZA**

**Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero de Petróleos**

**DIRECTOR**

**EDISON ODILIO GARCÍA NAVAS**

**M.Sc. en Ingeniería de Hidrocarburos**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANTER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS  
BUCARAMANGA**

**2018**

## **DEDICATORIA**

*A Dios, por ayudarme en los momentos difíciles y dotarme de fortalezas para afrontar cualquier desafío.*

*A mi padre, Wilson González, por sus sabios consejos y orientación en cualquier situación.*

*A mi madre, Emilsen Vargas, por su infinito amor y dedicación todos los días.*

*A mi hermano Wilson, por ser mi primer amigo y por ayudarme incondicionalmente.*

*A Diego, Daniela, Genn, Paula y Laura, por ser mis amigos en todo momento, por apoyarme y brindarme su cariño a lo largo de estos años.*

*A Nidia, por su compañía, por su cariño y por su paciencia.*

*Finalmente, a todos los profesores de la Universidad Industrial de Santander que aportaron sus conocimientos y experiencias de la mejor manera para mi crecimiento personal.*

**Brayan Steven González Vargas**

## DEDICATORIA

A Dios por permitirme culminar esta etapa en mi vida y lograr este sueño.

A mis Padres, Arturo Jaimes y Rosalba Meza, por todas las enseñanzas a lo largo de mi vida, por formarme día a día para ser una gran persona, por los sacrificios realizados para ayudarme a llegar hasta aquí y por ser el motor en mi vida para salir adelante y cumplir mis metas.

A mis Hermanos, Wilmer y Karenn por estar en todo momento conmigo, por sus consejos en los momentos que los necesitaba y por estar siempre juntos buscando alcanzar cada uno de nuestros sueños.

A mi amor, Leidy Muñoz, por ser mi compañera de vida durante todos estos años, en los momentos difíciles y en los de mayor alegría, por tu comprensión y el amor de que me has brindado en toda esta etapa.

A mis grandes amigos: Brayan, Daniela, Silvia, Sandra y Laura, por estar a cada momento vivido en nuestro estudio, cada materia vista, cada conversación, cada risa y cada momento de disfrute vividos juntos, las clases no hubieran sido lo mismo sin ustedes y, sobre todo, por la paciencia de aguantarme a cada segundo.

A mis demás amigos, imposible mencionar a cada uno de ellos, por los momentos compartidos en cada parte de este recorrido que termina.

A la Universidad Industrial de Santander y a cada uno de los profesores que me acompañaron en esta formación, por sus experiencias compartidas, sus conocimientos transmitidos para lograr formarme como un profesional íntegro y ético.

**Diego Felipe Jaimes Meza**

## **AGRADECIMIENTOS**

Queremos mostrar nuestro agradecimiento a:

A Dios por permitirnos culminar nuestros estudios superiores de la mejor manera y dar cumplimiento a un sueño más en nuestras vidas.

A nuestra alma máter, la Universidad Industrial de Santander, por la formación brindada a lo largo de todos estos años de aprendizaje.

Al M.Sc. Edison Odilio García Navas, director de este proyecto por su disponibilidad, colaboración y una constante guía a lo largo del desarrollo de este trabajo, aportándonos su experiencia y conocimientos siempre con la mejor actitud.

A nuestras familias, quienes han estado con nosotros en todo momento y que a pesar de las dificultades siempre nos han brindado todo su apoyo.

A todos y cada uno de nuestros amigos y compañeros, quienes de una u otra forma aportaron a nuestro crecimiento personal y profesional.

Brayan Steven González Vargas

Diego Felipe Jaimes Meza

## TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN .....	17
1. AGUA DE PRODUCCIÓN .....	18
1.1. Generalidades del agua asociada a la producción .....	18
1.2. Características fisicoquímicas del agua .....	18
1.2.1. Aceite disperso .....	19
1.2.2. Compuestos orgánicos disueltos .....	19
1.2.3. Metales pesados .....	20
1.2.4. Minerales disueltos .....	21
1.2.5. Químicos de producción .....	21
1.2.6. Sólidos de producción .....	22
1.2.7. pH .....	23
1.2.8. Materiales radioactivos (NORM) .....	23
1.2.9. Gases disueltos .....	23
1.2.10. Oxígeno disuelto (OD) .....	24
1.2.11. Demanda bioquímica de oxígeno (DBO) .....	24
1.2.12. Demanda química de oxígeno (DQO) .....	25
2. NORMATIVIDAD TÉCNICA LEGAL Y AMBIENTAL .....	26
2.1. Vertimiento .....	26
2.2. Reinyección .....	30
3. TECNOLOGÍAS PARA EL TRATAMIENTO DEL AGUA PRODUCIDA .....	33
3.1. Tratamiento primario .....	33
3.1.1. Tanques de sedimentación .....	33
3.1.2. Tanques desnatadores .....	34
3.1.3. Separador API .....	35
3.1.4. Separadores de placas coalescedoras .....	35
3.1.4.1. Separador de placas paralelas (PPI) .....	35
3.1.4.2. Separador de placas corrugadas (CPI) .....	35
3.1.4.2. Separador de flujo transversal (CFD) .....	37
3.2. Tratamiento secundario .....	37

3.2.1. Hidrociclones .....	38
3.2.2. Centrífugas .....	39
3.2.3. Cyclotech .....	40
3.2.4. Steam Stripping .....	41
3.2.5. Técnicas de flotación convencionales.....	41
3.2.5.1. Flotación por gas inducido (IGF).....	41
3.2.5.2. Flotación por gas disuelto (DAF) .....	42
3.2.5.3. Flotación por aire disuelto (IAF) .....	42
3.3. Nuevas tecnologías de flotación.....	43
3.3.1 Flotación de partículas absorbentes .....	43
3.3.2. Flotación de agregados coloidales .....	43
3.3.3. Bubble chamber (BC) .....	43
3.3.4. Flotación JET .....	44
3.3.5. Separador centrífugo .....	44
3.3.6. Celda multiburbujas .....	45
3.3.7. Celda de microburbujas .....	45
3.3.7.1 Celda de microburbujas por aire .....	45
3.3.7.2 Celda de microburbujas por nitrógeno .....	46
3.4. Tratamiento terciario .....	47
3.4.1. Tecnologías de filtración .....	47
3.4.2. Evaporación rápida por aspersion .....	52
3.4.3. Humedal artificial .....	53
3.4.4. Procesos de oxidación avanzada .....	53
3.4.4.1. Ventajas de los AOP .....	56
3.4.4.2. Clasificación de los AOP .....	57
✓ Ozonización (O <sub>3</sub> ) .....	58
✓ O <sub>3</sub> /H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> .....	59
✓ UV .....	60
✓ UV/H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> .....	62
✓ UV/H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /Fe <sup>+2</sup> (Proceso foto-fenton) .....	63
✓ UV/O <sub>3</sub> .....	63

✓ Cavitación hidrodinámica con AOP's.....	64
3.5. Tabla resumen de tecnologías de tratamiento .....	66
4. PLANTA MODELO PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA COMBINANDO TECNOLOGÍAS DE FLOTACIÓN Y PROCESOS DE OXIDACIÓN .....	70
4.1. Aguas de producción estudiadas .....	73
4.2. Comparativa entre los parámetros del agua de la resolución 0631 de 2015 contra los parámetros del agua de producción de los campos estudiados. ....	77
4.3. Metodología de selección.....	81
4.4. Propuestas para planta de tratamiento de UIS I.....	86
4.4.1. Selección de equipos a partir del diagrama de flujo .....	87
4.5. Propuestas para planta de tratamiento de Campo Escuela Colorado.....	98
5. CONCLUSIONES .....	100
6. RECOMENDACIONES.....	103
BIBLIOGRAFÍA.....	105
ANEXOS.....	110

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Vista interna de un separador CPI .....	36
Figura 2. Separador de flujo transversal .....	37
Figura 3. Hidrociclón .....	39
Figura 4. Centrifuga .....	40
Figura 5. Lámpara UV.....	61
Figura 6. Diagrama de flujo (Parte I).....	83
Figura 7. Diagrama de flujo (Parte II).....	84
Figura 8. Diagrama de flujo (Parte III).....	85
Figura 9. Condicional para G&A .....	90
Figura 10. Condicional para SST y SSED .....	91
Figura 11. Condicional para DQO.....	93
Figura 12. Condicionales para DBO, fenoles, HTP, nitrógeno y cianuro .....	94
Figura 13. Condicional para cloruros .....	95
Figura 14. Condicionales para sulfatos, sulfuros, metales y metaloides.....	96
Figura 15. Finalización del diagrama de flujo.....	97

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros fisicoquímicos a monitorear y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales no domésticas – ARnD a cuerpos de aguas superficiales de actividades asociadas con hidrocarburos.....	27
Tabla 2. Referencia NACE de calidad de agua para Inyección a pozos.....	31
Tabla 3. Eficiencias AOPs con cavitación hidrodinámica.....	65
Tabla 4. Resumen de tecnologías de tratamientos.....	66
Tabla 5. Parámetros fisicoquímicos a monitorear y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales no domésticas – ARnD a cuerpos de aguas superficiales de actividades asociadas con hidrocarburos (Producción).....	70
Tabla 6. Parámetros fisicoquímicos campo UIS 1 .....	73
Tabla 7. Análisis fisicoquímicos del agua de producción de Campo Escuela Colorado, 2013 .....	75
Tabla 8. Comparativa entre la Resolución 0631 de 2015 y UIS 1.....	77
Tabla 9. Comparativa entre la Resolución 0631 de 2015 y Colorado.....	79
Tabla 10. Parámetros que exceden los valores de la resolución 0631 de 2015 para campo UIS 1 .....	86
Tabla 11. Datos de Campo UIS 1 .....	87
Tabla 12. Resultados de la planta de tratamiento para Campo UIS 1 .....	98
Tabla 13. Resultados de la planta de tratamiento para Campo Escuela Colorado	99

## LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Tablas del diagrama de flujo .....	110
Anexo B. Formato de datos de campo .....	113

## RESUMEN

**TITULO: DISEÑO DE UNA PLANTA MODELO PARA EL TRATAMIENTO DEL AGUA DE PRODUCCIÓN MEDIANTE LA COMBINACIÓN DE TECNOLOGÍAS DE FLOTACIÓN Y PROCESOS DE OXIDACIÓN AVANZADA \***

**AUTOR: BRAYAN STEVEN GONZÁLEZ VARGAS  
DIEGO FELIPE JAIMES MEZA \*\***

**PALABRAS CLAVES:** Agua de producción, parámetros fisicoquímicos, tratamiento, vertimiento, reinyección, flotación, oxidación avanzada, normatividad, planta modelo.

### **DESCRIPCIÓN:**

El agua asociada a la producción de hidrocarburos ha venido tomando cada vez más importancia en el mundo, en Colombia este problema es muy notorio debido a las condiciones geológicas en las que se encuentra depositado el crudo, con campos en donde los cortes de agua superan el 90% en volumen de fluido producido. Esta agua requiere de un tratamiento que depende del destino final que se le vaya a dar, ya sea reinyección o vertimiento. El objetivo de este trabajo fue diseñar una planta modelo para el tratamiento del agua de producción mediante la combinación de tecnologías de flotación y procesos de oxidación avanzada, considerando los parámetros fisicoquímicos de acuerdo con la normatividad técnica, legal y ambiental vigente en relación con el vertimiento de aguas y el uso de ésta para reinyección.

En primer lugar, se realizó una revisión de la normatividad vigente en materia de vertimientos de agua para la industria petrolera y los requerimientos para su uso en reinyección. Posteriormente, se realizó una revisión sistemática de los métodos utilizados para el tratamiento de agua asociada a la producción de hidrocarburos, enfatizando en las nuevas tecnologías de flotación y oxidación avanzada con el fin de proponer una planta de tratamiento modelo, para lo cual, se tomaron los datos fisicoquímicos del agua de producción de dos campos colombianos y con base en éstos, se realizó un diagrama de flujo en el cual se consideraron los valores máximos permisibles dados por la normatividad ambiental, y en él, se realizó la selección de los diferentes equipos y tratamientos disponibles de acuerdo a la eficiencia de remoción de la carga contaminante, logrando así, una alternativa para cada uno de los casos de estudio a fin de dar cumplimiento a los requisitos legales, técnicos y ambientales vigentes.

---

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad de Ingeniería Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director: Edison Odilio García Navas, M.Sc. en Ingeniería de Hidrocarburos.

## ABSTRACT

**TITLE: DESIGN OF A MODEL PLANT FOR THE TREATMENT OF PRODUCTION WATER THROUGH THE COMBINATION OF FLOATING TECHNOLOGIES AND ADVANCED OXIDATION PROCESSES\***

**AUTHOR: BRAYAN STEVEN GONZÁLEZ VARGAS  
DIEGO FELIPE JAIMES MEZA \*\***

**KEYWORDS:** Production water, physicochemical parameters, treatment, dumping, reinjection, flotation, advanced oxidation, regulations, model plant.

### **DESCRIPTION:**

The water associated with the production of hydrocarbons has been taking more and more importance in the world, in Colombia this problem is very noticeable due to the geological conditions in which the oil is deposited, with fields where the water cuts exceed the 90% in volume of fluid produced. This water requires a treatment that depends on the final destination that is going to be given, either reinjection or dumping. The objective of this work was to design a model plant for the treatment of production water through the combination of flotation technologies and advanced oxidation processes, considering the physicochemical parameters in accordance with current technical, legal and environmental regulations in relation to dumping of water and the use of it for reinjection.

In first place, a revision of the current regulations was carried out regarding the dumping of water for the oil industry and the requirements for its use in reinjection. Subsequently, a systematic review of the methods used for water treatment associated with the production of hydrocarbons was carried out, emphasizing on the new technologies of flotation and advanced oxidation in order to propose a model treatment plant, for which, the physicochemical data of the production water of two Colombian fields was taken and based on these, a flowchart was made in which the maximum permissible values given by the environmental regulations were considered, and in it, the selection of the different equipment and available treatments was made according to the removal efficiency of the contaminant load, thus achieving an alternative for each of the study cases in order to comply with current legal, technical and environmental requirements.

---

\* Bachelor Thesis

\*\* Faculty of Physicochemical Engineering. School of Petroleum Engineering. Director: Edison Odilio García Navas, M.Sc. in Hydrocarbon Engineering.

## INTRODUCCIÓN

En el mundo, el tratamiento del agua asociada a la producción de hidrocarburos ha cobrado una mayor importancia debido a los altos volúmenes de esta. A nivel nacional, este problema tiene un mayor impacto debido a las condiciones geológicas en las que se encuentra almacenado el hidrocarburo, dando lugar a una relación agua-petróleo de 12,5 barriles de agua por barril de crudo producido según la Agencia Nacional de Hidrocarburos y Ecopetrol. Sumado a esto, debido a que Colombia cuenta con un invaluable número de fuentes hídricas, se hace necesario el uso de tratamientos para el agua de producción que generen una mayor reducción en la carga contaminante de esta, para evitar de esta manera grandes impactos a nivel ambiental y social.

El objetivo de este trabajo es realizar el diseño de una planta de tratamiento modelo para el tratamiento de agua de producción enfatizada en nuevas tecnologías de flotación y procesos de oxidación avanzada que cumpla con la normatividad técnica, legal y ambiental vigente en relación al vertimiento o el uso del agua para su reinyección para dos campos de producción colombianos.

## 1. AGUA DE PRODUCCIÓN

### 1.1. Generalidades del agua asociada a la producción

El agua asociada a la producción se define como aquella proveniente de las formaciones geológicas que es llevada hasta superficie durante el proceso de extracción de petróleo y gas natural debido a que se encuentra en la misma formación que el hidrocarburo, un acuífero activo (agua intrusiva) o un proyecto de inyección de agua (agua inyectada)<sup>1,2</sup>. Esta agua es el más grande flujo de residuos generados en la industria del petróleo y gas, formada por una mezcla de compuestos orgánicos e inorgánicos<sup>3</sup>.

Las aguas residuales, generadas en la producción, transporte y refinación, contienen contaminantes disueltos y suspendidos como aceite residual y materiales sólidos, los cuales deben ser separados para que el agua vertida cumpla estrictamente con las regulaciones ambientales gubernamentales<sup>4</sup>.

### 1.2. Características fisicoquímicas del agua

El agua producida está constituida principalmente por sustancias orgánicas e inorgánicas tales como sales, bacterias, ácidos orgánicos, metales pesados, aditivos químicos e hidrocarburos solubles e insolubles.<sup>5</sup> Las propiedades que

---

<sup>1</sup> MANCILLA, Robinson. y MESA, Henry., Metodología para el manejo de aguas de producción en un campo petrolero. Bucaramanga. Tesis de grado (Ingeniería de Petróleos), Universidad Industrial de Santander. 2012.

<sup>2</sup> CLARK, C., VEIL, J., Produced water volumes and management practices. Groundwater Protection Council, p 119., 2015.

<sup>3</sup> AHMADUN, Fakhru'l-Razi., ALIREZA, Pendashteh, et al., Review of technologies for oil and gas produced water treatment, en Journal of Hazardous Materials, Volume 170, 2009.

<sup>4</sup> FORERO, J, et al., Diseño de un nuevo sistema de flotación para tratamiento de aguas industriales. En Ciencia, Tecnología y Futuro, Vol. 1., Ecopetrol, Instituto Nacional del Petróleo., 1999.

<sup>5</sup> ZHENG, Jisi. CHEN, Bing., et al., Offshore produced water management: A review of current practice and challenges. En Arctic environments. Marine Pollution Bulletin., 2016.

pueda tener el agua estarán en función de la profundidad, edad geológica y geoquímica que tenga la formación donde se encuentre almacenado el hidrocarburo, así como también de la composición del aceite y gas.<sup>6</sup>

A continuación, es presentada una descripción de los principales constituyentes del agua de producción:

### **1.2.1. Aceite disperso**

Se componen de pequeñas gotas de aceite en suspensión en el agua de producción. Los factores que afectan principalmente el agua de producción son la densidad del aceite, la tensión entre las fases aceite - agua, el tipo el tratamiento químico y su eficiencia, así como el tipo, tamaño, y la eficiencia del equipo de separación física utilizado.<sup>7</sup>

### **1.2.2. Compuestos orgánicos disueltos**

Los principales compuestos orgánicos disueltos son el BTEX (Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xileno), hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) y fenoles, estos compuestos aromáticos son de vital importancia debido a que contribuyen en gran medida a la toxicidad de ambientes naturales.<sup>8</sup> La cantidad de compuestos orgánicos dentro del agua de producción estará en función de factores tales como la composición del crudo, la salinidad, los sólidos totales disueltos (TDS), el pH, la temperatura el tipo y cantidad de compuestos químicos estabilizadores de

---

<sup>6</sup> LEE, K., NEFF, J., et al., Produced Water: Overview of Composition, Fates, and Effects. Produced Water Environmental Risks and Advances in Mitigation Technologies SE – 1. Springer, New York, pp. 3-57., 2011.

<sup>7</sup> ADEBAMBO, O. Evaluation of the beneficial reuse of produced water: a review of relevant guidelines and produced water toxicity. (Master of Environmental Management) Duke University, 2011.

<sup>8</sup> Ibid.

emulsiones y la relación aceite/agua.<sup>9</sup> Además, dicha cantidad de aceite dependerá también del volumen de producción, el sistema de levantamiento artificial usado y la etapa de producción en la que se encuentre.<sup>10</sup>

### 1.2.3. Metales pesados

Altas concentraciones de metales pesados incluidos Bario (Ba), Berilio (Be), Cadmio (Cd), Cromo (Cr), Cobre (Cu), Hierro (Fe), Plomo (Pb), Níquel (Ni), Plata (Ag) y Zinc (Zn) se encuentran en el agua producida<sup>11</sup>. Estos pueden variar en concentración dependiendo de la edad y la geología de las formaciones de las cuales se está produciendo el aceite o gas<sup>12</sup>.

La concentración de metales pesados en el agua producida es generalmente más alta que la del agua utilizada en recobro mejorado y el agua de mar<sup>13</sup>. Además de la toxicidad asociada a cada uno de estos elementos, los metales pueden causar problemas de producción. Por ejemplo, el hierro en el agua producida puede reaccionar con el oxígeno del aire y producir sólidos, que pueden interferir con algunos equipos en los sistemas de tratamiento, tales como los hidrociclones, además pueden taponar las formaciones durante la inyección o causar pigmentaciones o depósitos en los sitios de descarga en superficie<sup>14</sup>.

---

<sup>9</sup> IGUNNU, Ebenezer., CHEN, George., Produced water treatment technologies. International Journal of Low-Carbon Technologies, Volume 9, pag 157–177., 2012.

<sup>10</sup> AHMADUN, Fakhru'l-Razi., et al., Op. Cit.

<sup>11</sup> JOHNSON, Greg., CULKIN, Brad., A summary of options available for the beneficial use of oilfield produced water using membrane treatment. VSEP treatment of produced water for beneficial use., 2016.

<sup>12</sup> GARCIA, Juan. y HERRERA, Sergio. Tratamiento del agua de producción para los proyectos de gas en aguas profundas y ultraprofundas del caribe colombiano. Bucaramanga, Trabajo de grado (Ingeniería de Petróleos), Universidad Industrial de Santander. 2017,p 34.

<sup>13</sup> IGUNNU, Ebenezer., CHEN, George., Op. Cit.

<sup>14</sup> Ibid.

#### 1.2.4. Minerales disueltos

Los componentes inorgánicos disueltos o minerales se encuentran usualmente en altas concentraciones, y son clasificados como cationes y aniones, materiales radioactivos que ocurren naturalmente y metales pesados. Sus concentraciones varían dependiendo de la formación geológica, de su edad y el tipo de yacimiento<sup>15</sup>.

Los cationes y aniones afectan la química del agua producida en términos de la conductividad, la salinidad, y el potencial de formación de escamas. El Sodio (Na<sup>+</sup>) y el Cloro (Cl<sup>-</sup>) son responsables de la salinidad, que va desde unos pocos miligramos por litro (mg/L) a 300,000 mg/L. El Cl<sup>-</sup>, los Sulfatos (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>), los Carbonatos (CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>), los Bicarbonatos (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>), Na<sup>+</sup>, el Potasio (K<sup>+</sup>), el Calcio (Ca<sup>2+</sup>), el Bario (Ba<sup>2+</sup>), el Magnesio (Mg<sup>2+</sup>), el hierro (Fe<sup>2+</sup>) y el Estroncio (Sr<sup>2+</sup>) afectan la conductividad y el potencial de formación de escamas<sup>16</sup>.

#### 1.2.5. Químicos de producción

Los productos químicos utilizados para el tratamiento del agua con fines de conducción y recuperación de crudo, incluyen a los biocidas, rompedores inversos de emulsión, secuestrantes de oxígeno e inhibidores de corrosión y plantean una de las mayores preocupaciones de toxicidad para los ecosistemas acuáticos. Los efectos asociados a los productos químicos utilizados, van a depender enteramente del tipo de químico en particular y de la cantidad utilizada.<sup>17</sup> Además, durante el proceso de producción de petróleo se utilizan algunos compuestos químicos adicionales ya sea para recobro mejorado o para mitigar problemas operacionales<sup>18</sup>.

---

<sup>15</sup> AHMADUN, Fakhru'l-Razi., et al., Op. Cit.

<sup>16</sup> IGUNNU, Ebenezer., CHEN, George., Op. Cit.

<sup>17</sup> ADEBAMBO, O., Op. Cit.

<sup>18</sup> IGUNNU, Ebenezer., CHEN, George., Op. Cit.

Algunas de estas sustancias químicas llegan a ser letales a niveles tan bajos como 0.1 mg/L a pesar de sufrir reacciones que reducen sus efectos tóxicos antes de ser descargadas o inyectadas. Un ejemplo de lo anterior son los biocidas, los cuales al reaccionar químicamente tienden a perder su nivel de toxicidad<sup>19</sup>.

### **1.2.6. Sólidos de producción**

Los sólidos de producción son una amplia gama de materiales que incluyen arcillas, sólidos precipitados, bacterias, carbonatos, arenas y limos, productos de corrosión y escamas, sólidos de la formación, ceras y asfáltenos<sup>20</sup>.

Los sólidos pueden influir en los efectos causados por el agua producida, por ejemplo, los sólidos de grano fino pueden reducir la eficiencia de remoción en los separadores agua-aceite, lo que lleva a sobrepasar los límites de descarga de grasas y aceites en el agua producida descargada<sup>21</sup>. Las incrustaciones se pueden formar cuando el agua producida se encuentra sobresaturada de iones, lo cual favorece que reaccionen y formen precipitados durante la producción cuando las presiones y temperaturas disminuyen. Estas se forman comúnmente por bicarbonatos, carbonato de calcio, sulfato de calcio, sulfato de bario, sulfato de estroncio y sulfato de hierro. Sus mayores inconvenientes están asociados al taponamiento de las líneas de flujo, la formación de lodos aceitosos, y de emulsiones que son muy difíciles de romper<sup>22</sup>.

---

<sup>19</sup> ADEBAMBO, O., Op. Cit.

<sup>20</sup> AHMADUN, Fakhru'l-Razi., et al., Op. Cit.

<sup>21</sup> CLARK, C., VEIL, J., Op. Cit.

<sup>22</sup> Ibid.

### 1.2.7. pH

La reducción del pH puede perturbar el proceso de separación aceite/agua y puede afectar considerablemente a los cuerpos de agua receptores cuando se realiza su descarga. Así mismo, es importante considerar que muchos de los productos químicos utilizados en la eliminación de incrustaciones son sustancias ácidas, por lo cual pueden contribuir en la reducción del pH en el agua producida<sup>23</sup>.

### 1.2.8. Materiales radioactivos (NORM)

Los NORM (*Naturally Occurring Radioactive Materials*) son originarios de las formaciones geológicas y pueden ser llevados a la superficie junto con el agua producida. Los compuestos NORM más abundantes en el agua producida son el Radio-226 (<sup>226</sup>Ra) y el Radio-228 (<sup>228</sup>Ra), los cuales se derivan de la desintegración radiactiva del uranio y el torio asociados con ciertas rocas y arcillas en los yacimientos de hidrocarburos.<sup>24,25</sup>

### 1.2.9. Gases disueltos

Los principales gases disueltos se forman naturalmente por las actividades de bacterias o por reacciones químicas en el agua. El dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), el oxígeno (O<sub>2</sub>) y el ácido sulfhídrico (H<sub>2</sub>S) son los gases más comunes incluidos en el agua producida<sup>26</sup>.

---

<sup>23</sup> Ibid.

<sup>24</sup> IGUNNU, Ebenezer., CHEN, George., Op. Cit.

<sup>25</sup> CLARK, C., VEIL, J., Op. Cit.

<sup>26</sup> AHMADUN, Fakhru'l-Razi., et al., Op. Cit.

Su procedencia puede ser de origen natural debido a la actividad microbiológica o por las reacciones químicas que suceden en el agua producida<sup>27</sup>.

### **1.2.10. Oxígeno disuelto (OD)**

El oxígeno disuelto en el agua es importante para los peces y la vida acuática. Altos niveles sostienen una mayor diversidad de especies y un ecosistema saludable. En comparación con los animales terrestres que respiran una atmósfera gaseosa compuesta por un 21% de oxígeno, los peces necesitan cerca de una milésima parte del 1% que es solamente 10 ppm (partes por millón) para estar en las mejores condiciones. Se puede evaluar con las normas:

Titulación. ASTM D 888-12<sup>28</sup> y Colorimetría. ASTM D 888-12<sup>29</sup>.

### **1.2.11. Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)**

La demanda bioquímica de oxígeno (DBO) es una prueba usada para la determinación de los requerimientos de oxígeno para la degradación bioquímica de la materia orgánica en las aguas municipales, industriales y en generales residuales; su aplicación permite calcular los efectos de las descargas de los efluentes domésticos e industriales sobre la calidad de las aguas de los cuerpos receptores. Los datos de la prueba de la DBO se utilizan en ingeniería para diseñar las plantas de tratamiento de aguas residuales.

Determinación demanda bioquímica de oxígeno disuelto en el agua.

Norma: SM 5210-B<sup>30</sup>.

---

<sup>27</sup> ADEBAMBO, O., Op. Cit.

<sup>28</sup> ASTM. Standard Test Method for Dissolved Oxygen in Water. American Society of Test Methods.

<sup>29</sup> Ibid., (Colorimetry). ASTM, 2012.

<sup>30</sup> SM. Test for the Chemical Oxygen Demand COD. Standard Methods. 1999.

### 1.2.12. Demanda química de oxígeno (DQO)

Determina la cantidad de oxígeno requerido para oxidar la materia orgánica en una muestra de agua residual, bajo condiciones específicas de agente oxidante, temperatura y tiempo. Las sustancias orgánicas e inorgánicas oxidables presentes en la muestra, se oxidan mediante reflujos en solución fuertemente ácida con un exceso conocido de dicromato de potasio, en presencia de sulfato de plata que actúa como agente catalizador, y de sulfato mercurico adicionado para remover la interferencia de los cloruros después de la digestión. La materia orgánica oxidable se calcula en términos de oxígeno equivalente<sup>31</sup>. Para determinar la demanda química de oxígeno disuelto en el agua, se puede evaluar con la siguiente norma:

Determinación demanda bioquímica de oxígeno disuelto en el agua.

Norma: SM 5220-B<sup>32</sup>.

---

<sup>31</sup> SAWYER, Cleir. et al., Chemistry for Environmental Engineering. McGraw Hill, 5th Edition, 2003.

<sup>32</sup> Standard Methods, Op. Cit.

## 2. NORMATIVIDAD TÉCNICA LEGAL Y AMBIENTAL

Con el propósito de mitigar el impacto ambiental generado en toda la cadena productiva desde la extracción hasta la venta de hidrocarburos en relación al agua asociada a la producción, a nivel nacional se han establecido algunas normas técnicas, legales y ambientales en las cuales se establecen ciertos parámetros a cumplir para sus distintos usos de disposición final. A lo largo de este capítulo, se describe la normatividad asociada para el vertimiento en cuerpos de aguas superficiales y reinyección como métodos de disposición final del agua de producción.

### 2.1. Vertimiento

El Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible de la República de Colombia en su Resolución 0631 del 17 de Marzo de 2015 “Por la cual se establecen los parámetros y valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones” y haciendo uso de sus facultades legales y considerando que según la Constitución Política se establece que el saneamiento ambiental es un servicio público del Estado y además que el Estado tiene como obligación proteger la diversidad e integridad del ambiente, fomentando la educación ambiental, previniendo y controlando factores como el deterioro ambiental, fijó los parámetros y valores máximos permisibles que deberán cumplir quienes realizan vertimientos puntuales a los cuerpos de agua superficiales y a los sistemas de alcantarillado público, en donde además se establecen los parámetros de análisis y reporte por parte de cada una de las actividades industriales, comerciales o de servicios.<sup>33</sup>

---

<sup>33</sup> MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE, Resolución 0631(17 de marzo de 2015). Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones. 2015. p. 1-2

Con referencia a lo anterior, en el Artículo 11 de dicha resolución se establecen los parámetros fisicoquímicos a monitorear en los vertimientos puntuales de aguas residuales no domésticas (ARnD) a cuerpos de aguas superficiales y actividades asociadas a la producción y transporte hidrocarburos (Petróleo crudo, gas natural y derivados) los cuales están divididos dependiendo del tipo de actividad económica en la cual se puedan realizar vertimientos, como son:

- Exploración (Upstream)
- Producción (Upstream)
- Refino
- Venta y distribución (Downstream)
- Transporte y Almacenamiento (Midstream)

A continuación, se muestra una tabla con los respectivos parámetros y valores límites máximos permisibles según la Resolución 0631 del 17 de marzo de 2015:

**Tabla 1. Parámetros fisicoquímicos a monitorear y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales no domésticas – ARnD a cuerpos de aguas superficiales de actividades asociadas con hidrocarburos.**

Parámetro	Unidades	Exploración (Upstream)	Producción (Upstream)	Refino	Venta y Distribución (Downstream)	Transporte y Almacenamiento (Midstream)
<b>Generales</b>						
pH	Unidades de pH	6.00 - 9.00	6.00 - 9.00	6.00 - 9.00	6.00 - 9.00	6.00 - 9.00
<b>Demanda química de oxígeno (DQO)</b>	mg/L O <sub>2</sub>	400,00	180,00	400,00	180,00	180,00
<b>Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)</b>	mg/L O <sub>2</sub>	200,00	60,00	200,00	60,00	60,00
<b>Sólidos suspendidos totales (SST)</b>	mg/L	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00

Parámetro	Unidades	Exploración (Upstream)	Producción (Upstream)	Refino	Venta y Distribución (Downstream)	Transporte y Almacenamiento (Midstream)
Sólidos sedimentables (SSED)	mg/L	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Grasas y aceites	mg/L	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00
Fenoles	mg/L	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
Sustancias activas al azul de metileno	mg/L	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte
<b>Hidrocarburos</b>						
Hidrocarburos totales (HTP)	mg/L	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
Hidrocarburos aromáticos Policíclicos (HAP)	mg/L	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte	
BTEX (Benceno, Tolueno, Etilbenceno, Xileno)	mg/L	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte	
Compuestos orgánicos halogenados Adsorbibles (AOX)	mg/L	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte		
<b>Compuestos de Fósforo</b>						
Fósforo total (P)	mg/L	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte
Ortofosfatos	mg/L	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte		
<b>Compuestos de Nitrógeno</b>						
Nitrato	mg/L	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte		
Nitrógeno Amoniacal	mg/L	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte		
Nitrógeno total	mg/L	10,00	10,00	10,00 o 40,00 si en el proceso de refino se incluyen actividades de hidrogenación	Análisis y reporte	Análisis y reporte
<b>Iones</b>						
Cianuro total	mg/L	1,00	1,00	1,00		
Cloruros	mg/L	1200,00	1200,00	500,00	250,00	250,00
Fluoruros	mg/L	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte		
Sulfatos	mg/L	300,00	300,00	500,00	250,00	250,00

Parámetro	Unidades	Exploración (Upstream)	Producción (Upstream)	Refino	Venta y Distribución (Downstream)	Transporte y Almacenamiento (Midstream)
Sulfuros	mg/L	1,00	1,00	1,00		
<b>Metales y metaloides</b>						
Arsénico (As)	mg/L	0,10	0,10	0,10		
Bario (Ba)	mg/L	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte		
Cadmio (Cd)	mg/L	0,10	0,10	0,10		
Cinc (Zn)	mg/L	3,00	3,00	3,00		
Cobre (Cu)	mg/L	1,00	1,00	1,00		
Cromo (Cr)	mg/L	0,50	0,50	0,50		
Hierro (Fe)	mg/L	3,00	3,00	3,00		
Mercurio (Hg)	mg/L	0,01	0,01	0,01		
Níquel (Ni)	mg/L	0,50	0,50	0,50		
Plata (Ag)	mg/L	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte		
Plomo (Pb)	mg/L	0,20	0,20	0,10		
Selenio (Se)	mg/L	0,20	0,20	0,20		
Vanadio (V)	mg/L	1,00	1,00	1,00		
<b>Otros parámetros para análisis y reporte</b>						
Acidez total	mg/L CaCO <sub>3</sub>	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte
Alcalinidad total	mg/L CaCO <sub>3</sub>	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte
Dureza cálcica	mg/L CaCO <sub>3</sub>	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte
Dureza total	mg/L CaCO <sub>3</sub>	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte
Color real	m-1	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte

Fuente: MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE, Resolución 0631(17 de marzo de 2015). Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones. 2015. p. 12-14

En el párrafo 1 de este artículo se establece que “En los casos en que el vertimiento puntual de aguas residuales se realice en un cuerpo de agua superficial receptor o en un tramo de mismo, que tenga como destinación el uso del agua para consumo humano, doméstico y pecuario, la concentración de Hidrocarburos Policíclicos (HAP) en el vertimiento puntual de aguas residuales deberá ser menor

o igual a 0.01 mg/L para aquellas actividades que lo tienen definido como de análisis y reporte.”<sup>34</sup>

Con relación a los yacimientos no convencionales de hidrocarburos, el párrafo 2 del mismo artículo establece que “no se admite el vertimiento de las aguas de producción y de los fluidos de retorno a los cuerpos de aguas superficiales y alcantarillado público, hasta tanto este Ministerio cuente con la información técnica que le permita establecer los parámetros y sus valores límites máximos permisibles.”<sup>35</sup>

## **2.2. Reinyección**

Según la Asociación Regional de Empresas de Petróleo y Gas natural en Latinoamérica y del caribe (ARPEL), se establecen diferentes técnicas de reinyección como método de disposición de agua producida, como son: inyección por el espacio anular, inyección en pozo somero y profundo e inyección para mantenimiento de presión (recuperación secundaria).

En todo proceso de inyección se deben analizar las propiedades del yacimiento para una correcta operación, sea esta de fluidos o de gases, ya que tienen diferentes formas de reaccionar con su entorno, por lo cual debe hacerse un análisis previo para ver sus condiciones y así determinar valores y factores con los cuales la inyección será óptima.<sup>36</sup>

---

<sup>34</sup> Ibid.

<sup>35</sup> Ibid.

<sup>36</sup> IZQUIERDO, José, et al. Manual para el procesamiento de agua de inyección en un campo petrolero. Guayaquil. Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra. Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL). 2013, p. 3

Posterior a esto, se procede a realizar una caracterización básica la cual incluye pH, conductividad, alcalinidad, turbidez, hierro disuelto, H<sub>2</sub>S, grasas y aceites, sólidos suspendidos y análisis microbiológico.<sup>37</sup>

Las características del agua de inyección deben cumplir entre otras, con la normatividad técnica NACE (*National Association of Corrosion Engineers*), que indica que un agua de inyección para recobro de crudo debe cumplir con las siguientes especificaciones:<sup>38</sup>

**Tabla 2. Referencia NACE de calidad de agua para Inyección a pozos**

TIPO DE ANÁLISIS	PARÁMETRO	LÍMITE DE REFERENCIA	NORMA
Análisis Físico-químicos "in situ"	Conductividad	-	Referencia NACE
	pH	6.5-8.5	
	Fe <sub>2+</sub>	<1.0 mg/L	
	H <sub>2</sub> S	0.0 mg/L	
	CO <sub>2</sub>	<10 ppm	
	O <sub>2</sub>	<1 ppb	
	Turbidez	< 2 NTU	
Análisis Físico-químicos en el laboratorio	Metales Na <sup>+</sup> , K <sup>+</sup> , Ca <sup>++</sup> , Mg <sup>++</sup> , Ba <sup>++</sup> , Sr <sup>++</sup> , Si <sup>4</sup> Aniones Cr, SO <sub>4</sub> <sup>++</sup>	-	

<sup>37</sup> NARANJO, Carlos; MUÑOZ, Samuel y ZAPATA, José. Factibilidad experimental de la inyección de agua en las arenas Mugrosa del campo Lisama. Revista Fuente: El reventón Energético. Vol. 8. 2010, p. 2-3.

<sup>38</sup> MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE, Resolución 0135(9 de febrero de 2015). Por la cual se resuelve un recurso de reposición contra la resolución 0764 del 16 de julio de 2014. 2015. p. 23

TIPO DE ANÁLISIS	PARÁMETRO	LÍMITE DE REFERENCIA	NORMA
	Densidad	-	
Calidad del Agua	Grasas y Aceites	<5 mg/L	Referencia NACE
	Sólidos suspendidos	<5 mg/L	NACE TMO 273-05
	Pendiente (caudal vs. volumen)	<0.99	
Bacteriológico	BSR	<10 <sup>4</sup> ufc/mL	ATSM 4412-02

Fuente: ARPEL, Guía para la disposición y tratamiento de agua producida.

Si bien la norma NACE, en su definición no establece estándares de calidad medio ambiental, si considera los parámetros mínimos para evitar la corrosión y taponamiento de los pozos destinados a la inyección.<sup>39</sup>

---

<sup>39</sup> Ibid.

### **3. TECNOLOGÍAS PARA EL TRATAMIENTO DEL AGUA PRODUCIDA**

En la industria petrolera, existen diversas tecnologías y equipos para el tratamiento del agua de producción, estas se clasifican, dependiendo del tipo de procesos de separación que se lleven a cabo en cada uno de estos, en tres grandes grupos: tratamientos primarios, secundarios y terciarios. A continuación, se describen detalladamente cada uno de estos tratamientos y los equipos a utilizar.

#### **3.1. Tratamiento primario**

Son procesos físicos en los que se disminuye el contenido de aceites, grasas flotantes y sólidos en suspensión. De manera general los tratamientos consisten en procesos de desarenado, sedimentación, remoción de aceites y grasas; en los cuales se separa el hidrocarburo libre, existiendo diversos diseños en los que varía la eficiencia. Los equipos utilizados en esta etapa pueden ser separadores, tanques de lavado y tratadores térmicos, entre otros.<sup>40</sup>

##### **3.1.1. Tanques de sedimentación**

Se utilizan para eliminar grandes partículas en el agua con ayuda de la gravedad. El grado y el tamaño de la eliminación de partículas dependen del tiempo de retención del agua en el tanque. En este proceso no se requieren químicos, pero pueden ser utilizados para mejorar la eficiencia. Dentro de las especificaciones técnicas de los tanques de sedimentación, el agua de alimentación no tiene restricciones. Por otro lado, la calidad del agua resultante depende del diseño del

---

<sup>40</sup> RUIZ, Luis. Propuesta de mejoramiento para las facilidades de tratamiento de agua de producción y disposición por sistema de inyección para el campo Cabiona. Bucaramanga, Trabajo de grado (Ingeniería de Petróleos), Universidad Industrial de Santander, 2015.

sistema y los residuos sólidos requieren disposición.<sup>41</sup> Estos tanques presentan una capacidad de remoción de tamaño de partículas entre 100 y 150 micrones.<sup>42</sup>

### **3.1.2. Tanques desnatadores**

Es el equipo más simple de tratamiento primario, estas unidades pueden ser a presión atmosférica, son diseñadas para proporcionar un alto tiempo de retención durante el cual pueda ocurrir la coalescencia y la separación gravitacional.

Los desnatadores pueden ser horizontales o verticales. En los verticales las gotas de aceite deben ascender en sentido contrario al flujo de agua que es descendente; algunos desnatadores verticales poseen propagadores en la entrada y colectores en la salida para ayudar a la distribución de flujo uniforme.

El flujo entra y pasa a un tubo que lo dirige hacia abajo permitiendo que se liberen pequeñas cantidades de gas. La entrada inferior dirige el flujo a través de la capa de aceite a un sistema propagador para permitir que el agua continúe su flujo hacia abajo con la velocidad uniforme sobre toda la sección del área transversal en el tanque. En esta zona tranquila, entre el propagador y el colector de agua, puede ocurrir algo de coalescencia y la boyanza de las gotas de aceite causará que estas asciendan contra el flujo del agua. El aceite que se encuentra en la superficie se retira y se recoge en colectores.<sup>43</sup> Este equipo tiene un porcentaje de remoción del 95% de grasas y aceites.<sup>44</sup>

---

<sup>41</sup> COLORADO SCHOOL OF MINES. Technical assessment of produced water treatment technologies. USA, 2009.

<sup>42</sup> ARNOLD, Ken, y STEWART, Maurice. Surface Production Operations, Design of Oil-Handling Systems and Facilities Vol.1. 3 ed. Houston, 2008. p 499.

<sup>43</sup> RUIZ, Luis. Op. Cit.

<sup>44</sup> Oil skimmers, INC the oil removal solution expert, citado por DUARTE, Paola y PATIÑO, Sandra. Alternativas para el diseño del sistema de tratamiento del agua de producción de Campo Escuela Colorado conforme a la normatividad vigente para vertimiento en Colombia. Tesis de grado en Ingeniería de Petróleos. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías fisicoquímicas. 2017.p 79.

### **3.1.3. Separador API**

Es un dispositivo de separación por gravedad que funciona con el principio de la Ley de Stokes. Esta ley define la velocidad de ascenso de una partícula de aceite en función de su densidad y tamaño. Su función principal es eliminar la mayoría del aceite y de sólidos en suspensión del agua. Por lo tanto, su diseño se basa en la diferencia en la gravedad específica del aceite y el agua que serán separados. Mientras los glóbulos de aceite subirán debido a las fuerzas boyantes para formar una capa de aceite sobre la superficie del agua, los sólidos aceitosos con una gravedad específica mayor a 1.0 se depositarán en el fondo del separador. Esto hace que sean relativamente fáciles de eliminar.<sup>45</sup> Este equipo cuenta con una eficiencia de remoción de grasas y aceites del 90%.<sup>46</sup>

### **3.1.4. Separadores de placas coalescedoras**

#### **3.1.4.1. Separador de placas paralelas (PPI)**

Las placas forman una "V" a lo largo del eje de flujo de manera que el aceite migre hasta la parte superior de la placa de coalescencia y hacia los lados. Los sedimentos migran hacia el centro y hacia la parte inferior del separador, donde se remueven.<sup>47</sup>

#### **3.1.4.2. Separador de placas corrugadas (CPI)**

Es un equipo que involucra la instalación de una serie de platos paralelos al eje longitudinal de un separador API, estos platos son corrugados, con el eje de corrugación paralelo a la dirección de flujo. Los platos o placas forman una "V"

---

<sup>45</sup> ARNOLD, Ken, y STEWART, Maurice. Op. Cit.

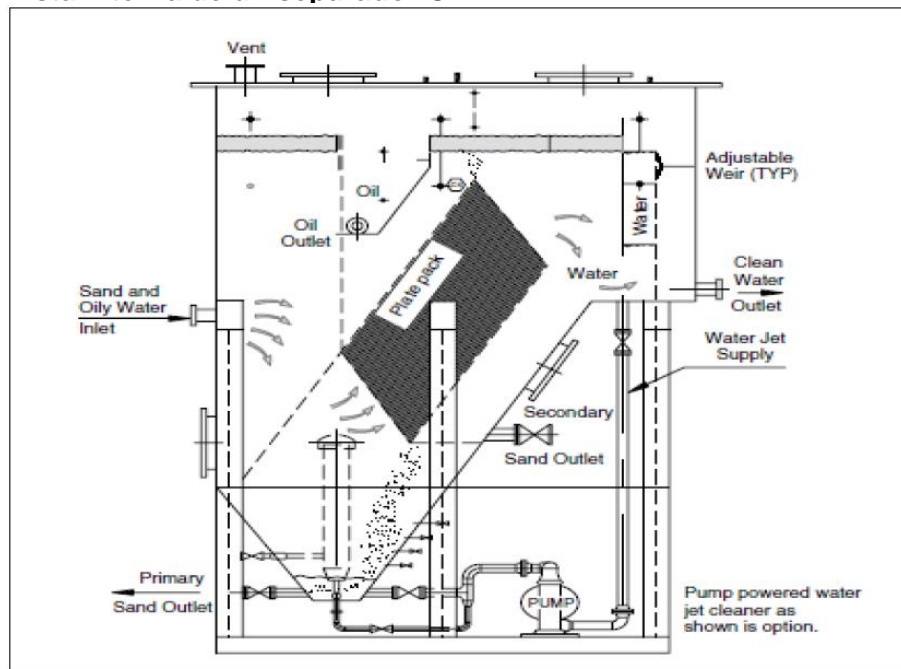
<sup>46</sup> IGUNNU, Ebenezer., CHEN, George. Op. cit.

<sup>47</sup> Ibid.

cuando son vistos a lo largo del eje de flujo, el empaque de la placa está inclinado en un ángulo de 45° y la mayor parte del agua es forzada a fluir hacia abajo. Las capas de petróleo ascienden contra el flujo de agua y se concentran en el tope de cada corrugación. Cuando el petróleo llega al final del empaque de platos es recolectado en un canal y enviado a la interface petróleo-agua de donde son removidos.

Un rango típico de aplicación de los equipos CPI permite separar gotas de aceite libre del orden de 20 hasta 1000 micras. Sin embargo, la efectividad del sistema está sujeta a varios factores, como diferencias de densidad, viscosidad, temperatura, turbulencia entre otros<sup>48</sup>. En la figura 1 se tiene una representación gráfica de este separador. Su eficiencia de remoción de grasas y aceites es del 95%.<sup>49</sup>

**Figura 1. Vista interna de un separador CPI**



Fuente: ARNOLD, Ken, y STEWART, Maurice. Surface Production Operations, Design of Oil-Handling Systems and Facilities Vol.1. 3 ed. Houston, 2008.

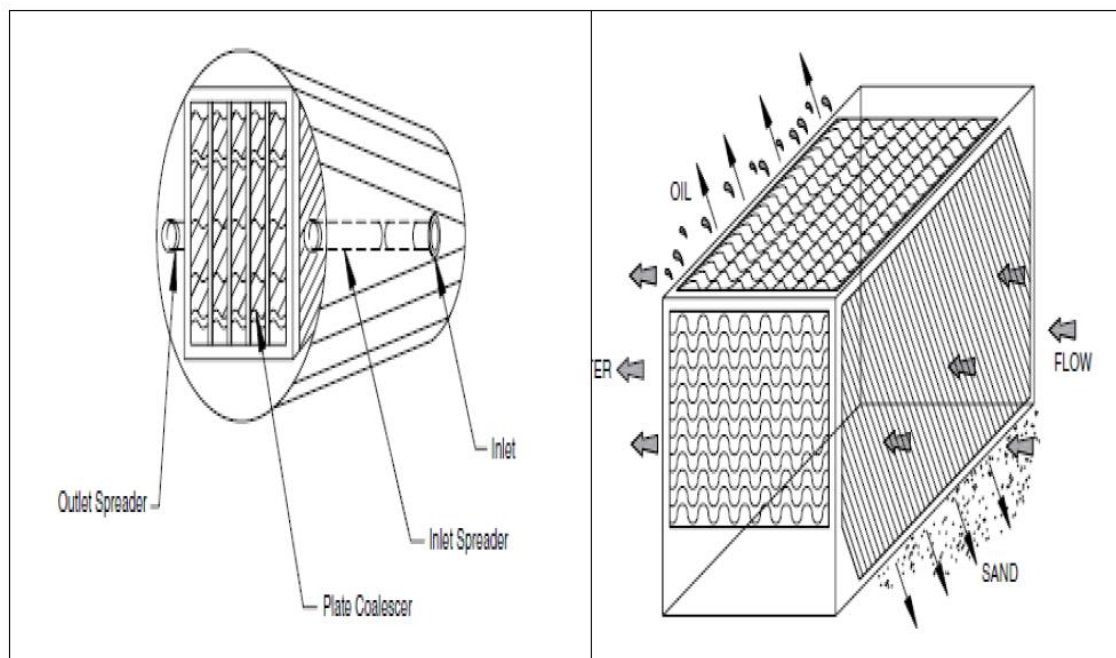
<sup>48</sup> Ibid.

<sup>49</sup> Ospar commission 2013. "Background Document concerning Techniques for the Management of Produced Water from Offshore Installations, p 47.

### 3.1.4.2. Separador de flujo transversal (CFD)

Son una modificación de la configuración del CPI. Este permite que las placas se puedan poner en un ángulo más inclinado para facilitar la remoción de sedimentos, y para que el paquete de placas sea más convenientemente empaquetado en un tanque a presión.<sup>50</sup>

**Figura 2. Separador de flujo transversal**



Fuente: ARNOLD, Ken, y STEWART, Maurice. Surface Production Operations, Design of Oil-Handling Systems and Facilities Vol.1. 3 ed. Houston, 2008.

## 3.2. Tratamiento secundario

El tratamiento secundario reduce la concentración de aceite disperso y remueve los sólidos finos utilizando técnicas de flotación<sup>51</sup>. La separación de las gotas de aceite

<sup>50</sup> IGUNNU, Ebenezer., CHEN, George. Op. cit.

<sup>51</sup> AL-MAAMARI, Rashid., et al. Flotation, Filtration, and Adsorption: Pilot Trials for Oilfield Produced-Water Treatment. Oil and Gas Facilities. En www.onepetro.org, 2014.

y la fase continua de agua se logra aumentando la diferencia de densidad entre los dos fluidos, uniendo burbujas de gas<sup>52</sup>. Las partículas y gotas de aceite en suspensión se asocian a las burbujas y ascienden a la superficie, formando una espuma que posteriormente es removida<sup>53</sup>. Coagulantes y floculantes como sulfato férrico, cloruro de aluminio y sulfato de aluminio o alúmina, son usados como un pretratamiento a la flotación; estos aglomeran gotas de aceite y sólidos en flóculos grandes permitiendo una separación más eficiente<sup>54</sup>. Sin embargo, no son eficaces para la remoción de componentes disueltos<sup>55</sup>.

### **3.2.1. Hidrociclones**

Consiste en múltiples ciclones agrupados dentro de una carcasa en donde el flujo es distribuido uniformemente; la diferencia sobre la fase acuosa y la capa de crudo se aumenta por efecto de fuerzas tangenciales, permitiendo una separación eficiente del crudo y el agua.<sup>56</sup> La separación aceite-agua en el hidrociclón se basa en fuerzas centrífugas y la diferencia de las gravedades específicas entre en aceite y el agua. La forma del ciclón provoca un aumento en la velocidad, resultando en grandes fuerzas centrífugas y en la separación del aceite y el agua. Estos equipos tienen una eficiencia de remoción de aceite disperso del 98%.<sup>57</sup>

---

<sup>52</sup> ARNOLD, Ken, y STEWART, Maurice. Op. Cit.

<sup>53</sup> COLORADO SCHOOL OF MINES. Op. Cit.

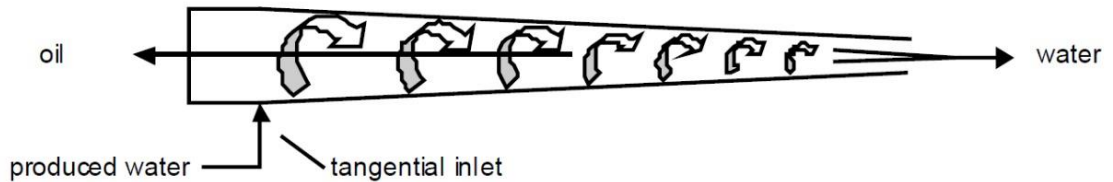
<sup>54</sup> MUNIRASU, Selvaraj., et al. Use of membrane technology for oil field and refinery produced water treatment- A review. En Elsevier [en línea], 2016, vol.100. Disponible en Science Direct.

<sup>55</sup> AHMADUN, Fakhru'l-Razi., et al., Op. Cit.

<sup>56</sup> Ibid.

<sup>57</sup> Ospar commission 2013. Op cit. p 49.

**Figura 3. Hidrociclón**



Fuente: Modificado de Ospar commission 2013. "Background Document concerning Techniques for the Management of Produced Water from Offshore Installations, p 49.

### **3.2.2. Centrífugas**

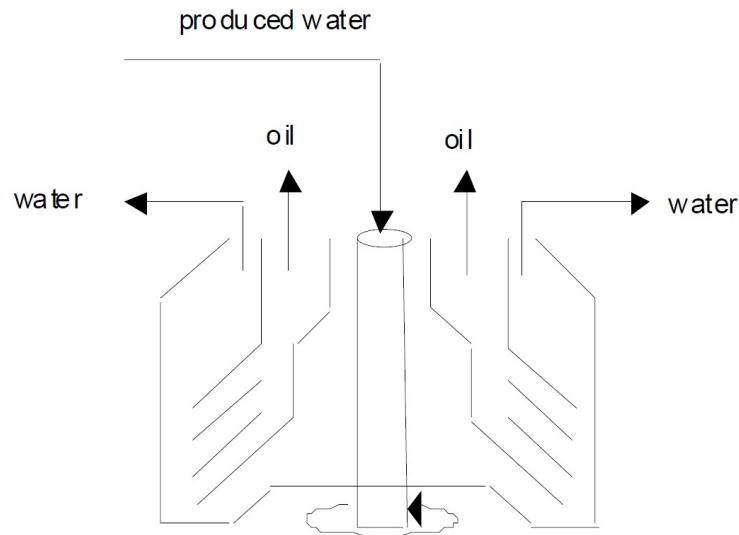
Se encargan de la separación de las partículas mediante fuerza de aceleración gravitacional que se logra gracias a una rotación rápida. Es un proceso de separación que utiliza la acción de la fuerza centrífuga para promover la aceleración de partículas en una mezcla sólido-líquido. Las centrífugas operan con el mismo principio físico de los hidrociclones, pero difieren en que la entrada de alimentación tangencial genera la fuerza centrífuga y las partes móviles generan el movimiento de rotación. También eliminan sólidos suspendidos y se ocupa de partículas sólidas tan pequeñas como 2 micras. Las desventajas de las centrífugas incluyen altos costos de mantenimiento y bajo rendimiento.<sup>58</sup> Las centrífugas tubulares tienen un porcentaje de remoción del 29.1% de DQO y 29.6% de cloruros. Al combinar centrífugas en serie (Decanter, Centrífuga de platos y centrífuga tubular) se obtienen unos nuevos porcentajes de remoción de DQO y cloruros del 34.1% y 25.84% respectivamente.<sup>59</sup>

---

<sup>58</sup>ARTHUR, J. Daniel, et al. Technical summary of oil & gas produced water treatment technologies. ALL CONSULTING, LLC. Tulsa, 2005.

<sup>59</sup> BUITRAGO, July. Extracción de cloruros de un sistema de aguas residuales a través de procesos mecánicos. Mechanical processes for chloride extraction from an industrial wastewater treatment system. Revista palmas. Bogota. Vol 38. 2017. P 108-113

**Figura 4. Centrifuga**



Fuente: Modificado de Ospar commission 2013. "Background Document concerning Techniques for the Management of Produced Water from Offshore Installations, p 53.

### **3.2.3. Cyclotech**

El cyclotech contiene un medio especializado de coalescencia el cual es instalado en la entrada de los hidrociclones o en un recipiente situado aguas arriba del sistema. La cámara de entrada de un hidrociclón convencional puede tener un tiempo de residencia de hasta 20 segundos.

Este tiempo de residencia se utiliza de manera constructiva para conseguir la coalescencia parcial de las gotas. Esto se logra optimizando una serie de parámetros de diseño de la tecnología, incluyendo la selección del material, la densidad del medio, el tratamiento de la superficie del medio, el régimen de flujo y la orientación mecánica. La actividad de coalescencia mejorada resultante puede

aumentar el rendimiento de los hidrociclones aguas abajo.<sup>60</sup> Este equipo cuenta con una eficiencia de remoción del 99% de aceite disperso y más del 50% en aceite disuelto y HPAs.<sup>61</sup>

### **3.2.4. Steam Stripping**

El agua es llevada a una columna empacada poniéndose en contacto extremo con el vapor (conocida como el stripping). Esta técnica es adecuada para la eliminación de aceite disuelto (BTEX), pero también eliminará hidrocarburos alifáticos. El vapor y los vapores de los hidrocarburos son separados y condensados fácilmente debido al alto contenido de hidrocarburos. Los hidrocarburos que han sido separados por el vapor pueden ser dirigidos a un sistema de tratamiento de condensados y el agua puede ser dispuesta.<sup>62</sup> Esta tecnología tiene una eficiencia de remoción del 85% de aceite disperso, de entre 10-80% de metanol y mayor del 90% de aceite disuelto, BTEX, benceno y HPAs.<sup>63</sup>

### **3.2.5. Técnicas de flotación convencionales**

#### **3.2.5.1. Flotación por gas inducido (IGF)**

La flotación por gas inducido tiene como objeto la remoción de hidrocarburos emulsionados o impurezas que se encuentran en el agua como partículas muy finas, que no pueden separadas por simple decantación natural. El IGF está dividido, típicamente en cuatro celdas de flotación en serie, combinadas con compartimentos de entrada y salida. El agua aceitosa entra por el final de la unidad y pasa

---

<sup>60</sup> GARCIA, Juan. y HERRERA, Sergio. Op. Cit, p 68.

<sup>61</sup> Ibid.

<sup>62</sup> Ibid

<sup>63</sup> Ospar commission 2013. Op cit. p 31.

secuencialmente por cada una de las cuatro celdas de flotación, mejorando notablemente con la adición de floculantes o sustancias químicas para romper las emulsiones.<sup>64</sup>

### **3.2.5.2. Flotación por gas disuelto (DAF)**

En estas unidades como mecanismo de producción de burbujas se puede utilizar un eductor para saturar el agua residual y una boquilla para inducir las burbujas o en su defecto, un rotor mecánico que agita la corriente de agua en la cámara para facilitar la dispersión de las burbujas. Las burbujas generadas en este tipo de unidades son de mayor tamaño que las generadas en las unidades de flotación de tipo gas disuelto, dado que no se encuentran en solución con el fluido, el ascenso de las burbujas a superficie será más rápido, ocasionando así un tiempo de residencia menor.<sup>65</sup> Esta tecnología tiene una eficiencia de remoción del 90% de aceites<sup>66</sup>, 40% de DBO y 95% de sólidos suspendidos totales.<sup>67</sup>

### **3.2.5.3. Flotación por aire disuelto (IAF)**

El principio de la flotación por aire disuelto es similar al proceso de inducción por gas, sólo que es utilizado aire como vehículo para generar microburbujas. El agua

---

<sup>64</sup> RUIZ, Luis. Op. Cit.

<sup>65</sup> Ibid.

<sup>66</sup> ACOSTA, Diego. y JACOBS, Juan. Diseño conceptual de un sistema de tratamiento de aguas de producción para reinyección en pozo disposal en un campo de la cuenca de los llanos orientales. Tesis de Ingeniería de Petróleos. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías fisicoquímicas. 2017.p 125

<sup>67</sup> LOPEZ, Luis. Diseño de una planta de tratamiento de aguas, mediante la implementación de osmosis inversa en campos petroleros de Colombia. Monografía de especialización en Producción de Hidrocarburos. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías fisicoquímicas. 2016.p 95

al ser tratada se sobresatura de aire a una presión entre 40 y 60 lpcm en un tanque de presurización, durante un período de 2 a 3 minutos.<sup>68</sup>

### **3.3. Nuevas tecnologías de flotación**

#### **3.3.1 Flotación de partículas absorbentes**

La base de este proceso es la selección de un material adsorbente adecuado, o sea, con elevada área superficial y alta reactividad con el elemento contaminante (alta capacidad de adsorción). El mecanismo responsable por el proceso de flotación, FPA, está compuesto de 4 etapas en nivel macroscópico.<sup>69</sup>

#### **3.3.2. Flotación de agregados coloidales**

La base de este proceso es la formación de agregados a partir de la adsorción/coprecipitación de los iones contaminantes en coloides con alta área superficial, baja toxicidad y buenas características de flotación, especialmente con el empleo de microburbujas generadas in situ, como en el caso de la DAF (flotación por aire disuelto). La cinética de levitación de las unidades burbujas - partículas puede ser incrementada con la adición de polímeros o hidrofobizantes (colectores).<sup>70</sup>

#### **3.3.3. Bubble chamber (BC)**

Este sistema es una variante del Hidrociclón de Miller-ASH ("Air sparger

---

<sup>68</sup> RUIZ, Luis. Op. Cit.

<sup>69</sup> Ibid.

<sup>70</sup> Ibid.

hydrocyclone") sin el "overflow" (desbordamiento) y sirviendo de "contactor" de burbujas y partículas. El ASH y el BC hacen parte de un conjunto de sistemas de flotación centrífuga de alta capacidad que aplica el concepto de separación con burbujas pequeñas en un campo centrífugo. Estos sistemas han sido recientemente utilizados en el área ambiental, en la remoción de tintas de papel (reciclo) y aceites. El sistema BC consta de un contactor y un separador de las fases flotada y agua tratada.<sup>71</sup>

#### **3.3.4. Flotación JET**

Las celdas de flotación jet convencionales, CFJC, consisten en un tubo de contacto, un tanque de flotación y un controlador de nivel. El tubo de contacto está a su vez formado por un inyector (generador de burbujas) localizado en la parte superior que permite introducir la corriente a tratar en forma de jet, un tubo de descenso ("downcomer"), y en la parte inferior, posee un distribuidor de burbujas o difusor. En estas celdas el proceso de "colección" (colisión - adhesión) y la formación de los agregados gotas de aceite - burbujas de aire, se produce en el tubo de descenso ("Downcomer") y la separación de estos agregados del agua, en el tanque de flotación (separación de las fases).<sup>72</sup>

#### **3.3.5. Separador centrífugo**

Fue desarrollado en el laboratorio de la Universidad do Río Grande do Sul y emplea el mismo principio de la "nozzle flotation", con la diferencia de que después de la etapa de pasaje forzada por la válvula (en este caso el flujo es horizontal), la solución aireada pasa por un "static mixer" y todo el conjunto alimenta a un

---

<sup>71</sup> Ibid.

<sup>72</sup> Ibid.

separador de forma cilíndrica que posee entrada tangencial, un pedestal para formar el "air core", "underflow", "vortex finder" y "overflow". Las principales variables de diseño son las dimensiones del cilindro y de sus distintas partes, el tipo de contactor ("static mixer") y el sistema de auto aspiración. Entre los parámetros operacionales, se destacan, la presión del fluido dentro del separador centrífugo, la localización del pedestal y el caudal a ser tratado.

### **3.3.6. Celda multiburbujas**

Reportaron valores de remoción de precipitados coloidales de hierro en una columna que opera con mezclas de burbujas de tamaño mediano (menores que 600  $\mu\text{m}$ ) y microburbujas generadas con el sistema FAD (menores que 100  $\mu\text{m}$ ). Esta celda, llamada de "multiburbujas" presenta una serie de ventajas con relación a la FAD y a la Microcel. Estas ventajas son derivadas de los mayores valores de flujo del área superficial de burbujas disponibles,  $S_b$ , (mejor tasa aire/sólidos) lo que resulta en mejores velocidades (cinética) de separación.

La generación de las burbujas de tamaño medio se logra utilizando un Venturi y la de las microburbujas con la técnica de la FAD. Para ello se necesita alto volumen de aire y en especial, para la generación de microburbujas se requiere alta área superficial. Esta técnica no genera destrucción del floculado.<sup>73</sup>

### **3.3.7. Celda de microburbujas**

#### **3.3.7.1 Celda de microburbujas por aire**

---

<sup>73</sup> FÉRIS, L.A. GALLINA, S.C.W. RODRÍGUEZ, R.T. y RUBIO, Jorge. Optimizing Dissolved Air Flotation Design System, Abril 6, 2000.

Sistema compuesto por una turbina regenerativa diseñado para producir burbujas que ayudan a la separación del aceite del agua, el sistema es utilizado en los dos compartimientos de la Celda UTA. Esta celda es el primer equipo que conforma el sistema de tratamiento, trabaja a presión atmosférica, está dividido en dos compartimientos cada uno con un bolsillo de 9 Bls de capacidad y tiene una capacidad de procesar 30000 BWPD; la función principal es realizar el proceso de separación del aceite libre del agua que ingresa al sistema. La función del segundo compartimiento de la Celda UTA es realizar la separación de borra que se forma por la reacción de productos químicos (clarificador y floculante).

En la turbina regenerativa se inyecta aire de forma perpendicular por la línea logrando que el equipo remueva gotas de aceite de hasta 5µm. Una vez recuperadas las aguas aceitosas, las unidades de micro flotación se valen del sistema de microburbujas compuesto por las turbinas regenerativas para remover los sólidos suspendidos, limos, arcillas que están presentes en el agua de producción. Decantando los sólidos en la parte inferior del equipo para su posterior drenaje. Este tipo de celda tiene un porcentaje de remoción del 93.92% de grasas y aceites y 99.08% de sólidos totales.<sup>74</sup>

### **3.3.7.2 Celda de microburbujas por nitrógeno**

Las unidades de micro flotación A/B permiten la precipitación de arenas, arcillas y limos sedimentables, de manera que periódicamente deben removerse por la línea

---

<sup>74</sup> RUBIO, Ivonne. Comparación técnica y económica entre un sistema de tratamiento de agua de producción con inyección de microburbujas de aire y un sistema con inyección de microburbujas de nitrógeno en el bloque Cubiro. Trabajo de grado para especialización en Producción de Hidrocarburos. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías fisicoquímicas. 2016.p 28-38

empleando las bombas neumáticas y enviándolos finalmente al tanque de lodos por la misma línea de proceso.

El agua clarificada que sale de las unidades de micro flotación A/B por la línea pasa por un juego de válvulas automáticas ON/OFF que dan paso al agua hacia el sistema de bombeo de filtración compuesto por cinco bombas A/B/C/D/E con capacidad de trasegar 16.500BWPD a 60psi; dos de estas bombas son para proceso de filtración, la tercera es stand by o back up y la cuarta y quinta se emplean en los retro-lavados de los filtros inyectando agua tratada para optimizar el proceso de limpieza.

Cada unidad de micro flotación tiene su respectivo motoreductor, medidor de nivel continuo para controlar el proceso de recuperación de aguas aceitosas y remoción de sólidos por las líneas de proceso respectivamente y salida de oxígeno, nitrógeno y vapor de agua hacia el medio ambiente. Esta celda tiene un porcentaje de remoción del 85.84% de grasas y aceites y 70.08% de sólidos totales.<sup>75</sup>

### **3.4. Tratamiento terciario**

#### **3.4.1. Tecnologías de filtración**

La tecnología de filtración se usa ampliamente para eliminar aceite y grasa y TOC del agua producida. La filtración se puede lograr mediante el uso de varios tipos de medios como arena, grava, antracita, cáscara de nuez y otros. Los filtros de cáscara de nuez se usan comúnmente para el tratamiento de agua producida. Este proceso no se ve afectado por la salinidad del agua y puede aplicarse a cualquier tipo de

---

<sup>75</sup> Ibid.

agua producida. La tecnología de filtración de medios es altamente eficiente para la eliminación de aceites y grasas, y se ha informado de una eficiencia de más del 90%. La eficacia puede mejorarse aún más si se agregan coagulantes al agua de alimentación antes de la filtración. La regeneración de medios y la eliminación de desechos sólidos son reverses en este proceso.<sup>76</sup>

- **Filtro de cáscara de nuez**

Fueron desarrollados como el método más conveniente de filtración de aceite libre y sólidos suspendidos, en aplicaciones donde los lechos de arena eran convencionalmente usados, ahora el lecho es de 100% cáscaras de nuez, las cuales tienen excelentes características de superficie para la coalescencia y filtración.

Actualmente, los filtros rellenos con cáscara de nuez han presentado buen desempeño, esto debido a que la cáscara de nuez presenta una propiedad mojante en agua (water-wet), lo cual implica máximo contacto en agua para remover los sólidos. Se presentan con frecuencia como tratamiento final del agua para inyección. Este filtro tiene una eficiencia de remoción del 95% de sólidos totales y del 90% de aceite <sup>77</sup>

- **Filtros biológicos aireados**

El término filtro aireado biológico (FBA) se refiere a una clase de tecnologías, que incluyen películas fijas y procesos de crecimiento adjuntos, filtros de desbaste, filtros

---

<sup>76</sup> IGUNNU, Ebenezer., CHEN, George. Op cit. p 11

<sup>77</sup> ACOSTA, Diego. y JACOBS, Juan. Op. cit. p 112.

intermitentes, filtros de medios de lecho compacto y filtros de goteo convencionales. Un FAB consiste en medios permeables, como rocas, grava o medios de plástico. El agua a tratar fluye hacia abajo sobre los medios y con el tiempo genera una película microbiana en la superficie del medio. Los medios facilitan la oxidación / eliminación bioquímica de constituyentes orgánicos. Este es un proceso aeróbico y las bombas y los ventiladores en el sistema mantienen las condiciones aeróbicas. El grosor de la capa microbiana continúa aumentando a medida que se utiliza el filtro.

Eventualmente, la capa microbiana se vuelve lo suficientemente gruesa para que parte de la capa de lodo se vuelva anaeróbica y la capa microbiana comience a desprenderse en el efluente del filtro. Los medios deben tener una gran área de superficie por unidad de volumen, ser duraderos y de bajo costo. El tipo de medio a menudo se determina en función de los materiales disponibles en el sitio. Los medios pueden ser de piedra de campo o grava y cada piedra debe tener entre uno y cuatro pulgadas de diámetro, para generar un espacio de poro que no prohíba el flujo a través del filtro y no se obstruya cuando se produce desprendimiento. Estos filtros remueven el 70% de nitrógeno, 80% de aceite, 85% de SST, 60% de DQO y 95% de DBO.<sup>78</sup>

- **Microfiltración y Ultrafiltración**

Las membranas son películas finas con tamaños de poro específicos que separan selectivamente un fluido desde sus componentes. Son fabricadas con materiales orgánicos o inorgánicos sintéticos. La tecnología de membrana opera con filtración de flujo cruzado o filtración cerrada a una presión impulsada por el sistema. La

---

<sup>78</sup> COLORADO SCHOOL OF MINES. Op. cit. p 7-8

presión de operación aumenta drásticamente a medida que disminuye el tamaño de poro. La operación de las membranas de microfiltración (MF) y ultrafiltración (UF) se basa en el mecanismo de flujo de poro conectivo o Ley de Darcy. En el caso de la microfiltración, se obtiene una reducción de 35% para DQO, 25% de COT, 92% de grasas y aceites y 35% de fenoles. Para la ultrafiltración se tienen porcentajes de reducción de 96% de HTP, 54 % de BTX, 95% de Cobre, 95% de Zinc y hasta el 100% de SST.<sup>79</sup>

- **Electrodiálisis**

La electrodiálisis (ED) es un proceso en el cual se separan iones disueltos del agua. Se utilizan membranas permeables fabricadas a partir de polímeros de intercambio iónico. Una pila de ED se compone de una serie de membranas de intercambio aniónico y catiónico dispuestos de modo alternante entre el ánodo y el cátodo. Los cationes migran hacia el cátodo, pasan la membrana de intercambio de cationes y son rechazados por la membrana de intercambio aniónico. Lo opuesto ocurre cuando los aniones migran al ánodo. El proceso de EDR es similar, excepto que adicionalmente utiliza inversión periódica de la polaridad para reducir el ensuciamiento de la membrana.<sup>80</sup> La electrodiálisis tiene un porcentaje de reducción del 95.5% de grasas y aceites, 84.5% DBO, 99.1% de BTEX y 88.9% de TDS.<sup>81</sup>

---

<sup>79</sup> MORALES, María y REVELO, Astrid. Desempeño técnico y ambiental de las tecnologías convencionales y modernas de tratamientos de agua producida. Tesis de Ingeniería de Petróleos. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías fisicoquímicas. 2016. p 57-58

<sup>80</sup> Ibid.

<sup>81</sup> ARTHUR, J. Daniel, et al. Op. Cit.p 20.

- **Adsorción de lecho compacto**

La adsorción es un proceso en el que los compuestos orgánicos disueltos en el agua producida se adhieren a la superficie de un medio poroso. En este tratamiento se emplean varios adsorbentes como carbón activado, arcillas orgánicas, alúmina activada y zeolitas. El agua es bombeada dentro de una columna que contiene el adsorbente, la eficiencia del adsorbente de la columna depende de la temperatura y de la naturaleza de las sustancias. El agua pasa a través de la columna constantemente y produce una acumulación de sustancias en el medio poroso. Por esa razón el adsorbente necesita ser sustituido periódicamente. La adsorción por lecho compacto tiene una efectividad de remoción del 99.26% de hidrocarburos totales (THP), 99.21% de grasas y aceites, 84.04% de benceno, 89.94% de tolueno, 89.89% de etilbenceno y 96.63% de xileno.<sup>82</sup>

- **Osmosis Inversa**

La ósmosis inversa (RO, Reverse Osmosis) es una técnica de desmineralización basada en membranas y usada para separar sólidos disueltos, tales como iones, de una solución. Las membranas en general actúan como barreras permeables selectivas que permiten que algunas sustancias (como el agua) permee a través de ellas mientras retiene otras sustancias disueltas (como iones).

RO ofrece la filtración más fina actualmente disponible, rechazando la mayoría de los sólidos disueltos y suspendidos, al tiempo que impiden el paso de las bacterias y los virus, obteniéndose un agua pura y esterilizada. Aguas con un elevado

---

<sup>82</sup> Ibid.

contenido de sales como, sodio, calcio, boro, hierro, cloruros, sulfatos, nitratos y bicarbonatos, pueden ser tratados con la osmosis inversa hasta alcanzar los límites considerados como “agua aceptable” para su utilización.

Las membranas filtrantes son la clave y responsables de separar las sales del agua. Dichas membranas pueden considerarse como filtros moleculares. El tamaño de los poros de estas membranas es extremadamente reducido, por lo que se requiere una presión considerable para hacer pasar cantidades de agua a través de ellas. La elección del modelo de membrana más apropiado es según el agua a tratar y su empleo posterior, determinando el tipo de instalación más idónea.<sup>83</sup> La osmosis inversa tiene una eficiencia de remoción del 98% de metales pesados, sales y cloruros.<sup>84</sup>

#### **3.4.2. Evaporación rápida por aspersión**

AquaSonics International ha desarrollado un sistema Rapid Spray Evaporation™ (RSE) de eyección de agua contaminada a altas velocidades a través de una boquilla inyectora especializada en el calor residual. La unidad usa un elemento de calentamiento para una fuente de calor a través de la cual se sopla aire a la cámara de evaporación. A medida que el aire caliente se mueve a lo largo de la cámara de evaporación, se inyecta agua residual nebulizada en la cámara de evaporación. El vapor en movimiento y las gotas de salmuera pasan a través de un filtro mecánico que atrapa las gotas de salmuera. La fase de vapor puro pasa a un condensador. Las gotas de salmuera se lavan periódicamente del filtro con el agua que se está tratando.

---

<sup>83</sup> Diseños y soluciones sostenibles DSS. S.A. Ingeniería para un desarrollo sostenible. Osmosis inversa. [En línea]. [Citado el: 23 septiembre de 2018] [http://dss.com.ec/wp-content/uploads/2012/07/osmosis\\_inversa.pdf](http://dss.com.ec/wp-content/uploads/2012/07/osmosis_inversa.pdf)

<sup>84</sup> Oil skimmers, INC the oil removal solution expert, citado por DUARTE, Paola y PATIÑO, Sandra. Op. cit. p 79.

A medida que el agua se vaporiza en cuestión de milisegundos de expulsión, los sólidos en la solución se evaporan o se separan. El vapor de agua se condensa y se recoge mientras que los sólidos precipitados forman partículas cristalinas aisladas, que se recogen a través de un proceso de vacío y se venden como subproducto. RSE expulsa el agua salada a través de una boquilla en una corriente de aire caliente, formando una niebla de gotitas que se vaporizan casi al instante. Las diminutas escamas de sal sólida que quedan en el fondo de la cámara de evaporación, donde pueden recogerse. El mejor éxito proviene del desarrollo de boquillas que permiten que el proceso funcione con presión hidráulica. Estudios de campo han determinado que la eficiencia de este tratamiento es de 98.2% de cloruros, 99.51% de sulfatos, 99.66% de TDS entre otros.<sup>85</sup>

### **3.4.3. Humedal artificial**

Los humedales son biorreactores de película delgada que utilizan diversas especies de plantas y microbios junto con arenas que oxidan los contaminantes presentes en el agua. Las instalaciones de tratamiento de humedales ofrecen una alternativa más económica a la reinyección y benefician a la fauna local a través de la descarga de agua. Los humedales cuentan con una eficiencia de remoción del 75% de fósforo, 92% de DBO, 40% de DQO, 95% de THP y 94% de grasas y aceites, entre otros.<sup>86</sup>

### **3.4.4. Procesos de oxidación avanzada**

Los procesos de oxidación avanzada (AOP, por sus siglas en inglés), que producen especies reactivas como los radicales hidroxilo in situ, se identifican como una de

---

<sup>85</sup> ARTHUR, J. Daniel, et al. Op. Cit. p 26.

<sup>86</sup> Ibid

las tecnologías potenciales para la eliminación de concentraciones mínimas de compuestos orgánicos de varias corrientes de agua<sup>87</sup>.

La tecnología de oxidación avanzada es una de las técnicas más respetuosas con el medio ambiente utilizadas para eliminar los contaminantes orgánicos recalcitrantes que no se pueden tratar fácilmente mediante procesos convencionales existentes debido a su estabilidad química. La degradación de los contaminantes biológicamente persistentes se produce en presencia de especies altamente reactivas como el ozono, el peróxido de hidrógeno y los radicales hidroxilo a temperatura y presión ambiente.

El mecanismo básico de los AOP se centra en la generación de radicales hidroxilo altamente reactivos. Estos radicales hidroxilo son oxidantes inestables, no selectivos y potentes en comparación con otros agentes oxidantes conocidos, como el permanganato de potasio. El radical hidroxilo reacciona de manera eficiente para fragmentar contaminantes orgánicos en productos finales inocuos, CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O. A pesar de ser una especie de vida corta, el radical hidroxilo atacó a los contaminantes orgánicos a través de la abstracción de hidrógeno, la transferencia de electrones y la formación de un doble enlace con los compuestos orgánicos.<sup>88</sup>

La oxidación se define como la transferencia de uno o más electrones de un donador de electrones (reductor) a un aceptor de electrones (oxidante) que tiene una mayor

---

<sup>87</sup> GILMOUR, Charles., Water Treatment Using Advanced Oxidation Processes: Application Perspectives. Trabajo de grado (Master of Engineering Science), The University of Western Ontario, 2012.

<sup>88</sup> TIJANI, Jimoh, et al. A review of combined advanced oxidation technologies for the removal of organic pollutants from wáter. Water Air Soil Pollut, Vol 25, 2102. 2014, p. 4

afinidad por los electrones. Estas transferencias de electrones resultan en la transformación química tanto del oxidante como del reductor.<sup>89</sup>

Los procesos de oxidación convencionales se utilizan en el tratamiento del agua para desinfectar el agua, reducir las toxinas, el olor y el color o para reducir los niveles de manganeso y hierro en el agua potable. Estos procesos pueden no destruir todas las toxinas y tener el potencial de crear subproductos de desinfección peligrosos (DBP). El proceso de oxidación avanzada (AOP) utiliza el fuerte poder oxidante de los radicales hidroxilo que pueden reducir los compuestos orgánicos a productos finales inocuos como el dióxido de carbono y el agua.<sup>90</sup>

Las industrias que utilizan AOP para eliminar o reducir los compuestos resistentes a la degradación (recalcitrantes / refractarios) incluyen lugares donde se almacenaron o produjeron productos petrolíferos, productos textiles, pulpa y papel, producción y uso de explosivos, lixiviados de vertederos, desechos hospitalarios, eliminación de patógenos y sustancias químicas disruptivas endocrinas persistentes, desechos de chapado de metales, pesticidas, metales pesados como el cromo y arsénico. Esta amplia y creciente gama de compuestos principalmente orgánicos incluye aquellos que comienzan con concentraciones muy pequeñas en cuerpos de agua pero que, debido a que no se degradan mediante una planta de tratamiento convencional y procesos naturales, persisten en el ambiente y se reciclan dentro del ciclo del agua o se acumulan dentro de los organismos que se vuelven más concentrados y tóxicos a medida que ascienden en la cadena alimentaria.<sup>91</sup>

---

<sup>89</sup> GROTE, Bill., Application of advanced oxidation processes (AOP) in water treatment. 37th Annual Qld Water Industry Operations Workshop. Parklands, Gold Coast, Australia, 2012.

<sup>90</sup> Ibid.

<sup>91</sup> Ibid.

#### 3.4.4.1. Ventajas de los AOP<sup>92</sup>

Algunas de las ventajas de estas nuevas tecnologías frente a los métodos convencionales para el tratamiento de aguas residuales industriales son las siguientes:

- Los contaminantes se destruyen, no se concentran ni cambian de fase.
- Puede alcanzarse la mineralización total de los contaminantes orgánicos.
- Usualmente no generan lodos que requieren tratamiento y/o eliminación.
- Los reactivos utilizados como oxidantes son sustancias que se descomponen durante el proceso en productos inocuos.
- Son muy útiles para eliminar contaminantes refractarios que resisten otros métodos de tratamiento, principalmente el biológico. Mejoran la biodegradabilidad del agua residual, permitiendo acoplar un tratamiento biológico posterior.
- Sirven para tratar contaminantes a muy baja concentración.
- Generalmente mejoran las características organolépticas de las aguas tratadas.
- Eliminan efectos sobre la salud de desinfectantes y oxidantes residuales como el cloro.
- En muchos casos, consumen mucha menos energía que otros métodos.

---

<sup>92</sup> CASTAÑEDA, Amparo. Procesos de Oxidación avanzada aplicados en el tratamiento de aguas de la industria del petróleo. Proyecto de Especialización en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, 2014, p. 15

### 3.4.4.2. Clasificación de los AOP

Los procesos de oxidación avanzada se pueden clasificar como procesos no fotoquímicos y procesos fotoquímicos en función de la participación de la luz en el proceso. <sup>93</sup>

#### Procesos no fotoquímicos<sup>94</sup>

- Ozonización
- Ozonización con H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> / O<sub>3</sub>
- Procesos Fenton ( Fe <sup>2+</sup>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) y relacionados
- Oxidación electroquímica
- Radiolisis y tratamiento con haces de electrones
- Plasma no térmico
- Oxidación de agua sub y supercrítica

#### Procesos fotoquímicos<sup>95</sup>

- Ultravioleta de vacío
- UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>
- UV/O<sub>3</sub>
- UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/O<sub>3</sub>

---

<sup>93</sup> Ibid.

<sup>94</sup> Ibid.

<sup>95</sup> Ibid. p.16

## **Fotocatálisis solar**<sup>96</sup>

- Fotocatálisis homogénea (Foto fenton)
- Mecanismo de catálisis con TiO<sub>2</sub>

A continuación, se presenta una descripción de algunos de los procesos de oxidación mostrados anteriormente.

### ✓ **Ozonización (O<sub>3</sub>)**

El uso de la ozonización en el tratamiento del agua ha sido la aplicación más utilizada en comparación con todos los demás AOP y se ha utilizado para la desinfección, el control del olor y la eliminación del color. La degradación de los contaminantes en el agua mediante la ozonización se produce a través de dos mecanismos. El primero es la oxidación directa por ozono, que es un proceso altamente selectivo con bajas velocidades de reacción. El otro es un mecanismo indirecto para producir radicales hidroxilo.<sup>97</sup>

Una importante limitación de la ozonización es la formación de subproductos potencialmente nocivos que reaccionan con compuestos de fondo en el agua, uno de los cuales, el bromato, está regulado y se considera un posible carcinógeno humano. Entonces es importante optimizar los procesos de desinfección y oxidación de la ozonización para minimizar la formación de subproductos tóxicos.<sup>98</sup>

---

<sup>96</sup> Ibid.

<sup>97</sup> GILMOUR, Charles., Op, Cit.

<sup>98</sup> Ibid.

Estudios experimentales han demostrado que la oxidación con ozono puede lograr resultados satisfactorios en torno a la remoción de la demanda química de oxígeno (DQO) y en la degradación de fenoles con unas eficiencias de 19.2% y 18% respectivamente.<sup>99 100</sup>

✓ **O<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>**

La ozonización se realiza en medio alcalino para aumentar la velocidad de descomposición del ozono, incrementando así la velocidad de generación de radicales hidroxilo. La generación de radicales hidroxilo puede ser aumentada con la adición de peróxido de hidrógeno (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), ampliando la concentración de los mismos en el agua. Se logra una mejoría agregando agua oxigenada.

El uso de dos o más oxidantes combinados permite aprovechar los posibles efectos sinérgicos entre ellos, lo que produce una destrucción adicional de la carga orgánica. Sin embargo, como existe una gran dosis de empirismo en el uso de mezclas oxidantes, es difícil prever el rendimiento, que debe determinarse en ensayos de laboratorio. Entre las posibles mezclas de agentes oxidantes, la combinación peróxido de hidrógeno y ozono es sin duda la más usada. El proceso pretende combinar la oxidación directa del ozono con la reacción rápida y poco selectiva de los radicales HO• con los compuestos orgánicos.

---

<sup>99</sup> CEHOVIN M, et al. Hydrodynamic cavitation in combination with the ozone, hydrogen peroxide and the UV-based advanced oxidation processes for the removal of natural organic matter from drinking water. *Ultrasonics Sonochemistry*, Vol 37, 2017. p. 400.

<sup>100</sup> RAMIREZ, Clementina. Oxidación de fenoles con peróxido de hidrogeno y ozono. XXVIII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Cancún, 2002, p.4.

El proceso es caro pero rápido, y puede tratar contaminantes orgánicos presentes en muy bajas concentraciones (ppb), a pH entre 7 y 8; la relación molar óptima  $O_3/H_2O_2$  es  $\cong 2:1$ .<sup>101</sup>

Mientras que usando solo peróxido de hidrógeno, se tiene una eficiencia de remoción de 93% en cianuro<sup>102</sup> y entre 50-65% de fenoles.<sup>103</sup> Este proceso combinado permite la remoción de DQO en un 43.6%<sup>104</sup> y de fenoles entre 65% y 80%.<sup>105</sup>

### ✓ UV

Este proceso aprovecha la irradiación a longitudes de onda por debajo de 190 nm., y usa habitualmente lámparas de Xe ( $\lambda = 172$  nm). La excitación electrónica en esta longitud de onda lleva, en la mayoría de los casos, a la ruptura homolítica de uniones químicas y puede producir la degradación de materia orgánica tanto en fase condensada como en gaseosa.

El equipo de desinfección UV es sencillo en su diseño, operación y mantenimiento. Consiste en un bulbo o tubo de cuarzo que emite radiación UV. El agua infectada que se pone en contacto con este tipo de radiación recibe una dosis de la misma y de esta manera los microorganismos son inactivados.

---

<sup>101</sup> CASTAÑEDA, Amparo. Op. cit. p 20-21

<sup>102</sup> QUISPE, Luz., et al. Op. cit. 117.

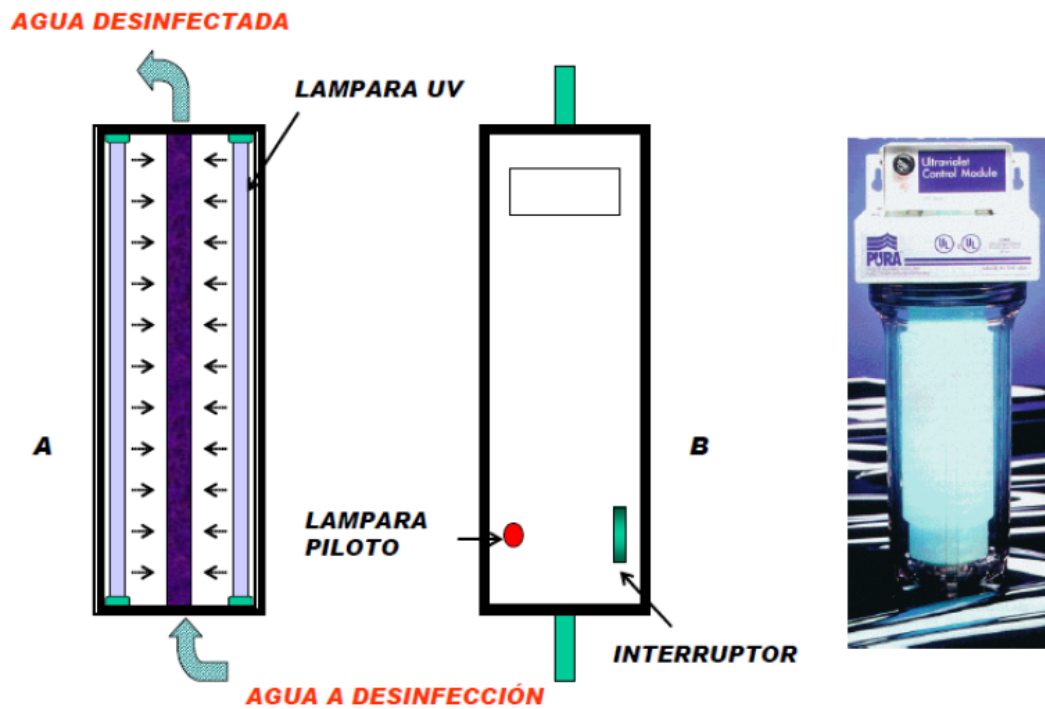
<sup>103</sup> RAMIREZ, Clementina. Op. cit. p 2-3.

<sup>104</sup> CEHOVIN M, et al. Op. cit. p 400.

<sup>105</sup> RAMIREZ, Clementina. Op. cit. p 6

En su paso a desinfección, el agua circula a través de un compartimiento donde se encuentran una o más lámparas UV. El tubo por donde circula el agua es de nylon, PVC transparente, cuarzo o algún otro material transparente a la radiación y si se forma sarro en el mismo o se ensucia, debe limpiarse o reemplazarse ya que puede disminuir la efectividad.<sup>106</sup> La eliminación de cianuro bajo radiación de UV llega al 24%.<sup>107</sup>

**Figura 5. Lámpara UV**



Fuente: Modificado de CASTAÑEDA, Amparo. Procesos de Oxidación avanzada aplicados en el tratamiento de aguas de la industria del petróleo. Proyecto de Especialización en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, 2014, p 30.

<sup>106</sup> Ibid.

<sup>107</sup> QUISPE, Luz., et al. Eliminación de cianuro mediante sistema combinado UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub>. Revista Bolivariana de Química. Vol. 28. 2011. p 5.

## ✓ UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>

Este proceso de oxidación avanzada implica la formación de radicales hidroxilo por fotólisis del peróxido de hidrógeno y sus consiguientes reacciones de propagación. El mecanismo más comúnmente aceptado para la fotólisis del peróxido de hidrógeno es la ruptura homolítica del enlace O-O debida a la acción ultravioleta para formar dos radicales hidroxilo.<sup>108</sup>



Las ventajas de UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> son que tiene altas velocidades de reacción y un diseño de reactor modular, lo que reduce la huella en la planta de tratamiento. Dado que se utilizan lámparas UV-254 nm, el sistema también proporciona desinfección. A diferencia de la ozonización y la cloración, no se producen subproductos tóxicos de desinfección después del tratamiento que requieren costosas unidades de eliminación. Por otro lado, UV / H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> requiere agua con una muy alta transmitancia UV. Se requiere una unidad de filtración de pretratamiento para disminuir la turbidez antes de que el agua ingrese al reactor, especialmente en aplicaciones de aguas residuales. La energía para las lámparas UV y las etapas de adición y remoción del peróxido de hidrógeno resultan en un alto costo de operación.<sup>109</sup>

Con la reacción dada en este proceso se pueden obtener eficiencias de remoción de hasta 55% en la concentración de DQO.<sup>110</sup> Para obtener una remoción en la carga contaminante de cianuros, estudios han demostrado que al adicionar TiO<sub>2</sub> a este tratamiento, se pueden obtener reducciones de hasta 99%.<sup>111</sup>

---

<sup>108</sup> CASTAÑEDA, Amparo. Op. cit. p 31.

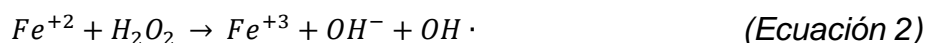
<sup>109</sup> Ibid.

<sup>110</sup> DINCER, Ar. Removal of COD from oil recovery industry wastewater by the advanced oxidation processes (AOP) based on H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. Global NEST Journal, Vol. 10. 2008. p 37.

<sup>111</sup> QUISPE, Luz., et al. Op. cit. p 117.

✓ **UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/Fe<sup>+2</sup> (Proceso foto-fenton)**

El proceso se basa en la reacción Fenton (Ecuación 2) a la que se aumenta su eficiencia mediante iluminación, que produce la fotólisis de hidroxocomplejos de Fe<sup>+2</sup> (Formula 17). El Fe<sup>+2</sup> fotogenerado produce radicales OH• adicionales (Ecuación 3). El proceso es catalítico ya que el Fe<sup>+2</sup> oxidado a Fe<sup>+3</sup> en la reacción de Fenton, se reduce de nuevo a Fe<sup>+2</sup> por acción de la radiación. Ambas reacciones generan radicales hidroxilo.<sup>112</sup> Esta combinación de procesos de oxidación avanzada tiene, según estudios, una eficiencia de remoción de 81% de la demanda química de oxígeno.<sup>113</sup>



✓ **UV/O<sub>3</sub>**

El ozono (un gas con carácter oxidante por sí mismo) ve potenciada su actividad en muchos casos por la aplicación de radiación UV, generalmente a 254 nm. Esto se debe a que la molécula de O<sub>3</sub> se descompone a través de una secuencia de reacciones que le llevan a formar el radical hidroxilo.



---

<sup>112</sup> CASTAÑEDA, Amparo. Op. cit. p 34.

<sup>113</sup> DINCER, Ar.Op. cit. p 37.

El peróxido de hidrógeno así generado se fotoliza a su vez según la ecuación:



Y reacciona con el exceso de ozono, generando también radicales del siguiente modo:<sup>114</sup>



Estudios han demostrado, que este tipo de tratamiento puede alcanzar una eficiencia de 45.7% en la remoción de DQO.<sup>115</sup>

#### ✓ **Cavitación hidrodinámica con AOP's.**

La cavitación hidrodinámica se define como la formación, crecimiento y colapso de las burbujas de gas o vapor en un líquido como consecuencia de la variación de presión que puede producir condiciones de temperatura y presión localizadas muy elevadas comparadas con la temperatura ambiente. En la cavitación hidrodinámica, se generan burbujas de vapor como consecuencia de la reducción de la presión, lo que genera un flujo de dos fases denominado flujo de cavitación. Por lo tanto, un líquido está cavitando cuando las burbujas de vapor se forman y crecen como consecuencia de la reducción de la presión.

La cavitación hidrodinámica se puede aplicar como:

- Una fuente de especies químicas y radicales, entre las que se encuentra el peróxido de hidrógeno, radicales hidroxilos e hidroperóxido.

---

<sup>114</sup> Ibid.

<sup>115</sup> CEHOVIN M, et al. Op. cit. p 400.

- Un mecanismo para mejorar la transferencia de masa de oxidantes, la dispersión y solubilidad de solutos existentes debido a los efectos mecánicos en líquidos (la ocurrencia de HC causará fenómenos turbulentos severos, tensiones de cizallamiento extremas, pulsaciones de velocidad y presión, evaporación y condensación del líquido así como los componentes disueltos de la solución gaseosa, difusión y dispersión intensas de las sustancias, acompañadas de pérdidas de presión, disipación de calor, ondas de choque, etc.)
- Un proceso híbrido en combinación con otros procesos.

Se observó que el tratamiento combinado con cavitación hidrodinámica podría afectar significativamente el rendimiento de los AOP aplicados. Las eficiencias de remoción de DQO de los procesos de oxidación avanzada con cavitación hidrodinámica son:<sup>116</sup>

**Tabla 3. Eficiencias AOPs con cavitación hidrodinámica**

Proceso	Eficiencia (%)
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> + O <sub>3</sub> + HC	40.5
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> + UV + HC	30.8
O <sub>3</sub> + UV + HC	23.5

Fuente: Modificado de CEHOVIN M, et al. Hydrodynamic cavitation in combination with the ozone, hydrogen peroxide and the UV-based advanced oxidation processes for the removal of natural organic matter from drinking water. Ultrasonics Sonochemistry, Vol 37, 2017. p 400.

<sup>116</sup> CEHOVIN M, et al. Op. cit. p 394-395.

### 3.5. Tabla resumen de tecnologías de tratamiento

En la tabla 4 se resumen todos los tratamientos mencionados a lo largo de este capítulo, en ésta se muestran los parámetros que reducen cada uno de dichos tratamientos y sus respectivas eficiencias de remoción.

**Tabla 4. Resumen de tecnologías de tratamientos**

Equipo	Parámetro que reduce	Eficiencia (%)
<b>Adsorción de lecho compacto</b>	Hidrocarburos totales (THP)	99,26
	Grasas y aceites	99,21
	Benceno	<84.08
	tolueno	<89.94
	Etilbenceno	<89.89
	Xileno	<96.63
<b>Celda Microburbujas Aire</b>	Grasas y aceites	93,92
	Sólidos totales	99,08
	Oxígeno disuelto (Aumento de concentración)	221,05
<b>Celda Microburbujas Nitrógeno</b>	Grasas y aceites	85,84
	Sólidos totales	70,08
	Oxígeno disuelto (Aumento de concentración)	200
<b>Centrífuga tubular</b>	Cloruros	29,6
	DQO	29,1
<b>Cyclotech</b>	Aceite disuelto	>50

Equipo	Parámetro que reduce	Eficiencia (%)
	Aceite disperso	99
	HPAs	>50
DAF	Aceites	90
	DBO	40
	Sólidos suspendidos totales	95
	NH3	73
Humedal Artificial	NO3	-
	Fósforo	75
	DBO	92
	DQO	40
	TOC	90
	THP	95
	Grasas y aceites	94
	Benceno	100
	tolueno	100
	Etilbenceno	100
	Xileno	100
	Turbidez	90
	TDS	9
	Alcalinidad	73
Electrodiálisis	Grasas y aceites	95,5
	DBO	84,5
	BTEX	99,1
	TDS	88,9
Equipos en serie (decanter, centrífuga de platos, centrífuga tubular)	Cloruros	25,84
	DQO	34,1
Filtro de cáscara de Nuez	Sólidos totales	95
	Aceite	90
Filtros biológicos aireados	Nitrógeno	70
	Aceite	80
	DQO	60
	DBO	95
	SST	85
H2O2	Fenoles	50-65
	Cianuro	93
H2O2 + O3	DQO	43,6
	Fenoles	65-80

Equipo	Parámetro que reduce	Eficiencia (%)
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> + O <sub>3</sub> + HC (Cavitación Hidrodinámica)	DQO	40,5
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> + UV + HC	DQO	30,8
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> + UV + TiO <sub>2</sub>	Cianuro	99
Hidrociclones	Aceite disperso	98
Interceptor de placas paralelas / corrugadas (CPI)	Grasas y aceites (aceite disperso)	95
Microfiltración	DQO	35
	COT	25
	Grasas y aceites	92
	Fenoles	35
O <sub>3</sub>	DQO	19,2
	Fenoles	18
O <sub>3</sub> + HC	DQO	11,7
O <sub>3</sub> + UV	DQO	45,7
O <sub>3</sub> + UV + HC	DQO	23,5
Osmosis Inversa	Solutos de agua	99
	Radionucleidos	>99
	STD	>99,4
	Amoniacó	80
	Boro	<50
	Cloruros	98
	Sales	98
Metales pesados	98	
Proceso foto-fenton (H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> +Fe+2)	DQO	81
Evaporación rápida por aspersión (RSE)	Ca	97,97
	Mg	99,65
	Na	99,36
	K	99,68
	Cloruros	98,2
	Sulfatos	99,51
	Bicarbonato	99,64
	Fosfatos	100

Equipo	Parámetro que reduce	Eficiencia (%)
	CO2	100
	TDS	99,66
<b>Separador API</b>	Grasas y aceites	90
<b>Steam Stripping</b>	Metanol	10 - 80%
	Aceite disuelto	>90
	BTEX	>90
	Benceno	>90
	HPAs	>90
	Aceite disperso	85
<b>Tanque desnatador</b>	Grasas y aceites	95
<b>Ultrafiltración</b>	HT	96
	BTX	54
	Cu	95
	Zn	95
	SST	100
<b>UV</b>	Cianuro	24
<b>UV/H2O2</b>	DQO	55

#### 4. PLANTA MODELO PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA COMBINANDO TECNOLOGÍAS DE FLOTACIÓN Y PROCESOS DE OXIDACIÓN

Con el propósito de diseñar una planta modelo para el tratamiento de agua de producción combinando las tecnologías de flotación y procesos de oxidación avanzada a fin de dar cumplimiento a la normatividad técnica, legal y ambiental vigente para vertimientos de agua, se procedió a realizar un diagrama de flujo en el cual se tienen en cuenta cada uno de los valores límites máximos permisibles en el área de producción de hidrocarburos dados en la Resolución 0631 del 2015, con relación al vertimiento de agua en cuerpos de agua superficiales y se comparan con los datos de calidad de agua de un campo en específico a la salida de los procesos y equipos separadores con el propósito de analizar cada variable y lograr el cumplimiento de la norma para su disposición final, basados en la eficiencia de separación de cada uno de los equipos y tratamientos evaluados.

En la siguiente tabla se encuentran los parámetros asociados a las actividades de producción de hidrocarburos establecidos en la resolución.

**Tabla 5. Parámetros fisicoquímicos a monitorear y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales no domésticas – ARnD a cuerpos de aguas superficiales de actividades asociadas con hidrocarburos (Producción)**

Parámetro	Unidades	Resolución 0631 de 2015
		Producción (Upstream)
<b>Generales</b>		
pH	Unidades de pH	6.00 - 9.00
Demanda química de oxígeno (DQO)	mg/L O <sub>2</sub>	180,00

Parámetro	Unidades	Resolución 0631 de 2015
		Producción (Upstream)
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)	mg/L O <sub>2</sub>	60,00
Sólidos suspendidos totales (SST)	mg/L	50,00
Sólidos sedimentables (SSED)	mg/L	1,00
Grasas y aceites	mg/L	15,00
Fenoles	mg/L	0,20
Sustancias activas al azul de metileno	mg/L	Análisis y reporte
<b>Hidrocarburos</b>		
Hidrocarburos totales (HTP)	mg/L	10,00
Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP)	mg/L	Análisis y reporte
BTEX (Benceno, Tolueno, Etilbenceno, Xileno)	mg/L	Análisis y reporte
Compuestos orgánicos halogenados Adsorbibles (AOX)	mg/L	Análisis y reporte
<b>Compuestos de Fósforo</b>		
Fósforo total (P)	mg/L	Análisis y reporte
Ortofosfatos	mg/L	Análisis y reporte
<b>Compuestos de Nitrógeno</b>		
Nitrato	mg/L	Análisis y reporte
Nitrógeno Amoniacal	mg/L	Análisis y reporte
Nitrógeno total	mg/L	10,00
<b>Iones</b>		
Cianuro total	mg/L	1,00

Parámetro	Unidades	Resolución 0631 de 2015
		Producción (Upstream)
Cloruros	mg/L	1200,00
Fluoruros	mg/L	Análisis y reporte
Sulfatos	mg/L	300,00
Sulfuros	mg/L	1,00
<b>Metales y metaloides</b>		
Arsénico (As)	mg/L	0,10
Bario (Ba)	mg/L	Análisis y reporte
Cadmio (Cd)	mg/L	0,10
Cinc (Zn)	mg/L	3,00
Cobre (Cu)	mg/L	1,00
Cromo (Cr)	mg/L	0,50
Hierro (Fe)	mg/L	3,00
Mercurio (Hg)	mg/L	0,01
Níquel (ni)	mg/L	0,50
Plata (Ag)	mg/L	Análisis y reporte
Plomo (Pb)	mg/L	0,20
Selenio (Se)	mg/L	0,20
Vanadio (V)	mg/L	1,00
<b>Otros parámetros para análisis y reporte</b>		
Acidez total	mg/L CaCO <sub>3</sub>	Análisis y reporte
Alcalinidad total	mg/L CaCO <sub>3</sub>	Análisis y reporte
Dureza cálcica	mg/L CaCO <sub>3</sub>	Análisis y reporte
Dureza total	mg/L CaCO <sub>3</sub>	Análisis y reporte
Color real	m-1	Análisis y reporte

Fuente: MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE, Resolución 0631(17 de marzo de 2015). Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones. 2015. p. 12-14

#### 4.1. Aguas de producción estudiadas

Con el propósito de realizar una planta modelo para tratamiento de aguas de producción, se utilizó la información de dos campos colombianos relacionada con los parámetros fisicoquímicos del agua asociada de estos a la salida del separador para así generar alternativas de tratamiento.

El primero de estos campos, ubicado en la zona occidental del departamento de Santander, Cuenca del Valle Medio Magdalena, por motivos de confidencialidad, será llamado UIS 1.

**Tabla 6. Parámetros fisicoquímicos campo UIS 1**

Parámetro	Unidades	CAMPO
		UIS I
<b>Generales</b>		
pH	Unidades de pH	8,10
<b>Demanda química de oxígeno (DQO)</b>	mg/L O <sub>2</sub>	927,00
<b>Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)</b>	mg/L O <sub>2</sub>	465,00
<b>Sólidos suspendidos totales (SST)</b>	mg/L	477,00
<b>Sólidos sedimentables (SSED)</b>	mg/L	1,70
<b>Grasas y aceites</b>	mg/L	5683,00
<b>Fenoles</b>	mg/L	0,54
<b>Sustancias activas al azul de metileno</b>	mg/L	--
<b>Hidrocarburos</b>		
<b>Hidrocarburos totales (HTP)</b>	mg/L	--
<b>Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP)</b>	mg/L	0,00
<b>BTEX (Benceno, Tolueno, Etilbenceno, Xileno)</b>	mg/L	8,91

Parámetro	Unidades	CAMPO
		UIS I
Compuestos orgánicos halogenados Adsorbibles (AOX)	mg/L	0,00
<b>Compuestos de Fósforo</b>		
Fósforo total (P)	mg/L	0,22
Ortofosfatos	mg/L	0,20
<b>Compuestos de Nitrógeno</b>		
Nitrato	mg/L	0,34
Nitrógeno Amoniacal	mg/L	--
Nitrógeno total	mg/L	2,70
<b>Iones</b>		
Cianuro total	mg/L	0,01
Cloruros	mg/L	11200,00
Fluoruros	mg/L	--
Sulfatos	mg/L	44,50
Sulfuros	mg/L	1,00
<b>Metales y metaloides</b>		
Arsénico (As)	mg/L	0,00
Bario (Ba)	mg/L	3,28
Cadmio (Cd)	mg/L	0,02
Cinc (Zn)	mg/L	0,53
Cobre (Cu)	mg/L	0,55
Cromo (Cr)	mg/L	0,14
Hierro (Fe)	mg/L	2,63
Mercurio (Hg)	mg/L	0,00
Níquel (Ni)	mg/L	0,85
Plata (Ag)	mg/L	0,03
Plomo (Pb)	mg/L	0,05
Selenio (Se)	mg/L	0,00
Vanadio (V)	mg/L	0,44
<b>Otros parámetros para análisis y reporte</b>		
Acidez total	mg/L CaCO3	21,30
Alcalinidad total	mg/L CaCO3	997,00
Dureza cálcica	mg/L CaCO3	323,00
Dureza total	mg/L CaCO3	376,00
Color real	m-1	132,00

Fuente: COMPAÑÍA OPERADORA, Plan de reconversión a tecnologías limpias en gestión de vertimientos Campo UIS 1.

Además, se trabajó con la información disponible de Campo Escuela Colorado con el objetivo de ratificar que la metodología aplicada en este trabajo puede ser utilizada en diferentes campos del país. La siguiente tabla contiene los parámetros fisicoquímicos del agua en este campo.

**Tabla 7. Análisis fisicoquímicos del agua de producción de Campo Escuela Colorado, 2013**

Parámetro	Unidades	Campo
		Colorado
<b>Generales</b>		
pH	Unidades de pH	7,66
Demanda química de oxígeno (DQO)	mg/L O <sub>2</sub>	4012
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)	mg/L O <sub>2</sub>	440
Sólidos suspendidos totales (SST)	mg/L	1110
Sólidos sedimentables (SSED)	mg/L	-
Grasas y aceites	mg/L	362,3
Fenoles	mg/L	-
Sustancias activas al azul de metileno	mg/L	0,283
<b>Hidrocarburos</b>		
Hidrocarburos totales (HTP)	mg/L	-
Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP)	mg/L	-
BTEX (Benceno, Tolueno, Etilbenceno, Xileno)	mg/L	-
Compuestos orgánicos halogenados Adsorbibles (AOX)	mg/L	-
<b>Compuestos de Fósforo</b>		
Fósforo total (P)	mg/L	-
Ortofosfatos	mg/L	-
<b>Compuestos de Nitrógeno</b>		

Parámetro	Unidades	Campo
		Colorado
Nitrato	mg/L	0,41
Nitrógeno Amoniacal	mg/L	4,63
Nitrógeno total	mg/L	-
<b>Iones</b>		
Cianuro total	mg/L	-
Cloruros	mg/L	17867,6
Fluoruros	mg/L	-
Sulfatos	mg/L	67,7
Sulfuros	mg/L	-
<b>Metales y metaloides</b>		
Arsénico (As)	mg/L	0,14
Bario (Ba)	mg/L	102,4
Cadmio (Cd)	mg/L	0,081
Cinc (Zn)	mg/L	0,052
Cobre (Cu)	mg/L	-
Cromo (Cr)	mg/L	-
Hierro (Fe)	mg/L	0,6
Mercurio (Hg)	mg/L	-
Níquel (ni)	mg/L	0,35
Plata (Ag)	mg/L	-
Plomo (Pb)	mg/L	0,64
Selenio (Se)	mg/L	0,36
Vanadio (V)	mg/L	-
<b>Otros parámetros para análisis y reporte</b>		
Acidez total	mg/L CaCO3	-
Alcalinidad total	mg/L CaCO3	-
Dureza cálcica	mg/L CaCO3	-
Dureza total	mg/L CaCO3	-
Color real	m-1	-

Fuente: BENAVIDES, Jhon y JAIMES, Yureynis. Factibilidad técnico-financiera de los usos alternativos del agua de producción en Campo Escuela Colorado. Tesis de ingeniería de petróleos. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías fisicoquímicas.

#### 4.2. Comparativa entre los parámetros del agua de la resolución 0631 de 2015 contra los parámetros del agua de producción de los campos estudiados.

A continuación, se muestra la comparación de los datos de cada campo con respecto a la Resolución 0631 de 2015 con el propósito de determinar que parámetros superan los valores límites máximos permisibles establecidos en esta.

**Tabla 8. Comparativa entre la Resolución 0631 de 2015 y UIS 1**

Parámetro	Unidades	Resolución 0631 de 2015	CAMPO	Estado UIS 1
		Producción (Upstream)	UIS I	
<b>Generales</b>				
<b>pH</b>	Unidades de pH	6.00 - 9.00	8,10	CUMPLE
<b>Demanda química de oxígeno (DQO)</b>	mg/L O2	180,00	927,00	INCUMPLE
<b>Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)</b>	mg/L O2	60,00	465,00	INCUMPLE
<b>Sólidos suspendidos totales (SST)</b>	mg/L	50,00	477,00	INCUMPLE
<b>Sólidos sedimentables (SSED)</b>	mg/L	1,00	1,70	INCUMPLE
<b>Grasas y aceites</b>	mg/L	15,00	5683,00	INCUMPLE
<b>Fenoles</b>	mg/L	0,20	0,54	INCUMPLE
<b>Sustancias activas al azul de metileno</b>	mg/L	Análisis y reporte	--	CUMPLE
<b>Hidrocarburos</b>				
<b>Hidrocarburos totales (HTP)</b>	mg/L	10,00	--	CUMPLE
<b>Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP)</b>	mg/L	Análisis y reporte	0,00	CUMPLE

Parámetro	Unidades	Resolución 0631 de 2015	CAMPO	Estado UIS 1
		Producción (Upstream)	UIS I	
<b>BTEX (Benceno, Tolueno, Etilbenceno, Xileno)</b>	mg/L	Análisis y reporte	8,91	CUMPLE
<b>Compuestos orgánicos halogenados Adsorbibles (AOX)</b>	mg/L	Análisis y reporte	0,00	CUMPLE
<b>Compuestos de Fósforo</b>				
<b>Fósforo total (P)</b>	mg/L	Análisis y reporte	0,22	CUMPLE
<b>Ortofosfatos</b>	mg/L	Análisis y reporte	0,20	CUMPLE
<b>Compuestos de Nitrógeno</b>				
<b>Nitrato</b>	mg/L	Análisis y reporte	0,34	CUMPLE
<b>Nitrógeno Amoniacal</b>	mg/L	Análisis y reporte	--	CUMPLE
<b>Nitrógeno total</b>	mg/L	10,00	2,70	CUMPLE
<b>Iones</b>				
<b>Cianuro total</b>	mg/L	1,00	0,01	CUMPLE
<b>Cloruros</b>	mg/L	1200,00	11200,00	INCUMPLE
<b>Fluoruros</b>	mg/L	Análisis y reporte	--	CUMPLE
<b>Sulfatos</b>	mg/L	300,00	44,50	CUMPLE
<b>Sulfuros</b>	mg/L	1,00	1,00	CUMPLE
<b>Metales y metaloides</b>				
<b>Arsénico (As)</b>	mg/L	0,10	0,00	CUMPLE
<b>Bario (Ba)</b>	mg/L	Análisis y reporte	3,28	CUMPLE
<b>Cadmio (Cd)</b>	mg/L	0,10	0,02	CUMPLE
<b>Cinc (Zn)</b>	mg/L	3,00	0,53	CUMPLE
<b>Cobre (Cu)</b>	mg/L	1,00	0,55	CUMPLE
<b>Cromo (Cr)</b>	mg/L	0,50	0,14	CUMPLE
<b>Hierro (Fe)</b>	mg/L	3,00	2,63	CUMPLE
<b>Mercurio (Hg)</b>	mg/L	0,01	0,00	CUMPLE
<b>Níquel (Ni)</b>	mg/L	0,50	0,85	INCUMPLE
<b>Plata (Ag)</b>	mg/L	Análisis y reporte	0,03	CUMPLE
<b>Plomo (Pb)</b>	mg/L	0,20	0,05	CUMPLE
<b>Selenio (Se)</b>	mg/L	0,20	0,00	CUMPLE
<b>Vanadio (V)</b>	mg/L	1,00	0,44	CUMPLE
<b>Otros parámetros para análisis y reporte</b>				

Parámetro	Unidades	Resolución 0631 de 2015	CAMPO	Estado UIS 1
		Producción (Upstream)	UIS I	
Acidez total	mg/L CaCO <sub>3</sub>	Análisis y reporte	21,30	CUMPLE
Alcalinidad total	mg/L CaCO <sub>3</sub>	Análisis y reporte	997,00	CUMPLE
Dureza cálcica	mg/L CaCO <sub>3</sub>	Análisis y reporte	323,00	CUMPLE
Dureza total	mg/L CaCO <sub>3</sub>	Análisis y reporte	376,00	CUMPLE
Color real	m-1	Análisis y reporte	132,00	CUMPLE

Fuente: Modificado de MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE, Resolución 0631(17 de marzo de 2015). Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones. 2015. p. 12-14

**Tabla 9. Comparativa entre la Resolución 0631 de 2015 y Colorado**

Parámetro	Unidades	Resolución 0631 de 2015	Campo	Estado Colorado
		Producción (Upstream)	Colorado	
<b>Generales</b>				
pH	Unidades de pH	6.00 - 9.00	7,66	CUMPLE
Demanda química de oxígeno (DQO)	mg/L O <sub>2</sub>	180,00	4012	INCUMPLE
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)	mg/L O <sub>2</sub>	60,00	440	INCUMPLE
Sólidos suspendidos totales (SST)	mg/L	50,00	1110	INCUMPLE
Sólidos sedimentables (SSED)	mg/L	1,00	-	CUMPLE
Grasas y aceites	mg/L	15,00	362,3	INCUMPLE

Parámetro	Unidades	Resolución 0631 de 2015	Campo	Estado Colorado
		Producción (Upstream)	Colorado	
Fenoles	mg/L	0,20	-	CUMPLE
Sustancias activas al azul de metileno	mg/L	Análisis y reporte	0,283	CUMPLE
<b>Hidrocarburos</b>				
Hidrocarburos totales (HTP)	mg/L	10,00	-	CUMPLE
Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP)	mg/L	Análisis y reporte	-	CUMPLE
BTEX (Benceno, Tolueno, Etilbenceno, Xileno)	mg/L	Análisis y reporte	-	CUMPLE
Compuestos orgánicos halogenados Adsorbibles (AOX)	mg/L	Análisis y reporte	-	CUMPLE
<b>Compuestos de Fósforo</b>				
Fosforo total (P)	mg/L	Análisis y reporte	-	CUMPLE
Ortofosfatos	mg/L	Análisis y reporte	-	CUMPLE
<b>Compuestos de Nitrógeno</b>				
Nitrato	mg/L	Análisis y reporte	0,41	CUMPLE
Nitrógeno Amoniacal	mg/L	Análisis y reporte	4,63	CUMPLE
Nitrógeno total	mg/L	10,00	-	CUMPLE
<b>Iones</b>				
Cianuro total	mg/L	1,00	-	CUMPLE
Cloruros	mg/L	1200,00	17867,6	INCUMPLE
Fluoruros	mg/L	Análisis y reporte	-	CUMPLE
Sulfatos	mg/L	300,00	67,7	CUMPLE
Sulfuros	mg/L	1,00	-	CUMPLE
<b>Metales y metaloides</b>				
Arsénico (As)	mg/L	0,10	0,14	INCUMPLE
Bario (Ba)	mg/L	Análisis y reporte	102,4	CUMPLE
Cadmio (Cd)	mg/L	0,10	0,081	CUMPLE
Cinc (Zn)	mg/L	3,00	0,052	CUMPLE
Cobre (Cu)	mg/L	1,00	-	CUMPLE

Parámetro	Unidades	Resolución 0631 de 2015	Campo	Estado Colorado
		Producción (Upstream)	Colorado	
<b>Cromo (Cr)</b>	mg/L	0,50	-	CUMPLE
<b>Hierro (Fe)</b>	mg/L	3,00	0,6	CUMPLE
<b>Mercurio (Hg)</b>	mg/L	0,01	-	CUMPLE
<b>Níquel (Ni)</b>	mg/L	0,50	0,35	CUMPLE
<b>Plata (Ag)</b>	mg/L	Análisis y reporte	-	CUMPLE
<b>Plomo (Pb)</b>	mg/L	0,20	0,64	INCUMPLE
<b>Selenio (Se)</b>	mg/L	0,20	0,36	INCUMPLE
<b>Vanadio (V)</b>	mg/L	1,00	-	CUMPLE
<b>Otros parámetros para análisis y reporte</b>				
<b>Acidez total</b>	mg/L CaCO <sub>3</sub>	Análisis y reporte	-	CUMPLE
<b>Alcalinidad total</b>	mg/L CaCO <sub>3</sub>	Análisis y reporte	-	CUMPLE
<b>Dureza cálcica</b>	mg/L CaCO <sub>3</sub>	Análisis y reporte	-	CUMPLE
<b>Dureza total</b>	mg/L CaCO <sub>3</sub>	Análisis y reporte	-	CUMPLE
<b>Color real</b>	m-1	Análisis y reporte	-	CUMPLE

Fuente: Modificado de MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE, Resolución 0631(17 de marzo de 2015). Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones. 2015. p. 12-14

#### 4.3. Metodología de selección

Debido a que el proceso de selección de equipos para realizar una planta de tratamiento varía dependiendo de los principales problemas que presenta el agua de producción, existen diferentes alternativas para solucionarlos, por esta razón, se deben tener en cuenta ciertas consideraciones a la hora de escoger cada uno de los equipos, tales como: volumen a tratar, área disponible, presupuestos, disponibilidad de las tecnologías, entre otros.

Este trabajo está enfocado en generar alternativas para el tratamiento de aguas de producción que incluyan tecnologías de flotación y procesos de oxidación avanzada como complemento a los tratamientos convencionales presentes en los campos petroleros. Cabe destacar que las propuestas generadas dependen directamente de los parámetros con mayor carga contaminante ya que la mayoría de los equipos y tratamientos deben centrarse en su remoción.

Para lograr esto, se procedió a realizar un diagrama de flujo, en el cual se incluyen los parámetros de la Resolución 0631 de 2015 con sus valores máximos, y diferentes tratamientos y tecnologías que permiten la reducción de cada uno de estos a valores que estén dentro del rango permitido; siguiendo un proceso lógico se establece un orden de remoción por etapas en las cuales se seleccionan los equipos y tratamientos según las necesidades del campo y el criterio técnico del personal profesional. A continuación, se presenta el diagrama de flujo final con el cual se genera la propuesta de una planta modelo de tratamiento de agua de producción que cumpla con la normatividad técnica, legal y ambiental vigente.

Figura 6. Diagrama de flujo (Parte I)

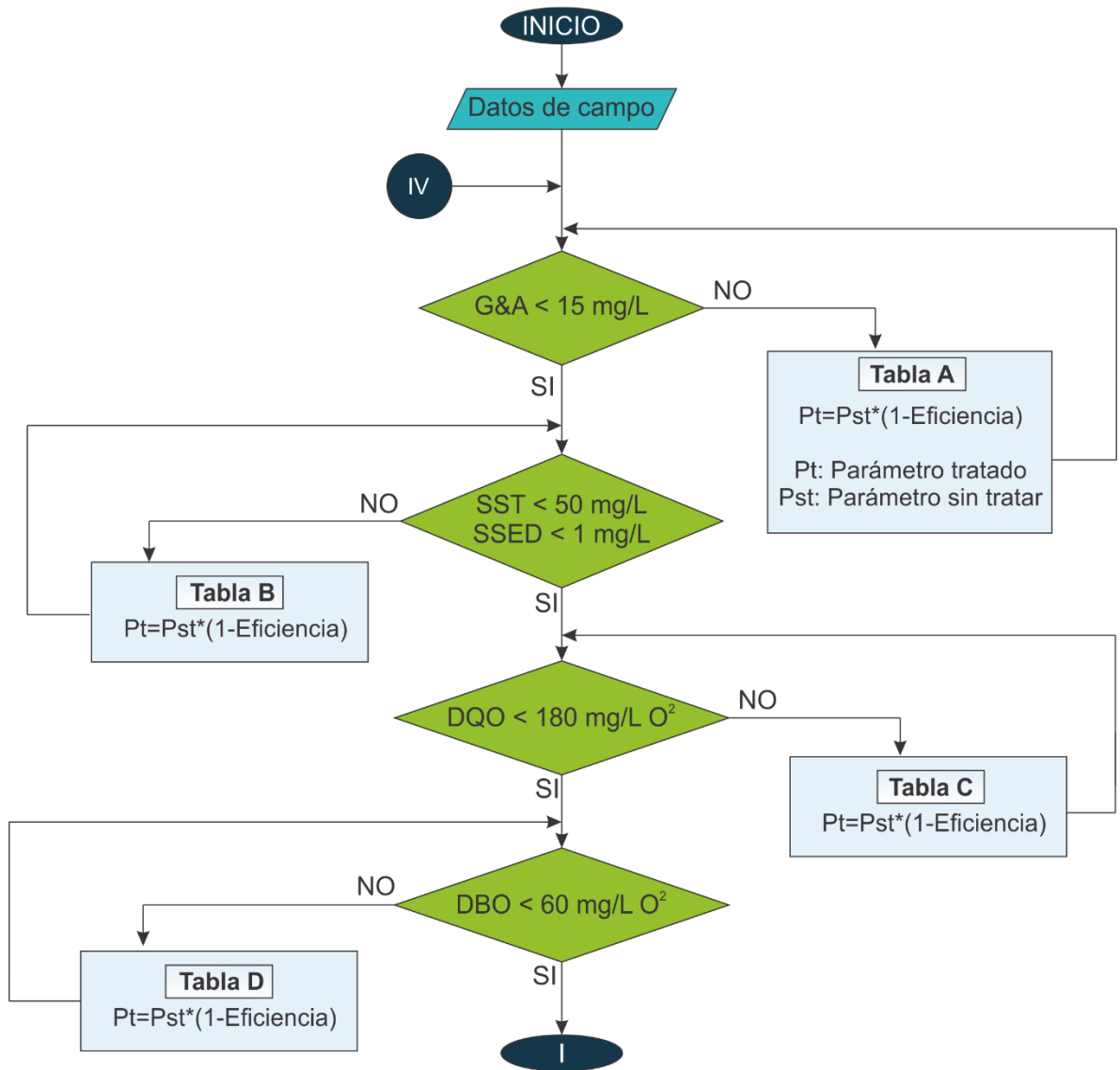


Figura 7. Diagrama de flujo (Parte II)

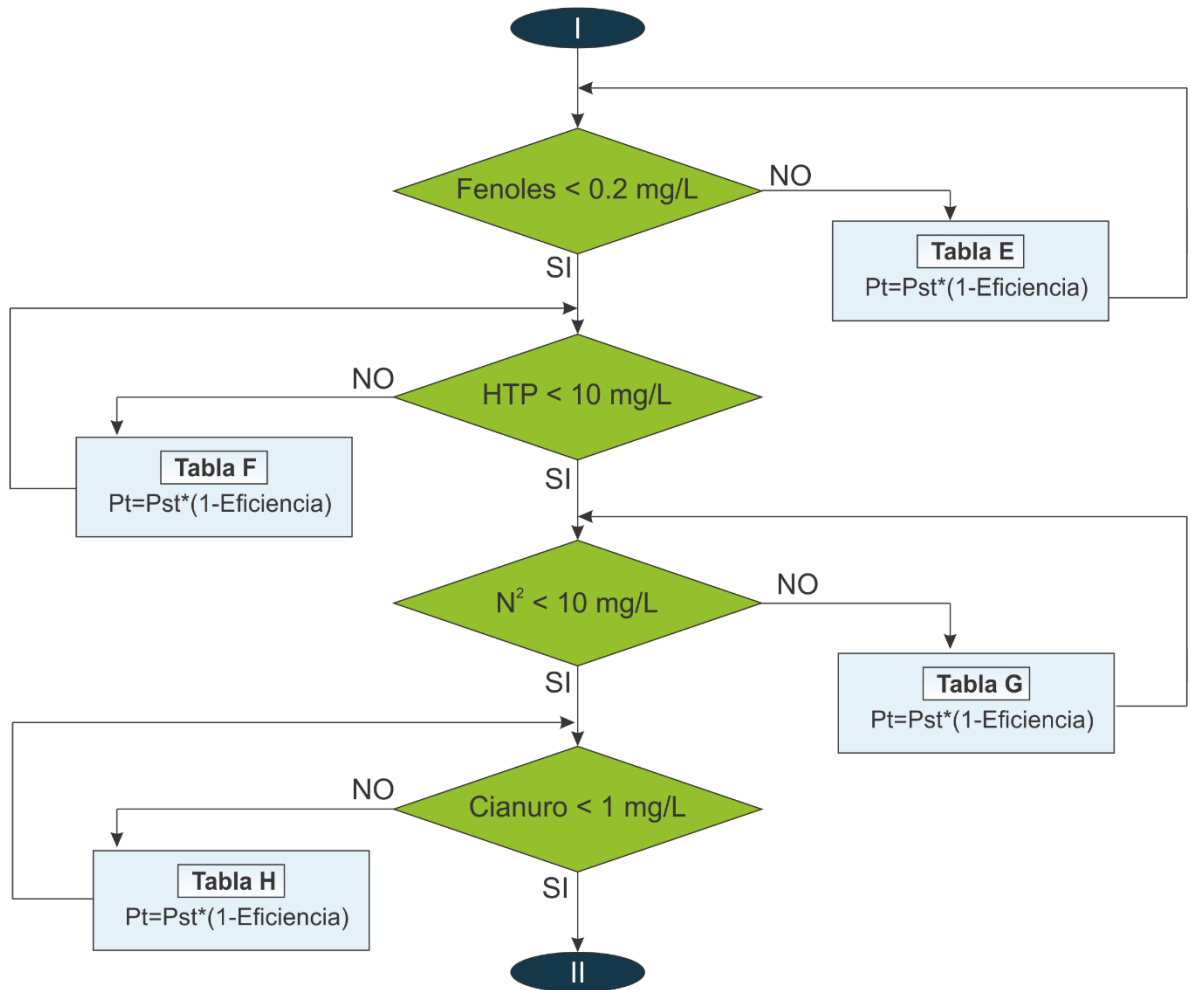
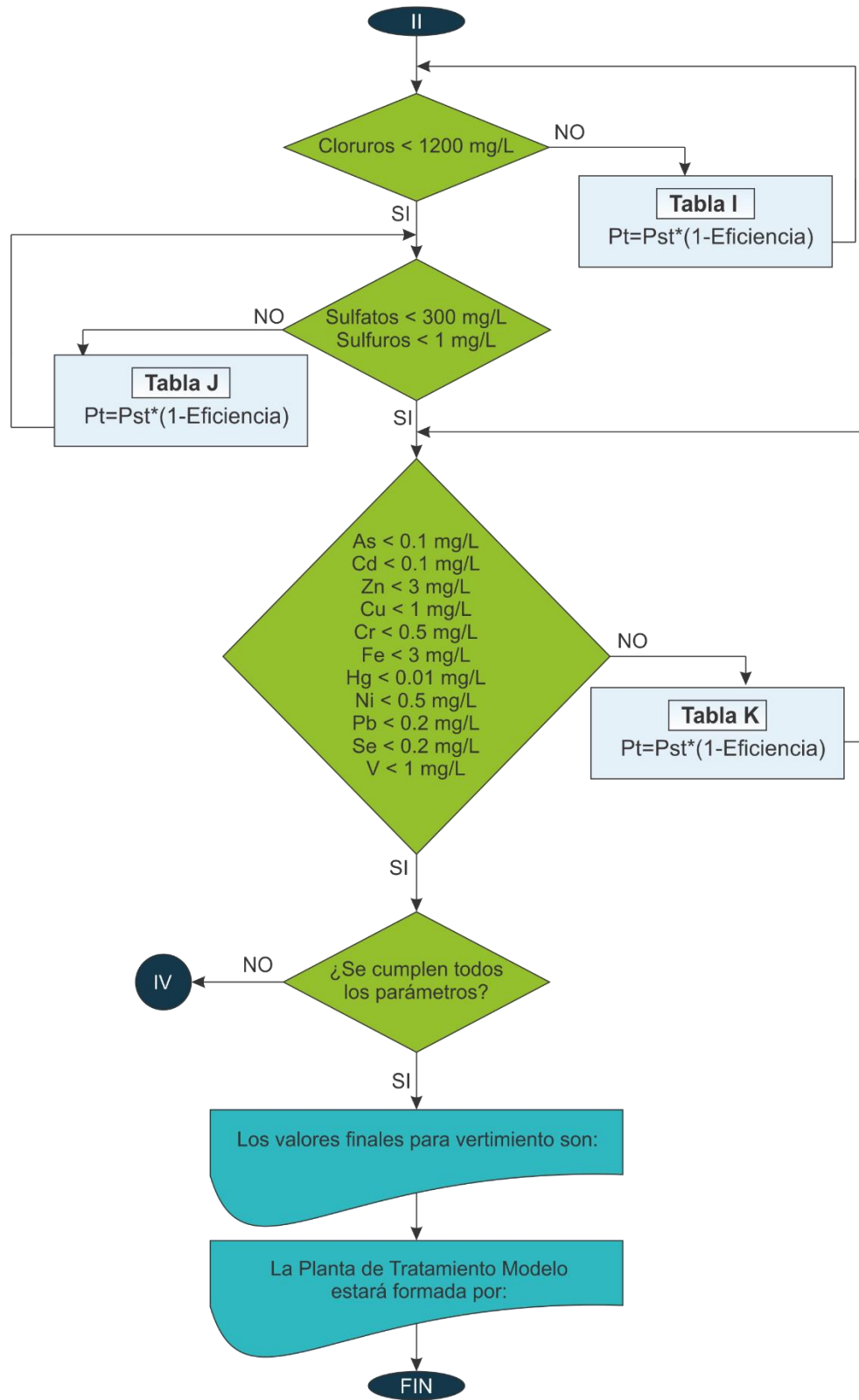


Figura 8. Diagrama de flujo (Parte III)



#### 4.4. Propuestas para planta de tratamiento de UIS I

Basándonos en la comparación realizada, se obtuvieron los parámetros que superaron el límite permisible para vertimiento, por lo cual, la propuesta planteada está enfocada en reducir la carga de contaminantes propia del agua de producción. Estos parámetros se encuentran resumidos en la siguiente tabla:

**Tabla 10. Parámetros que exceden los valores de la resolución 0631 de 2015 para campo UIS 1**

Parámetro	Unidades	Resolución 0631 de 2015	CAMPO
		Producción (Upstream)	UIS I
<b>Demanda química de oxígeno (DQO)</b>	mg/L O <sub>2</sub>	180,00	927,00
<b>Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)</b>	mg/L O <sub>2</sub>	60,00	465,00
<b>Sólidos suspendidos totales (SST)</b>	mg/L	50,00	477,00
<b>Sólidos sedimentables (SSED)</b>	mg/L	1,00	1,70
<b>Grasas y aceites</b>	mg/L	15,00	5683,00
<b>Fenoles</b>	mg/L	0,20	0,54
<b>Cloruros</b>	mg/L	1200,00	11200,00
<b>Níquel (Ni)</b>	mg/L	0,50	0,85

En la tabla 10. se observan que los parámetros de DQO, SST, grasas y aceites, y cloruros son los que presentan mayor concentración en el agua, por lo tanto, la planta de tratamiento para este campo deberá estar enfocada en una fuerte remoción de cada uno de estos.

Para la selección de cada uno de los equipos, se utilizó el diagrama de flujo mostrado en la **figura 6 (Diagrama completo)** (las tablas del diagrama se encuentran en el Anexo A). El procedimiento por seguir se muestra a continuación:

#### 4.4.1. Selección de equipos a partir del diagrama de flujo

- **Llenar la tabla de datos de campo**

Para realizar la selección de los equipos, es necesario diligenciar el “Formato de Datos de Campo” (ver Anexo B); en esta tabla deberán ingresarse los datos correspondientes a cada uno de los parámetros fisicoquímicos del agua de producción para el campo en estudio, para este caso, campo UIS 1.

**Tabla 11. Datos de Campo UIS 1**

Parámetro	Unidades	CAMPO
		UIS I
<b>Generales</b>		
<b>pH</b>	Unidades de pH	8,10
<b>Demanda química de oxígeno (DQO)</b>	mg/L O <sub>2</sub>	927,00
<b>Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)</b>	mg/L O <sub>2</sub>	465,00
<b>Sólidos suspendidos totales (SST)</b>	mg/L	477,00
<b>Sólidos sedimentables (SSED)</b>	mg/L	1,70
<b>Grasas y aceites</b>	mg/L	5683,00
<b>Fenoles</b>	mg/L	0,54
<b>Hidrocarburos</b>		

Parámetro	Unidades	CAMPO
		UIS I
Hidrocarburos totales (HTP)	mg/L	--
<b>Compuestos de Nitrógeno</b>		
Nitrógeno total	mg/L	2,70
<b>Iones</b>		
Cianuro total	mg/L	0,01
Cloruros	mg/L	11200,00
Sulfatos	mg/L	44,50
Sulfuros	mg/L	1,00
<b>Metales y metaloides</b>		
Arsénico (As)	mg/L	0,00
Cadmio (Cd)	mg/L	0,02
Cinc (Zn)	mg/L	0,53
Cobre (Cu)	mg/L	0,55
Cromo (Cr)	mg/L	0,14
Hierro (Fe)	mg/L	2,63
Mercurio (Hg)	mg/L	0,00
Níquel (Ni)	mg/L	0,85
Plomo (Pb)	mg/L	0,05
Selenio (Se)	mg/L	0,00
Vanadio (V)	mg/L	0,44

- **Análisis de grasas y aceites**

Lo primero a realizar es la comprobación de la condición, esta es, que el valor de grasas y aceites (G&A en el diagrama) sea menor a 15 mg/L, límite máximo permitido.<sup>117</sup> En este caso, el dato campo correspondiente a grasas y aceites es 5683 mg/L, entonces no cumple con la condición y por lo tanto debe ser sometido a tratamiento.

<sup>117</sup> MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE, Op. cit., p. 12-14.

Al realizar el análisis de cada uno de los equipos que reducen G&A, se proceder a hacer una selección de acuerdo con la eficiencia de remoción, del criterio técnico del profesional y la disponibilidad de cada uno. Para este campo se seleccionó en primer lugar, un tanque desnatador (línea continua, **figura 9**) que tiene una eficiencia de remoción del 95% de G&A.<sup>118</sup> Con este porcentaje se realiza el cálculo del nuevo valor del parámetro después del tratamiento:

$$G\&A_T = G\&A_{ST} * (1 - Eficiencia) \quad (Ecuación 7)$$

$$G\&A_T = 5683 * (1 - 0.95) = 284.1 \text{ mg/L} \quad (Ecuación 8)$$

Se puede observar que el parámetro al regresar al condicional aun no cumple la condición, por lo tanto, se debe volver a ingresar a la tabla de equipos para utilizar un tratamiento complementario al primero (línea discontinua, **figura 9**). El equipo seleccionado para esta etapa fue el CPI (separador de placas corrugadas) que cuenta con una eficiencia de remoción del 95% de G&A.<sup>119</sup> Al aplicar la eficiencia de remoción se obtiene:

$$G\&A_T = 284.1 * (1 - 0.95) = 14.21 \text{ mg/L} \quad (Ecuación 9)$$

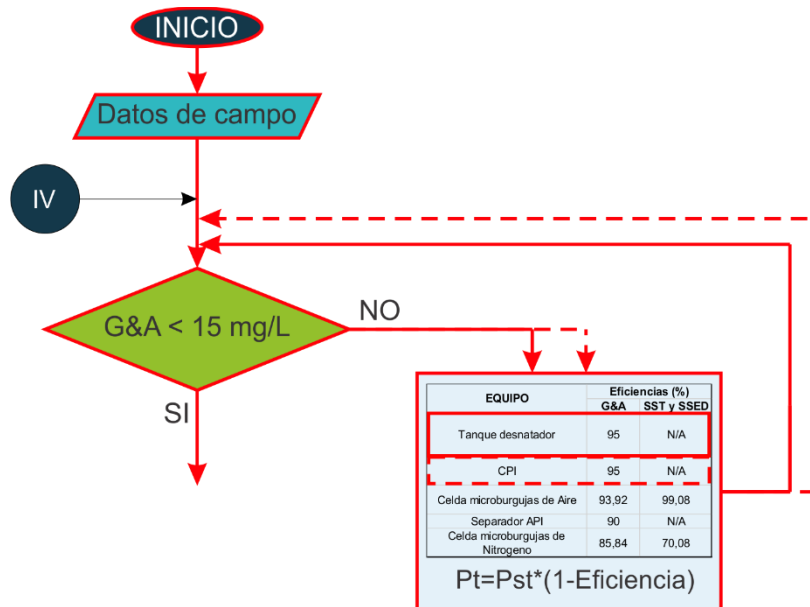
Comprobando nuevamente en el condicional, se tiene que el parámetro de grasas y aceites ya es menor al valor máximo permisible dado por la norma, lo cual permite pasar a la etapa de tratamiento.

---

<sup>118</sup> Oil skimmers, INC the oil removal solution expert, citado por DUARTE, Paola y PATIÑO, Sandra. Op. cit. p 79.

<sup>119</sup> GARCIA, Juan. y HERRERA, Sergio. Op. cit. p 68.

**Figura 9. Condicional para G&A**



- **Análisis de SST y SSED**

Se repite el procedimiento anterior para obtener una reducción en los sólidos suspendidos totales y sólidos sedimentables utilizando los equipos de la figura 10. Como se puede observar, los equipos que tratan este parámetro también tienen una eficiencia de tratamiento para otros, cuando esto sucede, se deben aplicar las remociones correspondientes de cada uno. En este estudio, el primer tratamiento consta de una unidad DAF, la cual tiene una eficiencia de remoción del 95% en SST y SSED<sup>120</sup>, del 90% en grasas y aceites<sup>121</sup> y del 40% en DBO.<sup>122</sup>

Según lo anterior, la reducción de los contaminantes quedaría de la siguiente manera:

$$SST_T = 477 * (1 - 0.95) = 23.85 \text{ mg/L} \quad (\text{Ecuación 10})$$

$$SSED_T = 1.7 * (1 - 0.95) = 0.09 \text{ mg/L} \quad (\text{Ecuación 11})$$

<sup>120</sup> LOPEZ, Luis. Op. cit. p 95

<sup>121</sup> ACOSTA, Diego. y JACOBS, Juan. Op cit. p 125

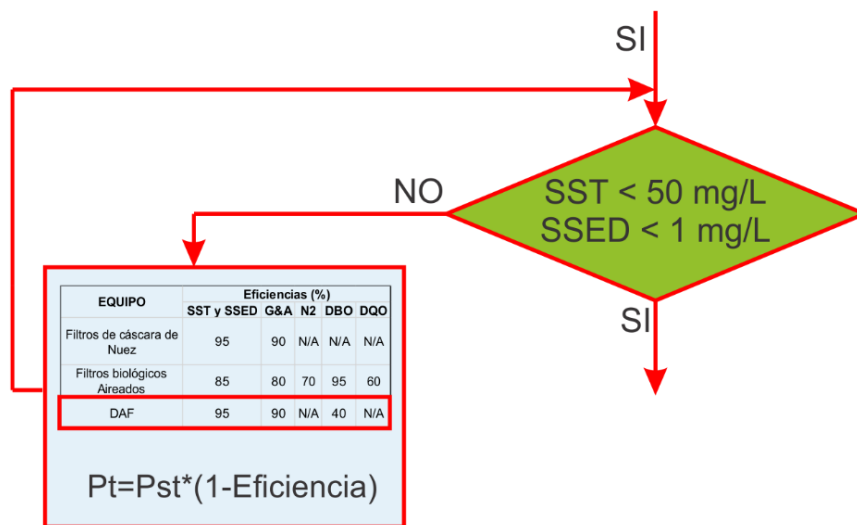
<sup>122</sup> LOPEZ, Luis. Op. cit. p 95

$$G\&A_T = 14.21 * (1 - 0.9) = 1.42 \text{ mg/L} \quad (\text{Ecuación 12})$$

$$DBO_T = 465 * (1 - 0.4) = 279 \text{ mg/L } O_2 \quad (\text{Ecuación 13})$$

Aplicando el condicional, se obtiene que la reducción cumple con el límite establecido en la resolución y por lo tanto se continúa con el diagrama de flujo.

**Figura 10. Condicional para SST y SSED**



- **Análisis de DQO**

Los pasos por seguir son los mismos que en las etapas anteriores, exceptuando que en esta son necesarios tres tipos de tratamiento debido a que la eficiencia de cada uno de estos no es suficiente para la gran carga contaminante de demanda química de oxígeno que trae el agua. Los tratamientos utilizados son:

H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + O<sub>3</sub> con una eficiencia de remoción del 43.6% en DQO<sup>123</sup> y 65% de fenoles.<sup>124</sup>

$$DQO_T = 927 * (1 - 0.436) = 522.83 \text{ mg/L } O_2 \quad (\text{Ecuación 14})$$

<sup>123</sup> CEHOVIN M, et al. Op. cit. p 400.

<sup>124</sup> RAMIREZ, Clementina. Op. cit. p 6

$$Fenoles_T = 0.54 * (1 - 0.65) = 0.19 \text{ mg/L} \quad (\text{Ecuación 15})$$

Filtros biológicos aireados que remueven 60% en DQO<sup>125</sup>, 95% en DBO<sup>126</sup>, 80% de G&A<sup>127</sup> y 85% de SST y SSED.<sup>128</sup>

$$DQO_T = 522.53 * (1 - 0.6) = 209.13 \text{ mg/L } O_2 \quad (\text{Ecuación 16})$$

$$DBO_T = 279 * (1 - 0.95) = 13.95 \text{ mg/L } O_2 \quad (\text{Ecuación 17})$$

$$G\&A_T = 1.42 * (1 - 0.8) = 0.28 \text{ mg/L} \quad (\text{Ecuación 18})$$

$$SST_T = 23.85 * (1 - 0.85) = 3.58 \text{ mg/L} \quad (\text{Ecuación 19})$$

$$SSED_T = 0.09 * (1 - 0.85) = 0.01 \text{ mg/L} \quad (\text{Ecuación 20})$$

Microfiltración con 35% de reducción de DQO<sup>129</sup>, 92% de G&A<sup>130</sup> y 35% de fenoles.<sup>131</sup>

$$DQO_T = 209.13 * (1 - 0.35) = 135.94 \text{ mg/L } O_2 \quad (\text{Ecuación 21})$$

$$G\&A_T = 0.28 * (1 - 0.92) = 0.02 \text{ mg/L} \quad (\text{Ecuación 22})$$

$$Fenoles_T = 0.19 * (1 - 0.35) = 0.12 \text{ mg/L} \quad (\text{Ecuación 23})$$

Como se puede observar, a la salida del último tratamiento (microfiltración) el agua cumple con la normatividad para DQO además de sufrir una reducción en G&A, SST, SSED, DBO y fenoles. Por lo tanto, se pasa a la siguiente condición, la cual es DBO.

---

<sup>125</sup> COLORADO SCHOOL OF MINES. Op. cit. p 7-8.

<sup>126</sup> Ibid.

<sup>127</sup> Ibid.

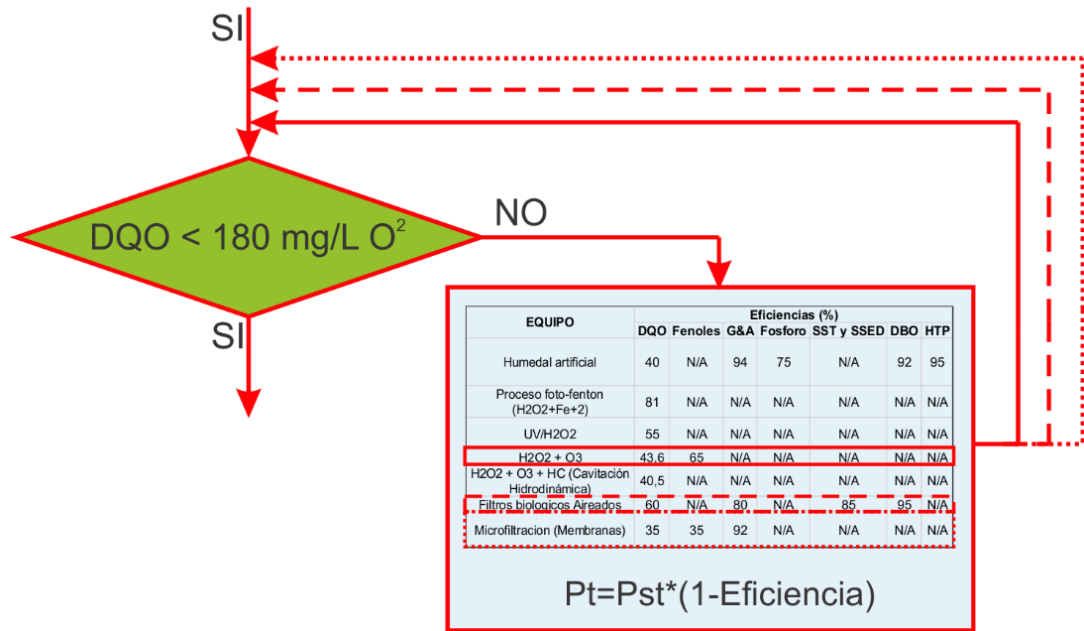
<sup>128</sup> Ibid.

<sup>129</sup> MORALES, María y REVELO, Astrid. Op. cit. p 57-58.

<sup>130</sup> Ibid.

<sup>131</sup> Ibid.

Figura 11. Condicional para DQO

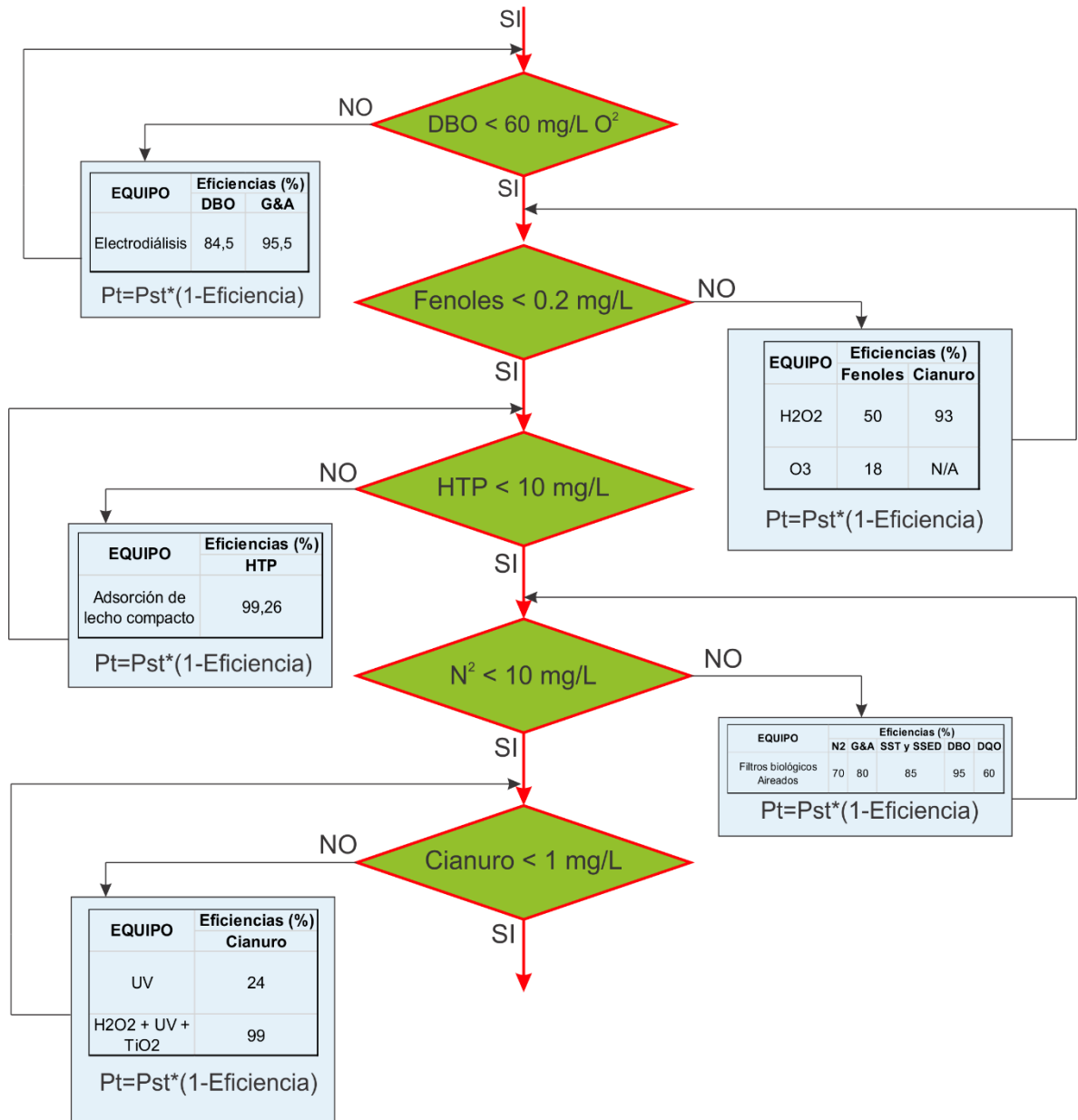


- **Análisis de DBO, fenoles, HTP, nitrógeno y cianuro**

Dado que en etapas anteriores los parámetros de DBO y fenoles fueron tratados indirectamente, es decir, por equipos cuyo principal objetivo no era la reducción de estos y teniendo que sus valores ya tratados cumplen con la normatividad, no es necesario el uso de tratamientos específicos y sus respectivos condicionales son aprobados directamente.

Para el caso de HTP (hidrocarburos totales), nitrógeno y cianuro, no se hace necesario realizar un tratamiento debido a que estos parámetros no exceden los valores límites máximos permisibles dados en la resolución 0631 de 2015.

Figura 12. Condicionales para DBO, fenoles, HTP, nitrógeno y cianuro



- **Análisis de cloruros**

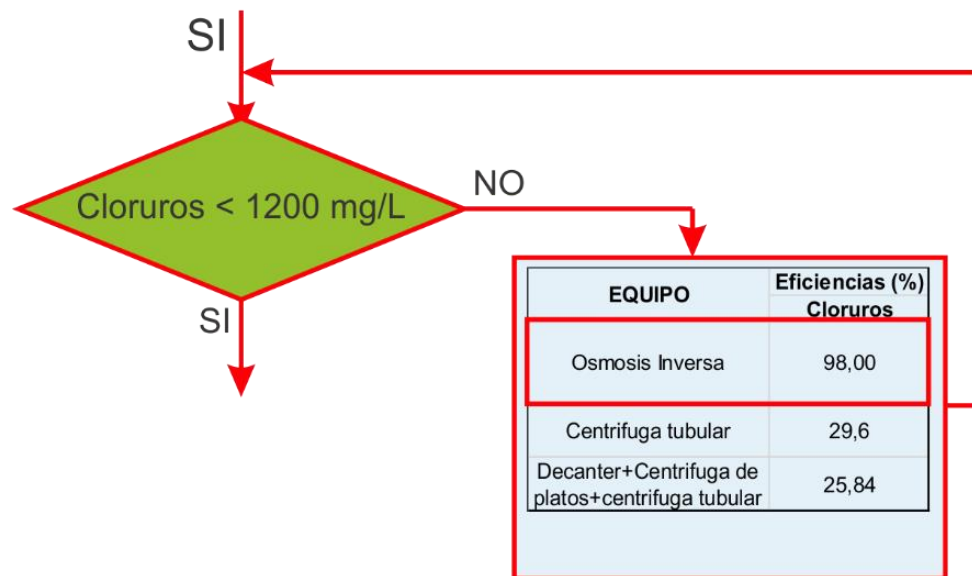
Continuando con el mismo procedimiento de selección de los anteriores análisis, al comparar la concentración de cloruros en el agua de estudio con el parámetro dado por la norma, se hace necesario realizar un tratamiento. El tratamiento seleccionado

para hacer esta reducción es la osmosis inversa, debido a que tiene una eficiencia del 98% de cloruros<sup>132</sup> y además es útil para reducir parámetros en una etapa posterior.

La concentración a la salida de este tratamiento está dada de la siguiente manera:

$$\text{Cloruros}_T = 11200 * (1 - 0.98) = 224 \text{ mg/L} \quad (\text{Ecuación 24})$$

**Figura 13. Condicional para cloruros**



- **Análisis de sulfuros, sulfatos, metales y metaloides**

Debido a que la carga contaminante de sulfuros y sulfatos no supera los límites permisibles, no es necesario la selección de algún equipo para su tratamiento y por ende este condicional se supera de inmediato.

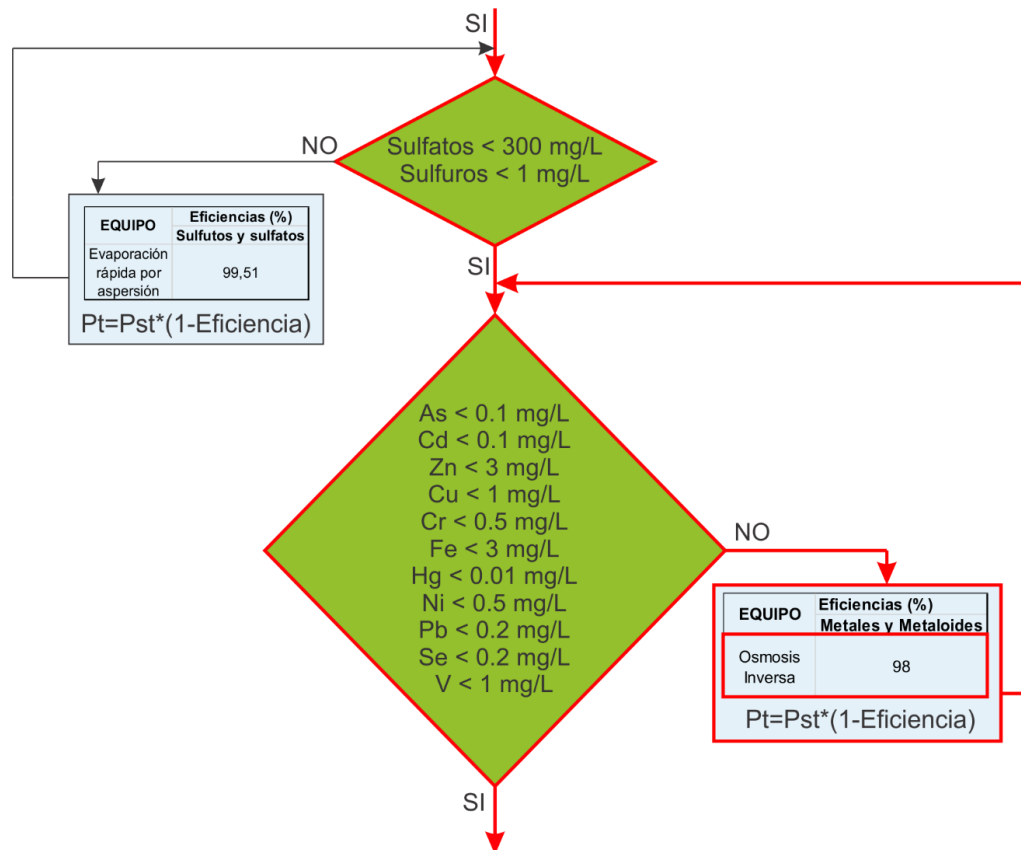
<sup>132</sup> DUARTE, Paola y PATIÑO, Sandra. Op. cit. p 79.

Por otra parte, para los metales y metaloides, únicamente el valor de níquel excede la concentración permitida por la normatividad, y es reducido utilizando osmosis inversa, tratamiento que es aplicado en la etapa anterior para la reducción de cloruros y en este caso cuenta con una eficiencia de remoción para este tipo de contaminantes del 98%.<sup>133</sup>

El valor de este parámetro a la salida de este tratamiento es:

$$Ni_T = 0.85 * (1 - 0.98) = 0.02 \text{ mg/L} \quad (\text{Ecuación 25})$$

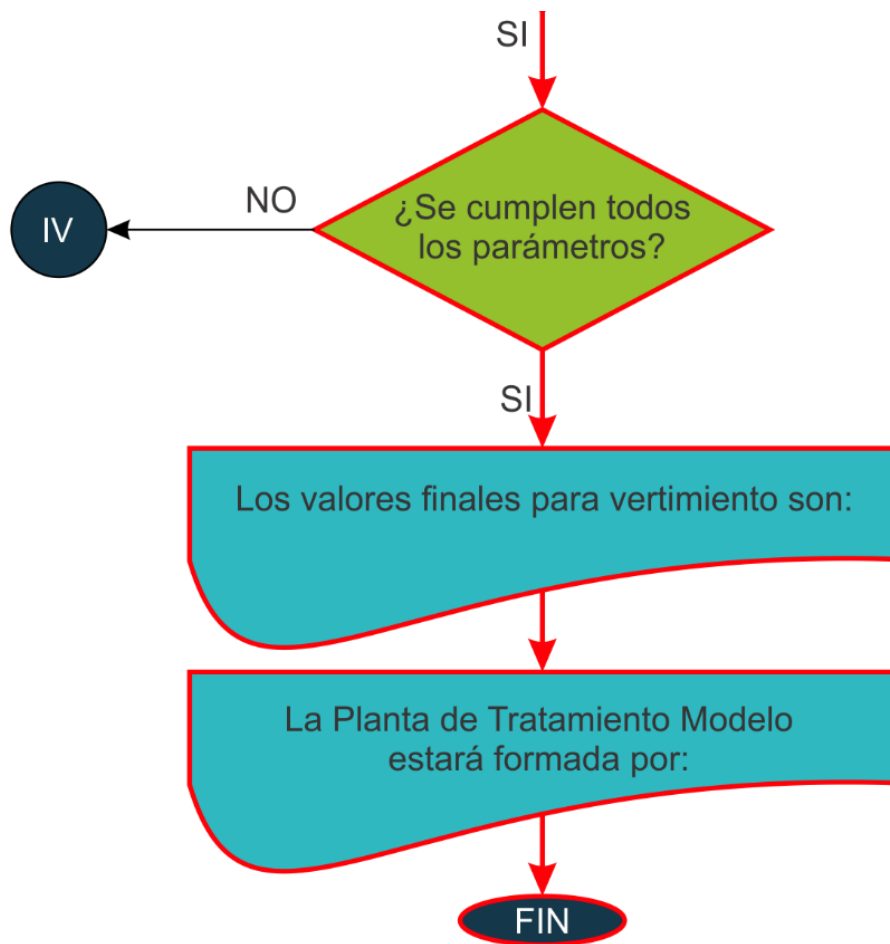
**Figura 14. Condicionales para sulfatos, sulfuros, metales y metaloides**



<sup>133</sup> Ibid.

Finalmente, se realiza una verificación de los parámetros finales analizando sus valores con respecto a los de la resolución 0631 de 2015, debido a que todos se cumplen se realiza una impresión de los parámetros finales para vertimiento y se muestran los equipos y tratamientos usados en la planta modelo para lograrlo. En la **Tabla 12** se resumen los resultados del análisis realizado para el agua de estudio campo UIS 1.

**Figura 15. Finalización del diagrama de flujo**



**Tabla 12. Resultados de la planta de tratamiento para Campo UIS 1**

	DQO	DBO	SST	SSED	Grasas y aceites	Fenoles	Cloruros	Niquel
	mg/L O2	mg/L O2	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
<b>Resolución</b>	<b>180</b>	<b>60</b>	<b>50</b>	<b>1</b>	<b>15</b>	<b>0,2</b>	<b>1200</b>	<b>0,5</b>
<b>UIS 1</b>	<b>927,00</b>	<b>465,00</b>	<b>477,00</b>	<b>1,70</b>	<b>5683,00</b>	<b>0,54</b>	<b>11200,00</b>	<b>0,85</b>
Tanque desnatador (95% Grasas y aceites)	927,00	465,00	477,00	1,70	284,15	0,54	11200,00	0,85
CPI (95% Grasas y aceites)	927,00	465,00	477,00	1,70	14,21	0,54	11200,00	0,85
DAF (90% Grasas y aceites) (95% SST y SSED) (40% DBO)	927,00	279,00	23,85	0,09	1,42	0,54	11200,00	0,85
H2O2 + O3 (43,6% DQO) (65% Fenoles)	522,83	279,00	23,85	0,09	1,42	0,19	11200,00	0,85
Filtros biológicos aireados (85% SST y SSED) (80% Grasas y aceites) (95% DBO) (60% DQO)	209,13	13,95	3,58	0,01	0,28	0,19	11200,00	0,85
Microfiltración (92% Grasas y aceites)(35% Fenoles) (35% DQO)	135,94	13,95	3,58	0,01	0,02	0,12	11200,00	0,85
Osmosis Inversa (OI) (98% Sales) (98% Cloruros) (98% Metales pesados)	135,94	13,95	3,58	0,01	0,02	0,12	224,00	0,02
<b>Vertimiento Cuerpos de Aguas Superficiales</b>	<b>135,94</b>	<b>13,95</b>	<b>3,58</b>	<b>0,01</b>	<b>0,02</b>	<b>0,12</b>	<b>224,00</b>	<b>0,02</b>

#### 4.5. Propuestas para planta de tratamiento de Campo Escuela Colorado

El flujo de trabajo para realizar la planta de Campo Escuela Colorado es el mismo utilizado en el campo UIS 1, teniendo en cuenta que los parámetros que incumplen con los establecidos por la resolución son diferentes. Los resultados de esta propuesta se encuentran en la **Tabla 13**.

**Tabla 13. Resultados de la planta de tratamiento para Campo Escuela Colorado**

	DQO	DBO	SST	Grasas y aceites	Cloruros	Arsenico	Plomo	Selenio
	mg/L O2	mg/L O2	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
<b>Resolución</b>	<b>180,00</b>	<b>60,00</b>	<b>50,00</b>	<b>15,00</b>	<b>1200,00</b>	<b>0,10</b>	<b>0,20</b>	<b>0,20</b>
<b>Colorado</b>	<b>4012,00</b>	<b>440,00</b>	<b>1100,00</b>	<b>362,30</b>	<b>17867,60</b>	<b>0,14</b>	<b>0,64</b>	<b>0,36</b>
Tanque desnatador (95% Grasas y aceites)	4012,000	440,000	1100,000	18,115	17867,600	0,140	0,640	0,360
Microburbujas Aire (99.08% SST y SSED) (93.92% Grasas y aceites)	4012,000	440,000	10,120	1,101	17867,600	0,140	0,640	0,360
Filtros biológicos aireados (85% SST y SSED) (80% Grasas y aceites) (95% DBO) (60% DQO)	1604,800	22,000	1,518	0,220	17867,600	0,140	0,640	0,360
H2O2 + O3 + HC (Cavitación Hidrodinámica) (40.5% DQO)	954,856	22,000	1,518	1,101	17867,600	0,140	0,640	0,360
Proceso foto-fenton (81% DQO)	181,423	22,000	1,518	1,101	17867,600	0,140	0,640	0,360
Humedal artificial (40% DQO)(94% Grasas y aceites) (92% DBO)	108,854	1,760	1,518	0,066	17867,600	0,140	0,640	0,360
Osmosis Inversa (OI) (98% Sales) (98% Cloruros) (98% Metales pesados)	108,854	1,760	0,009	0,066	357,352	0,003	0,013	0,007
<b>Vertimiento Cuerpos de Aguas Superficiales</b>	<b>108,854</b>	<b>1,760</b>	<b>0,009</b>	<b>0,066</b>	<b>357,352</b>	<b>0,003</b>	<b>0,013</b>	<b>0,007</b>

Para finalizar, las propuestas anteriormente mencionadas, pueden ser sujetas a modificaciones, ya sea por factores externos como problemas con la comunidad por afectación de alguno de estos equipos a su entorno, como problemas particulares en cada uno de los campos, ya sea por limitaciones de espacio en la locación para la instalación de la planta o el uso de tratamientos químicos complementarios al proceso para aumentar su eficiencia de remoción, por ejemplo, rompedores de emulsiones inversas, floculantes, entre otros.

## 5. CONCLUSIONES

- Debido a que los valores máximos permisibles para el vertimiento de aguas asociadas a la producción de hidrocarburos establecidos por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible en la Resolución 0631 de 2015 son los mismos para cualquier campo del país y debido a que la carga de contaminantes y la presencia de estos difiere entre campos, se hace necesario plantear múltiples alternativas de tratamiento que se adapten de acuerdo a las necesidades de cada campo.
- En el caso del uso del agua de producción para reinyección, es necesario realizar un análisis fisicoquímico del agua centrado tanto en la compatibilidad de esta frente a la formación objetivo y su agua asociada, como en los parámetros establecidos por la NACE, para establecer el tratamiento específico al que deberá ser sometido el agua de producción.
- Con la realización de este trabajo se evidenció que hay diversas alternativas de tratamiento, tanto primarias, secundarias y terciarias, que logran reducir las concentraciones de los contaminantes del agua de producción, utilizando tecnologías modernas como procesos de oxidación avanzada y nuevas tecnologías de flotación para lograr cumplir con los límites permisibles establecidos por las normas técnicas, legales y ambientales vigentes en relación con el vertimiento de aguas y el uso de esta para reinyección.
- Los procesos de oxidación avanzada se presentan como una excelente alternativa para el tratamiento de parámetros como fenoles y DQO para

campos con grandes concentraciones de estos que no pueden ser tratados convencionalmente.

- Los procesos de oxidación avanzada son una alternativa para el tratamiento del agua de producción, debido a que con esta tecnología es posible tener una eliminación de los contaminantes, mineralización de algunos contaminantes orgánicos y por lo general no generan lodos que requieren un tratamiento adicional o eliminación de estos, mejorando así características organolépticas del agua y la biodegradabilidad de esta.
- Las nuevas tecnologías de flotación son alternativas a usar dentro de la industria para el tratamiento de agua con el fin de reducir la carga contaminante de esta y junto con las tecnologías de flotación convencionales, brindan una alta eficiencia de remoción en torno a los sólidos suspendidos totales, grasas y aceites, además de una reducción significativa de la demanda química y bioquímica de oxígeno.
- Según la revisión sistemática, para los procesos de oxidación avanzada, se observó que es necesario realizar un pretratamiento al agua de producción antes de ser aplicada la tecnología, donde se incluyan tratamientos primarios y secundarios, como procesos de separación gravitacional y tecnologías de flotación con el fin de reducir la carga contaminante de la corriente y conseguir altas eficiencias de remoción.
- Las alternativas de plantas de tratamiento planteadas para cada uno de los casos de estudio (Campo UIS 1 y Campo Escuela Colorado) están enfocadas en la reducción de los parámetros que sobrepasan los límites dados por

normatividad técnica, legal y ambiental, en las cuales fue necesario tener una combinación de tecnologías, tanto convencionales, de flotación, procesos de oxidación avanzada y algunas tecnologías de tratamiento terciario, logrando así un cumplimiento total en todos los parámetros fisicoquímicos.

- Como personas integrales y futuros ingenieros de petróleos, se deben generar alternativas para el tratamiento de agua de producción, no sólo con el propósito de cumplir con la normatividad asociada, sino para mantener el respeto y el sentido de responsabilidad hacia el ser humano, el medio ambiente y la sociedad.

## 6. RECOMENDACIONES

- Se recomienda para futuras investigaciones hacer una revisión de los parámetros que figuran con “análisis y reporte” dentro de la Resolución 0631 de 2015, los cuales a consideración de los autores de este trabajo pueden ser perjudiciales para la salud de los seres vivos.
- Al final de la selección de los equipos, se recomienda hacer una revisión en la cual se tenga en cuenta la adición de productos químicos, tales como floculantes, rompedores de emulsión inversa, inhibidores de corrosión entre otros, para establecer, si las eficiencias de los equipos seleccionados aumentan y alguno de estos deja de ser necesario para el proceso sin que afecte el cumplimiento de la normatividad.
- Para futuros trabajos de investigación, se recomienda ampliar el listado de tecnologías disponibles para el tratamiento de agua de producción, debido a que con el avance de la tecnología constantemente se desarrollan y optimizan equipos y procesos; además de realizar un análisis económico para cada una de las tecnologías.
- Debido a que se cuenta con una base de datos de equipos y tratamientos para el agua de producción, además de un diagrama de flujo que tiene las consideraciones del proceso de selección de estos, se recomienda realizar un software basado en lo anterior, con el cual sea posible realizar este proceso de forma automatizada, ya que este optimizaría el proceso de selección de equipos a la hora de realizar un diseño para una planta de tratamiento de agua en algún campo de producción de hidrocarburos.

- Debido a que algunas de las tecnologías tratadas en este proyecto son de alto costo, se recomienda realizar un análisis económico de las tecnologías y tratamientos usados en el diseño de la planta modelo para cada uno de los casos de estudio, con el objetivo de determinar el costo final de las plantas y establecer la rentabilidad estas.
- Dado que los límites establecidos por la Resolución 0631 de 2015 con respecto al vertimiento de aguas son altamente estrictos y no pueden ser superados por las tecnologías convencionales, se recomienda destinar el agua de producción a procesos de reinyección, ya sea como método de disposición o con fines de recuperación secundaria. De lo contrario, será requerido el uso de tratamientos avanzados para el tratamiento del agua de producción.

## BIBLIOGRAFÍA

ACOSTA, Diego. y JACOBS, Juan. Diseño conceptual de un sistema de tratamiento de aguas de producción para reinyección en pozo disposal en un campo de la cuenca de los llanos orientales. Tesis de Ingeniería de Petróleos. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías fisicoquímicas. 2017.

ADEBAMBO, O. Evaluation of the beneficial reuse of produced water: a review of relevant guidelines and produced water toxicity, Trabajo de grado (Master of Environmental Management) Duke University, 2011.

AHMADUN, Fakhru'l-Razi., ALIREZA, Pendashteh, et al., Review of technologies for oil and gas produced water treatment, en Journal of Hazardous Materials, Volume 170, 2009.

AL-MAAMARI, Rashid., et al. Flotation, Filtration, and Adsorption: Pilot Trials for Oilfield Produced-Water Treatment. Oil and Gas Facilities. En [www.onepetro.org](http://www.onepetro.org), 2014.

ARNOLD, Ken, y STEWART, Maurice. Surface Production Operations, Design of Oil-Handling Systems and Facilities Vol.1. 3 ed. Houston, 2008.

ARPEL, Guía para la disposición y tratamiento de agua producida.

ARTHUR, J. Daniel, et al. Technical summary of oil & gas produced water treatment technologies. ALL CONSULTING, LLC. Tulsa, 2005.

ASTM. Standard Test Method for Dissolved Oxygen in Water. American Society of Test Methods.

BUITRAGO, July. Extracción de cloruros de un sistema de aguas residuales a través de procesos mecánicos. Mechanical processes for chloride extraction from an industrial wastewater treatment system. Revista palmas. Bogota. Vol 38. 2017.

CASTAÑEDA, Amparo. Procesos de Oxidación avanzada aplicados en el tratamiento de aguas de la industria del petróleo. Proyecto de Especialización en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, 2014.

CEHOVIN M, et al. Hydrodynamic cavitation in combination with the ozone, hydrogen peroxide and the UV-based advanced oxidation processes for the removal of natural organic matter from drinking water. Ultrasonics Sonochemistry, Vol 37, 2017. p 394-404.

CLARK, C., VEIL, J. Produces water volumes and management practices groundwater protection council, 2015.

COLORADO SCHOOL OF MINES. Technical assessment of produced water treatment technologies. USA, 2009.

DINCER, Ar. Removal of COD from oil recovery industry wastewater by the advanced oxidation processes (AOP) based on H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. Global NEST Journal, Vol. 10. 2008. p 31-38.

Diseños y soluciones sostenibles DSS. S.A. Ingeniería para un desarrollo sostenible. Osmosis inversa. [En línea]. [Citado el: 23 septiembre de 2018] [http://dss.com.ec/wp-content/uploads/2012/07/osmosis\\_inversa.pdf](http://dss.com.ec/wp-content/uploads/2012/07/osmosis_inversa.pdf)

DUARTE, Paola y PATIÑO, Sandra. Alternativas para el diseño del sistema de tratamiento del agua de producción de Campo Escuela Colorado conforme a la normatividad vigente para vertimiento en Colombia. Tesis de grado en Ingeniería de Petróleos. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías fisicoquímicas. 2017.

FÉRIS, L.A. GALLINA, S.C.W. RODRÍGUEZ, R.T. y RUBIO, Jorge. Optimizing Dissolved Air Flotation Design System, abril 6, 2000.

FORERO, J, et al., Diseño de un nuevo sistema de flotación para tratamiento de aguas industriales. En Ciencia, Tecnología y Futuro, Vol. 1., Ecopetrol, Instituto Nacional del Petróleo., 1999.

GARCIA, Juan. y HERRERA, Sergio. Tratamiento del agua de producción para los proyectos de gas en aguas profundas y ultraprofundas del caribe colombiano. Bucaramanga, Trabajo de grado (Ingeniería de Petróleos), Universidad Industrial de Santander. 2017.

GILMOUR, Charles., Water Treatment Using Advanced Oxidation Processes: Application Perspectives. Trabajo de grado (Master of Engineering Science), The University of Western Ontario, 2012.

GROTE, Bill., Application of advanced oxidation processes (AOP) in water treatment. 37th Annual Qld Water Industry Operations Workshop. Parklands, Gold Coast, Australia, 2012.

IGUNNU, Ebenezer., CHEN, George., Produced water treatment technologies. International Journal of Low-Carbon Technologies, Volume 9, 2012.

IZQUIERDO, José, et al. Manual para el procesamiento de agua de inyección en un campo petrolero. Guayaquil. Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra. Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL). 2013.

JOHNSON, Greg., CULKIN, Brad., A summary of options available for the beneficial use of oilfield produced water using membrane treatment. VSEP treatment of produced water for beneficial use., 2016.

LEE, K., NEFF, J., et al., Produced Water: Overview of Composition, Fates, and Effects. Produced Water Environmental Risks and Advances in Mitigation Technologies SE – 1. Springer, New York, 2011.

LEGRINI, O., et al. Photochemical processes for water treatment. Chemical Reviews, 93(2), 671-698, 1993.

LOPEZ, Luis. Diseño de una planta de tratamiento de aguas, mediante la implementación de osmosis inversa en campos petroleros de Colombia. Monografía de especialización en Producción de Hidrocarburos. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías fisicoquímicas. 2016

MANCILLA, Robinson. y MESA, Henry., Metodología para el manejo de aguas de producción en un campo petrolero. Bucaramanga. Tesis de grado (Ingeniería de Petróleos), Universidad Industrial de Santander. 2012.

MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE, Resolución 0135(9 de febrero de 2015). Por la cual se resuelve un recurso de reposición contra la resolución 0764 del 16 de julio de 2014. 2015.

MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE, Resolución 0631(17 de marzo de 2015). Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones. 2015.

MORALES, María y REVELO, Astrid. Desempeño técnico y ambiental de las tecnologías convencionales y modernas de tratamientos de agua producida. Tesis de Ingeniería de Petróleos. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías fisicoquímicas. 2016.

MUNIRASU, Selvaraj., et al. Use of membrane technology for oil field and refinery produced water treatment-A review. En Elsevier [en línea], 2016, vol.100. Disponible en Science Direct.

NARANJO, Carlos; MUÑOZ, Samuel y ZAPATA, José. Factibilidad experimental de la inyección de agua en las arenas Mugrosa del campo Lisama. Revista Fuente: El reventón Energético. Vol. 8. 2010.

OSPAR commission 2013. "Background Document concerning Techniques for the Management of Produced Water from Offshore Installations.

QUISPE, Luz., et al. Eliminación de cianuro mediante sistema combinado UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub>. Revista Bolivariana de Química. Vol. 28. 2011.

RAMIREZ, Clementina. Oxidación de fenoles con peróxido de hidrogeno y ozono. XXVIII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Cancún, 2002.

RUBIO, Ivonne. Comparación técnica y económica entre un sistema de tratamiento de agua de producción con inyección de microburbujas de aire y un sistema con inyección de microburbujas de nitrógeno en el bloque Cubiro. Trabajo de grado para especialización en Producción de Hidrocarburos. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías fisicoquímicas. 2016

RUIZ, Luis. Propuesta de mejoramiento para las facilidades de tratamiento de agua de producción y disposición por sistema de inyección para el campo Cabiona. Bucaramanga, Trabajo de grado (Ingeniería de Petróleos), Universidad Industrial de Santander, 2015.

SAWYER, Cleir. et al., Chemistry for Environmental Engineering. McGraw Hill, 5th Edition, 2003.

SM. Test for the Chemical Oxygen Demand COD. Standard Methods. 1999.

ZHENG, Jisi. CHEN, Bing., et al., Offshore produced water management: A review of current practice and challenges. En Arctic environments. Marine Pollution Bulletin., 2016.

## ANEXOS

### ANEXO A. Tablas del diagrama de flujo

Las siguientes son las tablas necesarias para utilizar el diagrama de flujo para la selección de equipos, las cuales se encuentran divididas de acuerdo con los parámetros a analizar en cada uno de los condicionales del diagrama y están basadas en las eficiencias mostradas en la Tabla 4. Resumen de tecnologías de tratamientos.

**Tabla A**

EQUIPO	Eficiencias (%)	
	Grasas y Aceites	SST y SSED
Tanque desnatador	95	N/A
CPI	95	N/A
Celda microburbujas de Aire	93,92	99,08
Separador API	90	N/A
Celda microburbujas de Nitrógeno	85,84	70,08

**Tabla B**

EQUIPO	Eficiencias (%)				
	SST y SSED	Grasas y Aceites	Nitrógeno	DBO	DQO
DAF	95	90	N/A	40	N/A
Filtros de cáscara de Nuez	95	90	N/A	N/A	N/A
Filtros biológicos Aireados	85	80	70	95	60

**Tabla C**

EQUIPO	Eficiencias (%)						
	DQO	Fenoles	Grasas y Aceites	Fósforo	SST y SSED	DBO	HTP
Humedal artificial	40	N/A	94	75	N/A	92	95
Proceso foto-fenton (H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> +Fe <sup>+2</sup> )	81	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
UV/H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	55	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> + O <sub>3</sub>	43,6	65	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> + O <sub>3</sub> + HC (Cavitación Hidrodinámica)	40,5	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Filtros biológicos Aireados	60	N/A	80	N/A	85	95	N/A
Microfiltración (Membranas)	35	35	92	N/A	N/A	N/A	N/A

**Tabla D**

EQUIPO	Eficiencias (%)	
	DBO	Grasas y Aceites
Electrodialisis	84,5	95,5

**Tabla E**

EQUIPO	Eficiencias (%)	
	Fenoles	Cianuro
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	50	93
O <sub>3</sub>	18	N/A

**Tabla F**

EQUIPO	Eficiencias (%)
	HTP
Adsorción de lecho compacto	99,26

**Tabla G**

EQUIPO	Eficiencias (%)				
	Nitrógeno	Grasas y Aceites	SST y SSED	DBO	DQO
Filtros biológicos Aireados	70	80	85	95	60

**Tabla H**

EQUIPO	Eficiencias (%)
	Cianuro
UV	24
H2O2 + UV + TiO2	99

**Tabla I**

EQUIPO	Eficiencias (%)
	Cloruros
Osmosis Inversa	98,00
Centrífuga tubular	29,6
Decanter + Centrífuga de platos + centrífuga tubular	25,84

**Tabla J**

EQUIPO	Eficiencias (%)
	Sulfuros y sulfatos
Evaporación rápida por aspersión	99,51

**Tabla K**

EQUIPO	Eficiencias (%)
	Metales y Metaloides
Osmosis Inversa	98

## ANEXO B. Formato de datos de campo

Parámetro	Unidades	CAMPO
<b>Generales</b>		
pH	Unidades de pH	
Demanda química de oxígeno (DQO)	mg/L O <sub>2</sub>	
Demanda bioquímica de Oxígeno (DBO)	mg/L O <sub>2</sub>	
Sólidos suspendidos totales (SST)	mg/L	
Sólidos sedimentables (SSED)	mg/L	
Grasas y aceites	mg/L	
Fenoles	mg/L	
<b>Hidrocarburos</b>		
Hidrocarburos totales (HTP)	mg/L	
<b>Compuestos de Nitrógeno</b>		
Nitrógeno total	mg/L	
<b>Iones</b>		
Cianuro total	mg/L	
Cloruros	mg/L	
Sulfatos	mg/L	
Sulfuros	mg/L	
<b>Metales y metaloides</b>		
Arsénico (As)	mg/L	
Cadmio (Cd)	mg/L	
Cinc (Zn)	mg/L	
Cobre (Cu)	mg/L	
Cromo (Cr)	mg/L	
Hierro (Fe)	mg/L	
Mercurio (Hg)	mg/L	
Níquel (Ni)	mg/L	
Plomo (Pb)	mg/L	
Selenio (Se)	mg/L	
Vanadio (V)	mg/L	