

Elaboración de una matriz para la selección de las tecnologías para el tratamiento de aguas industriales con altos contenidos de cloruros producidas en el sector petrolero.

Gabriel Felipe López Rojas, Johanna Ximena Villamizar Sandoval

Monografía para Optar el título de Especialización en Ingeniería Ambiental

Director

Marlon Serrano Gómez

MSc. en Química Ambiental

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Especialización en Ingeniería Ambiental Bucaramanga

2019

Dedicatoria

Este trabajo está dedicado principalmente a Dios el cual nos ha dado la fortaleza necesaria para continuar en los momentos de desfallecimiento y en los puntos más críticos de nuestras vidas; dándonos la sabiduría necesaria para afrontar estas necesidades; de igual manera a nuestros Padres que nos han sabido dar una formación integral y un apoyo incondicional con la cual nos han ayudado a salir adelante buscando siempre un mejor camino y sobre todo a nuestros Hijos, Hermanos y Parejas que hemos encontrado en ellos un apoyo y nos han dado un motivo o propósito para seguir siendo mejores personas y especialmente profesionales respetables.

Agradecimientos

Agradezco a Dios por darme todo lo que tengo, por su infinito amor y misericordia conmigo en todo momento, por la salud, por mi familia, por permitirme alcanzar este logro más en mi vida, a mi esposo Hernán Villamizar y a mi hija Sara Luciana por darme todo el amor, apoyo y motivación incondicional para seguir superándome cada día, a mis padres y a mis suegros que me ayudaron para poder alcanzar este nuevo proyecto.

Agradecemos a nuestros profesores de toda la especialización que nos impartieron su conocimiento durante este año. Agradecemos principalmente a nuestro profesor y tutor Marlon Serrano Gómez que con su ayuda y su vasta experiencia nos han guiado en la elaboración de esta Monografía.

Tabla de contenido

Introducción	18
1. Justificación	19
2.Objetivos	21
2.1 Objetivo general.	21
2.1 Objetivos específicos.	21
3.Marco Teórico.....	22
3.1 Marco Referencial.....	22
3.2 Agua Residual.	22
3.3 Ion Cloruro	23
3.4 Agua de Producción	23
4. Características del agua de producción.....	24
4.1 Compuestos de crudo disperso y disuelto	25
4.2 Compuestos químicos	25
4.3 Minerales disueltos.	26
4.3.1 Cationes y aniones.	27
4.3.1 Metales pesados.	27

4.3.1 Materiales radioactivos naturales (NORM).	27
4.4. Solidos.....	27
4.5 Gases disueltos.....	28
5. Tratamientos de aguas industriales	28
5.1 Electrodiálisis (ED) / Electrodiálisis inversa (EDR).....	29
5.2 Ósmosis inversa (OR)	30
5.2.1 Membrana semipermeable.	32
5.3 Intercambio Iónico.	33
5.3.1 Tipos de resinas.....	36
5.4 Biorremediación.....	37
6. Metodología	38
6.1 Análisis de la caracterización del agua industrial en una estación de producción petrolera... 39	
6.2 Análisis de las alternativas para la remoción de cloruros en agua industrial provenientes de la industria del petróleo.....	39
6.3 Realización de un cuadro para cada una de las tecnologías evaluadas en esta investigación. 40	
6.4 Implementación de una matriz de selección de tecnologías para aguas residuales con alto contenido de cloruros en el sector petrolero.	40
7. Datos y análisis	40
7.1 Caracterización del agua de una estación de producción.....	41

7.2 Análisis del comportamiento de los parámetros de la caracterización de agua de producción.	46
7.3 Análisis y evaluación de las técnicas revisadas	50
7.3.1 Electrodialisis inversa.	52
7.3.2 Ósmosis inversa.	52
7.3.3 Intercambio Iónico.	53
7.3.4 Biológico..	54
7.4 Análisis comparativo de las tecnologías según criterios y su respectivo valor cuantitativo para lograr crear una matriz.	57
8. Conclusiones.	62
9. Recomendaciones	64
Referencias Bibliográficas	66

Lista de Tablas

Tabla 1. Caracterización de aguas de producción entre 2004 al 2008.	41
Tabla 2. Caracterización de aguas de producción entre 2009 al 2013.	42
Tabla 3. Caracterización de aguas de producción entre 2014 al 2018.	43
Tabla 4. Evaluación de ventajas y desventajas.	51
Tabla 5. Ventajas y desventajas de electrodiálisis y su análisis cuantitativo.	52
Tabla 6. Ventajas y desventajas de ósmosis inversa y su análisis cuantitativo.	53
Tabla 7. Ventajas y desventajas de intercambio iónico y su análisis cuantitativo.	54
Tabla 8. Ventajas y desventajas de biológico y su análisis cuantitativo.	54
Tabla 9. Viabilidad de selección según la tecnología.	56
Tabla 10. Comparativo de las tecnologías según criterios técnicos y su respectivo análisis cuantitativo.	58
Tabla 11. Promedio de cada una de las tecnologías	61
Tabla 12. Comparativo de los dos análisis de ponderación	62

Lista de Figuras

Figura 1. Alternativas para la remoción de cloruros.	28
Figura 2. Principio de la Electrodialisis.	29
Figura 3 Funcionamiento de la ósmosis directa y ósmosis inversa.	31
Figura 4 Planta de un sistema de ósmosis inversa.	32
Figura 5 Tipos de membranas.	33
Figura 6. Esquema del proceso de intercambio iónico.	35
Figura 7. Tipos de resinas para intercambio iónico.	36

Lista de Gráficas

Gráfica 1. Comportamiento de la concentración de grasas y aceites entre el 2004 al 2018..	477
Gráfica 2. Comportamiento de la concentración de DBO5 entre el 2004 y 2018	47
Gráfica 3. Comportamiento de la concentración de sólidos suspendidos totales entre el 2004 y 2018	48
Gráfica 4. Comportamiento de la concentración de cloruros entre el 2004 y 2018.....	49
Gráfica 5. Ponderación total de ventajas y desventajas	577
Gráfica 6. Comparativo de los promedios ponderados de las tecnologías	61
Gráfica 7. Comparativo de los promedios de las tecnologías	612

Glosario

Agua de producción AP: Es el agua residual generada en las demás etapas de exploración (perforación, completamiento o recobro) y procesos de producción que han retornado a la superficie y tienen que hacer su disposición acuerdo a las regulaciones ambientales.

Aguas residuales: Es toda agua procedente de cualquier actividad industrial.

Anión: Es un ion con carga eléctrica negativa, que ha ganado electrones.

API: American Petroleum Institute, en español Instituto americano del petróleo, es la principal asociación comercial de los Estados Unidos.

ARI: Agua Residual Industrial.

Bioaugmentación: inoculación de cepas microbianas genéticamente modificadas o con mayor capacidad para la depuración de entornos con alta concentración de toxinas.

Bioestimulación: modificación del entorno para la estimulación del crecimiento de ciertos microorganismos biorremediadores.

BWPD: Barriles de agua por día por sus siglas en inglés Barrels water per day.

Carbono Orgánico Total (COT): Se utiliza para caracterizar la materia orgánica disuelta y suspendida en el agua.

Catión: Es un ion con carga eléctrica positiva, que ha perdido electrones.

Cloruros: Compuestos que llevan un átomo de cloro en estado de oxidación formal -1.

Coagulación: Consiste en la formación de partículas de tamaño discreto (partículas coloidales, suspensiones finas, pero también a las sustancias disueltas o a las moléculas grandes hidrófilas en dispersión estable) fácilmente separables del agua por medio de la sedimentación y de la filtración. El coagulante es el compuesto químico que da pie a la coagulación ya que desestabiliza la materia suspendida en forma coloidal. Los coagulantes típicos son las sales de hierro y aluminio

Deionización: Proceso que sirve para eliminar todas las sustancias ionizadas de una solución.

Demanda Biológica de Oxígeno (DBO): Es la cantidad de oxígeno requerido por los microorganismos para oxidar (estabilizar) la materia orgánica biodegradable en condiciones aeróbicas. Representa indirectamente una medida de la concentración de materia orgánica biodegradable contenida en el agua.

Demanda Química de Oxígeno (DQO): Permite estimar la cantidad total de contaminantes orgánicos presentes en las aguas. Se utiliza para medir el oxígeno equivalente a la materia orgánica oxidable químicamente mediante un agente químico oxidante fuerte, generalmente dicromato de potasio, en un medio ácido y a alta temperatura.

Desalinización: Proceso mediante el cual se elimina sal del agua.

Dureza del Agua: Es la concentración de todos los cationes metálicos no alcalinos presentes (iones de calcio, estroncio, bario y magnesio en forma de carbonatos y bicarbonatos), se expresa en equivalentes de carbonato de calcio y constituye un parámetro significativo en la calidad del agua.

Floculación: Es el proceso por el que las partículas desestabilizadas se unen para formar grandes partículas estables o aglomeradas.

Impacto ambiental: Es la alteración del medio ambiente resultado de la actividad antropogénica.

Incrustación: Capa de residuos minerales que se forma en la superficie de un material. **IO:** Intercambio Iónico.

Ion: Partícula cargada eléctricamente constituida por un átomo o molécula que ha ganado o perdido electrones.

Membrana: Lamina de poco espesor generalmente flexible y resistente, hecha de cierto número de materiales y su función es detener el paso determinadas sustancias o contaminantes permitiendo atravesar las moléculas de agua.

MMBBL: Millón de barriles, por sus siglas en inglés Millon Barrels.

OI o RO: Osmosis Inversa.

Oxígeno Disuelto (OD): Es la cantidad de oxígeno libre en el agua que no se encuentra combinado ni con hidrógeno (formando agua) ni con los sólidos existentes en el agua.

Permeabilidad: Es la capacidad que tiene un material de permitirle a un flujo que lo traspase sin alterar su estructura interna.

pH: Indica el grado de acidez o basicidad de una solución.

Pretratamiento: Es el primer paso de acondicionamiento para el tratamiento de las aguas residuales.

Rechazo o concentrado: Agua de arrastre a la salida de un sistema que contiene sales que han sido separadas por las membranas.

Resina: Secreción orgánica que producen muchas plantas, particularmente los árboles del tipo conífera, es muy valorada por sus propiedades químicas y sus usos asociados.

Salmuera: Solución formada por altas concentraciones de cloruro de sodio (NaCl), sal común, en agua (H₂O), se puede encontrar en condiciones naturales.

Salobre: Es aquella agua que tiene más sales disueltas que el agua dulce pero menos que el agua del mar.

Saturación: Estado de una disolución que ya no acepta más cantidad de la sustancia que disuelve.

Solubilidad: Medida de la capacidad de disolverse de una determinada sustancia (solute) en un determinado medio (disolvente). Implícitamente se corresponde con la máxima cantidad de soluto que se puede disolver en una cantidad determinada de disolvente, a determinadas condiciones de Temperatura, e incluso Presión.

TDS: Total de sólidos disueltos.

TSS: Total de sólidos suspendidos.

Vertimiento puntual: Es el que se realiza a partir de un medio de conducción, del cual se puede precisar el punto exacto de descarga al cuerpo de agua, al alcantarillado o al suelo (MINAMBIENTE, 2015).

Vertimiento: Descarga final a un cuerpo de agua, a un alcantarillado o al suelo, de elementos, sustancias o compuestos contenidos en un medio líquido (MINAMBIENTE, 2015).

RESUMEN

TITULO: ELABORACIÓN DE UNA MATRIZ PARA LA SELECCIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS INDUSTRIALES CON ALTOS CONTENIDOS DE CLORUROS PRODUCIDAS POR EL SECTOR PETROLERO. ¹

AUTORES: JOHANNA XIMENA VILLAMIZAR SANDOVAL, GABRIEL FELIPE LOPEZ ROJAS**

PALABRAS CLAVES: Agua de producción, cloruros, disposición final

Descripción: Las aguas de producción derivadas de los métodos de extracción del petróleo son un factor importante en la misma industria, debido al cambio continuo de las normas ambientales que regulan la disposición con el paso de los días los tratamientos deben ser de mayor eficacia y por ende los altos costos asociados a su tratamiento y su disposición final, teniendo así un significativo impacto económico sin precedentes.

En la mayoría de los campos petroleros las aguas son tratadas con sistemas convencionales tipo biológico y luego son vertidas a los cuerpos de agua autorizados por la autoridad ambiental para cada campo. Sin embargo, aunque se han realizado muchos estudios en la búsqueda de nuevas alternativas y tecnologías que sean viables y que cumplan con las normas que regulan y que están en vigencia, estas tecnologías son altamente costosas, se plantea años atrás en otros países el reúso de estas aguas como una alternativa para el aprovechamiento del recurso debido a que se deben tratar para ser vertidas pues mejor es tratarlas para reutilizarlas.

En este documento se realizó una revisión bibliográfica de las principales técnicas disponibles en la actualidad para el tratamiento de aguas producidas en la industria petrolera las cuales tienen altos contenidos de cloruros, además se realizó una matriz con las tecnologías que son utilizadas actualmente para tratar dicho contaminante.

¹ Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Especialización en Ingeniería Ambiental. Director: Marlon Serrano Gómez

ABSTRACT

TITLE: ELABORATION OF A MATRIX FOR THE SELECTION OF TECHNOLOGIES FOR THE TREATMENT OF INDUSTRIAL WATER WITH HIGH CONTENTS OF CHLORIDES PRODUCED BY THE OIL SECTOR. ^{2*}

AUTHOR: JOHANNA XIMENA VILLAMIZAR SANDOVAL, GABRIEL FELIPE LOPEZ ROJAS**

KEY WORDS: Produced water, Chlorides, final disposal

Description: Production waters derived from oil extraction methods are an important factor in the same industry, due to the continuous change in environmental standards regulating the provision over the days treatments should be more effective and therefore the high costs associated with their treatment and final disposal, thus having an unprecedented significant economic impact.

In most oil fields the waters are treated with conventional biological type systems and then are discharged to the bodies of water authorized by the environmental authority for each field. However, although many studies have been carried out in the search for new alternatives and technologies that are feasible and meet the standards they regulate and are in force, these technologies are highly expensive, years ago in other countries the recycling of these waters is considered as an alternative for the exploitation of the resource because they must be treated to be dumped because it is better to treat them to reuse them.

In this document, a bibliographic review was made of the main techniques currently available for the treatment of water produced in the oil industry, which have high levels of chlorides, In addition, a matrix was drawn up of the technologies currently used to treat this pollutant.

* Bachelor Thesis

* * Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Especialización en Ingeniería Ambiental. Director: Marlon Serrano Gómez.

Introducción

En la extracción del petróleo comúnmente trae unos subproductos asociados como lo son el gas y el agua. Aunque el gas no se considera un problema mayor, la presencia de agua que normalmente recibe el nombre de aguas de producción, si se convierte en un gran problema debido por la complejidad de su composición, el impacto negativo si se es vertida a un cuerpo de agua o en el suelo y la necesidad de tratamiento.

La complejidad de su composición varía de acuerdo con el yacimiento de donde sea extraído el petróleo y su complejo tratamiento radica en los múltiples contaminantes que son arrastrados en el proceso como crudo libre y emulsionado, hidrocarburos, gases, metales, sales, sólidos suspendidos, sólidos disueltos, entre otros. Por lo tanto, requiere de sistemas de tratamientos que en su mayoría son costosos y complejos que, aunque no eliminan totalmente los contaminantes ayudan a minimizar el impacto generado por la industria y garantiza el cumplimiento de la norma ambiental.

Las aguas de producción presentan especialmente altas concentraciones en sales disueltas lo cual genera grandes inconvenientes como corrosión en las tuberías, bombas, equipos, también forman incrustaciones o taponamiento del yacimiento y demás; generando altos costos en su tratamiento. Generalmente estas aguas utilizan tecnologías como reinyección, evaporación, ósmosis inversa, electrodiálisis, electrodiálisis inversa, biológicos, resinas de intercambio iónico; todas buscan remover las sales presentes o cloruros.

Aunque las tecnologías mencionadas anteriormente son de última generación requieren que el agua a tratar este en unas especificaciones o características según el equipo o sistema que se va a utilizar y para ello se deben aplicar pretratamientos, tratamientos primarios y/o secundarios donde se utilizan procesos fisicoquímicos, entre otros.

En este documento se realizó la revisión bibliográfica y una matriz de las diferentes alternativas y tecnologías que existen en la actualidad para el tratamiento de agua de producción con altos contenidos de cloruros para una estación, teniendo las características del agua y la normatividad vigente para Colombia.

1. Justificación

En la industria petrolera, el proceso de extracción de hidrocarburos es uno de los generadores de mayores volúmenes de aguas residual, tanto así que a nivel mundial la producción asciende aproximadamente a 270 millones de barriles de agua diarios, de una producción aproximada de 83 millones de barriles diarios de hidrocarburo separado, dichos volumen de agua son proveniente de acuíferos (Richard, 2010). De esta manera, podemos dimensionar el impactó técnico y económico que representa el tratamiento del Agua Residual Industrial de producción a los sistemas de producción petrolera.

Las Aguas Residuales Industriales pertenecientes a la extracción de hidrocarburos, produce una gran diversidad de contaminantes que afectan considerablemente al ecosistema acuático y terrestre; estos vertimientos afectan principalmente a los cuerpos de agua superficial lenticos como loticos los cuales son los receptores de las descargas de los procesos industriales, uno de los contaminantes que se está convirtiendo en una problemática en estos momentos para el sector petrolero son los altos índices de cloruros disueltos en el agua extraída de los pozos de producción; lo que se hace indispensable buscar alternativas viables que permitan el cumplimiento de las normas ambientales

vigentes para el vertimiento de las aguas residuales que son generadas por la extracción del petróleo; lo cual el valor máximo permisible por la ley para el vertimiento puntal de aguas residuales no domesticas a cuerpos de aguas superficiales de actividades asociadas con hidrocarburo es de 1200 mg/L; ya que al no cumplir con lo establecido acarrea sanciones económicas y de repercusiones legales; sin hablar de las afectaciones de los ecosistemas en el área de influencia.

2.Objetivos

2.1 Objetivo general.

Elaborar una matriz para la selección de tecnologías o alternativas para el tratamiento de aguas industriales con alto contenido de cloruros producidas por el sector petrolero.

2.1 Objetivos específicos.

Caracterizar el agua industrial de una estación de producción del sector petrolero.

Realizar la revisión bibliográfica correspondiente a tratamientos de agua residual en la industria del petróleo.

Analizar las alternativas para la remoción de cloruros presentes en agua industrial provenientes de la industria del petróleo.

Realizar una matriz de selección de tecnologías para aguas residuales con alto contenido de cloruros en el sector petrolero.

3.Marco Teórico

3.1 Marco Referencial.

Colombia es uno de los países con mayor número de recursos hídricos en el mundo, se ve representada en la extensa red superficial de las aguas que cubre el país con un importante número de cuerpos de aguas como ríos, lagunas, lagos y embalses. Sin embargo, en los últimos tiempos ha sufrido un deterioro acelerado debido a la contaminación de origen industrial siendo esta uno de los principales factores de contaminación que han aportado al descenso de la calidad del agua. Por tal motivo se han creado leyes y entes como el Ministerio de Medio Ambiente, entre otros, que ayudan a evitar que el deterioro de nuestros recursos siga aumentando. En la actualidad se cuenta con la Resolución 0631 del 17 de Marzo de 2015 (MINAMBIENTE, 2015), expedida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible donde se reglamenta en el artículo 11 para la actividad de hidrocarburos, en ella contiene los parámetros legales de vertimientos a los cuerpos de agua y es la encargada de establecer, verificar, controlar y hacer cumplir las condiciones estipuladas en dicha ley para todas las industrias.

Por consiguiente, cada agua proveniente de las industrias antes de ser vertido a un cuerpo de agua debe tener un tratamiento ya sea primario, secundario o terciario para que se cumpla con la normatividad nacional ambiental.

3.2 Agua Residual.

Las aguas residuales o agua residual son cualquier tipo de agua que ha sido afectada negativamente con presencia de diversos agentes contaminantes como consecuencia del accionar del hombre,

dentro de este concepto se incluyen aguas con numerosos orígenes como las domésticas o aguas negras, aguas blancas (lluvia, nieve, hielo, riego o limpieza de lugares o calles), residuos industriales, residuos mineros y residuos agrícolas. (Ramalho, 2003).

Las aguas residuales no tienen valor inmediato de acuerdo con su calidad, debido a la gran cantidad de sustancias (algunas de ellas tóxicas) y microorganismos que portan haciéndola peligrosa e impropia para su uso es por ello por lo que no deben ser utilizadas sin un tratamiento previo. La concentración de los contaminantes puede variar según las impurezas procedentes de los diversos procesos industriales. (Romero, 2004)

3.3 Ion Cloruro

El ion cloruro (Cl^-) es un anión monovalente y monoatómico que se forma al ganar un electrón y quedar cargado electronegativamente con 17 protones y 18 electrones. Este ion forma sales muy solubles que suelen estar asociados al ion Na^+ , las aguas dulces entre 10 a 250 ppm y el agua de mar contiene alrededor de 20000 ppm. El contenido de cloruros afecta la potabilidad del agua y su potencial para uso agrícola e industrial, a partir de 300 ppm el agua empieza a adquirir un sabor salado, las aguas con cloruros suelen ser muy corrosivas debido al pequeño tamaño del ion que puede penetrar la capa protectora en la interfaz óxido-metal y reaccionar con el hierro estructural. Los cloruros son casi siempre uno de los componentes principales de las salmueras. Por general los iones cloruro no se remueven con métodos convencionales de tratamiento de agua se requieren sistemas de tratamientos especiales. (Lapeña, 1999)

3.4 Agua de Producción

Agua de producción es llamada en la industria petrolera a la mezcla de agua (agua de formación e inyección), el hidrocarburo y el gas que se encuentra depositada o acumulada naturalmente en el subsuelo y que están contenidos en rocas porosas. En la extracción del petróleo el agua es extraída con ellos, generando un mayor afluente como subproducto, aunque puede variar de un pozo a otro, la cantidad de agua depende del método de extracción y de la naturaleza del yacimiento. (Richard, 2010)

La generación de agua producida aumenta normalmente con el tiempo y en yacimientos convencionales a medida que se va agotando el petróleo y el gas. La proporción de agua producida en otros países varía como por ejemplo en Estados Unidos la relación de agua a crudo es de alrededor de 3:1 pero el corte global del agua ha aumentado desde hace una década y sigue subiendo. (Ahmadun, 2009).

4. Características del agua de producción

Las características de las aguas producidas dependen la ubicación geológica del campo, su geología, de la naturaleza de formación, vida útil del reservorio, tipo de hidrocarburo, condiciones operativas, productos químicos utilizados en el proceso. La composición del agua de producción es una mezcla de materiales orgánicos e inorgánicos, generalmente contienen crudo libre, disuelto y emulsionado, sólidos suspendidos, gases, sales disueltas y otros, lo que representan una

composición compleja y un problema para su disposición final debido a su alto contenido de contaminantes. (Teixeira, 2016)

Los principales componentes de agua de producción son:

- Compuestos de orgánicos libres, emulsionados y disuelto.
- Compuestos químicos de producción
- Minerales disueltos
- Sólidos (incluyendo sólidos de formación, corrosión, bacterias, ceras y asfáltenos)
- Gases disueltos.

4.1 Compuestos de crudo disperso y disuelto

El crudo es una mezcla de hidrocarburos incluyendo benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos (BTEx), (NPD, hidrocarburos poli aromáticos (HAP) y fenoles. El agua no puede disolver todos los hidrocarburos, así que se encuentra dispersa en el agua.

La cantidad de crudo presente en el agua de producción está relacionada con siguientes factores:

- Composición del crudo.
- Relación de crudo/agua.
- Tipo y cantidad de productos químicos en los campos.
- pH, sólidos disueltos, temperatura, salinidad.

4.2 Compuestos químicos

En el proceso de extracción y producción del gas y petróleo se adicionan algunos químicos para tratar o prevenir problemas operacionales como corrosión, crecimiento bacteriano, incrustaciones y formación de emulsiones, mejorando de esta forma la separación entre el agua y el petróleo, a continuación, se mencionarán algunos de los diversos compuestos químicos utilizados en los tratamientos:

- Biocidas para mitigar las bacterias.
- Coagulantes y floculantes.
- Inhibidores de corrosión.
- Inhibidores de incrustaciones.
- Clarificadores para romper emulsiones.
- Solventes para reducir depósitos de parafina.

4.3 Minerales disueltos.

Los compuestos inorgánicos disueltos en el agua de producción incluyen una amplia gama de cationes, aniones, metales pesados y materiales radioactivos los cuales algunos tienen patrones similares de concentración.

4.3.1 Cationes y aniones. Tanto los cationes y los aniones tales como Na^+ , K^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2} , Ba^{+2} , Sr^{+2} , Fe^{+2} , Cl^- , SO_4^{2-} , CO_3^{2-} y HCO_3^- afectan la química del agua producida aumentando el pH, la salinidad, la capacidad amortiguadora, ocasionando incrustaciones. La salinidad es la concentración de las sales que se deben en mayor proporción al sodio y al cloruro que se encuentra diluido en el agua y en menor contribución por el calcio, el magnesio y el potasio. La concentración de sal del agua producida puede variar entre 1000 a 300000 mg/L o partes por millón (ppm).

4.3.1 Metales pesados. La concentración de los metales pesados en el agua de producción depende de la edad del yacimiento o reservorio y de su formación geológica, el metal pesado primario en aguas de producción es el Bario (Ba) pero también se pueden encontrar trazas de otros metales pesados como cadmio, cromo, cobre, plomo, mercurio, níquel, plata y zinc.

4.3.1 Materiales radioactivos naturales (NORM). La fuente de radioactividad está dada por los iones radioactivos, principalmente el Bario y el radio son co-precipitados del agua producida, pero se pueden encontrar dependiendo de la geología del pozo materiales radioactivos como el Radio 226, Radio 228, Bario y Estroncio 90, entre otros.

4.4. Sólidos

Los sólidos pueden ser incorporados al agua por diversas actividades industriales, como es el caso de los fluidos de perforación que se le adicionan sólidos al fluido para darle peso al fluido, pero después hay que remover esos sólidos a la hora de disponer dicha agua. La mayor parte de las partículas presentes en las aguas residuales están en los rangos de 1×10^{-7} milímetros las cuales deben ser removidas por procesos especiales y las partículas sobre 10^{-3} milímetros pueden ser

removidas por procesos de sedimentación o filtración. Las pruebas analíticas generalmente están divididas en sólidos sedimentables, suspendidos y disueltos.

4.5 Gases disueltos.

En la extracción del petróleo los gases más comunes y que están presentes en las aguas de producción son el dióxido de carbono CO_2 , el oxígeno O_2 y el ácido sulfhídrico H_2S , los cuales se disuelven desde la atmósfera o se forman por la actividad de bacterias y reacciones químicas en el agua.

5. Tratamientos de aguas industriales

En el tratamiento de aguas residuales industriales implica procesos fisicoquímicos y biológicos que se realiza a aguas provenientes de una actividad antrópica con el fin de eliminar los contaminantes presentes en el agua. (Xavier, 2012) Como se comentó anteriormente uno de los contaminantes más relevantes en las aguas provenientes de la industria del petróleo son las sales disueltas como el cloruro por consiguiente se va a mencionar las diferentes alternativas utilizadas o existentes para la remoción de estos.

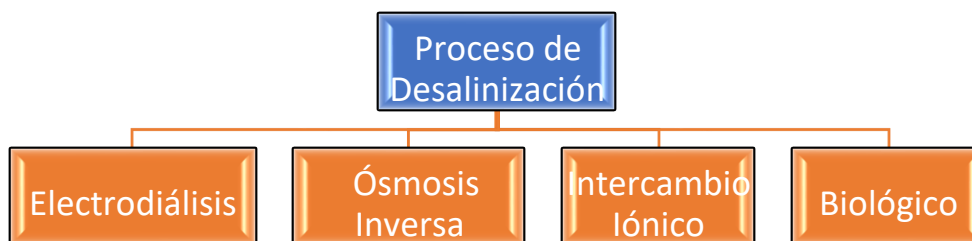


Figura 1. Alternativas para la remoción de cloruros.

5.1 Electrodialisis (ED) / Electrodialisis inversa (EDR)

Es un proceso de separación electroquímica en los cuales los iones disueltos se transfieren a través de membranas permeables cargadas por medio de un voltaje de corriente continua. Una pila de electrodialisis se compone de una serie de membranas de intercambio iónico son fabricadas a partir de polímeros de intercambio iónico dispuestas en modo alternante entre el ánodo y cátodo, donde transportan selectivamente los iones con una carga positiva (cátodo) o negativa (ánodo) y rechazan los iones de carga opuesta, se usan para separar especies iónicas y otros componentes no cargados de una solución acuosa, creando una solución más diluida.

Este proceso requiere regularmente adición de químicos (ácido y/o secuestrante) a la corriente de concentrado para inhibir la precipitación de las sales solubles como CaCO_3 y CaSO_4 en el acumulador y ayudar a el rendimiento.

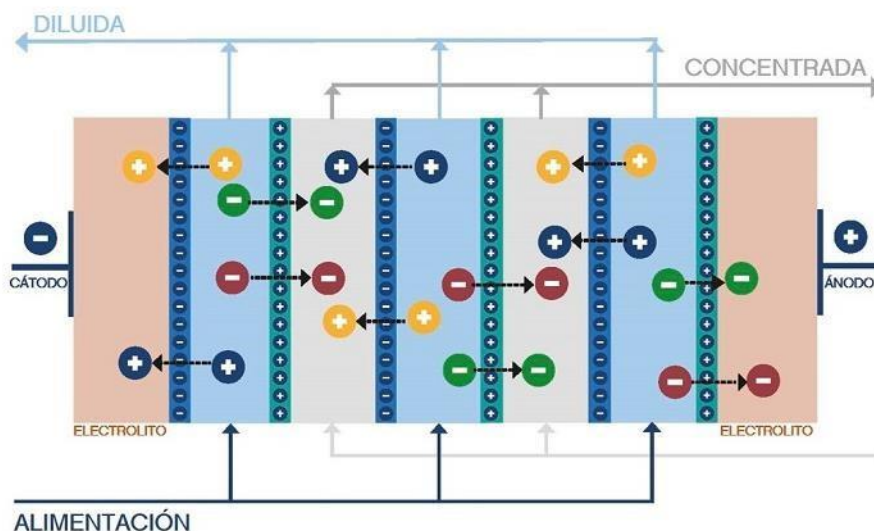


Figura 2. Principio de la Electrodialisis. adaptado de Apria Systems.

En el proceso de la tecnología de Electrodialisis se encuentra transfiriendo iones de agua salobre a través de la membrana de intercambio con ayuda de energía eléctrica donde va eliminando selectivamente los sólidos disueltos, esto quiere decir que el agua de alimentación que es el agua que trae contaminante siendo esta la que pasa directamente por los electrodos, donde separa en dos corrientes finales una es una salmuera o concentrado que viene siendo el agua que recibe los iones y por último agua producto que tiene un nivel aceptable de baja conductividad y un nivel de TDS.

La electrodialisis inversa EDR es una variación en el proceso de la electrodialisis directa donde utiliza la inversión de la polaridad del electrodo está se invierte de dos a cuatro veces por hora, su funcionalidad es limpiar automáticamente las superficies de la membrana y ayuda a prevenir la formación de incrustaciones en las membranas. Su configuración es similar a un sistema de electrodialisis directa excepto por la inversión de la polaridad y la presencia de válvulas de inversión.

Cabe resaltar que estas técnicas no son recomendadas para aguas con concentración de cloruros más de 5000 mg/L ya que consumen gran cantidad de energía que requieren para producir la corriente constante que impulsa la purificación y para bombear el agua a través del sistema. El gasto de energía, cambio de membranas y resinas es directamente proporcional a la cantidad de sales a separar.

5.2 Ósmosis inversa (OR)

La ósmosis inversa es un proceso en el cual se aplica una presión superior a la presión osmótica para obligar al agua de entrada pasar a través de una membrana especial semipermeable, dejando cualquier componente contenido en el agua que es retenido o rechazado debido a que no pueden atravesar la membrana de manera que salen por el lado de la alimentación de la membrana mientras que el agua permeada que pasa a través de la membrana es de alta calidad libre de sales, materia

orgánica, coloides y organismos microbiológicos, logrando eliminar cerca del 99% de los sólidos disueltos. (Gonzalez, 2012)

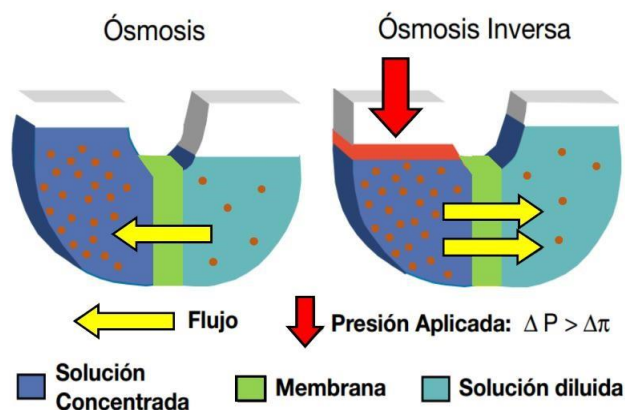


Figura 3 Funcionamiento de la ósmosis directa y ósmosis inversa.

Las membranas pueden rechazar partículas y sólidos disueltos de prácticamente cualquier tamaño, sin embargo, no rechazan bien los gases debido a su pequeño tamaño molecular. Por lo general eliminan o rechazan sólidos mayores que 1 A (Angstrom), esto significa que pueden eliminar casi todos los sólidos disueltos, protozoos, bacterias, virus, patógenos y otros contaminantes contenidos en el agua. Por lo tanto las membranas de ósmosis inversa su estructura y configuración no está diseñada para almacenar y retirar grandes cantidades de sólidos suspendidos por lo que estas partículas sólidas se acumularían y rápidamente tapan las membranas y su funcionamiento no sería continuo y el óptimo; por consiguiente deben ser eliminadas dichas partículas antes de entrar al proceso de ósmosis inversa para que las membranas funcionen correctamente, tengan una vida útil que haga viable económicamente el proyecto.



Figura 4 Planta de un sistema de ósmosis inversa. Adaptado de Lenntech

Para el proceso de separación no se requiere calentamiento ni ocurre cambio de fase solo se requiere energía para la presurización del agua de entrada y tratamiento previo para que el agua este en las condiciones adecuadas, por lo tanto, es indispensable un pretratamiento, tratamiento primario, secundario e incluso hasta microfiltración antes de que ingrese al sistema de OR. Por esta razón hacen que los costos asociados a la técnica sean elevados, debido a que las membranas se ven afectadas ya que en aguas de producción las grasas, aceites y sólidos disueltos no alcanzan a remover en un 100 por ciento.

5.2.1 Membrana semipermeable. Las membranas son lo más importante en el sistema de ósmosis inversa y de su cuidado depende su funcionamiento y eficacia de todo el tratamiento, una membrana debe ser adecuada para resistir presiones mucho mayores a la diferencia de presiones osmóticas de ambas soluciones por ejemplo un agua bruta de 35.000 ppm de TDS a 25°C tiene una presión osmótica de alrededor de 25 bar, pero son necesarios 70 bar para obtener permeado.

Hasta hace poco las membranas que más se utilizaban eran de acetato de celulosa sin embargo no soportaba niveles de pH que salgan del rango de 2 a 9 y en temperaturas arriba de 35°C y además tienen una resistencia química limitada.

Actualmente se pasó a utilizar membranas de materiales cerámicos y poliméricos, comparadas con las de acetato de celulosa están hechas para obtener mejor calidad de producto, no está condicionada a pH, resistencia química, buen rango de temperaturas y por tal motivo hay una disminución de presión de operación y por resultante se obtiene una disminución de energía.

Generalmente las membranas se usan en arreglos o módulos que se diseñan en paralelo o en serie, pero de acuerdo con la forma del arreglo que se utilice. En estos sistemas se pueden encontrar en el mercado diferentes configuraciones de membranas como tubulares, placa plana, fibra hueca y arrollamiento en espiral; se debe elegir de acuerdo con las condiciones del agua que se va a tratar.



Figura 5 Tipos de membranas. Adaptado de, Lenntech, www.osmosisinversafiltroagua.com

El sistema de ósmosis inversa obtiene un rechazo o concentrado el cual es o que se está removiendo en el proceso del fluido de entrada, normalmente la concentración de las sales es muy alta y el volumen de ese efluente es el 10% del fluido de entrada, al ser su concentración tan alta se convierte en un problema ya que se deben realizar otros procesos para poder verterlo o hacer su disposición final.

5.3 Intercambio Iónico.

El intercambio iónico es un proceso unitario se basa en las propiedades que presentan ciertas sustancias insolubles capaces de intercambiar aniones o cationes cuando se ponen en contacto con un electrolito. Este proceso tiene varios usos siendo su uso principal y más extendido en el campo es el ablandamiento o la eliminación de iones como Ca^{2+} y Mg^{2+} de las aguas residuales industriales y también es usado en la desmineralización o desalinización que se conoce como la eliminación de aniones cloruros (Cl^-) y cationes Sodio (Na^+), usado en las industrias como refinerías, industrias químicas, centrales térmicas, minería, industria médica, farmacéutica e industria alimenticia, entre otras. El intercambio iónico es un proceso reversible y el intercambiador de iones se puede regenerar o cargarlo de nuevo con los iones deseables mediante el lavado con un exceso de estos iones. No requiere un aporte de energía térmica alto, no requiere altas presiones, no requiere un tratamiento previo tan exigente, sin embargo, su limitante es el agotamiento de las resinas y los grandes volúmenes con lo que las resinas se deben regenerar, esto genera un incremento en los costos de operación, aumento en costos de insumos para la creación de los volúmenes para regenerar las resinas y en el tratamiento de este subproducto en dicho proceso. (Ayala, 2016).

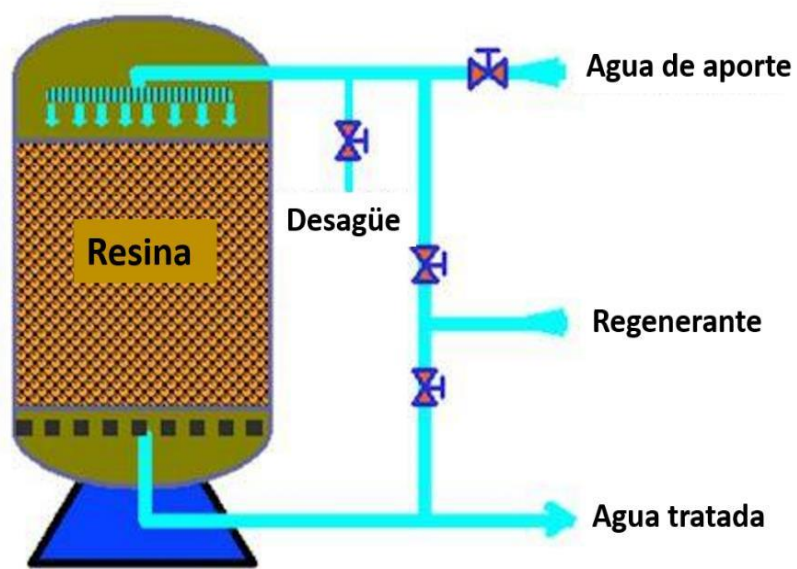


Figura 6. Esquema del proceso de intercambio iónico. Adaptado de Fluencecorp.com

La eficacia de este proceso depende de diversos factores:

- La afinidad de la resina con los iones de la disolución.
- El pH del medio.
- La temperatura.
- La concentración de la disolución.

- La difusión (dimensión del ion, carga electrostática, temperatura, estructura y tamaño del poro de la resina).

Por lo general las resinas tienen forma de gránulos o perlas, aunque también se hace la molienda de los gránulos de resina y se obtiene en forma de polvo, los diámetros de estas resinas pueden estar de 1 a 120 mm. Por lo tanto, este proceso de pulverizar las resinas genera un aumento en el área superficial, logrando una mejora en la velocidad de la reacción y una mayor área de reacción.



Figura 7. Tipos de resinas para intercambio iónico. Adaptado de www.fluencecorp.com

5.3.1 Tipos de resinas. Las resinas son la parte principal del proceso de intercambio iónico actualmente son compuestos sintéticos que se obtienen por copolimerización de estireno y vinil benceno o partir de materiales acrílicos. Se clasifican cuatro categorías de resinas:

- **Resinas catiónicas ácido fuerte:** Tiene grupos sulfónicos (SO_3) como grupo funcionales.
- **Resinas catiónicas ácido débil:** Tiene grupos carboxilo (COO^+) como grupo funcional.
- **Resinas aniónicas base fuerte:** Tiene iones amonio cuaternario en su estructura como grupo funcionales. Se subdividen en dos clases en función de que incorporen a su estructura grupos alcohol.

Tipo 1: Son bases fuertes de menor capacidad de intercambio con baja eficiencia de regeneración

Tipo 2: Incorpora los residuos alcohólicos y exhiben una basicidad algo menor, aumenta su capacidad de intercambio y la eficiencia de regeneración.

- **Resinas aniónicas base débil:** Tiene grupo amino en su estructura, no retiene aniones de ácidos débiles como bicarbonatos y silicatos. Son sensibles a la hidrólisis por parte de los iones del agua, lo que las hace más fácil regenerarse.

Para la eliminación de cloruros se realiza mediante una resina aniónica de base fuerte y una resina catiónica de ácido fuerte, se pueden encontrar en la industria variaciones en las configuraciones de intercambiadores iónicos como doble columna (catión – anión), triple columna (catión – anión – catión), cuatro columnas (catión – anión – catión – anión) y doble columna (catión – anión) y lecho mixto.

5.4 Biorremediación

La biorremediación se ha convertido en una alternativa atractiva y prometedora ya que utiliza las mismas herramientas de la naturaleza para auto depurarse como son los microorganismos, hongos, plantas; esta tecnología actúa con la sistematización de la diversidad biológica para la mitigación de la contaminación ocasionada por las actividades industriales y domesticas (Garzón JM, 2017); poseen varias ventajas sobre otros métodos de remediación, estos son: bajos costos, remediación in situ, mantenimientos casi nulos y corto periodos de tiempo (Tejedor, 2011).

Debido a las altas concentraciones presentes en las aguas residuales industriales un grupo importante de microorganismos, los extremófilos han despertado el interés de varias industrias, y una de ellas es la del sector petrolero; como son los Metalófilos y las Halófilos que microorganismos que pueden sobrevivir a altas concentraciones de metales y sales respectivamente, lo que es perfecto ya que estas son las características principales de las aguas residuales de este sector (Ninfa Ramírez D., 2006).

Se ha demostrado que la utilización de bacterias halófilas aerobias, en diversas técnicas como son los lodos activados, biodiscos y biorreactores tienen resultados de remoción variable dependiendo de la concentración de la salinidad presente en el agua tratada; lo que ayudaría a aumentar la sedimentación de la materia de suspensión, que de otra forma no sedimentaria por la presencia de sales inorgánicas e el agua residual (Meza, 2014). Los biorreactores son sistemas de

bioestimulación y bioaumentación para la degradación o transformación de un medio a un producto de cierto interés; debe cumplir ciertos criterios para ser eficiente:

- Mantener las células uniformemente distribuidas en todo el volumen de cultivo.
- Mantener constante y homogénea las condiciones del medio.
- Mantener el cultivo de interés.
- Minimizar el gradiente de concentración de nutrientes.
- Maximizar el rendimiento y la producción.
- Minimizar el gasto y los costos de producción.
- Reducir al máximo el tiempo.

6. Metodología

Para el desarrollo de este proyecto se tuvo en cuenta datos históricos del monitoreo de la caracterización de agua de producción para un campo en sabana de torres se obtienen los registros desde el 2004 hasta el 2018. La metodología planeada para esta investigación es una técnica cualitativa/cuantitativa que con base de conceptos técnicos y operacionales se valora la alternativa más apropiada para la remoción de cloruros en las aguas residuales industriales, por consiguiente, no se considera una metodología experimental debido a que no hay manipulación de las variables

ya que las mediciones fueron previamente realizadas en el área por la empresa encargada para la caracterización de dichas aguas.

De acuerdo con lo mencionado anteriormente se realizó la revisión bibliográfica sobre las diferentes técnicas de remoción de cloruros donde se procura analizar la más adecuada en cuanto a eficiencia-costos y además cumpla con los parámetros máximos permisibles de cloruros para vertimiento de agua a cuerpos de aguas, según la normativa ambiental vigente en Colombia (Resolución 0631 del 17 de Marzo del 2015 expedida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, sector de hidrocarburos Art.11) (MINAMBIENTE, 2015).

En el proceso de análisis de la investigación se dará el cumplimiento a los objetivos planteados, donde se realizará ciertas actividades para efectuar lo propuesto. A continuación, se mencionan los objetivos:

6.1 Análisis de la caracterización del agua industrial en una estación de producción petrolera.

Para dar cumplimiento a este objetivo se revisará la bibliografía de los monitoreos de las aguas residuales de la estación de producción correspondiente a los años 2004 al 2018 y se revisará la normativa ambiental vigente, se tomarán los registros de la caracterización del agua y se ordenará en tablas año a año, para luego representar el comportamiento de dichas concentraciones con respecto al valor máximo permitido por el ente regulador.

6.2 Análisis de las alternativas para la remoción de cloruros en agua industrial provenientes de la industria del petróleo.

Para el cumplimiento de este objetivo por medio de la revisión bibliográfica se analizará todos los aspectos técnicos para luego realizar unas tablas con las ventajas y desventajas de cada una de las técnicas.

6.3 Realización de un cuadro para cada una de las tecnologías evaluadas en esta investigación.

Para el cumplimiento de este objetivo teniendo en cuenta las tablas de ventajas y desventajas de cada una de las tecnologías analizadas en este trabajo se le otorgarán valores cuantitativos donde se podrá evaluar la viabilidad de cada una.

6.4 Implementación de una matriz de selección de tecnologías para aguas residuales con alto contenido de cloruros en el sector petrolero.

Para cumplir este objetivo se realizó un análisis comparativo de cada una de las técnicas evaluadas en esta investigación teniendo en cuenta unos criterios los mismos para cada una de las tecnologías, a los cuales se les otorgará valores para ser evaluados y así se podrá analizar la técnica de remoción de cloruros más apropiada según mayor beneficio para el sistema de aguas de la estación de producción petrolera.

7. Datos y análisis

Se obtuvieron los registros de los monitoreos ambientales de las aguas residuales industriales para el campo de Sabana de Torres correspondiente a los años 2004 al 2018, donde se evidencio

altos índices de algunos parámetros en el efluente que son vertidos a una quebrada de la región, estos parámetros incumplen la normativa ambiental colombiana vigente Resolución 631 del 17 de Marzo de 2015 capítulo 6 artículo 11 para la actividad de hidrocarburos del Ministerio del Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible. (MINAMBIENTE, 2015)

7.1 Caracterización del agua de una estación de producción.

A continuación, se presenta la caracterización del agua de la estación de producción en las tablas 1,2,3 y 4 con los datos de los diferentes parámetros medidos con su respectiva normativa ambiental, cabe resaltar que para esta investigación es muy importante los registros de la concentración de los cloruros. Se toman los datos más relevantes del año 2004 hasta 2018.

Tabla 1.

Caracterización de aguas de producción entre 2004 al 2008.

PARAMETRO	UNIDAD	FECHA					Decret o	Resolució n 0631
		2004	2005	2006	2007	2008		
S	ES						1594/84 Art. 72- 74	2015 Art. 11
CAUDAL	L/s	NS	2,49	0,61	0,54	1,66	NR	NR
CONDUCTIVI D AD	umhos/cm	1096 , 46	1335 , 08	1067 , 85	1634 , 85	2402 , 93	NR	NR
OXÍGENO DISUELTO	mg O2/L	7,56	2,60	3,89	3,26	2,10	NR	NR
PH / T (GR C)	Uni, pH	8,43	9,06	7,78	8,41	8,01	5,09, 0	6,0 a 9,0
CLORUROS	mg Cl-/L	260, 3 3	252, 0 0	240, 9 2	291, 6 9	578, 0 3	NR	1200,00

DBO5	mg O2/L	13,31	20,50	5,22	11,92	12,07	≥20%	60,0
							R, C	
DQO	mg O2/L	332,	116,	76,82	152,	130,	NR	180,0
		7 5	5 4		6 2	8 8		
SÓLIDOS	ml/L	0,42	<0,1	<0,1	0,21	0,11	10	1,0
SEDIMENTABLE	-h							
S								
SÓLIDOS	mg/	20,37	5,72	12,13	4,10	12,44	≥50%	50,0
SUSPENDIDOS	L						R, C	
GRASAS Y	mg/	15,23	8,60	11,55	30,82	13,08	≥80%	15,0
ACEITES	L						R, C	

Tabla 2.*Caracterización de aguas de producción entre 2009 al 2013.*

PARAMET	UNIDAD	FECHA					Decr	Resol
RO	ES						eto	ución
S		2009	2010	2011	2012	2013	1594/84	0631
							Art. 72-	2015
							74	Art. 11
CAU	L/s	1,2	1,05	1,51	1,0	0,	NR	NR
DAL		4			9	84		
CONDU	umhos/cm	426	5503,	7868	751	87	NR	NR
CTI		5,	23	, 28	5,	81,		
VID		63			11	94		
AD								
OXÍG	mg O2/L	2,5	0,63	0,26	4,4	2,	NR	NR
ENO		7			8	62		
DISUEL								
TO								

PH / T (GR	Uni,	8,3	7,80	7,71	9,0	8,	5,09	6,0 a 9,0
C)	pH	0			1	17	,0	
CLOR	mg Cl-/L	129	1521,	1988	224	28	NR	1200,00
UROS		4,	65	, 21	7,	15,		
		65			88	14		
DBO5	mg O2/L	25,62	411,	554,	42,56	14	≥20	60,
			4 7	3 3		0,6	% R,	0
						5	C	
DQO	mg O2/L	210	1112,	1477	178	37	NR	180
		,0 0	33	, 56	,4	0,1		,0
					7	3		
SÓLI	ml/L-	<0,10	0,35	0,14	6,8	0,	10	1,0
DOS	h				3	56		
SEDIMENT								
ABLES								
SÓLI	mg/	12,39	53,26	64,57	23,73	32,77	≥50	50,
DOS	L						% R,	0
SUSPEND							C	
IDOS								
GRAS	mg/	28,88	60,38	49,44	37,62	34,76	≥80	15,
AS Y	L						% R,	0
ACEIT							C	
ES								

Tabla 3.

Caracterización de aguas de producción entre 2014 al 2018.

PARAMETR	UNIDA	FECHA					Decr	Resoluc
OS	DES	2014	2015	2016	2017	2018	eto	ión 0631 2015

							1594/84	Art. 11
							Art. 72-	
							74	
CAUDA	L/s	0,91	1,08	1,26	2,46	1,25	NR	NR
L								
CONDUCT	umhos/c	8665,	4356,	NS	NS	NS	NR	NR
IVIDAD	m	42	62					
OXÍGEN	mg O2/L	1,00	3,27	2,09	3,73	2,11	NR	NR
O								
DISUELTO								
PH / T (GR	Uni, pH	8,83	8,67	7,93	7,35	8,11	5,09,	6,0 a
C)							0	9,0
CLORUR	mg Cl-/L	2628,	1461,	2940,	3170,	6560,	NR	1200,00
OS		62	25	88	63	40		
DBO5	mg O2/L	164,7	95,90	118,3	129,1	360,5	≥20	60,0
		5		4	5	0	% R, C	
DQO	mg O2/L	395,7	156,8	201,7	201,0	596,4	NR	180,0
		3	0	8	8	0		
SÓLIDO	ml/L-h	0,14	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	10	1,0
S			0	0	0	0		
SEDIMENTA								
BLE								
S								
SÓLIDO	mg/L	29,35	37,10	20,78	46,04	47,60	≥50	50,0
S							% R, C	
SUSPENDID								
OS								

GRASAS	mg/L	68,03	11,36	3,58	19,22	23,04	≥80	15,0
Y							% R, C	
ACEITES								

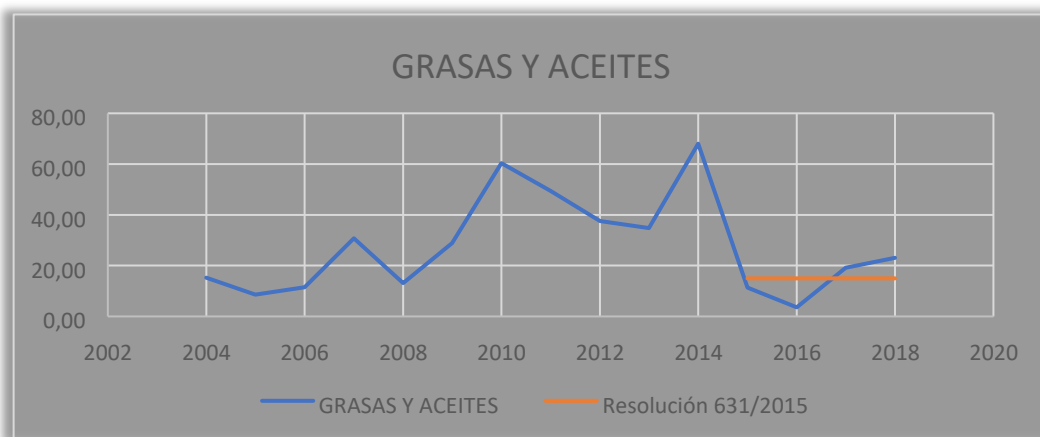
Como se evidencio anteriormente con las tablas de caracterización de aguas de la estación de producción petrolera desde el año 2008 hasta el año 2018, se puede observar que los parámetros tanto del cloruro como los del DBO₅, DQO, Sólidos Suspendidos y Grasas & Aceites muestran el incumplimiento con la normatividad ambiental que está vigente que es la Resolución 631 de 17 de marzo de 2015 detallada en el artículo 11 para la actividad de hidrocarburos (MINAMBIENTE, 2015), evidenciando que el sistema de tratamiento de aguas no está funcionando adecuadamente, por lo que se deben plantear soluciones para el manejo de dicho problema ya que si no se hace la gestión adecuada esto puede acarrear multas o hasta cerrar el vertimiento. Por lo tanto, se recomienda que deben hacer mantenimientos más anuales o semestrales a el sistema o equipos de tratamiento, verificar la instalación de las tuberías o hasta analizar la posibilidad de otras alternativas de tratamiento que sean más viable en cuanto a Costo/Beneficio, tomar las medidas que sean correspondientes con el único objetivo de estabilizar las concentraciones de los parámetros que se encuentran fuera de la norma. El objetivo de esta investigación es elaborar una matriz de selección del mejor tratamiento para la eliminación de cloruros analizando sus variables operacionales y su costo.

Cabe resaltar que como se observó en las tablas anteriores hay otros parámetros que no están cumpliendo con la normatividad ambiental para vertimientos y que son importantes analizarlos como la concentración de cloruros, los cuales son el objetivo y la razón del presente documento y con el cuál se hará el análisis de las diferentes tecnologías revisadas anteriormente.

7.2 Análisis del comportamiento de los parámetros de la caracterización de agua de producción.

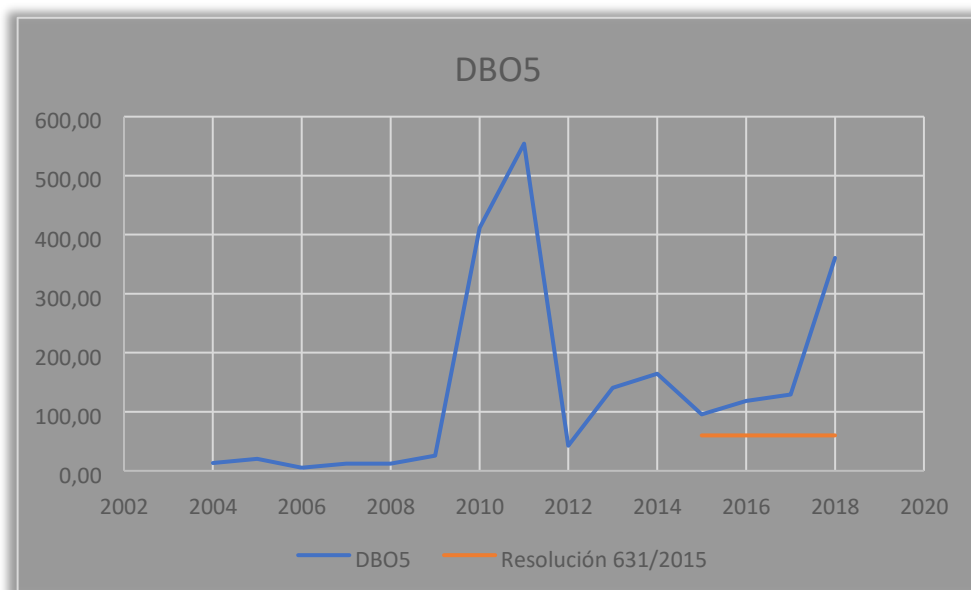
A continuación, se presentan las gráficas del comportamiento de los parámetros más importantes o más representativos de los monitoreos realizados entre el año 2004 al 2018 como grasas y aceites, DBO5, sólidos suspendidos y cloruros, observando así el desfase entre las concentraciones vertidas y las permitidas en la normatividad ambiental vigente, lo cual deja ver que se requiere urgente un sistema de tratamiento de aguas que sea eficiente para dar cumplimiento a la norma ambiental y también en el análisis y evaluación de las diferentes tecnologías revisadas para el tratamiento de los efluentes industriales con alto contenido de cloruros.

En la gráfica 1 se muestra el comportamiento de las grasas y aceites en los monitoreos realizados entre el año 2004 y 2018, donde se evidencia un aumento considerado en el resultado de la retención de grasas y aceites entre los años 2006 al 2014 y aumentando nuevamente en el 2016 al 2018, incumpliendo con la norma reglamentada superando el valor máximo permitido que es 15 mg/L para vertimientos. En la mayoría de los tratamientos para la disposición se requieren valores muy bajos de grasas y aceites.



Gráfica 1. Comportamiento de la concentración de grasas y aceites entre el 2004 al 2018.

En la gráfica 2 se muestra la carga orgánica que se encuentra en el afluente del tratamiento de aguas de producción, cabe resaltar que este aquí también aumenta la concentración del parámetro a partir del año 2010 al 2018 mostrando que el tratamiento no ha sido el óptimo desde ese año debido a que el valor máximo permitido por la normatividad ambiental es de 60 mg/L y ese valor es superado así que no debe ser vertido ese efluente a ningún cuerpo de agua.



Gráfica 2. Comportamiento de la concentración de DBO5 entre el 2004 y 2018.

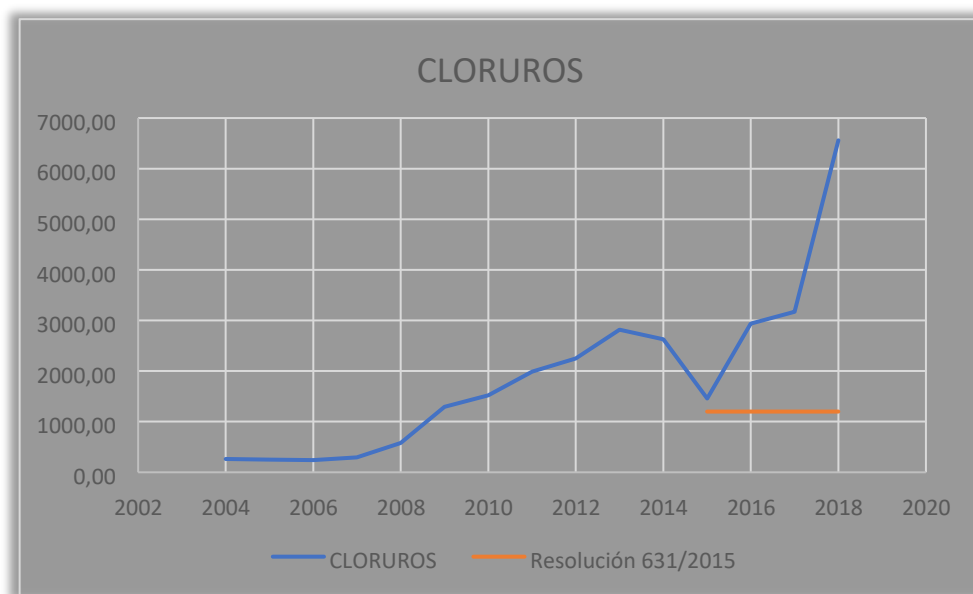
En el caso del comportamiento de los sólidos suspendidos totales obtenidos en los monitoreos realizados entre el 2004 al 2018 se observa una variación en los afluentes del sistema pero se nota que se mantuvo por debajo del máximo permitido de la norma ambiental en comparación con los demás parámetros, solo en el año 2010 ocurrió un aumento en este parámetro, quizás las unidades del sistema tenían en el fondo una capa considerable de sedimentos los cuales se comienzan a ir con la corriente y esto se ve reflejado al final del tratamiento. Para esto se debe implementar una mayor frecuencia en los mantenimientos de los sistemas y retirar los sedimentos que se encuentren en las unidades.



Gráfica 3. Comportamiento de la concentración de sólidos suspendidos totales entre el 2004 y 2018.

Para el caso de los cloruros es notorio el aumento en la concentración de este parámetro desde el 2008 hasta el 2018, donde se debe revisar exhaustivamente el porqué del incremento de dicho parámetro si son temas operacionales, por ejemplo mal funcionamiento de las unidades del tratamiento que hacen que los resultados finales nos sean los esperados o que el afluente llega con más carga de sales de lo habitual, revisar si esas alternativas que se manejan en el campo ya son

muy obsoletas o no les están dando el mantenimiento adecuado o requerido por cada unidad. En la actualidad contamos con una restricción para la disposición de los cloruros con concentración máxima permisible de 1200 mg/L, lo que nos muestra que estamos incumpliendo la norma ambiental, por lo tanto, es importante diseñar una estrategia que permita verter el efluente en las condiciones exigidas por la ley colombiana.



Gráfica 4. Comportamiento de la concentración de cloruros entre el 2004 y 2018.

Es importante realizar un buen tratamiento en las aguas residuales industriales ya que debido a esto se puede reutilizar este fluido en otros procesos, convirtiéndose en un recurso renovable y disminuyendo los costos como por ejemplo en tratamientos, entre otros. El objetivo siempre de cualquier tratamiento es mejorar la calidad del efluente según sea su uso; ya sea para su disposición como inyección o para ser vertida en cuerpos de agua.

En Colombia se utiliza en algunas regiones el vertimiento a los ríos, sin embargo, toda agua que se descargue a un cuerpo hídrico debe ser tratada mediante procesos químicos y físicos que

remuevan el mayor número de contaminantes, por lo tanto, estos vertimientos deben ser controlados por la entidad reguladora para no ocasionar un impacto negativo al medio ambiente.

En la industria petrolera se han realizado muchas investigaciones y están trabajando en nuevos proyectos para llegar a cero vertimientos, donde se reutilicé el 100 por ciento de sus aguas de producción. Las aguas de producción siempre se han considerado un problema para la industria petrolera ya que se extrae más agua que crudo y debido también a la alta concentración de contaminantes que en ella trae, en este caso se hace el análisis para la remoción de cloruros buscando una aplicación, tecnología o método que sea óptimo para la remoción de dicho contaminante.

7.3 Análisis y evaluación de las técnicas revisadas

Anteriormente se realizó la revisión bibliográfica de las tecnologías más empleadas en la industria petrolera para el tratamiento de aguas de producción y con la información obtenida se analizó y se realizó una tabla comparativa de las ventajas y desventajas teniendo en cuenta las características fisicoquímicas, la parte operativa, los costos operacionales, la energía y el área requeridas para cada tecnología o técnica que se evaluó.

Mediante la metodología de análisis cualitativo y cuantitativo, se estableció las ventajas y desventajas que presenta cada tecnología propuesta para la remoción de los cloruros. Para lo cual se diseñó una matriz de viabilidad que califica las ventajas y desventajas de cada una, donde 5 es la máxima clasificación y 0 es la mínima (Ver tabla 4). De acuerdo con cada proceso de remoción se les asignó 6 ventajas y 6 desventajas, los cuales se promediarán como “Ponderado Parcial” (Ver Ecuación 1 y 2) correspondientemente y se calculará la viabilidad, “Ponderado Total” (Ver Ecuación 3), como un Error Relativo sin valor absoluto, ya que el Ponderado Total puede ser negativo, donde el valor exacto corresponde al promedio de las ventajas y el valor experimental al

promedio de las desventajas. Donde el resultado más viable es el “Ponderado Total” mayor que tiende a 1, ya que representa mayor impacto de las ventajas sobre las desventajas.

Tabla 4.

Evaluación de ventajas y desventajas.

Valor	Ventajas	Desventajas
5	Impacto Positivo	Impacto Negativo
0	Impacto Negativo	Impacto Positivo

Ecuación 1. Cálculo de ventajas ponderado parcial.

$$P_p = \frac{\sum^{n_1} Valor\ Ventaja}{n}$$

Ecuación 2. Cálculo de desventajas ponderado parcial.

$$P_p = \frac{\sum^{n_1} Valor\ Desventajas}{n}$$

Donde n es el número de ventajas y desventajas respectivamente, en este caso 6.

Ecuación 3. Cálculo ponderado total de las ventajas y desventajas.

$$P_t = \frac{P_p Ventajas - P_p Desventajas}{P_p Ventajas}$$

7.3.1 Electrodiálisis inversa. En la siguiente tabla se presentan las ventajas y desventajas de la técnica de electrodiálisis inversa y su análisis cuantitativo.

Tabla 5.

Ventajas y desventajas de electrodiálisis y su análisis cuantitativo.

Electrodiálisis Inversa			
VENTAJAS	Calificación n Máximo:5 Mínimo: 0	DESVENTAJAS	Calificación n Máximo:5 Mínimo: 0
Remueve de forma eficiente las sales y metales presentes en el agua.	4	presenta precipitaciones de sales lo que forma incrustaciones generando colapso de las membranas limitando su vida útil	4
No requiere grandes cantidades de áreas.	4	No apta para aguas con más de 5000 mg/L de cloruros.	3
Recuperación de hasta un 90% del agua. Eliminación de sales de 60 al 90%	4	Limitada remoción de compuestos sin carga, incluyendo moléculas orgánicas, sílice, boro y microorganismos.	3,5
Moderado costo operacional y bajo consumo de energía eléctrica.	4	Requiere limpieza regularmente con ácido diluido y soluciones alcalinas para restaurar su funcionamiento.	4
Técnica sencilla de operar y controlar.	4	Aumento en los costos para aguas de producción con alto contenido de Cloruros y TDS.	4,5
Bajo consumo de productos antiincrustantes debido a la reversión automática.	4,5	No apta para aguas con concentraciones mayores de 15000 mg/L de TDS.	4,5
Ponderación Parcial	4,08		3,92
Ponderación Total		0,04	

7.3.2 Ósmosis inversa. En la siguiente tabla se presenta las ventajas y desventajas de la técnica de ósmosis inversa y su respectivo análisis cuantitativo.

Tabla 6.

Ventajas y desventajas de ósmosis inversa y su análisis cuantitativo.

Ósmosis Inversa			
VENTAJAS	Calificación n Máximo:5 Mínimo: 0	DESVENTAJAS	Calificación i Máximo:5 Mínimo: 0
Se logra eliminar cerca del 95% del agua de entrada de sólidos disueltos, cloruros, otras sales, metales, entre otros.	5	No toleran muy bien las variaciones de las condiciones en el fluido a tratar	4
Proceso de purificación de forma continua	4	El costo de las membranas es elevado alrededor de los 800 a 1000 dólares, su vida útil es de 3 a 7 años dependiendo de las condiciones de operación si las condiciones son las mejores se deberán cambiar antes de lo estipulado.	4,5
Remoción de partículas muy pequeñas tamaño de poro < 0,0001 µm	5	Genera un subproducto o rechazo del proceso llamado salmuera ultra concentrada lo cual debe ser tratada por aparte ya que no puede ser vertida.	5
Necesita poco espacio dependiendo del caudal.	4	Se requiere un pretratamiento para retirar los contaminantes antes de entrar al proceso con el objetivo de garantizar la durabilidad de las membranas.	4
Alta variedad de membranas por lo tanto genera buenos resultados	4,5	Altos costos en la utilización de la tecnología debido a los tratamientos que se deben realizar antes y después del proceso.	4,5
Requiere menos energía que los procesos térmicos o que otras tecnologías de membranas.	4	Potencial de ensuciamiento de membrana.	4
Ponderación Parcial	4,42		4,33
Ponderación Total		0,02	

7.3.3 Intercambio Iónico En la siguiente tabla se presenta las ventajas y desventajas de la técnica de intercambio iónico y su respectivo análisis cuantitativo.

Tabla 7.*Ventajas y desventajas de intercambio iónico y su análisis cuantitativo.*

Intercambio Iónico			
VENTAJAS	Calificación Máximo:5 Mínimo: 0	DESVENTAJAS	Calificación Máximo:5 Mínimo: 0
Trabaja con concentraciones de TDS entre 5000 mg/L a 7000 mg/L	3,5	Necesita pretratamiento para la remoción de contaminantes	4
Se alcanza una eliminación de iones monovalentes y divalentes hasta el 93%. El recobro del agua oscila entre el 80%	4,3	Las resinas de intercambio catiónico no deben estar expuesto a 120°C.	2,5
Necesita electricidad solo para bombeo	4	Se necesita tanques por lo tanto espacio para los regenerantes.	3
Requiere de poca supervisión	5	No elimina las bacterias, sustancias orgánicas o los patógenos de forma efectiva.	3,5
Las resinas son muy estables químicamente y fácil regeneración.	5	Mayor costo de producción cuando la producción es alta.	3,5
genera muy poco subproducto que requiera un tratamiento secundario.	4	se necesita grandes volúmenes de soluciones regeneradoras para la reactivación de las resinas	4
Ponderación Parcial	4,30		3,42
Ponderación Total		0,21	

7.3.4 Biológico. En la siguiente tabla se presenta las ventajas y desventajas de la técnica de Biológica y su respectivo análisis cuantitativo.

Tabla 8.*Ventajas y desventajas de biológico y su análisis cuantitativo.*

Biorremediación			
Ventajas	Calificación Máximo:5 Mínimo: 0	Desventajas	Calificación Máximo:5 Mínimo: 0

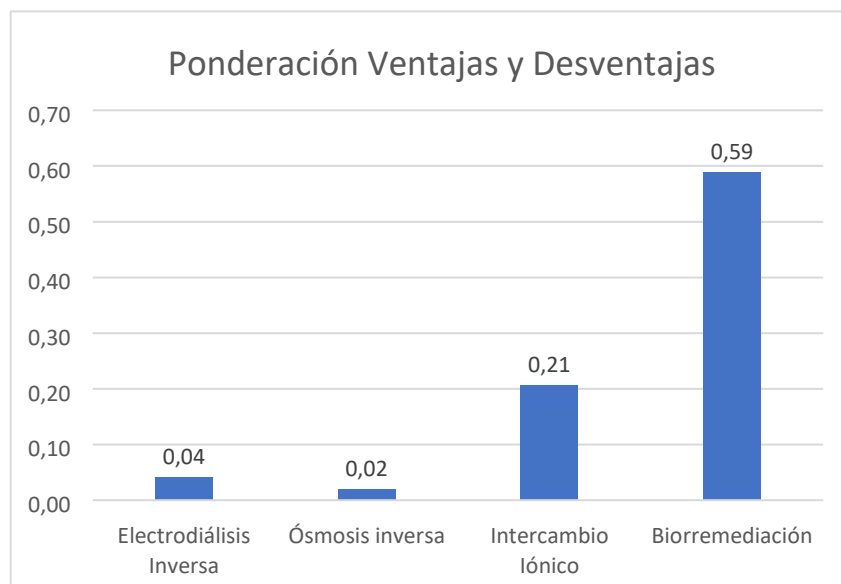
bajos costos a nivel operacional y a nivel de mantenimiento	5	el producto de la biodegradación puede llegar a ser más toxico que el mismo compuesto	3
fácil acople con otras tecnologías	4,5	al inicio del proceso se requiere una evaluación <i>in situ</i> , caracterización y evaluación de factibilidad lo cuales pueden llegar a costos altos	2
tiene una capacidad de remoción asta de un 90%	4,5	se requiere de tiempo para colocar en funcionamiento el proceso ya que requiere un periodo de adaptación	1
no se requiere equipamiento de maquinaria costosa	5	su eficiencia varía dependiendo de la fluctuación de las concentraciones de contaminante	1,5
presenta poca transferencia de contaminantes de un medio a otro ya que sufre una biotransformación y mineralización lo cual no requiere de ningún tratamiento posterior	4	solo se puede aplicar a compuestos biodegradables	1
presenta una gran variedad de metodologías para la aplicación de este proceso	5	es un proceso científicamente intensivo que debe adaptarse a las condiciones específicas del lugar para reducir al mínimo los efectos de la contaminación	3
Ponderación Parcial	4,67		1,92
Ponderación Total		0,59	

Según la tabla de evaluación de los impactos positivos e impactos negativos, donde 5 es un valor de impacto positivo para las ventajas y de impacto negativo para las desventajas, el resultado de la evaluación nos presentó que el sistema más viable es la biorremediación con un valor de 0,59 como valor total de ponderación, seguido por las técnicas de intercambio iónico y electrodiálisis inversa siendo la ósmosis inversa la menos viable.

Tabla 9.*Viabilidad de selección según la tecnología.*

Sistema	Ponderación total	
	Viabilidad de	
	de Ventajas y	
	Selección	
	Desventajas	
Electrodialisis Inversa	0,04	3
Ósmosis inversa	0,02	4
Intercambio Iónico	0,21	2
Biorremediación	0,59	1

Se muestra los resultados de forma gráfica para poder apreciarlos mejor donde según las ventaja y desventajas analizadas en cada una de las tecnologías nos dio como resultado que la técnica más viable es la de biorremediación en cuanto a menos impactos negativos al medio ambiente, menos transferencia de contaminación de un proceso a otro, menos costo de energía.



Gráfica 5. Ponderación total de ventajas y desventajas.

7.4 Análisis comparativo de las tecnologías según criterios y su respectivo valor cuantitativo para lograr crear una matriz.

Para esta investigación se ejecutó un segundo análisis donde se compararon las tecnologías con 9 criterios que se escogieron los cuales son:

- Estado de la tecnología
- Tipo de Remoción
- Calidad del agua de entrada
- Calidad del agua de salida
- Energía requerida
- Uso de químicos
- Vida Útil

- Condiciones de infraestructura
- Condiciones de operación y mantenimiento.

Se pretende analizar estos parámetros escogidos para poder así verificar el resultado anterior y saber si en realidad la técnica de biorremediación es la más adecuada para el tratamiento de aguas de producción con altos contenidos de cloruros. A continuación, se representa la tabla 10 donde está el comparativo de las tecnologías con sus respectivos valores cuantitativos.

Tabla 10.

Comparativo de las tecnologías según criterios técnicos y su respectivo análisis cuantitativo.

COMPARATIVO DE LAS TECNOLOGÍAS								
CRITERIO	ELECTRODIÁLISIS INVERSA		ÓSMOSIS INVERSA		INTERCAMBIO IÓNICO		BIORREMEDIACION	
	DESCRIPCIÓN	VALOR Máximo:5 Mínimo: 0	DESCRIPCIÓN	VALOR Máximo:5 Mínimo: 0	DESCRIPCIÓN	VALOR Máximo:5 Mínimo: 0	DESCRIPCIÓN	VALOR Máximo:5 Mínimo: 0
Estado de la tecnología	Robusta y madura para la desalinización de aguas salobres probada a escala laboratorio para el tratamiento de aguas de producción.	4,5	Tecnología robusta y madura	4,5	Amplia operación industrial.	4,5	Es una tecnología emergente con altos beneficios para el medio ambiente, lo que hace hincapié en la desintoxicación y la destrucción de los contaminantes; aunque haya tenido aplicaciones limitadas debido a las restricciones impuestas por el sustrato y viabilidad de los microorganismos utilizados	4
Tipo de Remoción	Sales, orgánicos solubles	3,5	Sales, metales, ácidos, azúcares, aminoácidos, materia orgánica, arena, limo, arcilla, algas,	5	Se puede alcanzar eliminación de iones mono y divalentes hasta el 93%	4	Material orgánico, nutrientes, patógenos, metales pesados, pesticidas, herbicidas, hidrocarburos y	5

			bacterias, virus, protozoos, iones metálicos y no metálicos.				cualquier compuesto biodegradable; variando desde 16,4% hasta un 98,8%	
Calidad del agua de entrada	Puede tratar aguas con concentraciones entre 4000 y 15000 mg/L TDS y No se recomienda aguas con concentraciones más de 5000 mg/L de cloruros	3	Concentración de TDS entre 500 a 47000 mg/L. Permite tratar aguas con electrolitos monovalentes (Na, Cl), divalentes (Mg, Ca, Ba, SO ₄) y multivalentes (Fe, Mn) Depende de la salinidad del agua de entrada,	4,5	Recibe TDS entre 500 mg/L y 7000 mg/L	4	depende de la tolerancia o resistencia que tenga el agente degradante a la sustancia contaminante	4,5
Calidad del agua de salida	Remoción de contaminantes hasta 90% dependiendo del número de etapas del proceso.	4	por lo general los TDS se reducen entre 100 y 1500 mg/L	4	Depende de las condiciones del agua de entrada	3,5	Depende de la cinética y los ciclos o etapas que tenga el proceso.	4,5
Energía requerida	Eléctrica. El consumo de energía está en el intervalo de 0,14 a 0,20 kWh/lb equivalente a NaCl eliminado. Para aguas de 5000 ppm se necesitan 1 a 2 Kwh/m ³ .	3	Eléctrica. Entre 0,5 y 3 kWh/gal (0,02 a 0,13 kWh/bbl) para alimentar el sistema de bombas de alta presión.	2,5	Los requerimientos de energía son mínimos y podrían incluir los costos de bombeo. La demanda de energía podría ser más baja que 1,5 kWh/kgal (0,07 kWh/bbl), asumiendo una tasa de flujo de 200 gpm y 80% de eficiencia en el bombeo.	4,5	Los requerimientos de energía son mínimos, dependiendo del diseño a trabajar	4,5
Uso de químicos	Se requiere para limpieza periódica usando ácidos, EDTA, cáusticos y desinfectantes, para prevenir ensuciamiento e incrustaciones	2,5	Se requiere para limpieza el uso de NaOH, HCl, Na ₂ S ₂ O ₄ , H ₂ O ₂ , Na ₄ EDTA. Requiere de sustancias inhibidoras para prevenir ensuciamiento e incrustaciones.	1	Se requiere para la limpieza soluciones de regeneración como el HCl, H ₂ SO ₄ , NaOH, Na ₂ CO ₃ o NaCl. Depende de la calidad el agua de entrada y la capacidad de adsorción de la resina.	2	No requiere ningún tipo de químicos	5
Vida Útil	Entre 4 y 5 años	3,4	Las membranas pueden requerir un reemplazo entre 3 a 7 años, pero eso depende de las condiciones de operación.	4	Vida útil de resina de intercambio aniónico entre 4 a 8 años. Vida útil de resina de intercambio catiónico entre 10 a 15 años.	5	La vida útil está estrechamente relacionada al rendimiento del proceso	3
Condiciones de infraestructura	Mínimas. Son sistemas compactos	5	Mínimas en comparación con otras tecnologías	5	Se puede dimensionar plantas de tratamiento de	5	Mínimas. Son sistemas compactos	5

Condiciones de operación y mantenimiento	Monitoreo y control de la corriente, voltaje, TDS, pH, integridad de la membrana. Se requiere mano de obra calificada. Requiere mantenimiento y limpieza periódica.	2	de desalinización.	4	agua residual industrial para pequeñas unidades hasta para grandes.	4,5	Requiere monitoreo para la tasa de flujo y calidad el agua en la salida; lo cual requiere poca supervisión y no es necesaria la mano de obra calificada.	4,5
			No superar temperaturas a 113 °F (45° C). Sistema automatizado con operación semicontinua (Poca mano de obra). Monitoreo y control de pH de entrada, flujo de entrada, TDS de entrada, Turbidez, cloruros y las presiones dentro del tanque.		Requiere poca supervisión. Las resinas de intercambio catiónico no deben ser expuestas a 120°C. Requiere monitoreo para las tasas de flujo, calidad del agua a la salida y la regeneración de la resina.			
Promedio		3,43		3,83		4,11		4,44

Lo cual se dio una descripción y calificación para cada criterio; la calificación de dio entre un rango de 0 a 5; donde 5 es la máxima clasificación que corresponde a muy eficiente y 0 es la mínima que corresponde a muy deficiente; teniendo todas las calificación se promediaron (Ver Ecuación 4) y posteriormente se le realizó una ponderación (Ver Ecuación 5); para que haya una equivalencia numérica con la “Ponderado Total ” de las ventajas y desventajas para posteriormente realizar un promedio entre estos dos valores.

Donde n_c el número de criterios con se compararon todas las tecnologías, en este caso 9.

Ecuación 4

$$P_{ct} = \frac{\sum^{n_1} \text{Valor de cada Criterio}}{n_c}$$

Ecuación 5

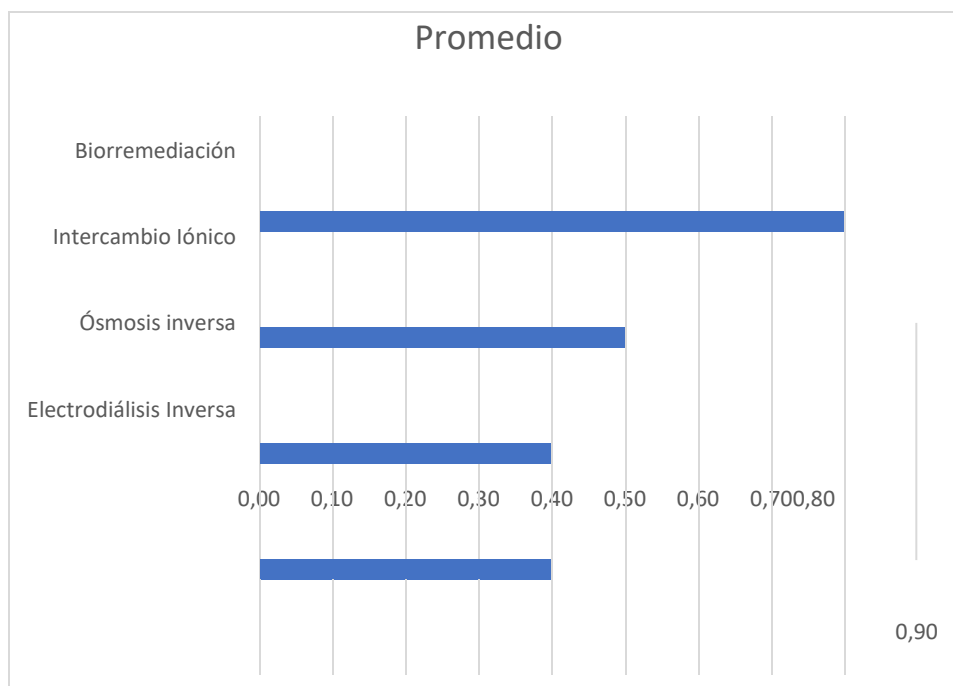
$$P_{Pct} = \frac{P_{ct} * 1}{\text{Valor Maximo de los } P_{ct}}$$

En la tabla 11 y la gráfica 6 se muestran los resultados de los análisis comparativos de los nueve criterios evaluados para cada una de las tecnologías o técnicas, donde se pudo comparar y corroborar que el mejor tratamiento es la biorremediación.

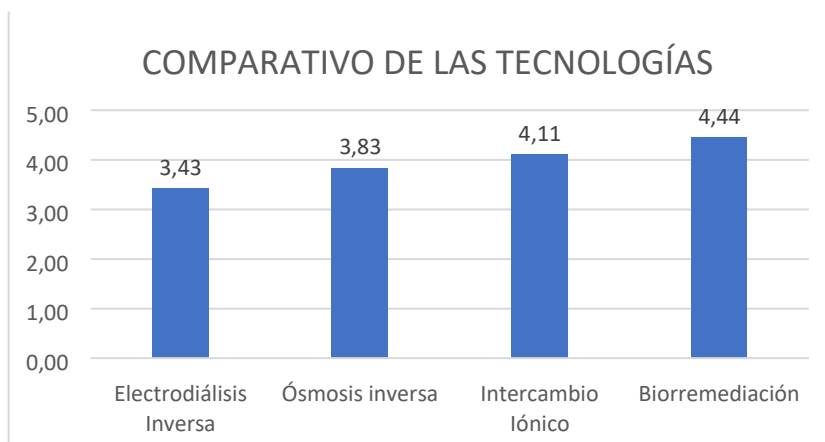
Tabla 11.

Promedio de cada una de las tecnologías

Sistema	Promedio	Ponderación del Promedio
Electrodiálisis Inversa	3,43	0,77
Ósmosis inversa	3,83	0,86
Intercambio Iónico	4,11	0,93
Biorremediación	4,44	1



Gráfica 6. Comparativo de los promedios ponderados de las tecnologías



Gráfica 7. Comparativo de los promedios de las tecnologías

En la siguiente tabla y gráfica se muestran en un paralelo los dos análisis realizados para evaluar la mejor técnica para la eliminación de cloruros.

Tabla 12.

Comparativo de los dos análisis de ponderación

Sistema	Ponderación total de Ventajas y Desventajas	Ponderación del Promedio Comparativo	Promedio
Electrodiálisis Inversa	0,04	0,77	0,41
Ósmosis inversa	0,02	0,86	0,44
Intercambio Iónico	0,21	0,93	0,57
Biorremediación	0,59	1,00	0,79

8. Conclusiones.

Los avances de la tecnología son una gran ayuda permitiendo el cumplimiento a cabalidad con las normas ambientales ayudando a dar una mayor eficiencia tanto en lo

administrativo, operativo como económico; En la explotación de hidrocarburos existen una gran variedad de tratamientos para las aguas de producción previo a su vertimiento, por lo cual se dieron cuatro alternativas como Electrodialisis Inversa, Ósmosis inversa, Intercambio Iónico, Biorremediación para su evaluación y posterior escogencia de dependiendo de las características dadas a cada caso en particular.

Lo cuales se identificaron varias falencias en común en más de una de estas tecnologías presentadas como la generación de subproductos contaminantes que posteriormente se deberá realizar un postratamiento lo que generaría más gastos y un aumento en el tiempo para el tratamiento final; con son la Electrodialisis Inversa, Ósmosis inversa e Intercambio Iónico, otra falencia son los elevados costos de mantenimiento y operación que requieren para el buen funcionamiento del tratamiento en esta categoría entra la Electrodialisis Inversa y la Ósmosis inversa; la gran desventaja y a la misma vez una gran ventaja que presenta el Intercambio Iónico que es una tecnología muy selectiva ya que no es capaz de remover materia orgánica ni patógenos pero alcanza la remoción más alta de iones monovalentes.

Aunque la Biorremediación presenta grandes ventajas como son los bajos costos y la degradación total o parcial de los contaminantes, es una tecnología que se debe evaluar con estudios especializados ya que la biodegradación presenta varios inconvenientes como la generación de compuestos que podrían llegar a ser más tóxicos que el mismo contaminante, pero es fácil prever esto con una identificación y análisis de los factores claves en este proceso.

La concentración final de cloruros, luego de la implementación de la alternativa permitirá que este parámetro entre en el rango de aceptación de la resolución 631 del 17 de Mayo de 2015, la cual exige concentraciones menores de 1200 ppm,

A demás cada uno de estos sistemas tienen la capacidad de remover los sólidos disueltos totales (TDS), por ende, el porcentaje de rechazo también aplicaría para uno de los cationes y aniones disueltos en el agua, permitiendo mejorar otros parámetros a partir de la remoción de los cloruros.

La disminución de los cloruros en las Aguas Residuales Industriales permitirá la recuperación de la biota acuática ya que disminuye las concentraciones de DBO5, DQO y por ende la conductividad lo que permitirá la proliferación de las especies endémicas, logrando un impacto positivo para el ambiente aguas abajo.

9. Recomendaciones

Al comparar los costos propuestos anteriormente; es importante tener en cuenta al seleccionar cual tiene mayor probabilidad de éxito en la solución del problema tanto desde el punto de vista de tiempo como costo.

Es indispensable antes de realizar cualquier cambio en el campo o estación que se vaya a realizar y que no esté cumpliendo la normatividad ambiental se realice un estudio previo

a los equipos y se realice un mantenimiento, para verificar que el sistema de tratamiento no es el adecuado y luego si implementar el tratamiento óptimo.

Se recomienda que para cualquier campo que se vaya a implementar la técnica biológica se haga un estudio previo de factibilidad más profundo y un análisis más detallado para comprobar su funcionalidad y lograr una efectividad y eficiencia en el tratamiento de aguas residuales con altos contenidos de cloruros dando cumplimiento a la normatividad ambiental.

Referencias Bibliográficas

- Ahmadun, F.-R. (2009). Review of technologies for oil and gas produced water treatment. *Journal of Hazardous Materials* 170, 530-551.
- Council, G. W., & Consulting, A. (s.f.). *Modern Shale Gas Development in the United States: A Primer*. Recuperado el 21 de 11 de 2018, de DOE Office of Fossil Energy and National Energy Technology Laboratory: http://www.netl.doe.gov/technologies/oilgas/publications/EPreports/Shale_Gas_Primer_2009.pdf -
- Garzón JM, R.-M. J.-G. (2017). Aporte de la biorremediación para solucionar problemas de contaminación y su relación con el desarrollo sostenible. *Universidad y Salud*, 309-318.
- Jaimes, D. M. (2009). Diseño de la planta de tratamiento de agua residuales y de agua de producción evaluando las diferentes alternativas Nacionales y Extranjeras aplicación Campo Colorado. Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingeniería Fisicoquímicas.
- Lapeña, M. R. (1999). *Tratamiento de aguas industriales: aguas de proceso y residuales*. Barcelona: MARCOMBO.
- Meza, T. D. (2014). *Biorremediación de Aguas residuales con alta salinidad mediante bacterias Halófilas Aisladas de perfiles costeros de Ecuador*. Obtenido de <http://dspace.udla.edu.ec/bitstream/33000/2274/1/UDLA-EC-TIAM-2014-05.pdf>

MINAMBIENTE. (17 de marzo de 2015). Resolución 631. Bogotá, Colombia: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

Ninfa Rmirez D., J. A. (2006). Microorganismos extremófilos. Actinomicetos halófilos. México. *Revista Mexicana de Ciencias Farmacéuticas*, 56-71.

Pedro Castillo, J. B. (1995). DEPURACIÓN DE AGUA RESIDUAL CON SALINIDAD VARIABLE EMPLEANDO UN PROCESO DEBIDISCOS (RBC). *Ingeniería del Agua.*, 25-30.

Ramalho, R. S. (2003). *Tratamiento de aguas residuales*. Barcelona: Reverté.

Richard, A. (2010). Manejo de la producción de agua: Residuo o Reúso. *Oilfield Rewiew Schlumberger*.

Romero, J. A. (2004). *Tratamientos de aguas residuales, teoría y principios*. Bogotá: LEMOINE Editores.

Teixeira, A. M. (Enero de 2016). Elaboración de un manual de selección de tecnologías para el tratamiento de aguas de producción. Sartenejas, Venezuela.

Tejedor, C. (2011). *Universidad de Alcalá*. Obtenido de http://www3.uah.es/bioquimica/Tejedor/bioquimica_ambiental/biorremediacion.pdf

Xavier, E. C. (2012). *Tecnologías aplicables al tratamiento de residuos. Pag 106 - 108*. Díaz de santos.