

**TRATAMIENTO Y DISPOSICIÓN FINAL DE AGUA RESIDUAL CON
ALTO CONTENIDO DE CLORUROS, PROVENIENTE DEL
PROCESO DE PRODUCCIÓN DE PETRÓLEO CRUDO, DEL
CAMPO SANTA LUCIA DE PETRÓLEOS DEL NORTE S.A.**

JORGE ARMANDO FERREIRA ASCENCIO

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE QUÍMICA
ESPECIALIZACIÓN EN QUÍMICA AMBIENTAL
BUCARAMANGA**

2014

**TRATAMIENTO Y DISPOSICIÓN FINAL DE AGUA RESIDUAL CON
ALTO CONTENIDO DE CLORUROS PROVENIENTE DEL
PROCESO DE PRODUCCIÓN DE PETRÓLEO CRUDO, DEL
CAMPO SANTA LUCIA DE PETRÓLEOS DEL NORTE S.A.**

JORGE ARMANDO FERREIRA ASCENCIO

**Trabajo de Monografía para optar el título de Especialista en Química
Ambiental.**

Director:

**Ph.D. MARIANNY YAJAIRA COMBARIZA MONTAÑEZ
Coordinadora Especialización Química Ambiental UIS**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE QUÍMICA
ESPECIALIZACIÓN EN QUÍMICA AMBIENTAL
BUCARAMANGA**

2014

TABLA DE CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	11
1 OBJETIVOS	15
1.1 OBJETIVO GENERAL	15
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
2 MARCO TEÓRICO.....	16
2.1 INYECCIÓN.....	16
2.1.1 Consideraciones generales.....	21
2.2 ELECTRODIÁLISIS Y ELECTRODIÁLISIS INVERSA.....	22
2.2.1 Proceso estándar de electrodiálisis.	23
2.2.2 Proceso de electrodiálisis inversa.	24
2.3 OSMOSIS INVERSA	27
2.3.1 Componentes básicos de un sistema de osmosis inversa.....	27
2.3.2 Membranas semipermeables.	29
2.3.3 Aplicaciones de la ósmosis inversa y consideraciones generales	32
2.4 EVAPORACIÓN	34
2.4.1 Evaporación térmica.....	34
2.4.2 Evaporación mecánica.....	39
3 JUSTIFICACIÓN	44
3.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL CAMPO SANTA LUCIA.	45
3.2 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS INDUSTRIALES DEL CAMPO SANTA LUCIA.	48
4 METODOLOGÍA.....	52
5 DATOS Y ANÁLISIS	55
5.1 CARACTERIZACIÓN DEL AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL DEL CAMPO SANTA LUCIA.	55
5.2 PARÁMETROS DE INTERÉS PARA EL ANÁLISIS DE LAS TÉCNICAS EVALUADAS PARA LA DISPOSICIÓN DE EFLUENTES CON ALTO CONTENIDO DE CLORUROS.	60

5.3	RESULTADO DE ANÁLISIS DE ANIONES Y CATIONES DEL AGUA INDUSTRIAL DEL CAMPO SANTA LUCIA.....	65
5.4	ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE LAS TÉCNICAS REVISADAS PARA EL TRATAMIENTO DE EFLUENTES CON ALTO CONTENIDO DE CLORUROS. ...	68
5.4.1	Inyección.....	68
5.4.2	Electrodialisis inversa	70
5.4.3	Osmosis inversa	71
5.4.4	Evaporación térmica	74
5.4.5	Evaporación mecánica.....	76
6.	CONCLUSIONES.....	79
7.	RECOMENDACIONES	82
8.	BIBLIOGRAFÍA	83
9.	ANEXOS	86

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Esquema de un campo petrolero con inyeccion de agua	17
Figura 2. Facilidades para bombeo de agua a pozos inyectoros.....	20
Figura 3. Esquema del funcionamiento de una membrana de electrodiálisis	24
Figura 4. Esquema del funcionamiento de la osmosis y la osmosis inversa.....	28
Figura 5. Componentes basicos de un sistema de membrana de osmosis inversa...	29
Figura 6. Estructura de una membrana de osmosis inversa de tipo tubular	31
Figura 7. Membrana de osmosis inversa de fibra hueca	31
Figura 8. Estructura de una membrana de osmosis inversa de espiral.	32
Figura 9. Esquema evaporador con bomba de calor.	36
Figura 10. Esquema evaporador por termocompresion.....	37
Figura 11. Esquema evporador de efecto multiple.....	38
Figura 12. Vista de evaporadores mecánicos en funcionamiento.....	40
Figura 13. Separador API – Estación Santa Lucia.....	49
Figura 14. Piscina facultativa – Estación Santa Lucia.....	50
Figura 15. Piscina de oxigenación – Estación Santa Lucia.....	51

LISTA DE GRÁFICAS

	pág.
Gráfica 1. Rata de evaporación y tiempo de viaje de una gota.....	41
Gráfica 2. Comportamiento de los SST del 2010 al 2012	60
Gráfica 3. Comportamiento de grasas y aceites del 2010 al 2012.....	62
Gráfica 4. Comportamiento de los Cloruros del 2010 al 2012	63
Gráfica 5. Comportamiento del Bario del 2010 al 2012	65
Gráfica 6. Análisis de minerales del agua industrial del campo Santa Lucia	67

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Técnicas de análisis in situ y métodos de laboratorio para análisis de agua	53
Tabla 2. Caracterización del agua industrial año 2010	55
Tabla 3. Caracterización del agua industrial año 2011	56
Tabla 4. Caracterización del agua industrial año 2012	57
Tabla 5. Caracterización de Cationes del agua industrial del campo Santa Lucia.	66
Tabla 6. Caracterización de Aniones del agua industrial del campo Santa Lucia .	67
Tabla 7. Ventajas y desventajas de la inyección	68
Tabla 8. Ventajas y desventajas de la electrodiálisis inversa	70
Tabla 9. Ventajas y desventajas de la osmosis inversa.....	71
Tabla 10. Ventajas y desventajas de la evaporación térmica	74
Tabla 11. Ventajas y desventajas de la evaporación mecánica.....	76

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Análisis de Aniones y Cationes del agua industrial del campo Santa Lucia	86

RESUMEN

Título: TRATAMIENTO Y DISPOSICIÓN FINAL DE AGUA RESIDUAL CON ALTO CONTENIDO DE CLORUROS, PROVENIENTE DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE PETRÓLEO CRUDO, DEL CAMPO SANTA LUCIA DE PETRÓLEOS DEL NORTE S.A.*

Autor: JORGE ARMANDO FERREIRA ASCENCIO**

Palabras clave: Aguas de producción, efluentes, cloruros, bario, tratamiento y disposición final, evaporación mecánica.

Las aguas de producción provenientes de los procesos de extracción del petróleo crudo, son un factor de vital importancia en la industria de los hidrocarburos, el cambio de las normas nacionales que regulan los vertimientos y los costos asociados a su tratamiento y disposición final, les han dado una significancia sin precedentes.

En el campo Santa Lucia de Petróleos del Norte S.A., las aguas de producción son tratadas mediante sistemas convencionales de tipo biológico y posteriormente se realiza su vertido al cuerpo de agua autorizado por la autoridad ambiental para este campo. No obstante Petróleos del Norte S.A. en su operación sostenible de campos petroleros, inició en 2012 la búsqueda de nuevas alternativas que sean viables para el campo y que permitan cumplir con los requisitos exigidos por las nuevas normas que regulan la materia y que próximamente entraran en vigencia.

En el presente documento se realizó la revisión bibliográfica de las principales técnicas que en la actualidad se tienen para el tratamiento y disposición final de efluentes con alto contenido de cloruros, y se evaluó su aplicabilidad a las condiciones de operación del campo Santa Lucia.

Como resultado de este proceso se propone a Petróleos del Norte S.A. continuar desarrollando la evaluación de la tecnología de Evaporación Mecánica para el campo Santa Lucia, con el objetivo de encontrar un uso apropiado a las sales resultantes del proceso, las cuales son en su gran mayoría cloruro de sodio y un poco de bario, lo que las hace aún más interesantes para fines comerciales dentro de la industria.

* Trabajo de Grado.

** Facultad de Ciencias. Escuela de Química. Director: Ph.D. Marianny Yajaira Combariza Montañez.

ABSTRACT

Title: TREATMENT AND FINAL DISPOSAL OF WASTEWATER WITH HIGH CHLORIDE, FROM CRUDE OIL PRODUCTION PROCESS, SANTA LUCIA FIELD OF PETRÓLEOS DEL NORTE S.A.*

Author: JORGE ARMANDO FERREIRA ASCENCIO**

Keywords: Water production, effluent, chloride, barium, treatment and final disposal, mechanical evaporation.

Produced water from extraction processes of crude oil, are a vital factor in the hydrocarbon industry, changing national standards that governing discharges and the costs associated with treatment and final disposal have given unprecedented significance.

In Santa Lucia field operated by Petróleos del Norte S.A. the production water is treated by a conventional biological system, and at the end of the process, this water goes in to the authorized river by the environmental authority for this field. However Petróleos del Norte S.A. doing a sustainable operation in oil fields, started in 2012 the search for new alternatives that are viable for the field and that would allow achieve the requirements of the new rules governing the matter and will soon enter into force.

In this document we made a literature review of the main techniques that today are using for the treatment and disposal of effluents high in chlorides, and evaluated their applicability to the operating conditions of the Santa Lucia field.

As a conclusion of this process is proposed to Petróleos del Norte S.A. further developing the technology assessment for Mechanical Evaporation for Santa Lucia field, aiming to find a proper use of the resulting salts, which are mostly sodium chloride and some barium, what makes it even more interesting for commercial purposes within the industry.

* Trabajo de Grado.

** Facultad de Ciencias. Escuela de Química. Director: Ph.D. Marianny Yajaira Combariza Montañez.

INTRODUCCIÓN

El gas y el agua son comúnmente los subproductos asociados al proceso de extracción del petróleo crudo. Normalmente el gas asociado al crudo no constituye un problema mayor, sin embargo la presencia del agua si se convierte en una situación de alta relevancia, por la complejidad de su composición, la necesidad de un tratamiento y el impacto ambiental negativo que causa al ser dispuesta o vertida en el medio ambiente. Estas aguas reciben el nombre de aguas de producción.

La composición de las aguas de producción varía de acuerdo con el yacimiento de donde se extrae el petróleo; sin embargo la complejidad de su tratamiento radica en los múltiples contaminantes que arrastra como crudo libre y emulsionado, hidrocarburos, sólidos suspendidos, gases, sales, metales y mercaptanos, entre otros. Por esta razón después de ser removida del petróleo, el agua de producción requiere de sistemas de tratamiento complejos y en la mayoría de los casos costosos, que garanticen el cumplimiento de los parámetros de la normatividad ambiental nacional de vertimientos, lo cual si bien minimiza en gran medida el impacto generado, no lo elimina totalmente.

Adicionalmente las aguas de producción, especialmente las que presentan altas concentraciones de sales disueltas, generan inconvenientes operativos graves en las estaciones petroleras asociados a fenómenos de corrosión en tuberías, bombas, equipos y demás infraestructura petrolera que se emplea para la explotación del hidrocarburo. Esto incide igualmente en los altos costos asociados con la generación de aguas de producción.

Para el tratamiento y disposición final de estas aguas se utilizan tecnologías como la reinyección, la osmosis inversa, la evaporación, la electrodiálisis, la electrodiálisis inversa, las resinas de intercambio iónico y los tratamientos

biológicos, todas enfocadas en generar una solución que permita remover los cloruros o sales presentes.

En muchos casos, la alta concentración de estas especies en las aguas de producción se convierte en el principal problema para el cumplimiento de la normatividad ambiental nacional de vertimientos por parte de los operadores de pozos petroleros.

Aunque las técnicas mencionadas anteriormente son de última generación aún es necesario, antes de utilizarlas, aplicar procesos fisicoquímicos de pre tratamiento y tratamientos primarios y secundarios, de acuerdo con las características del sistema y la calidad y cantidad del agua a tratar.

En el presente documento se realiza el análisis de las diferentes alternativas para el tratamiento y disposición final del agua de producción del campo petrolero Santa Lucia, de Petróleos del Norte S.A., teniendo como base fundamental las características específicas de esta agua, las condiciones operacionales del campo y la normatividad vigente en Colombia.

1 OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Analizar, con base en características operacionales y económicas, alternativas para el tratamiento y disposición final de agua residual con alto contenido de cloruros provenientes del proceso de producción de petróleo crudo del campo Santa Lucia de Petróleos del Norte S.A.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Realizar la revisión bibliográfica sobre los tratamientos para agua residual de la industria del petróleo con alto contenido de cloruros.

Caracterizar el agua residual industrial del proceso de producción de petróleo crudo del campo Santa Lucia.

Evaluar la viabilidad operacional y económica de alternativas para el tratamiento y disposición final del agua residual industrial con alto contenido de cloruros.

2 MARCO TEÓRICO

Los tratamientos primarios y secundarios que se utilizan en la actualidad para las aguas de producción, logran remociones del orden del 85 al 95% de los contaminantes orgánicos presentes en el agua. Sin embargo ninguna de estas técnicas convencionales ofrece una solución para la remoción de cloruros, que son eventualmente la razón para el uso de tratamientos terciarios o técnicas de última generación. Mediante el uso de estas metodologías es posible, retirar estos compuestos inorgánicos del agua y facilitar así su disposición final. Algunos de los procesos para la remoción y/o la disposición de cloruros son:

2.1 INYECCIÓN

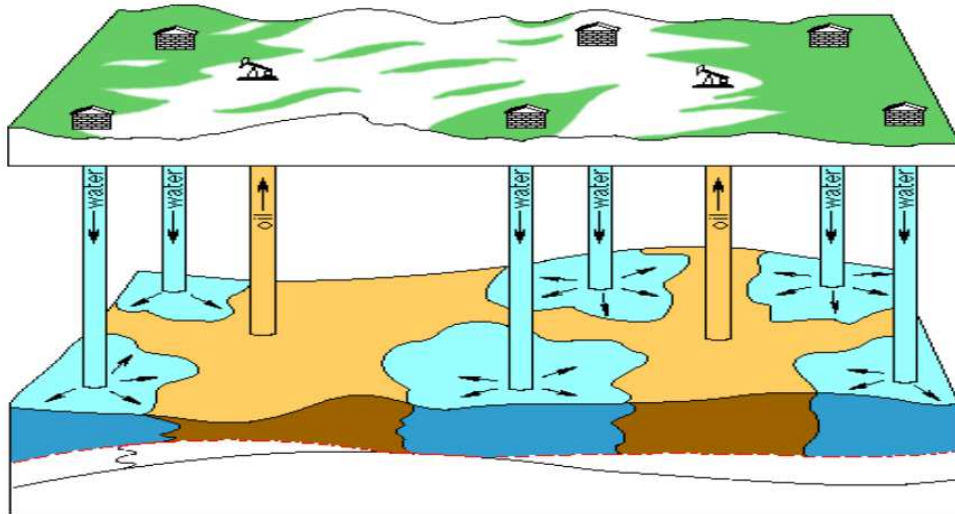
La inyección como medida de disposición final del agua de producción, también conocida como *Injection disposal*, es el conjunto de acciones, equipos y operaciones que se requieren para confinar el agua en una formación de un yacimiento que garantice la permanencia del fluido inyectado, sin generar problemas operativos en el campo petrolero o contaminación de aguas subterráneas circundantes¹ (ver figura 1).

El principal propósito de esta técnica es disponer las aguas salobres sin afectar el medio ambiente, evitando su descarga a los cuerpos de agua o al suelo. Para lograr un proceso exitoso de inyección se debe contar en primera instancia con un estudio completo del yacimiento y de la formación receptora para confinar el agua. De este estudio depende la vida útil del proyecto, la capacidad de inyectividad de la formación, la presión de fractura y la presión de inyección máxima a trabajar. En segunda instancia es necesario definir el campo y el pozo, o pozos, que serán

¹ CURSO DE TRATAMIENTO DE AGUAS DE PRODUCCIÓN PARA INYECCIÓN Y VERTIMIENTO. (5: 8-9, julio, 2013: Bogotá, Colombia). Memorias. Bogotá: Elite Training, 2013.

convertidos a inyectoras, regularmente con este propósito se utilizan pozos secos, abandonados, o con muy baja producción.

Figura 1. Esquema de un campo petrolero con inyección de agua.



Fuente: Curso de tratamiento de aguas de producción para inyección o vertimiento.

Finalmente, es necesario realizar caracterizaciones fisicoquímicas completas del agua a inyectar, para conocer en detalle su composición y poder así diseñar los tratamientos previos y facilidades requeridas para el proceso de inyección. Los parámetros mínimos de calidad para un agua de inyección son los siguientes:

- Los parámetros más restrictivos para la inyección son sólidos suspendidos, grasas y aceites y oxígeno (datos de referencia 20ppm, 5ppm y 1ppm, respectivamente, aunque estos “dependen netamente de la formación seleccionada como receptora”)². Básicamente, de las características del agua de inyección depende que los pozos puedan trabajar periodos largos de tiempo sin fallas ni taponamientos.
- El agua no debe ser corrosiva. El sulfuro de hidrógeno (H₂S), o el oxígeno por ejemplo, son dos fuentes comunes de problemas de corrosión, adicionalmente

² CURSO DE TRATAMIENTO DE AGUAS DE PRODUCCIÓN PARA INYECCIÓN Y VERTIMIENTO. (5: 8-9, julio, 2013: Bogotá, Colombia). Memorias. Bogotá: Elite Training, 2013.

la presencia de oxígeno facilita que se generen colonias de bacterias que afectan el tratamiento.

- Se debe garantizar que no se presenten compuestos que puedan generar escamas “*scales*” (encostramientos), pues no solamente se reduciría la capacidad de flujo sino que también proporciona un medio para que ocurra corrosión.
- El agua inyectada no debe reaccionar para causar hinchamiento de los minerales arcillosos presentes en la formación (depende de la cantidad y tipo de minerales arcillosos presentes en la formación y de las sales minerales disueltas en el agua inyectada y de la permeabilidad de la roca).
- El agua a inyectar debe ser compatible con el agua presente inicialmente en la formación.
- Normalmente el agua antes de ser inyectada debe ser filtrada, se debe aplicar bactericida, un inhibidor de incrustaciones y un inhibidor de corrosión.
- Se recomienda que el tamaño de las partículas presentes en el agua a inyectar no superen 1 micra, esto con el fin de evitar el taponamiento del yacimiento.

Para asegurar que las características del agua de reinyección sean óptimas es indispensable realizar procesos de tratamiento primario, secundario y terciario, que permitan remover las grasas y aceites, sólidos suspendidos, materia orgánica, reducir el tamaño de las partículas mediante filtración y aplicar aditivos como los secuestrantes de oxígeno. Adicionalmente se usan biocidas para eliminar la posibilidad de crecimiento de bacterias que causan taponamiento de los poros de la formación y problemas de corrosión en las tuberías.

Normalmente para estos tratamientos se emplean separadores API o tanques skimmer, unidades de floculación y coagulación por aire disuelto (DAF, por sus siglas en ingles), filtros para reducir el tamaño de las partículas y posteriormente unidades donde se aplican los secuestrantes de oxígeno, biocidas y anticorrosivos de acuerdo con las condiciones específicas de cada agua.

Cuando el agua a inyectar no cumple con los parámetros anteriormente mencionados, el sistema empieza a presentar algunos de los siguientes problemas operativos:

- Incrustaciones en tuberías y equipos.
- Obstrucciones en la formación.
- Sobre presiones en todo el sistema de inyección.
- Mayor gasto energético y disminución del tiempo de vida útil de los equipos.
- Daños en bombas y equipos.
- Incremento en el número de mantenimientos y servicios a pozos.

Aunque la mayoría de estas situaciones son manejables cuando ocurren en superficie, en los procesos de inyección se pueden generar efectos acumulativos en fondo. Por ejemplo, un problema de obstrucción por formación de incrustaciones puede elevar la presión de inyección y eventualmente con el tiempo inducir un daño permanente en la formación. Este daño, que puede estar relacionado con la pérdida de permeabilidad de la formación o con la disminución de su capacidad de inyectividad, puede causar fractura del yacimiento y acabar con la vida útil del proyecto.

Es importante mencionar que este tipo de inconvenientes operativos, consecuencia de un mal tratamiento del agua o incorrecta manipulación de equipos y sistemas de inyección, se traducen en incrementos de costos de operación que incluyen desde el valor de los servicios a pozo que deben realizarse para reactivar el sistema y los costos de almacenamiento del agua producida que no se puede disponer, hasta la parada de un campo en el peor de los casos.

Finalmente y paralelamente a todos los requisitos anteriormente mencionados del tratamiento del agua, se deben diseñar y construir las facilidades para el transporte, almacenamiento y bombeo del agua, lo cual está en función

principalmente del caudal de agua producida y de los aspectos logísticos del campo petrolero donde se esté realizando el proyecto (ver figura 2).

Figura 2. Facilidades para bombeo de agua a pozos inyectoros.



Fuente: Petróleos del Norte S.A. – Ecopetrol S.A (campo Casabe).

Regularmente un pozo inyector se encuentra dentro del mismo campo donde se produce el agua que se requiere inyectar, lo cual no significa que las facilidades para el tratamiento del crudo y para el tratamiento del agua estén muy cerca del pozo, normalmente se debe bombear esta agua ya tratada y casi lista para su inyección por varios kilómetros de tubería para llegar a la estación de inyección.

Por estas razones y teniendo en cuenta que cada campo petrolero produce aguas en cantidades y calidades diferentes y que todos tienen condiciones particulares de logística y operación, el diseño de las facilidades para la inyección es un punto muy importante en el proceso de esta técnica, el cual debe tener la participación de un grupo multidisciplinario garantice el éxito de toda la operación.

2.1.1 Consideraciones generales. Es importante tener en cuenta, que si bien los sistemas de inyección de agua presentan una solución muy atractiva para las grandes producciones de agua de la industria, esta técnica puede generar algunos impactos o problemas ambientales que se deben considerar. Entre estos están la falta de control geológico sobre el yacimiento que recibe el agua, la afectación que se puede causar a los acuíferos y demás aguas subterráneas y la adición de algunos químicos que requiere esta técnica, los cuales van a terminar almacenándose en el yacimiento.

A pesar de ser una técnica avalada por la autoridad ambiental en Colombia y en general a nivel mundial, es importante contemplar todas las medidas de monitoreo que se puedan realizar sobre los yacimientos receptores de estas aguas, ya que en ocasiones se han presentado problemas por intercomunicaciones entre los mismos y este fenómeno podría ocurrir entre los acuíferos subterráneos circundantes, causando daños irreparables a estos recursos.

En la industria petrolera colombiana la inyección como técnica de recobro, inició sus primeros proyectos en los años 80, donde mediante la inyección de agua limpia, tomada principalmente de pozos subterráneos, se logró mantener la presión de los yacimientos y generar aumentos en la producción de los diferentes campos.

Estas experiencias han resultado exitosas en campos como Cantagallo, Casabe y La Cira Infantas de Ecopetrol, y más recientemente en campos como Rubiales de Pacific Rubiales Energy Corp., campo Salinas de Petrosantander Inc. y Rancho Hermoso de la empresa Canacol Energy, donde ya se está implementando la técnica de la inyección igualmente con propósitos de recobro, pero utilizando el agua de la formación previamente tratada, y no agua limpia, como inicialmente se hacía.

2.2 ELECTRODIÁLISIS Y ELECTRODIÁLISIS INVERSA

“La Electrodiálisis es un proceso de separación electroquímica en el que las membranas cargadas y una diferencia de potencial eléctrico se usan para separar especies iónicas y otros componentes no cargados de una solución acuosa”³.

La electrodiálisis hoy en día es utilizada ampliamente para la desalación del agua salobre, y en algunas zonas del mundo es el proceso principal para la producción de agua potable⁴.

El desarrollo del intercambio iónico de membrana, con mejores selectividades, menor resistencia eléctrica y con propiedades térmicas, químicas y mecánicas mejoradas, ha generado un gran interés en las aplicaciones de la electrodiálisis, especialmente en la industrias de la alimentación, medicamentos y procesos químicos, así como en biotecnología y en el tratamiento de aguas residuales.⁵

La electrodiálisis es un proceso conocido en principio desde hace más de ochenta años, sin embargo la utilización a escala industrial comenzó hace aproximadamente veinticinco años. La electrodiálisis clásica o estándar unidireccional se desarrolló durante los años cincuenta, sin embargo, durante las dos décadas y media pasadas la característica principal ha sido el desarrollo del proceso de polaridad inversa que se conoce como electrodiálisis inversa (EDI)⁶

Esta técnica ha desplazado a la electrodiálisis unidireccional de la mayoría de las aplicaciones de agua salobre. El último énfasis en el desarrollo de la electrodiálisis

³ SCHOEMAN, J. J. The status of electrodialysis technology for brackish and industrial water treatment. En : Water SA. Vol. 11, No. 2 (april. 1985); p. 79 – 86.

⁴ LEITZ, F. B. and EISENMANN, J. L. Tutorial Lectures in Electrochemical Engineering and Technology : Electrodialysis as a Separation Process. New York : (AIChE Symposium Series Number 204). (1981), Vol. 77, 204 - 209 p.

⁵ KORNGOLD, E., et al. Fouling of anion-selective membranes in electrodialysis. En : Desalination. Vol. 8, No. 2 (october. 1970); p.195 – 220.

⁶ KATZ, William. E. The electrodialysis reversal (EDR) process. En : Desalination. Vol. 28, No. 1 (January. 1979); p. 31- 40

es la aplicación de electrodiálisis inversa para recuperación de recursos y control de la contaminación⁷.

2.2.1 Proceso estándar de electrodiálisis. En este proceso el agua fluye entre membranas permeables catiónicas y aniónicas, colocadas alternadamente, en lo que se construye como un acumulador o módulo de electrodiálisis. La corriente continua suministra la fuerza para la migración iónica a través de las membranas, y los iones son eliminados o concentrados en los pasos de agua alternativos por medio de las membranas permeablemente selectivas⁸. Entre cada juego de membranas se ubica una malla que sirve para separar las mismas, para soporte de estas y que genera canales de flujo a través de los cuales la solución pasa, generando turbulencia lo cual mejora la transferencia de iones⁹.

La membrana de intercambio catiónico está cargada negativamente y es permeable para cationes como los de sodio (Na^+) y calcio (Ca^{2+}), mientras que es impermeable para aniones tales como el cloruro (Cl^-), sulfato (SO_4^{2-}), entre otros. Las membranas de intercambio aniónico están cargadas positivamente y se comportan de modo opuesto (ver figura 3).

La electrodiálisis requiere regularmente la adición de ácido y/o secuestrante a la corriente de concentrado, con el fin de inhibir la precipitación de sales solubles como CaCO_3 y CaSO_4 en el acumulador. Para mantener el rendimiento, del acumulador o módulo de electrodiálisis, este debe limpiarse periódicamente para eliminar incrustaciones y otras materias ensuciadoras de las superficies.¹⁰

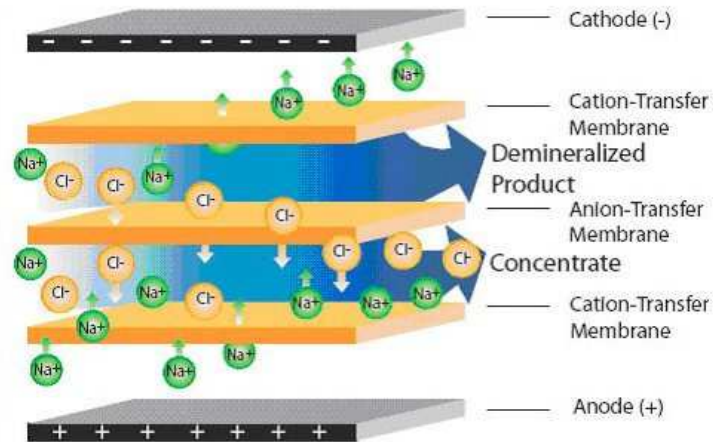
⁷ MANI, K. N. Electrodialysis water splitting technology. En : Journal of membrane science. Vol. 58, No. 2 (may. 1991) p. 117-138.

⁸ LEITZ, Op. cit., p. 205

⁹ MACHADO, Ana Graziella y CÁRDENAS, Antonio. Desalinización del Suero Lácteo por Electrodiálisis utilizando un Equipo Piloto de Asahi Glass, Co. Tesis de Grado Ingeniero Químico. Mérida. Universidad de los Andes, Venezuela. Facultad de Ingeniería. 2002.

¹⁰ SCHOEMAN, Op. cit., p. 79

Figura 3. Esquema del funcionamiento de una membrana de electrodiálisis.



Fuente: Curso de tratamiento de aguas de producción para inyección o vertimiento.

Las soluciones especiales de limpieza (ácidos o bases diluidas) se hacen circular a través del acumulador, pero este necesita desmontarse y limpiarse mecánicamente a intervalos regulares para eliminar la incrustación y otros materiales superficiales. El desmontaje regular es una operación que consume tiempo y representa una desventaja del este proceso.

2.2.2 Proceso de electrodiálisis inversa. El proceso de electrodiálisis inversa opera sobre los mismos principios básicos del proceso estándar de electrodiálisis, con la principal diferencia que la polaridad de los electrodos se invierte periódicamente, aproximadamente de 3 a 4 veces por hora y por medio de válvulas motorizadas, se intercambian las salidas del acumulador de membrana del agua producto y del agua residual¹¹.

¹¹ Ibid., p. 80.

Los iones son transferidos así en direcciones opuestas a través de las membranas, lo cual ayuda a la rotura de la incrustación y al lavado y salida al exterior de lodos y otros depósitos de las celdas que componen el módulo de electrodiálisis.

La operación automática del proceso de electrodiálisis inversa normalmente elimina la necesidad de dosificar ácido y/o secuestrantes y la formación de incrustación en los compartimentos de los electrodos se minimiza debido al cambio continuo de condiciones ácidas a básicas.

La capacidad de la electrodiálisis inversa para controlar la precipitación de la incrustación de formas más efectiva que la electrodiálisis normal es otra gran ventaja de este proceso, especialmente para las aplicaciones que requieren altas recuperaciones de agua.

2.2.2.1 Consideraciones y aplicaciones principales. El uso de la electrodiálisis y electrodiálisis inversa para la eliminación de contaminantes del agua y agua residual está generalmente restringido a los iones pequeños como sodio, calcio, cloruro, sulfato, entre otros, cuando los grandes iones orgánicos están presentes en solución, la conductividad eléctrica y permeselectividad de la membrana disminuye, con el efecto adverso sobre el rendimiento de la desalación¹².

Algunas de las aplicaciones más importantes para estos dos procesos son:

- Desalación del agua salobre.
- Desalación de agua marina.
- Desmineralización de suero.
- Recuperación de metales y aguas de lavado de electrodeposición.

¹² KORNGOLD, Op. cit., p.195.

- Desalación de purga de agua de fibra de refrigeración.
- Recuperación de ácidos y bases de efluentes ácidos usados.
- Desmineralización del vino.
- Desmineralización del azúcar.

Sin embargo es importante resaltar que estas técnicas están limitadas por la gran cantidad de energía que consumen o requieren para producir la corriente constante que impulsa la purificación y bombea el agua a través del sistema y por la dificultad que se presenta para el cambio de las membranas y resinas. Es por esto, que no son recomendados para aguas con más de 5000 mg/l de cloruros ya que el gasto de energía y membranas en el proceso es directamente proporcional a la cantidad de sales a separar¹³.

En la industria colombiana esta técnica es poco empleada para el tratamiento de aguas de producción, ya que la salinidad de las mismas es muy alta, sin embargo a nivel mundial, la electrodiálisis inversa es empleada con éxito en algunos procesos de reutilización de aguas saladas en las refinerías, especialmente para las calderas y torres de enfriamiento.

Un ejemplo de esto es la refinería Gabriel Passos (REGAP), ubicada en Brasil y propiedad de PETROBRAS, donde en 2012, de acuerdo a su informe de sostenibilidad, la electrodiálisis inversa se utilizó para desalinizar efluentes de procesos de la refinería, para posteriormente reutilizar las aguas en las torres de enfriamiento, lo cual evito captar 293.000 m³ de agua¹⁴.

¹³ STRATHMANN, Heinrich. Membrane Handbook, Ho W.S.W., Sirkar K.K. (Eds) : Applications, Electrodialysis. New York : Van Nostrand Reinhold, 1992. 217 p.

¹⁴PETROBRAS, Medio Ambiente – Recursos Hídricos. En : Informe de Sostenibilidad 2012 [en línea]. (2012). [consultado 30 octubre. 2013]. Disponible en <http://www.petrobras.com.br/rs2012/downloads/Informe_Sostenibilidad_2012.pdf>

2.3 OSMOSIS INVERSA

La osmosis es un proceso natural fundamentado en el equilibrio. En la naturaleza se conoce en procesos tan importantes como la entrada de agua a las células y consiste básicamente en el paso del agua a través de una membrana semipermeable o porosa desde una solución con menor concentración de sales hacia otra con mayor concentración salina.

Este movimiento del agua se producirá hasta que se alcance el equilibrio, es decir hasta que se igualen las concentraciones entre los dos fluidos. La fuerza que impulsa este movimiento se conoce como presión osmótica y está relacionada con la concentración de sales en las soluciones¹⁵.

La osmosis inversa es entonces la reversión de este proceso mediante la aplicación de una presión mayor a la presión osmótica sobre la solución de mayor concentración de sales, lo cual ocasionara que el agua migre a través de la barrera semipermeable hacia la solución con menor concentración salina, obteniendo en la barrera las sales que se encuentran en la solución (ver figura 4).

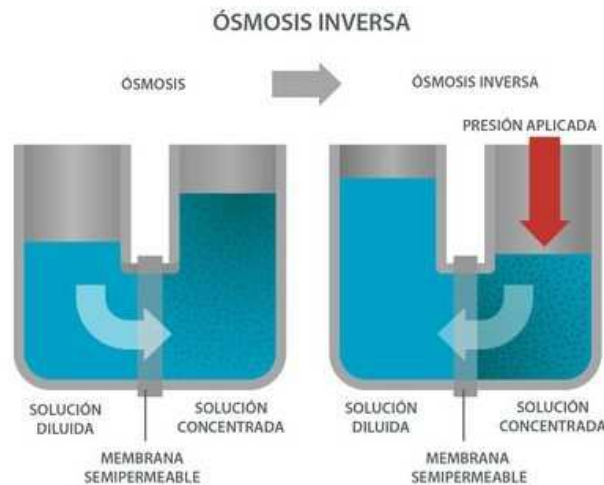
2.3.1 Componentes básicos de un sistema de osmosis inversa. Un sistema de Osmosis inversa tiene los siguientes componentes básicos, que se ilustran en la figura 5:

- Arreglo de tubos de presión donde se contiene la membrana, los cuales se diseñan normalmente en serie o en paralelo.
- Membranas para realizar la retención de los contaminantes de interés.
- Una bomba que suministra en forma continua el fluido a tratar a los tubos de presión y que ejerce la fuerza necesaria para vencer la presión osmótica y realizar el proceso.

¹⁵ BINNIE, Chirs; KIMBER, Martin y SMETHURST, George. Basic Water Treatment. Third Edition. London: Thomas Telford IWA, 2002. 169 p.

- Una válvula reguladora en la corriente de concentrado, es la encargada de controlar la misma dentro del arreglo de membranas (se denominan así a las membranas convenientemente dispuestas en los tubos).
- Igualmente se cuenta con medidores para la presión y para los caudales de entrada y salida de los flujos del sistema y con tableros de control eléctrico de todo el sistema.

Figura 4. Esquema del funcionamiento de la osmosis y la osmosis inversa.



Fuente: Curso de tratamiento de aguas de producción para inyección o vertimiento.

Es importante mencionar que un sistema de osmosis inversa para aguas industriales especialmente de la industria del petróleo, requiere que el agua de entrada tenga la menor cantidad de solidos disueltos y solidos suspendidos posibles, así como cero grasas y aceites para que las membranas funcionen correctamente y tengan una vida útil que haga viable económicamente el proyecto.

Figura 5. Componentes básicos de un sistema de membranas de osmosis inversa.



Fuente: Petróleos del Norte S.A – Camacol Ingeniería S.A.S.

Por esta razón es indispensable contar con un pre tratamiento, tratamiento primario, secundario e incluso micro filtración del agua antes que esta ingrese al sistema de osmosis inversa.

Estas necesidades previas al sistema de osmosis inversa hacen que los costos asociados a la técnica sean elevados en comparación con otros tratamientos, adicionalmente la vida útil de las membranas se ve fuertemente impactada, ya que en aguas de producción, las grasas y aceites no se alcanzan a remover en un 100% y adicionalmente la cantidad de solidos disueltos suele ser muy alta.

2.3.2 Membranas semipermeables. Las membranas son el corazón del sistema y de su cuidado depende el funcionamiento de todo el tratamiento de osmosis inversa.

Hay varios tipos de membranas y las mismas se deben elegir de acuerdo a las condiciones del agua que se va a tratar. Anteriormente las membranas se hacían de acetato de celulosa, sin embargo este material no soporta niveles de pH que

salgan del rango de 2 a 9 y en temperaturas arriba de 35°C. Además las membranas de acetato de celulosa tienen una resistencia química limitada¹⁶.

Actualmente se han desarrollado materiales cerámicos y membranas poliméricas, incluyendo polisulfonatos, fluoruro de polivildieno, poliacrilonitrilos y poliamida. Comparadas con las de acetato de celulosa, las membranas de polisulfonatos están hechas para desempeño en un rango de pH entre 1 a 14, a una temperatura máxima de 110°C, con buena resistencia química¹⁷.

Los cerámicos se usan en sistemas tubulares, generalmente en aplicaciones donde se necesita resistencia a pH extremos y niveles de temperatura extremos. Muchos de estos materiales han sido combinados en estructuras multipoliméricas, en donde una membrana delgada de un material, por ejemplo, polisulfonato es añadido a la superficie de un material de soporte diferente como el poliéster.

Normalmente las membranas se usan en arreglos o módulos que se diseñan en serie o en paralelo, pero de acuerdo a la forma del módulo o el arreglo que se utilice, se conocen principalmente 3 tipos de membranas a utilizar:

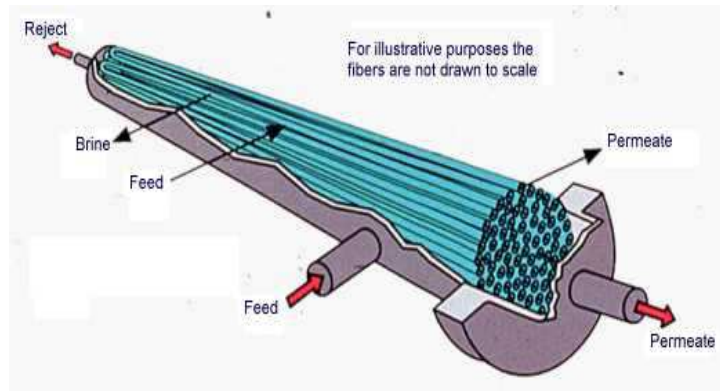
2.3.2.1 Membrana tubular. Consisten en largos tubos porosos con longitudes que oscilan entre los 1,5 y 3 m. y con diámetros entre 0,5 y 1 pulgada, los cuales llevan, concéntricamente, en su interior la membrana. El agua bruta se hace circular por el interior, recogándose el agua permeada entre la pared exterior de la membrana y la interior del tubo contenedor¹⁸ (ver figura 6).

¹⁶ HERNANDEZ, A., et al. Microfiltración, Ultrafiltración y Osmosis Inversa. Murcia : Universidad de Murcia, 1990. v. 4, 23:37 p.

¹⁷ BENITO, J. M; CONESA, A. y RODRIGUEZ, M. A. Membranas Cerámicas. Tipos, métodos de obtención y caracterización. En : Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio. Vol. 43, No. 5 (enero. 2004); p. 829 – 842.

¹⁸ HERNANDEZ, Op. cit., p. 97

Figura 6. Estructura de una membrana de osmosis inversa de tipo tubular.



Fuente: Curso de tratamiento de aguas de producción para inyección o vertimiento.

2.3.2.2 Membrana de fibra hueca. Están constituidas por miles de fibras huecas (tubos capilares) formando un haz en el interior del contenedor y cuyos extremos se insertan en un soporte de resina epoxi. El diámetro exterior de estos capilares oscila entre 60 y 80 micras para la poliamida y 200 a 300 micras para el acetato. El agua es obligada a pasar a través de la pared del capilar de espesor aproximado de 20 micras¹⁹ (ver figura 7).

Figura 7. Membrana de osmosis inversa de fibra hueca.

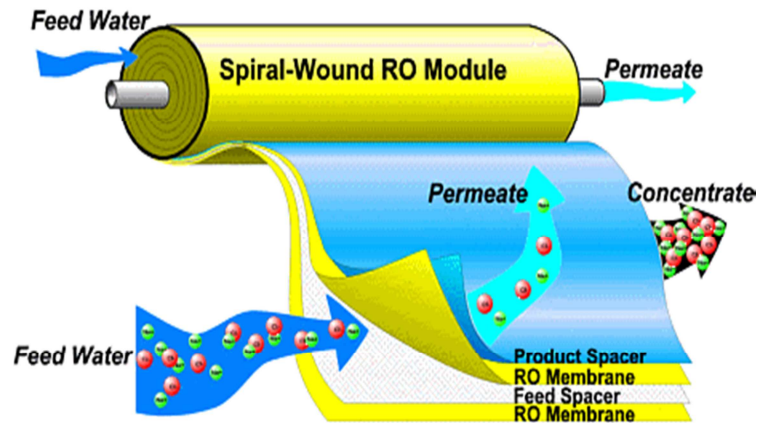


Fuente: Curso de tratamiento de aguas de producción para inyección o vertimiento.

¹⁹ Ibid., p.99

2.3.2.3 Membrana tipo espirales: Consisten en hojas de membrana que se sitúan sobre un soporte poroso y un espaciador, ese conjunto se enrolla sobre un tubo de PVC que servirá como colector de agua permeada²⁰ (ver figura 8).

Figura 8. Estructura de una membrana de ósmosis inversa de espiral.



Fuente: Curso de tratamiento de aguas de producción para inyección o vertimiento.

La capacidad de filtración de las membranas depende principalmente de los siguientes parámetros:

- La composición química del fluido a filtrar y al material semipermeable que se requiere debido a su composición.
- La temperatura del fluido.
- Presión de operación.
- Sólidos totales disueltos a ser removidos.

2.3.3 Aplicaciones de la ósmosis inversa y consideraciones generales. La ósmosis inversa puede aplicarse en un campo muy diverso entre los cuales se mencionan los siguientes²¹:

²⁰ SUSIAL, P. Evaluación de membranas espiral industriales de ósmosis inversa. En : INGENIERÍA QUÍMICA-MADRID Vol. 35, No. 403 (2003); p. 150 -167.

²¹ HERNANDEZ, Op. cit., p. 119:137

- Abastecimiento de aguas para usos industriales y consumo de poblaciones.
- Tratamiento de efluentes municipales e industriales para el control de la contaminación o recuperación de compuestos valiosos reutilizables.
- Industria de la alimentación, para la concentración de alimentos (jugo de frutas, tomate, leche, etc).
- Industria farmacéutica, para la separación de proteínas, eliminación de virus, entre otros.
- Industria cosmética.
- Agua de enjuagado electrónico, galvanico e industrias del vidrio.
- Sodas y plantas de embotellamiento.
- Aguas de alimentación de caldera y sistemas de vapor.
- Hospitales y laboratorio.
- Medioambiente (Reciclaje)
- Desalinización.

En la industria petrolera su principal interés se centra en la remoción de cloruros donde se logra una retención del orden del 90 al 95% de estos, sin embargo para realizar esta labor, se requiere un agua que preferiblemente solo contenga este anión y no como en las aguas de producción, que se presentan varios aniones y cationes, que como el Bario generan problemas casi inmediatos de incrustaciones en el sistema de membranas, lo cual afecta significativamente la vida útil de las mismas y por ende los costos del sistema.

Por otra parte en todo sistema de osmosis inversa se obtiene un rechazo, el cual presenta una concentración muy alta de las sales que se están removiendo en el proceso y este efluente que normalmente es del 10% del fluido tratado, requiere de otros procesos específicos y especializados para su disposición final.

En Colombia, Pacific Rubiales Energy Corp. en su campo Rubiales, trabaja con la compañía TEDAGUA, en la construcción de una planta de osmosis inversa, para el tratamiento de 500.000 bbl/d de agua de producción que genera el campo. El

efluente tratado se proyecta integrar a un programa para riego de cultivos y programas forestales que adelanta la empresa en la zona de su operación.

2.4 EVAPORACIÓN

2.4.1 Evaporación térmica. La evaporación térmica es un proceso físico cercano a la destilación, que consiste en pasar de forma gradual un líquido a estado gaseoso mediante la aplicación de la suficiente energía en forma de calor, para vencer la tensión superficial del mismo²².

Ocurre más rápido cuando se alcanza la temperatura de ebullición, pero no es necesario que todo el líquido alcance la temperatura de ebullición para iniciar a evaporarse.

Como método para separar el agua de los componentes con los que esta se encuentra mezclada, puede ser uno de los más efectivos, pero los altos costos de energía de la evaporación simple a presión atmosférica, lo convierten en un proceso inaceptable económicamente.

Es por esto que en la industria se trabaja con diversas formas de evaporación, que varían del método tradicional para hacerla más eficiente y que la técnica tenga mejores posibilidades de ser utilizada en los diferentes sectores en los que se puede aplicar.

2.4.1.1 Evaporación al vacío. La evaporación al vacío consiste en reducir la presión del interior de la caldera por debajo de la presión atmosférica. Esto permite disminuir la temperatura de ebullición del líquido a evaporar, lo cual

²² ELÍAS CASTELLS, Xavier. Tecnologías aplicables al tratamiento de residuos. Madrid: Diaz de Santos, 2012. p. 106 - 108.

reduce la cantidad de calor a aportar en el proceso de ebullición y de condensación²³.

De esta forma, incluir condiciones de vacío en la caldera de los sistemas de evaporación, permite aumentar el rendimiento termodinámico del proceso, es decir que se aplica menos calor y se ahorra energía²⁴.

2.4.1.2 Con bomba de calor. La evaporación con bomba de calor utiliza el ciclo frigorífico del gas freón, mediante la acción de la compresión del gas que se condensa y cede calor al líquido a evaporar por intercambio térmico, posteriormente se procede a la expansión del gas por medio de una válvula termostática y de la acción de un condensador que refrigera el líquido evaporado y extrae el destilado²⁵.

Este reactor de evaporación al vacío, permite lograr la evaporación a temperaturas sobre los 40° C, por lo cual no se necesita ninguna otra entrada de calor ni refrigeración, lo que lo vuelve un proceso muy atractivo desde el punto de vista económico.

Así mismo, este sistema de baja temperatura de evaporación permite una gran diversidad de aplicaciones, incluso para líquidos muy corrosivos, mediante aleaciones especiales y recubrimientos de teflón, sistemas de evaporación hasta residuo seco, líquidos fuertemente incrustantes o que cristalizan²⁶. En la figura 9 se ilustra el esquema de este tipo de evaporación.

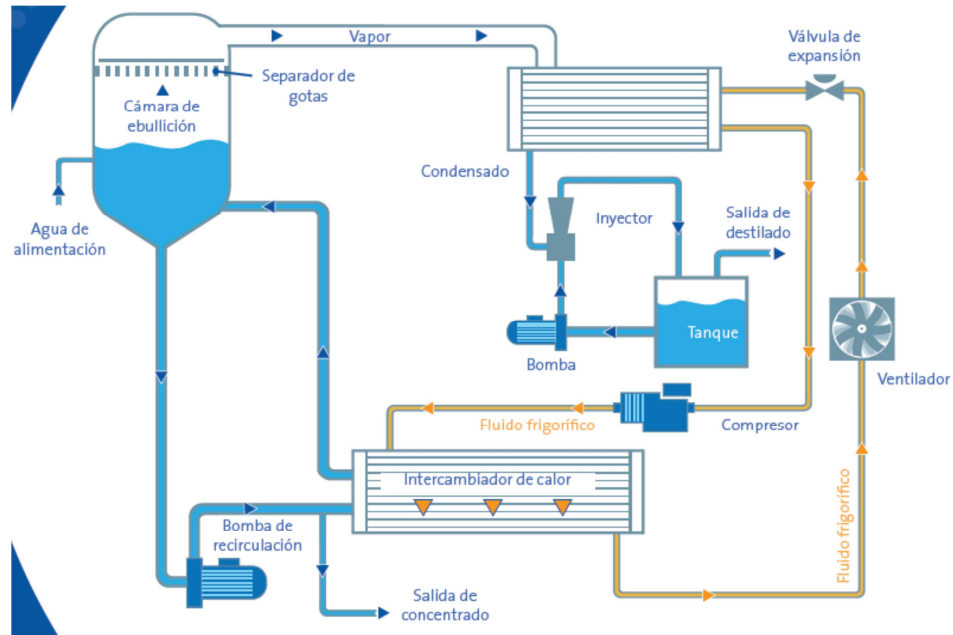
²³ Ibid., p. 107.

²⁴ GARCIA, Idoia y SOLDEVILA, Josep. Tratamiento por evapo-concentración al vacío de las aguas residuales industriales. En : INFOENVIRO : Depuración y Reutilización. Vol. 67, No. 3 (noviembre. 2011); p. 1- 2.

²⁵ ELÍAS, Op. cit., p. 107

²⁶ Ibid., p. 107.

Figura 9. Esquema de evaporación con bomba de calor.

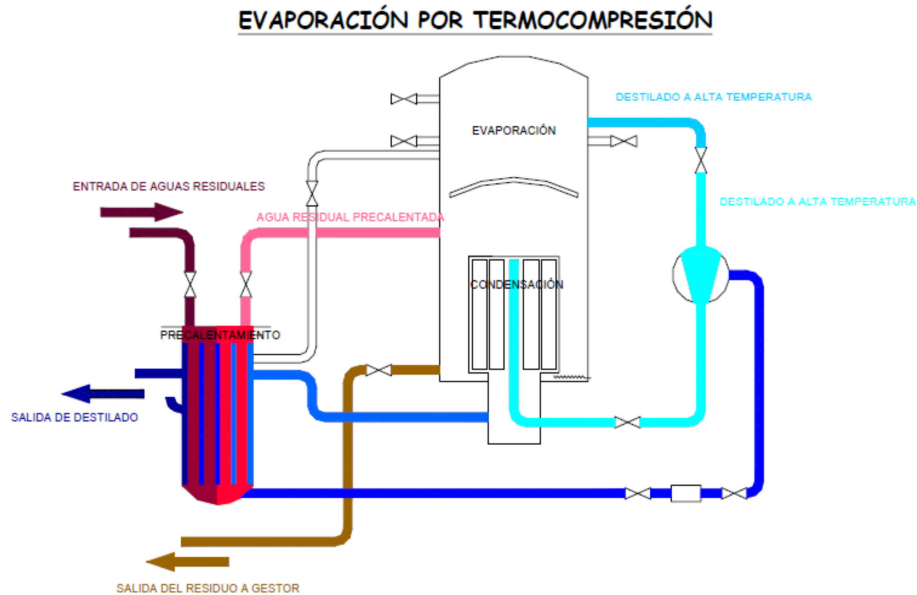


Fuente: Petróleos del Norte S.A. – Veolia Water Solutions & Technologies.

2.4.1.3 Por termo compresión. La evaporación por termo compresión trata de recuperar el calor latente de condensación del destilado como fuente de calentamiento del líquido a evaporar. Mediante esta operación, la temperatura del vapor generado en la evaporación se incrementa mediante compresión del propio vapor. De esta manera el vapor sobrecalentado puede ser reciclado por medio de un intercambiador del propio evaporador, consiguiéndose un doble objetivo, ahorro de energía para la evaporación y evitar el medio refrigerante para la condensación²⁷. En la figura 10 se presenta un esquema de este tipo de evaporador.

²⁷ Ibid., p. 107.

Figura 10. Esquema de evaporación por termo compresión

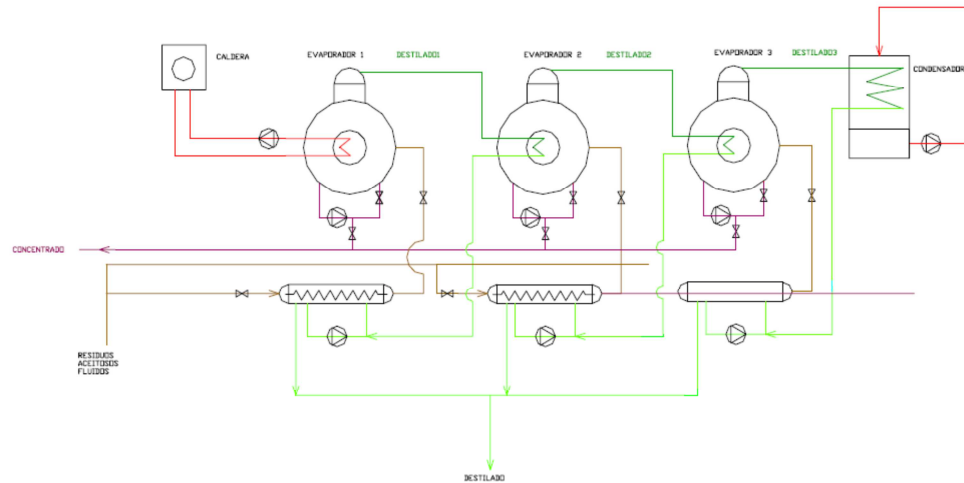


Fuente: Petróleos del Norte S.A. – DEPLAN, S.L.

2.4.1.4 Por efecto múltiple. La evaporación por efecto múltiple, consiste en una serie de evaporadores en donde se hace decrecer la presión de forma progresiva del primero al último, por lo cual el vapor producido en el primer evaporador se utiliza como medio de calentamiento del evaporador sucesivo a la vez que este condensa a líquido. La principal ventaja de este sistema, respecto del sistema de efecto simple, consiste en el ahorro del fluido de calentamiento, debido al aporte más efectivo de la energía térmica lo cual redunda en consumos de energía mucho más bajos que en las otras técnicas²⁸. En la figura 11 se presenta un esquema de este evaporador.

²⁸ Ibid., p. 108.

Figura 11. Esquema de evaporación por efecto múltiple.



Fuente: Petróleos del Norte S.A. – DEPLAN, S.L.

Es de suma importancia, que independientemente del tipo de evaporador que se escoja y de la especificidad del proceso, se tengan en cuenta los siguientes criterios generales cuando se va a elegir o diseñar un proceso de evaporación.

- Características del fluido a tratar y del sólido que se espera obtener.
- Las características del producto, incluyendo calor sensible, viscosidad y propiedades de flujo, tendencias a hacer espuma, al ensuciamiento y a la precipitación, el comportamiento de ebullición, etc.
- Capacidad y datos de operación, incluyendo cantidades de trabajo del equipo, concentraciones, temperaturas, horas de funcionamiento anuales, controles de automatización, etc.
- Todo lo referente a consumos de energía y mantenimiento de los equipos.
- Inversión y otros costos financieros.
- Tipo de personal requerido para la operación, costos del personal y costos del mantenimiento preventivo.

- Estándares y condiciones de fabricación, tales como entrega, parámetros de aceptación, etc.
- Selección de materiales de construcción y acabado de superficies.
- Condiciones del sitio de trabajo, tales como espacio disponible, condiciones del clima (para sitios a la intemperie), conexiones de energía, proximidad a comunidades, o ecosistemas sensibles, etc.
- Regulaciones legales que cubran aspectos de seguridad, prevención de accidentes, emisión de sonidos, requerimientos ambientales, y otros, dependiendo del proyecto específico.

La evaporación térmica es una técnica que en la industria petrolera colombiana no se ha implementado a gran escala, y solo se conocen en el sector algunos proyectos piloto realizados en campos de Ecopetrol, los cuales no han resultado satisfactorios, ya que los costos de la energía que requiere son muy elevados.

Así mismo, teniendo en cuenta que actualmente existen otras técnicas para la reutilización y/o disposición del agua y que el exceso de gas en los campos petroleros es utilizado para generar energía eléctrica, la evaporación térmica queda como un sistema poco atractivo, de alto costo, que las empresas no consideran entre sus opciones.

2.4.2 Evaporación mecánica. La evaporación mecánica se basa en la atomización o pulverización del agua a temperatura ambiente, haciendo pasar la misma de forma controlada por un rotor que gira a 3600 rpm impulsando el agua contra una platina con orificios de diámetros controlados, donde el agua impacta y sale disparada por unas boquillas que la lanzan al medio en tamaños promedio de 150 micras, aproximadamente a 4 metros de altura (ver figura 12).

Figura 12. Vista de evaporadores mecánicos en funcionamiento.



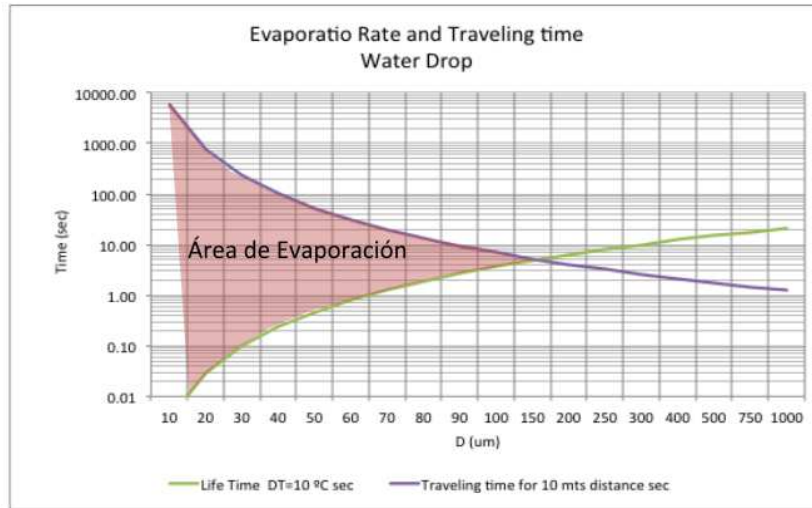
Fuente: Petróleos del Norte S.A. – Produce Water Eco Services PWES.

Este proceso de evaporación mecánica o atomización del agua, se realiza sin ningún tipo de calor aplicado y son los evaporadores los que pulverizando el agua en tamaños de los órdenes mencionados anteriormente, forman una nube o neblina, tan fina que al entrar en contacto con la masa de aire con bajo contenido de humedad de la atmosfera, se integra rápidamente a la misma.

Este fenómeno ocurre precisamente, porque aunque la niebla generada conserva la misma masa del agua en su estado líquido, aumenta considerablemente su superficie de contacto (un galón de agua atomizado a un promedio de 150 micras, cubre un área de aproximadamente 5400 metros cuadrados, con un espesor de 0,15 milímetros), lo cual permite que se mezcle rápidamente con el aire circundante.

Mientras que el aire este a temperaturas mayores de 0°C y una humedad relativa menor del 100% integrara el agua en forma de vapor en cuestión de segundos. En promedio una gota del orden de 150 micras necesita entre 3 a 5 segundos para integrarse a la atmosfera. En la gráfica 1 se ilustra el concepto anteriormente mencionado.

Grafica 1. Rata de evaporación y tiempo de viaje de una gota.



Fuente: Petr6leos del Norte S.A. – Produce Water Eco Services PWES.

Sin embargo la tasa de evaporaci6n se ve afectada por un n6mero de factores que incluyen, la velocidad del viento, la temperatura y la humedad del aire en el campo de atomizaci6n, y su distribuci6n espacial, tiempo de vuelo y el tama1o de las gotas atomizadas.

Todos estos par6metros deben ser monitoreados en tiempo real para mantener las eficiencias de los evaporadores y evitar enviar agua pulverizada a un aire que no pueda recibirla, por estas razones los evaporadores funcionan en l6nea con una estaci6n meteorol6gica que registra estas variables en tiempo real y mediante un software regula el funcionamiento del equipo.

2.4.2.1 Consideraciones Generales. Los evaporadores pueden funcionar flotando sobre el agua que se va a evaporar o en una superficie dura, donde son instalados y el agua es llevada hasta cada equipo por medio de bombas y tuberías.

Esta t6cnica no requiere un tratamiento previo avanzado, lo cual se constituye en una ventaja ya que los evaporadores pueden tolerar hasta 800 mg/l de grasas y

SST y las altas concentraciones de sales disueltas no le afecta ya que trabaja hasta con 50000 mg/l.

Los ambientes caliente, secos y con vientos son más favorables para la evaporación del agua atomizada, que los que presentan una humedad relativa alta y lluvias constantes o donde el viento es muy escaso.

Uno de los puntos importantes que ofrece la evaporación mecánica, es que el consumo de energía es sólo una fracción de la que se consume por otros tratamientos como la inyección de agua o la evaporación tradicional, con tan solo aprox. 0.34 Kwhr/bbl.

Es importante tener en cuenta, que en esta técnica de evaporación mecánica, el control y monitoreo de los contaminantes solidos que salen con la niebla que se forma en el proceso, es de suma importancia y es indispensable tener completamente caracterizada el agua que se va a evaporar y contar los controles físicos y áreas duras para evitar que los contaminantes solidos salgan del área de operación y generen problemas ambientales.

Igualmente se necesita de un área de trabajo impermeabilizada y la logística necesaria de acuerdo al balance de masas de los contaminantes presentes en el agua, para poder realizar su manejo, retiro y posterior disposición final adecuada, de acuerdo a la naturaleza de los mismos.

Cada evaporador requiere en promedio 120 metros cuadrados de área para su operación, lo cual debe tenerse en cuenta en el momento de diseñar el tratamiento completo del agua.

Por otra parte es importante controlar el nivel de ruido de los evaporadores y para esto también se requieren barreras que pueden ser utilizadas con doble propósito, evitar que los contaminantes solidos migren del lugar por acción de los vientos y reducir el ruido que generan estos equipos.

La evaporación mecánica es una tecnología que ingresa recientemente al país, a través de la empresa PWES, la cual tiene la representación para Colombia de la empresa SMI Evaporative Solutions, quienes a nivel mundial son líderes en esta materia.

A nivel mundial se ha empleado esta técnica, especialmente en minería a cielo abierto, sin embargo en el sector de hidrocarburos no se cuenta con la suficiente experiencia en la aplicación de la misma. De acuerdo con la gerencia de aguas de Ecopetrol, en el campo la creciente de la empresa Pacific Rubiales Energy Corp., se estarán realizando en 2014 las primeras pruebas con esta tecnología para el tratamiento de aguas de producción en Colombia.

3 JUSTIFICACIÓN

El campo Petrolero Santa Lucia, operado por la empresa Petróleos del Norte S.A., produce en la actualidad 365 barriles de petróleo crudo/día provenientes de la formación LA PAZ de donde se produce todo el campo. Por sus propiedades físicas, especialmente por su alto contenido de agua y sal, el crudo de este campo requiere de un tratamiento que permita la remoción de estos elementos antes de su entrega en la estación Ayacucho de Ecopetrol en el departamento del Cesar.

Este proceso genera un efluente con alto contenido de cloruros, que requiere igualmente de un tratamiento previo a su disposición final.

En la actualidad el campo Santa Lucia cuenta con un Plan de Manejo Ambiental (PMA) que avala su funcionamiento en esta materia. Este plan es regulado por la Corporación Autónoma Regional del Cesar CORPOCESAR, quien a su vez realiza el seguimiento ambiental de la operación del campo.

Entre los permisos ambientales dados por la corporación, se encuentra el de vertimientos del campo - Resolución 124 de marzo 5 de 2007, modificada por resolución 634 del 15 de agosto de 2007, renovada por resolución 522 de mayo 29 de 2012. De acuerdo con esta última, está permitido realizar el vertimiento de las aguas residuales industriales generadas en el campo Santa Lucia al rio Cachira, siempre y cuando se cumpla con las disposiciones transitoriamente vigentes del decreto 1594 de 1984 y con el decreto 3930 de 2010.

Con base en los resultados de los monitoreos realizados entre el año 2010 y 2012, al sistema de tratamiento de agua industrial del campo Santa Lucia, se evidencia el incumplimiento de 4 parámetros del decreto 1594 de 1984 que son; sólidos suspendidos totales (SST), demanda biológica de oxígeno (DBO₅), Bario y Fenoles.

Aunque no en todos los monitoreos realizados durante estos 3 años los 4 parámetros mencionados están fuera de norma, si se evidencia una tendencia clara al incumplimiento de los mismos, por esta razón, la compañía ha venido estudiando e implementando soluciones que actualmente se encuentran en construcción o fase de prueba, para cumplir con los valores de referencia para dichos parámetros.

No obstante, el objeto de este documento se centra en los cloruros, ya que los mismos aunque están cumpliendo la norma actual de vertimientos, son altos y con la entrada en vigencia de la resolución que reglamentara el decreto 3930 de 2010, como nueva norma nacional para vertimientos, este parámetro no cumplirá el límite permitido, el cual de acuerdo al último borrador de dicha resolución (versión 5 del 19 de octubre de 2012), no podrá superar los 1200 mg/L para la industria petrolera.

Por esta razón, para la empresa Petróleos del Norte S.A. es necesario encontrar una alternativa técnico-económica viable para el tratamiento y disposición final de las aguas residuales del campo Santa Lucia, que le permita cumplir con la nueva normatividad nacional en la materia.

3.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL CAMPO SANTA LUCIA.

El campo Santa Lucia está ubicado en la vereda Tres Esquinas, del municipio de San Alberto, en el departamento del Cesar, opera desde el año 1988 y en la actualidad cuenta con 5 pozos que producen diariamente en promedio 365 bbl de petróleo crudo, de grado API 19,5°.

El petróleo es bombeado desde los pozos hasta la estación del campo, donde posteriormente se realiza su tratamiento mediante la ejecución de los siguientes procesos:

- **Recibo de Producción y Tratamiento Químico.** Toda la producción ingresa primero a un arreglo de tuberías conocido como Manifold, que permite direccionar la producción hacia el tratador térmico y los separadores general o de prueba. Así mismo en este punto se inicia el tratamiento químico, donde aplicando un producto se empieza a romper la emulsión que forma el crudo y el agua.
- **Separación de Gas, Agua y Crudo.** En la estación se cuenta con dos separadores horizontales trifásicos, uno general y otro de prueba, normalmente la producción se alinea al separador general y si algún pozo esta en seguimiento o en prueba se alinea al separador de prueba. En estas unidades como su nombre lo indica, se realiza la separación mecánica del aceite, el agua y el gas, dirigiendo cada uno de estos a diferentes procesos o partes de la estación.

El gas sale por la parte superior del separador y se dirige hacia un scrubber y posteriormente hacia un compresor donde se distribuye para el consumo del tratador térmico de la estación, el crudo es evacuado al tratador térmico para seguir su proceso, mediante una válvula situada en la parte baja del separador, la cual esta calibrada para abrir y cerrar por nivel. Finalmente el agua que se deposita en el fondo del separador es enviada al separador API de la estación, igualmente mediante una válvula calibrada por nivel que abre y cierra de forma automática.

- **Tratamiento Térmico y lavado.** El tratador térmico es una unidad de separación secundaria, básicamente se agrega calor al crudo que ingresa a la vasija, lo cual genera una nueva separación del gas y el agua que aun están presentes en la emulsión. En detalle el gas es retirado mediante un desgasificador al inicio del tratador y es dirigido a un scrubber, el agua libre presente en la emulsión se retira mecánicamente en la segunda cámara de la

unidad y pasa para el separador API y al aplicar calor a la emulsión esta se pasa para los tanques de almacenamiento.

- **Almacenamiento.** Una vez el crudo entra a los tanques de almacenamiento, se genera un tiempo de retención y reposo en el cual se terminan de separar las fases de agua y aceite que por efectos del calor agregado en el tratador térmico se dividen fácilmente. Los sistemas de drenaje de los tanques de la estación están igualmente diseñados para retirar el agua cuando ya se encuentra completamente separada del crudo y esta es enviada directamente al sistema de tratamiento de aguas industriales de la estación.
- **Fiscalización y Despacho.** Finalmente se realiza el proceso de medición del crudo mediante cintas que se introducen desde la parte alta de los tanques y posteriormente a este proceso y a la comprobación de parámetros de calidad exigidos al crudo se realiza el despacho del mismo. En caso de que no se cumplieran los parámetros exigidos por el comprador para recibir el crudo, este entraría nuevamente al proceso de tratamiento.

Como se menciona en cada uno de los procesos anteriormente descritos, la generación del agua de producción es un punto inherente a estas etapas y de ahí su alta importancia ya que la misma requiere de un tratamiento que permita realizar su disposición final al medio, cumpliendo con todos los requisitos exigidos por la normatividad ambiental nacional que la regula.

En la actualidad el campo Santa Lucía produce 417 bbl de agua al día, los cuales provienen exclusivamente del agua de formación del campo y que se convierten en agua residual industrial, que una vez que completa su tratamiento es entregada al medio, sin embargo a estos 417 barriles se debe sumar el agua que se emplea para el lavado del crudo, que son 200 bbl por día, es decir que el sistema de

tratamiento con que cuenta la estación Santa Lucia, actualmente trabaja con un estimado de 617 bbl por día de agua industrial o 1,13 l/s, la cual es tratada y vertida en el punto autorizado por la autoridad ambiental, con un caudal promedio de 0.7 l/s.

Cabe resaltar, que hasta el año 2012 el sistema opero con un caudal de entrada de 2,5 l/s en promedio y debido a algunos trabajos en los pozos del campo y a la reducción del agua de lavado del crudo, se logró disminuir el caudal del afluente del mismo. Igualmente el caudal del efluente hasta el año 2012 era en promedio de 1.5 l/s.

3.2 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS INDUSTRIALES DEL CAMPO SANTA LUCIA.

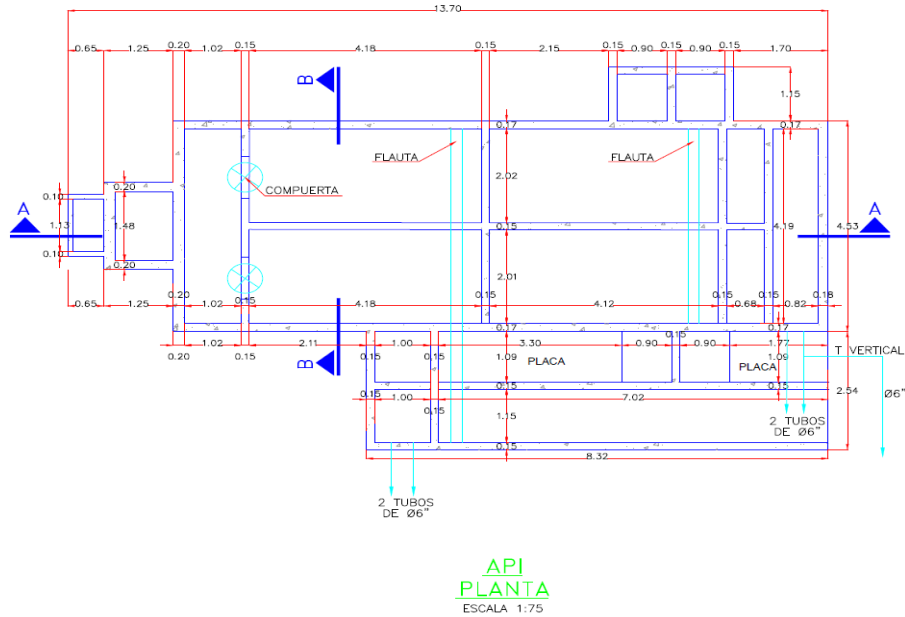
La estación Santa Lucia cuenta con un sistema para el tratamiento de las aguas industriales que se generan en el proceso de producción y tratamiento del crudo del campo, este sistema recibe el agua que sale del separador general, tratador térmico y tanques de almacenamiento y consta de 3 unidades que se describen a continuación,

- **Separador API.** las aguas aceitosas ingresan en primer lugar al separador API, donde son separadas por densidades el agua del crudo o aceite, el agua separada pasa a una segunda unidad de tratamiento, mientras que el crudo recuperado pasa a través de desnatadores o skimmers y es enviado nuevamente a los tanques de almacenamiento, la función principal de este sistema primario es la de separar el crudo y retener los sólidos sedimentables y suspendidos del fluido que ingresa.

En la batería de Santa Lucia, el separador API cuenta con una cámara de aquietamiento y pantalla, tres cámaras de separación y decantación, cámara

de filtrado y vertedero de control, en la figura 13 se ilustra el separador API de la estación.

Figura 13. Separador API – Estación Santa Lucia.



Fuente: Petróleos del Norte S.A.

- **Piscina facultativa.** Su función principal es la degradación de la materia orgánica presente en el agua, por la acción de microorganismos aerobios, anaerobios y facultativos que se tienen en esta parte del tratamiento.

En la parte superficial de la piscina, aproximadamente en los primeros 80 cm de profundidad, se presenta la degradación aerobia de la materia orgánica y otros contaminantes presentes en el agua, por la acción de microorganismos aerobios que aprovechan el oxígeno y la luz para ejercer su actividad metabólica.

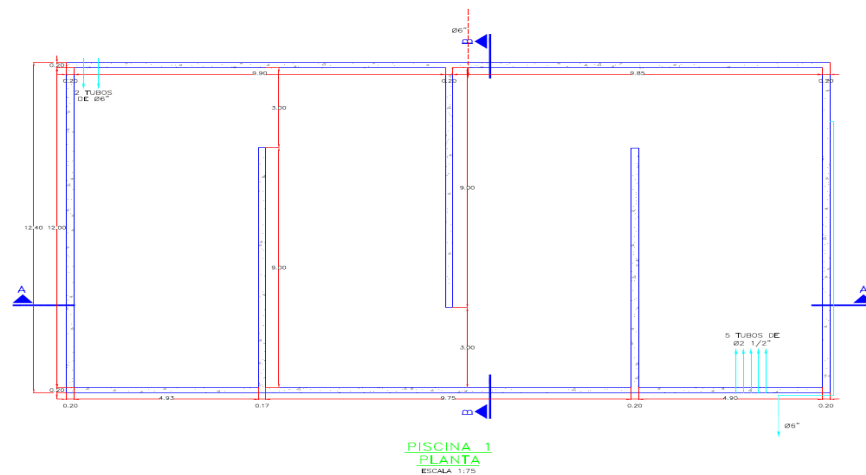
En la fase intermedia de la piscina se encuentran los microorganismos facultativos que utilizan procesos aerobios y anaerobios, para realizar la

degradación de la materia orgánica y aproximadamente después de 170 cm de profundidad solo encontramos microorganismos anaerobios, es decir que trabajan solo en ausencia de oxígeno y que de esta forma igualmente degradan la materia orgánica presente en el agua.

Igualmente en la primera cámara de esta unidad se realiza la recuperación final de trazas de crudo y natas que se forman aun después del separador API.

En la batería de Santa Lucia, la piscina facultativa presenta dos cámaras iniciales, con paso del agua por niveles y dos más separadas por tabique, para garantizar los tiempos de retención del agua para su tratamiento, en la figura 14 se ilustra la piscina facultativa del campo.

Figura 14. Piscina facultativa – Estación Santa Lucia.

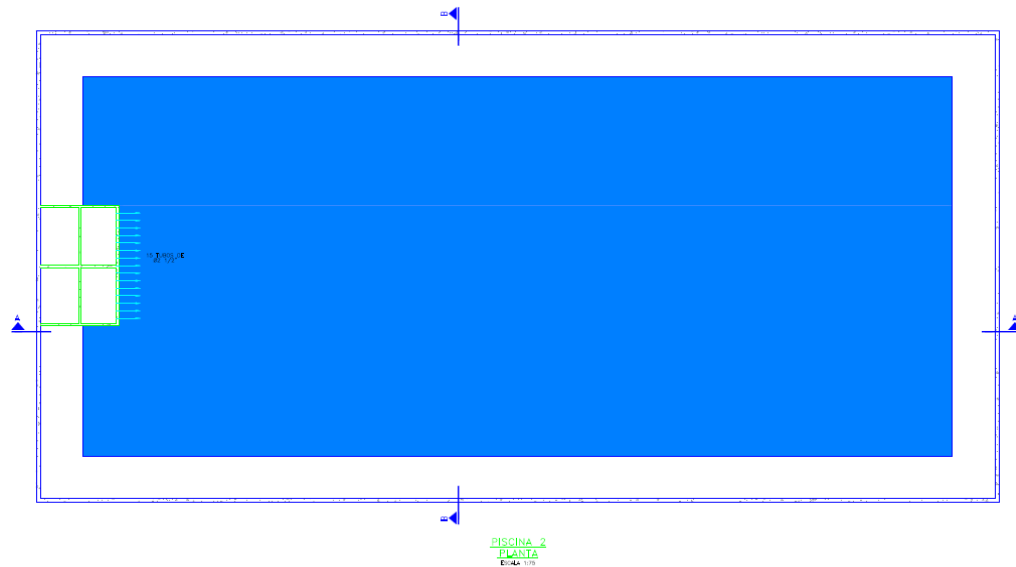


Fuente: Petróleos del Norte S.A.

- **Piscina de oxigenación.** Esta piscina tiene como función principal la oxidación de los últimos contaminantes orgánicos presentes en el agua, mediante la aireación de la misma. Igualmente mediante este proceso se genera un

aumento de los niveles de oxígeno disuelto en el agua antes del vertimiento, lo que mejora la calidad del efluente antes de ser entregado al cuerpo de agua. Es una unidad de gran área y poca profundidad, lo que permite mantener ambientes aerobios en toda la piscina, en la figura 15 se ilustra esta piscina.

Figura 15. Piscina de oxigenación – Estación Santa Lucia.



Fuente: Petróleos del Norte S.A.

Después de pasar por las tres unidades del sistema, el cual tiene un volumen útil total de 1008,84 m³, el agua ha sido tratada durante un tiempo de retención hidráulico de 10.33 días y aunque la residencia del sistema es alta, el mismo requiere de las mejoras que actualmente se implementan para cumplir inicialmente con todos los parámetros del decreto 1594 de 1984.

El punto autorizado para la entrega del efluente industrial del campo Santa Lucia es el río Cachira; la descarga se realiza mediante una tubería de polietileno de alta densidad de 3" la cual a lo largo de 2550 metros lleva el agua desde la salida de la piscina de oxigenación hasta el punto de vertimiento autorizado sobre el mencionado río.

4 METODOLOGÍA

El desarrollo de este proyecto parte de la caracterización del agua de producción del campo Santa Lucia. Para efectos de este documento, se tuvieron en cuenta los datos históricos del monitoreo que Petróleos del Norte S.A. ha realizado a esta agua desde el año 2010 hasta el año 2012.

Sin embargo cabe resaltar, que la compañía cuenta con datos históricos del sistema de tratamiento desde 2008 a la fecha, dando cumplimiento a las resoluciones 124 del 5 de marzo de 2007 y 634 del 15 de agosto de 2007 donde se otorgó y modificó respectivamente el permiso de vertimientos del campo, y a la resolución 522 del 29 de mayo de 2012, donde se renovó el mencionado permiso.

Todas las mediciones realizadas al agua industrial del campo, tanto de parámetros tomados in situ, como las determinaciones fisicoquímicas y microbiológicas realizadas en laboratorio se efectuaron siguiendo estrictamente las metodologías y técnicas aprobadas y estandarizadas por el “Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater de la APHA-AWWA-WPCF” ed. 21., tal como se detalla en la Tabla 1.

Adicionalmente, fue necesario llevar a cabo un análisis especializado para conocer el contenido de los aniones y cationes presentes en el agua industrial del campo Santa Lucia, ya que estos elementos en particular nunca habían sido monitoreados en el sistema.

Para esta labor se contrató a la empresa CORE LABORATORIES, quienes prestan sus servicios a Petróleos del Norte S.A. desde hace aproximadamente 6 años, y cuentan con los estándares requeridos internacionalmente para este tipo de análisis.

La muestra fue tomada el día 13 de septiembre de 2012 en la piscina de oxigenación del sistema de tratamiento del campo y enviada a los Estados Unidos

para realizar las respectivas pruebas, en esta determinación se emplearon las técnicas de Cromatografía Iónica e ICP. En el anexo 1, se presenta el reporte entregado por CORE LABORATORIES de los análisis realizados.

Tabla 1. Técnicas de análisis in situ y métodos de laboratorio para análisis de agua.

PARÁMETRO	TÉCNICA	UNIDADES	MÉTODO*
Ph	Potenciometría	Unidades	SM 4500-B+H
Conductividad	Electrometría	μS/cm	SM 2510-B
Oxígeno Disuelto	Electrodo de membrana	mg O ₂ /L	SM 4500 O-G
Temperatura	Termometría	°C	SM 2550-B
Aceites y Grasas	Infrarrojo	mg/L	SM 5520 C
Hidrocarburos Totales	Infrarrojo	mg/L	SM 5520 F
DBO ₅	Incubación	mg O ₂ /L	SM 5210 B
DQO	Reflujo cerrado	mg O ₂ /L	SM 5220 C
Cloruros	Volumetría	mg Cl/L	SM 4500 Cl-C
Fenoles	Espectrofotometría	mg Fenol/L	SM 5530 D
Sólidos Suspendidos Totales	Gravimetría	mg/L	SM 2540 D
Sólidos Totales	Gravimetría	mg/L	SM 2540 B
Sulfatos	Turbidimétrico	mg PO ₄ /L	SM 4500 SO ₄ E
Bario	Espectrofotometría	mg/L	SM 3030 E – SM 3111 D
Cadmio	Espectrofotometría	mg/L	SM 3030 E – SM 3111 B
Cromo	Espectrofotometría	mg/L	SM 3030 E – SM 3111 D

* “Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater” de la APHA-AWWA-WPCF, Ed. 21

Paralelamente se realizó la revisión bibliográfica de las diferentes alternativas que existen en la industria para el tratamiento de aguas de producción con alto contenido de cloruros, con el objetivo de conocer en detalle las técnicas que

actualmente se utilizan y revisar cuál de estas pudiese llegar a ser aplicable al campo Santa Lucía.

Por otra parte se indagó, acerca de las experiencias de algunas de las empresas del sector petrolero para el manejo de cloruros, revisando los tratamientos con los que cuentan y las nuevas técnicas en las que trabajan, esto se llevó a cabo mediante reuniones con la gerencia de aguas de ECOPETROL, reuniones y procesos de revisión de las tecnologías con las diferentes empresas que ofrecen alternativas para el manejo de aguas de producción y visitas a algunos campos de la estatal petrolera y a otras empresas del sector donde se ya se tienen técnicas implementadas para el manejo de estas aguas.

La asistencia a cursos sobre el manejo y tratamiento del agua en la industria y la experiencia de la empresa Petróleos del Norte y sus funcionarios de la Gerencia de Sostenibilidad, hizo parte de la metodología utilizada para el desarrollo de este proyecto.

5 DATOS Y ANÁLISIS

5.1 CARACTERIZACIÓN DEL AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL DEL CAMPO SANTA LUCIA.

A continuación se presentan en las tablas 2, 3 y 4, los datos obtenidos de la caracterización del agua residual industrial del campo Santa Lucia, desde el año 2010 al 2012.

Tabla 2. Caracterización del agua industrial año 2010.

CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUA INDUSTRIAL DE SANTA LUCIA. AÑO 2010							
PARÁMETROS	UNIDADES	Febrero de 2010		Julio de 2010		Noviembre de 2010	
		Afluyente	Efluente	Afluyente	Efluente	Afluyente	Efluente
pH	Unidades	6,27	7,24	7,01	7,04	6,78	7,21
Temperatura del agua	°C	41,5	32,9	40	29,7	38,4	32,5
Conductividad	µS/cm	1559	620	N.R	14,61	58792	41892
Oxígeno Disuelto	mg/L	<1	<1	N.R	0,51	1,65	1,48
Sólidos Totales	mg/L	15240	2240	N.R	18200	N.R	27200
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	1548	285,2	164	80,2	307	130
Hidrocarburos Totales	mg/L	N.R	N.R	N.R	0,42	N.R	3.07
Grasas y aceites	mg/L	712,1	5,2	300	1,35	3380	6,83
Sulfatos	mg/L	2,6	2,6	N.R	125	N.R	<4
DQO	mg O2/L	2220	722,3	N.R	476	N.R	220
DBO ₅	mg O2/L	885	322	410	71,2	388	136

Fuente: Petróleos del Norte S.A.

N.R: parámetro no requerido.

Continuación Tabla 2. Caracterización del agua industrial año 2010.

CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUA INDUSTRIAL DE SANTA LUCIA 2010							
PARÁMETROS	UNIDADES	Febrero de 2010		Julio de 2010		Noviembre de 2010	
		Afluyente	Efluente	Afluyente	Efluente	Afluyente	Efluente
Cloruros	mg/L	18185	8153,5	12700	10500	26700	24100
Bario	mg/L	50,91	38,16	N.R	2,3	N.R	2,3
Cadmio	mg/L	0,056	0,054	N.R	<0,005	N.R	<0,005
Cromo	mg/L	N.R	N.R	N.R	<0,043	N.R	<0,043
Fenoles	mg/L	0,52	0,55	0,264	0,186	0,887	0,002

Fuente: Petróleos del Norte S.A.

N.R: parámetro no requerido.

Tabla 3. Caracterización del agua industrial año 2011.

PARÁMETROS	UNIDADES	Junio de 2011		Octubre de 2011	
		Afluyente	Efluente	Afluyente	Efluente
pH	Unidades	6,77	7,57	7,8	7,4
Temperatura del agua	°C	34,31	29,74	39,1	32
Conductividad	µS/cm	27030	24980	N.R	34350
Oxígeno Disuelto	mg/L	2,25	3,67	N.R	5,2
Sólidos Totales	mg/L	N.R	23200	N.R	20900
Sólidos Suspendedos Totales	mg/L	8	141	5680	113
Hidrocarburos Totales	mg/L	N.R	3,71	N.R	4,45

Fuente: Petróleos del Norte S.A.

N.R: parámetro no requerido.

Continuación Tabla 3. Caracterización del agua industrial año 2011.

PARÁMETROS	UNIDADES	Junio de 2011		Octubre de 2011	
		Afluente	Efluente	Afluente	Efluente
Grasas y aceites	mg/L	489	13,6	5450	7,16
Sulfatos	mg/L	N.R	28,7	N.R	<4
DQO	mg O ₂ /L	N.R	344	N.R	231
DBO ₅	mg O ₂ /L	248	220	223	138
Cloruros	mg/L	7080	6660	10959,9	14214,4
Bario	mg/L	N.R	0,2	N.R	0,33
Cadmio	mg/L	N.R	<0,005	N.R	<0,005
Cromo	mg/L	N.R	<0,043	N.R	<0,043
Fenoles	mg/L	0,585	0,268	0,759	0,463

Fuente: Petróleos del Norte S.A.

N.R: parámetro no requerido.

Tabla 4. Caracterización del agua industrial año 2012.

CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUA INDUSTRIAL DE SANTA LUCIA 2012							
PARÁMETROS	UNIDADES	Febrero de 2012		Julio de 2012		Diciembre de 2012	
		Afluente	Efluente	Afluente	Efluente	Afluente	Efluente
pH	Unidades	5,4	7,37	N.R	7	6,55	6,74
Temperatura del agua	°C	30	30	N.R	32	N.R	34,5
Conductividad	µS/cm	N.R	56000	N.R	41500	N.R	463000

Fuente: Petróleos del Norte S.A.

N.R: parámetro no requerido.

Continuación Tabla 4. Caracterización del agua industrial año 2012.

CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUA INDUSTRIAL DE SANTA LUCIA 2012							
PARÁMETROS	UNIDADES	Febrero de 2012		Julio de 2012		Diciembre de 2012	
		Afluente	Efluente	Afluente	Efluente	Afluente	Efluente
Oxígeno Disuelto	mg/L	N.R	4,4	N.R	4,5	N.R	1,18
Sólidos Totales	mg/L	N.R	28200	N.R	257000	N.R	29200
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	176	43	1424	35	458	245
Hidrocarburos Totales	mg/L	N.R	9,8	N.R	5,32	N.R	3,76
Grasas y aceites	mg/L	16,7	9,9	104000	10,9	1800	12,4
Sulfatos	mg/L	N.R	<4	N.R	<4	N.R	<4
DQO	mg O ₂ /L	N.R	146	N.R	343	N.R	924
DBO ₅	mg O ₂ /L	710	93	808	233	476	573
Cloruros	mg/L	18303,5	18189,4	21114,3	24891	26000	25100
Bario	mg/L	N.R	20,4	N.R	33,4	N.R	N.R
Cadmio	mg/L	N.R	<0,007	N.R	<0,007	N.R	N.R
Cromo	mg/L	N.R	<0,050	N.R	<0,050	N.R	N.R
Fenoles	mg/L	0,556	0,19	0,568	0,299	0,622	0,332

Fuente: Petróleos del Norte S.A.

N.R: parámetro no requerido.

Como se mencionaba previamente en la justificación del proyecto, la caracterización del agua industrial del campo Santa Lucia desde el año 2010 hasta el 2012, evidencia que el sistema de tratamiento presenta incumplimiento en 4 parámetros de los regulados por el decreto 1594 de 1984, que son: Sólidos Suspendidos Totales, Demanda Biológica de Oxígeno, Bario y Fenoles. Para el control de estos indicadores se ha diseñado, probado e implementado desde el

año 2011 a la fecha, un grupo de soluciones que incluyen: mantenimientos anuales completos del sistema de tratamiento y semestrales de la piscina de oxigenación; instalación de tubería de recirculación desde la piscina de oxigenación hasta la piscina facultativa para aumentar el tiempo de retención del sistema; instalación de biofiltros en la piscina facultativa para generar un medio de soporte para los microorganismos presentes; construcción de un nuevo separador API para aumentar la retención de grasas y aceites del sistema y evitar la formación de una capa de estas en la primera cámara de la piscina facultativa. Adicionalmente, también se realizaron pruebas para la implementación de un secuestrante de bario en la piscina facultativa y de un producto químico para la oxidación los fenoles al final del sistema.

Todas las medidas anteriores con el único objetivo de estabilizar el comportamiento de los 4 parámetros que se encuentran fuera de norma y de los cuales a la fecha se esperan los resultados de los últimos monitoreos realizados, para verificar que se encuentren cumpliendo la norma.

Es importante resaltar, que para Petróleos del Norte S.A., estos parámetros no son los más críticos para el cumplimiento de la nueva legislación ambiental en materia de vertimientos, la cual se encuentra próxima a entrar en vigencia, ya que la compañía tiene medidas puntuales y específicas implementadas para el control de los mismos.

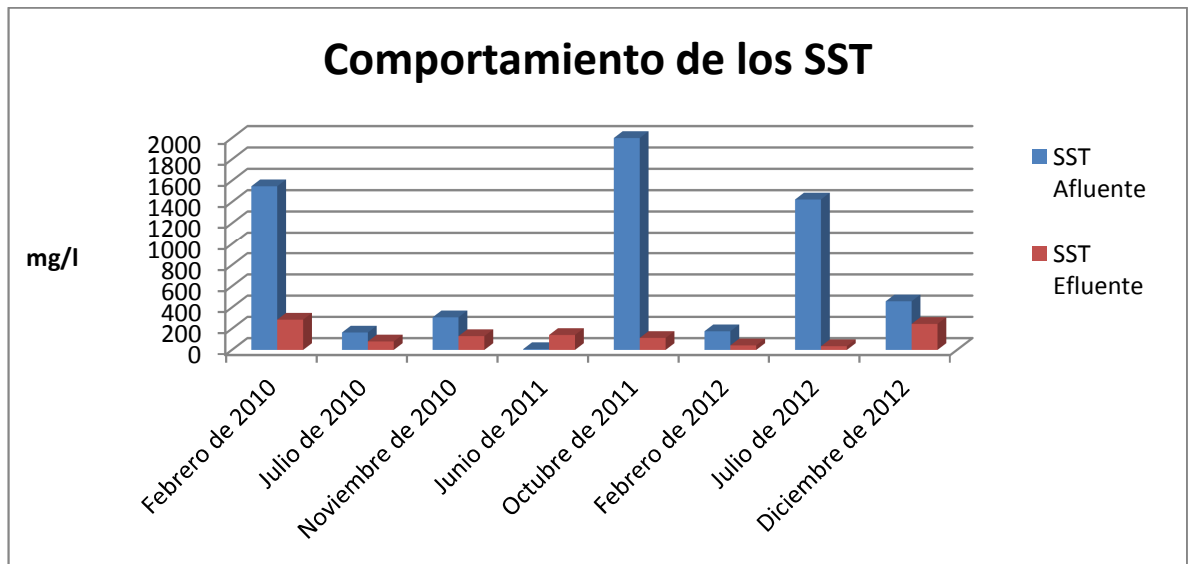
Sin embargo si son referentes importantes, así como los demás parámetros revisados en la caracterización del agua del campo Santa Lucia, para el análisis de las diferentes técnicas revisadas para la disposición de efluentes con alta concentración de cloruros, los cuales son el objeto y razón del presente documento.

5.2 PARÁMETROS DE INTERÉS PARA EL ANÁLISIS DE LAS TÉCNICAS EVALUADAS PARA LA DISPOSICIÓN DE EFLUENTES CON ALTO CONTENIDO DE CLORUROS.

A continuación se presentan las gráficas del comportamiento de los parámetros más importantes a tener en cuenta, en el análisis y evaluación de las diferentes técnicas revisadas para el tratamiento y disposición de efluentes industriales con alto contenido de cloruros.

En la gráfica 2 se presenta el comportamiento de los sólidos suspendidos totales en cada uno de los monitoreos realizados entre el año 2010 y 2012, donde se evidencia una fluctuación muy importante en los afluentes del sistema, la cual es generada por descargas de los drenajes de los tanques de almacenamiento de crudo, separadores y tratador térmico en el momento de la toma de muestras.

Gráfica 2. Comportamiento de los SST del 2010 al 2012.



Fuente: Petróleos del Norte S.A.

Para el caso de los Efluentes se nota claramente un comportamiento un poco más estable, sin embargo es evidente que los cambios y fluctuaciones en el momento

de la toma de muestras afecta de forma positiva o negativa el porcentaje de remoción del sistema. Razón por la cual se estableció un protocolo para la toma de muestras a partir del año 2013, con el fin de tener datos más representativos del sistema.

No obstante este parámetro que está ligado directamente a la cantidad de sólidos sedimentables en el agua, no cumple de forma constante con la remoción mínima del 80% en carga, exigida en el decreto 1594 de 1984, lo cual ocurre principalmente cuando las unidades del sistema tienen en el fondo una capa considerable de sedimentos, los cuales empiezan a arrastrarse con la corriente y se reflejan al final del tratamiento.

Para controlar este parámetro se implementó la recirculación de una fracción del agua de la piscina de oxigenación a la piscina facultativa para aumentar el tiempo de reposo del agua y permitir la sedimentación de estos sólidos. Igualmente se implementó una frecuencia mayor de mantenimientos del sistema, para retirar los sólidos sedimentables del fondo de las unidades y evitar su arrastre.

Los valores que presenta el sistema en cuanto a SST, presentan incumplimiento también en referencia al borrador de la norma que reglamentara el decreto 3930 de 2010, documento que en versión número 5 de octubre de 2012, permite un máximo de 180 mg/l para la actividad petrolera en su etapa de Exploración y producción.

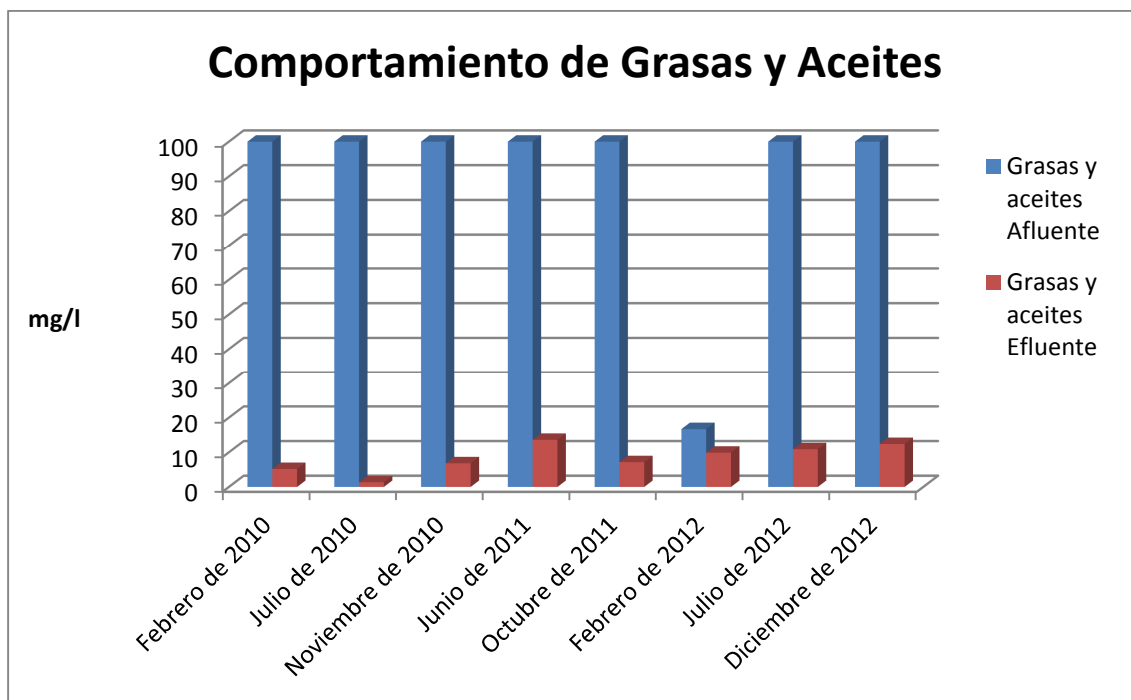
Cabe resaltar, que la alta carga de cloruros, bario y otros iones y cationes presentes en el agua afectan también este parámetro.

En la siguiente gráfica se exponen los resultados de la retención de grasas y aceites del sistema de tratamiento, la cual desde el año 2010 al 2012, presenta cumplimiento total de los porcentajes de remoción exigidos en la norma 1594 de 1984 que se encuentra vigente para todo lo relacionado a vertimientos.

Igualmente al comparar los resultados del sistema de tratamiento en este parámetro, con la versión número 5 del borrador de la norma que reglamentara el decreto 3930 de 2010, se evidencia un cumplimiento total del valor máximo permisible para grasas y aceites, el cual no podrá superar los 50 mg/l, y ya que durante los 3 años analizados del sistema de tratamiento, el valor más alto no supera los 12,4 mg/l, se cumpliría también con la nueva legislación ambiental para vertimientos.

Esta cifra es muy importante, ya que la mayoría de tratamientos para la disposición de cloruros requieren valores muy bajos de grasas y aceites.

Grafica 3. Comportamiento de Grasas y Aceites del 2010 al 2012.



Fuente: Petróleos del Norte S.A.

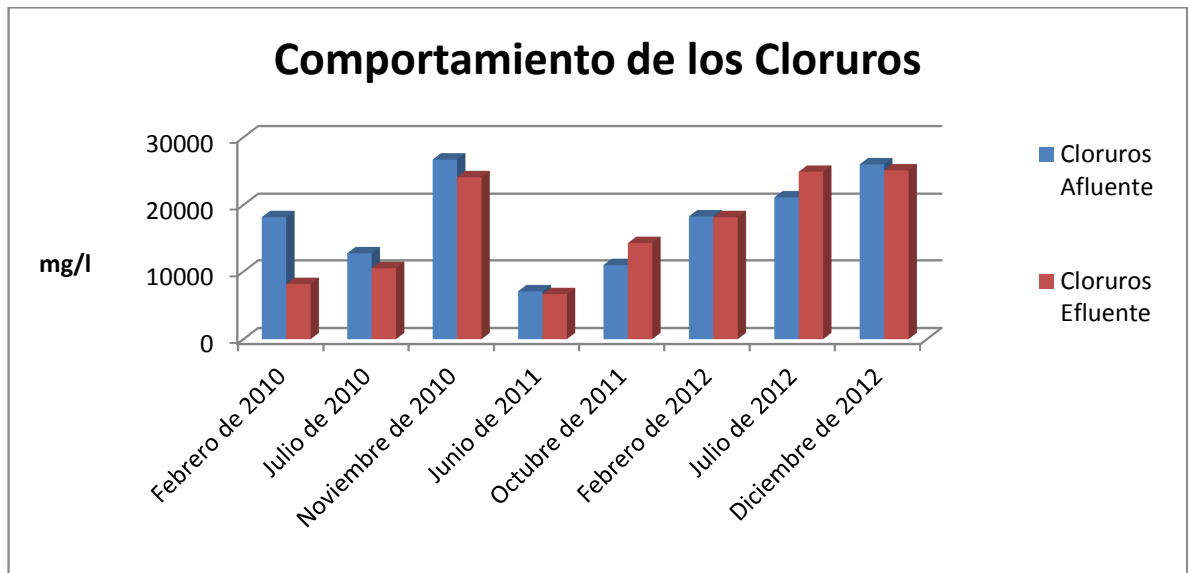
Cabe resaltar, que el dato de febrero de 2012 se ve alterado respecto a los demás datos, ya que la muestra tomada no tuvo en cuenta los drenajes de los tanques, razón por la cual este dato no es representativo en relación a los demás datos obtenidos del sistema durante los 3 años de análisis.

Para el caso de los Cloruros, su comportamiento fluctuante en el sistema de tratamiento de agua industrial del campo Santa Lucia, obedece principalmente al hecho de tener un sistema abierto, con unidades que reciben gran cantidad de aguas lluvias y donde por esta razón se genera el efecto de dilución del contaminante, lo cual no permite tener un muestreo en condiciones homogéneas en cada monitoreo realizado.

Igualmente es notorio el aumento en la concentración de este parámetro desde finales de 2011 hasta el 2012, donde por temas netamente operativos, se evidenció que los pozos más antiguos del campo, empezaron a aportar un crudo con más contenido de sales de lo habitual; razón por la cual se inició con el proceso de pruebas con productos químicos, para la remoción de esta sal.

El tratamiento que fue muy efectivo, redujo los volúmenes de agua de lavado del crudo, pero aumento la concentración de sales en el agua de producción que ingresa al sistema de tratamiento.

Grafica 4. Comportamiento de los Cloruros del 2010 al 2012.



Fuente: Petróleos del Norte S.A.

Aunque los cloruros no tienen valor de restricción en el decreto 1594 de 1984, y en la actualidad no se consideran fuera de norma, a la luz del borrador número 5 de la norma que reglamentara el decreto 3930 de 2010 es fundamental diseñar una estrategia que permita disponer adecuadamente este efluente con alta concentración de cloruros, que en promedio registra concentraciones de 15000 mg/l.

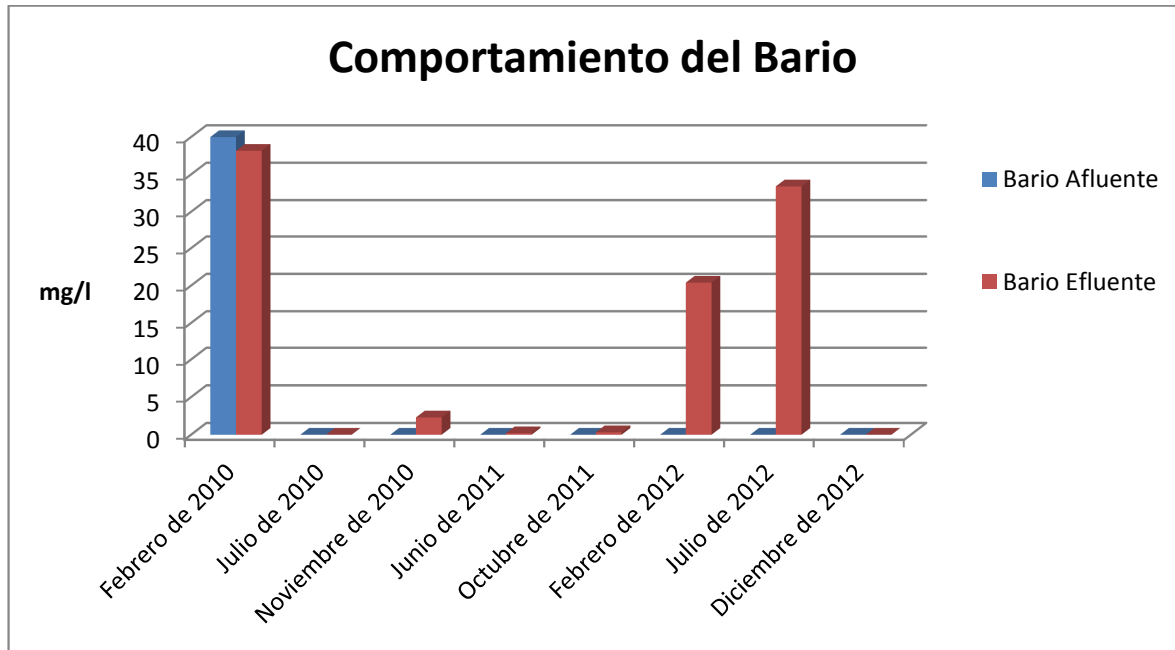
En el caso del Bario, el agua industrial del campo Santa Lucia tiene un incumplimiento tanto del decreto 1594 de 1984, como del borrador de la norma que reglamentara el decreto 3930 de 2010, donde se establece como límite máximo un valor de 3 mg/l.

En la gráfica 5 se aprecian los resultados de los monitoreos realizados de este metal, desde el año 2010 al 2012, de los cuales cabe aclarar, no se tiene datos del afluyente, salvo el de febrero de 2010, porque no se solicitaron más desde esta fecha.

El comportamiento del Bario en el efluente del sistema, ha sido muy fluctuante y aunque este metal registra mayores concentraciones cuando la temperatura del agua aumenta, aun se realizan análisis pozo por pozo y continúa siendo motivo de estudio para Petróleos del Norte, este comportamiento que se ha observado incluso desde años anteriores a los analizados en este documento, en el sistema de tratamiento del campo Santa Lucia.

Es importante resaltar, que el Bario presente en el agua es un parámetro crítico para los tratamientos especializados en la disposición de cloruros, ya que este metal genera graves problemas de incrustaciones en los equipos y facilidades empleadas para tal fin, por esta razón es necesario en la mayoría de los casos removerlo por completo antes de iniciar con una técnica especializada para los cloruros.

Grafica 5. Comportamiento del Bario del 2010 al 2012.



Fuente: Petróleos del Norte S.A.

Por otra parte, la presencia del Bario en el agua industrial del campo no es del todo negativa, el Bario puede generar un valor agregado a los sólidos que se obtienen en los tratamientos que se realizan al agua de producción, ya que si se logra diseñar un tratamiento que permita extraerlo junto con los cloruros, se puede llegar a tener sal de Bario, que es la materia prima para la Barita, producto de alto valor, empleado en la perforación de pozos petroleros.

5.3 RESULTADO DE ANÁLISIS DE ANIONES Y CATIONES DEL AGUA INDUSTRIAL DEL CAMPO SANTA LUCIA.

Después de realizado el análisis de Aniones y Cationes del agua industrial del campo Santa Lucia (ver anexo 1), se confirma que el Cation con más presencia en esta agua es el Sodio con 5960 mg/l, y el Anión con más presencia es el Cloruro, con 12100 mg/l.

Esto indica, que al aplicar un proceso para retirar del agua estos elementos, no se tendrán compuestos altamente tóxicos, sino que por el contrario y si se aplican todas las tecnologías necesarias, estos podrán ser empleados como materias primas de otros procesos.

Igualmente hay otros minerales presentes en el agua, como el Calcio, Magnesio y Bario, pero en concentraciones mucho más bajas, pero igualmente importantes al momento de analizar las diferentes técnicas para la disposición del efluente del campo Santa Lucia.

En la tabla 5 y 6 se presentan los resultados de los Cationes y Aniones encontrados en el agua del campo, respectivamente.

Tabla 5. Caracterización de Cationes del agua industrial del campo Santa Lucia.

Cations		Test Method	(mg/l)	MW	Valence	Meq/l
Barium	Ba ⁺²	ICP	41	137,34	2,0	0,60
Calcium	Ca ⁺²	ICP	1.400	40,08	2,0	69,79
Copper	Cu ⁺²	ICP	<0.009	63,55	2,0	0,00
Iron (dissolved)	Fe ⁺²	ICP	3,5	55,85	2,0	0,12
Iron (total)	Fe ⁺²	ICP	5,9	55,85	2,0	0,21
Lead	Pb ⁺²	ICP	<2.2	207,20	2,0	0,00
Magnesium	Mg ⁺²	ICP	200	24,31	2,0	16,38
Manganese	Mn ⁺²	ICP	0,48	54,94	2,0	0,02
Nickel	Ni ⁺²	ICP	<0.02	58,69	2,0	0,00
Potassium	K ⁺	ICP	55	39,10	1,0	1,41
Silicon	Si ⁺⁴	ICP	11	28,09	4,0	1,57
Sodium	Na ⁺	ICP	5.960	22,99	1,0	259,33
Strontium	Sr ⁺²	ICP	63	87,62	2,0	1,44
Vanadium	V ⁺²	ICP	<0.01	50,94	2,0	0,00
Zinc	Zn ⁺²	ICP	<0.004	65,39	2,0	0,00

Fuente: Petróleos del Norte S.A.

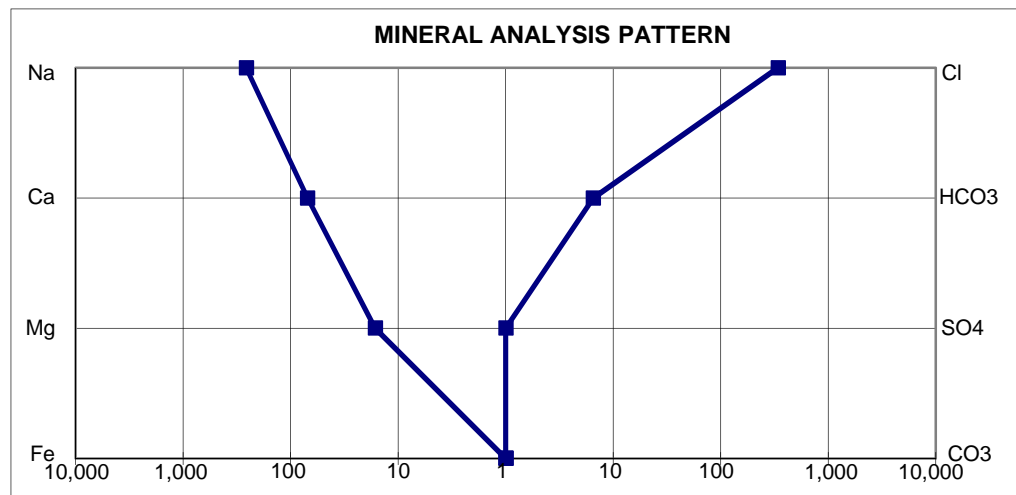
Tabla 6. Caracterización de Aniones del agua industrial del campo Santa Lucia.

Anions		Test Method	(mg/l)	MW	Valence	Meq/l
Alkalinity (as Bicarbonate)	HCO ₃ ⁻	Titration	400	61,02	1,0	6,52
Borate	B(OH) ₄ ⁻	ICP	1,6	78,84	1,0	0,02
Bromide	Br ⁻	Titration / IC	43	79,90	1,0	0,54
Carbonate	CO ₃ ⁻²	Titration	<2.0	60,01	2,0	0,00
Chloride	Cl ⁻	Titration / IC	12.100	35,45	1,0	341,24
Iodide	I ⁻	Titration / IC	<4.0	126,90	1,0	0,00
Sulfate	SO ₄ ⁻²	IC	7,8	96,06	2,0	0,16
Sulfide	S ⁻²	IC	0,0	32,06	2,0	0,00

Fuente: Petr6leos del Norte S.A.

En la gr1fica 6 se ilustra igualmente el an1lisis de minerales realizado al agua industrial del campo Santa Lucia, dentro de este mismo proceso mencionado anteriormente, donde se confirma que el mayor contenido de minerales presentes en el agua lo componen los Cloruros y el Sodio, lo cual permitir1a pensar en un aprovechamiento relativamente sencillo de cualquier precipitado que se obtenga al aplicar una t1cnica especializada para remover estos cloruros del agua.

Gr1fica 6. An1lisis de minerales del agua industrial del campo Santa Lucia.



Fuente: Petr6leos del Norte S.A.

5.4 ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE LAS TÉCNICAS REVISADAS PARA EL TRATAMIENTO DE EFLUENTES CON ALTO CONTENIDO DE CLORUROS.

Después de analizar la información bibliográfica relacionada con las principales tecnologías empleadas en la industria para el tratamiento de aguas de producción (presentadas al inicio de este documento) se comparan las ventajas y desventajas de su implementación teniendo como base las características fisicoquímicas del agua industrial del campo Santa Lucia. Adicionalmente en esta discusión se tienen en cuenta también las necesidades operativas de cada técnica, los costos operacionales (en dólares americanos) y demás aspectos en relación a la infraestructura existente en el campo y las modificaciones necesarias o equipos requeridos en caso de emplear cada técnica evaluada.

5.4.1 Inyección

Las ventajas y desventajas de esta técnica se presentan a continuación (Tabla 7).

Tabla 7. Ventajas y desventajas de la inyección.

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Dispone grandes volúmenes de agua y el costo por barril tratado esta entre 1 a 5 dólares, dependiendo del tipo de agua y el tratamiento previo a la inyección que se decida implementar.	Requiere un tratamiento previo complejo.
Es una solución aceptada por la autoridad ambiental y efectiva para la disposición final de solidos disueltos, como metales y cloruros.	Requiere estudios especializados para garantizar la no afectación de aguas subterráneas y conocer muy bien el yacimiento.

Fuente: Petróleos del Norte S.A.

Continuación tabla 7. Ventajas y desventajas de la inyección.

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Puede utilizarse como método de recobro secundario.	En caso de necesitarse mantenimientos los costos son elevados. (cada servicio a pozo cuesta en promedio 250.000 USD)
Evita la descarga de contaminantes a las aguas superficiales.	Los equipos e instalaciones del montaje en superficie son costosos.
Probada con éxito en diferentes campos de la industria nacional y mundial.	Puede presentar problemas operativos por incrustaciones o daños en la formación.

Fuente: Petróleos del Norte S.A.

Para la implementación de esta técnica en el campo Santa Lucia se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones mínimas de adecuaciones civiles y de infraestructura, equipos y personal.

- Modificar la piscina facultativa e instalar unidades de Coagulación y floculación DAF (Flotación por Aire Disuelto), para remover completamente todas las grasas y aceites, materia orgánica y sólidos suspendidos del agua.
- Definir el manejo y disposición final de los lodos que se obtienen de los procesos de coagulación y floculación diseñar y construir las facilidades necesarias para esta labor.
- Instalar módulos de filtración para llegar a los máximos recomendados de 20 mg/l de grasas y aceites, 5 mg/l de SST y 1 micra en tamaño de partículas.
- La piscina de oxigenación desaparecería como piscina y se ubicarían tanques de almacenamiento completamente sellados donde se inyectaría el secuestrante de oxígeno, biocida y anticorrosivo que requiere el agua.
- Construir todas las facilidades para la inyección, que se componen de las líneas de flujo hasta el pozo inyector, tanques de almacenamiento, manifold de recibo, bomba inyectora, equipos de monitoreo e instrumentación, etc.

- Es importante tener en cuenta que se requiere también de personal encargado de los sistemas de tratamiento y del sistema de inyección como tal, para garantizar el éxito del mismo.

Por otra parte, los costos iniciales de esta técnica presentan los siguientes escenarios para el campo Santa Lucia.

- Si se cuenta con un pozo perforado en el campo: 2.500.000 USD + costos de equipos y modificaciones físicas para el tratamiento previo del agua.
- Si se requiere perforar el pozo: en el campo 5.000.000 USD + costos de equipos y modificaciones físicas para el tratamiento previo del agua.
- Los costos de modificaciones y equipos del tratamiento ascienden a 170.000 USD.

5.4.2 Electrodiálisis inversa

La Tabla 8 presenta las ventajas y desventajas de la técnica de electrodiálisis inversa.

Tabla 8. Ventajas y desventajas de la electrodiálisis inversa.

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Remueve de forma controlada y segura las sales y metales presentes en el agua.	Las membranas y resinas empleadas tienen una vida útil limitada.
Es una técnica relativamente sencilla de controlar y operar.	Se requiere frecuentemente inhibir la precipitación de sales que forman incrustaciones, ya que estas colapsan el sistema de membranas.
No requiere grandes cantidades de espacio.	No se recomienda para aguas con más de 5000 mg/l de cloruros.

Fuente: Petróleos del Norte S.A.

Continuación tabla 8. Ventajas y desventajas de la electrodiálisis inversa.

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Alcanza porcentajes altos de remoción de los contaminantes.	Los sistemas de membranas generan rechazos altamente concentrados que requieren técnicas avanzadas y costosas para su disposición final. No se obtiene una solución real al problema.

Fuente: Petróleos del Norte S.A.

No se contempla la aplicación de esta técnica para el campo Santa Lucia, ya que a más de 5000 mg/l de concentración de contaminantes disueltos en el agua, la misma es inoperante. Y teniendo en cuenta, que el agua del campo en promedio tiene una concentración solo de cloruros de más de 15000 mg/l, este método se descarta.

5.4.3 Osmosis inversa

La Tabla 9 presenta las principales ventajas y desventajas del proceso de osmosis inversa.

Tabla 9. Ventajas y desventajas de la osmosis inversa.

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Permite retener hasta en un 95% los cloruros y otras sales, metales y demás solidos disueltos en el agua.	Las membranas no toleran muy bien las variaciones de las condiciones en el fluido a tratar (caudal y características) y fácilmente se presentan cortos circuitos en el tratamiento que implican el cambio permanente de las mismas.

Fuente: Petróleos del Norte S.A.

Continuación tabla 9. Ventajas y desventajas de la osmosis inversa.

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Es un proceso que en caso de requerirse, facilita la recuperación de los productos filtrados por las membranas.	El costo de las membranas es elevado, alrededor de los 800 a 1000 USD por membrana y para el campo Santa Lucia se requiere un set de 18 membranas, que en promedio se deberán cambiar mensualmente.
No requiere áreas grandes para las unidades de tratamiento de la técnica.	La Osmosis Inversa genera una salmuera ultra concentrada como rechazo del proceso, la cual debe ser tratada por aparte.
La alta variedad de membranas hace de este un proceso muy específico, lo cual genera excelentes resultados en la aplicación que se esté usando.	Para garantizar el éxito del proceso y la vida útil de la membrana se requiere que el agua llegue preferiblemente con una sola variable como objetivo a remover, lo que implica retirar previamente los demás contaminantes con otros procesos que elevan el costo de tratamiento.

Fuente: Petróleos del Norte S.A.

Para la implementación de esta técnica en el campo Santa Lucia es necesario tener en cuenta las siguientes consideraciones mínimas de adecuaciones civiles y de infraestructura, equipos y personal.

- Es indispensable tener un pre tratamiento y tratamiento recomendado con unidades de flotación por aire disuelto (DAF) para este sistema.
- Se requiere igualmente diseñar todo lo necesario para evacuar los lodos o *slurries* que se generan en el proceso y realizar su adecuado manejo y disposición final.

- Igualmente se requiere una filtración y ultrafiltración del efluente y finalmente un tanque de igualación para ingresar el agua en flujo constante a las unidades de Osmosis Inversa.
- En la batería Santa Lucia se debería modificar la piscina facultativa, en la cual funcionarían las unidades DAF y las unidades de filtración y ultra filtración.
- En el área donde está la piscina de oxigenación sería necesario dividir la misma en 4 partes, para en la primera tener un tanque de aireación e igualación de caudales y en la siguiente las unidades de osmosis.
- Las áreas restantes de la actual piscina servirían para almacenar los rechazos del proceso e implementar la técnica siguiente que permita tratar los rechazos o almacenar los mismos, para disponerlos con terceros autorizados.
- Igualmente sería necesario tener el personal técnico idóneo para la operación de este sistema las 24 horas del día, ya se requiere atención completa durante toda su operación.

En cuanto a los costos iniciales para la aplicación de esta técnica, se cuenta con la siguiente información, producto del proceso de análisis que ha realizado la compañía para la disposición del agua industrial del campo Santa Lucia.

- El sistema de tratamiento (oxidación, ultrafiltración y osmosis inversa) y su instalación cuestan 1.156.692 USD. Para un caudal de 1,5 l/s de agua tratada.
- Esto sin incluir las obras civiles que se requieren realizar para adecuar las áreas existentes, las cuales aproximadamente tienen un costo de 170.000 USD.
- Cabe resaltar, que para el campo Santa Lucia, el consumo de energía mensual con este sistema, puede oscilar entre 277 a 333 USD por día.

5.4.4 Evaporación térmica

La técnica de evaporación térmica tiene las siguientes ventajas y desventajas:

Tabla 10. Ventajas y desventajas de la evaporación térmica.

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Es posible emplear de forma directa el gas que generan los campos petroleros como fuente de energía.	Requiere de un consumo de energía muy alto para su funcionamiento, se estima que alrededor de unos 260 Kw/h para los 617 bbl/d que se producen en el campo.
Se adapta fácilmente a caudales grandes.	Las áreas para los equipos son de tamaño considerable, aproximadamente 290 metros cuadrados solo para los equipos principales.
Es un proceso que en teoría no requiere de un tratamiento previo sofisticado del agua, ya que solo se concentra en evaporar la misma mediante la adición de temperatura.	Los equipos, su importación y montaje son muy costosos.
	Es necesario emplear aditivos químicos previos al proceso, para precipitar metales y otros compuestos que pueden generar vapores peligrosos y que generarían problemas de incrustaciones en los equipos y elevar el punto de ebullición del agua.
Existen diversos tipos de montajes de evaporadores térmicos, lo cual permite que la técnica se adapte o sea específica para cada tipo de situación.	Los sólidos generados en los cristalizadores, aun van a contener entre un 20 a 15% de humedad, lo cual sigue dejando un problema para solucionar.
	Se genera un efluente del proceso el cual debe igualmente ser monitoreado y asegurado antes de su vertimiento.

Fuente: Petróleos del Norte S.A.

Para la implementación de esta técnica en el campo Santa Lucia se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones mínimas de adecuaciones civiles y de infraestructura, equipos y personal.

- La piscina de oxigenación tendría que ser secada y utilizada para ubicar los equipos de evaporación.
- Se requeriría realizar un aprovechamiento del gas del campo, lo cual implica traer los gases que se ventean en cabeza de pozo y el que se quema en la tea de la estación, para ayudar a la alimentación del proceso y disminuir los costos energéticos.
- Con los requerimientos de área de los equipos, quedarían de la piscina de oxigenación aproximadamente 500 metros cuadrados que deberán ser acondicionados para construir las facilidades y equipos necesarios para tratar los sólidos en *slurry*, que salen del proceso y evacuar los mismos, lo más secos posibles para su disposición final.
- Igualmente en esta área se deben construir los tanques y bombas para retornar los efluentes finales al proceso y para almacenar y evacuar los condensados que se generan en la fase final del tratamiento, para su monitoreo y posterior vertimiento.
- Se requiere al igual que en las otras técnicas, de personal técnico capacitado para la operación de los equipos, los cuales son importados y requieren monitoreo continuo durante su operación.

Los costos iniciales, para la implementación de esta técnica en el campo Santa Lucia, son los siguientes:

- Importación de los equipos, 4.008.600 USD, solo contemplando la compra.
- Obras civiles para adecuación de las áreas existentes, 56.000 USD.
- No obstante hay que tener en cuenta el consumo energético, que puede superar los 59.000 USD mensuales, teniendo en cuenta que el valor del Kw/h para el campo Santa Lucia es de 0,32 USD.

5.4.5 Evaporación mecánica

La Tabla 11 presenta las principales ventajas y desventajas del proceso de evaporación mecánica.

Tabla 11. Ventajas y desventajas de la evaporación mecánica.

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Es un proceso que no requiere tratamiento complejo previo para las aguas.	Es un sistema nuevo y aun no se ha implementado en Colombia, por lo tanto no es fácilmente comprobable su eficiencia.
Su consumo de energía es bajo y está por el orden de 0,34 Kw/h/bbl, lo cual genera que el costo barril tratado sea el más bajo de los tratamientos analizados, con solo 1 USD/ bbl tratado.	Los cambios de clima, especialmente las condiciones de humedad, baja temperatura y lluvia afectan su eficiencia.
Al no tener cambios de temperatura y presión en el proceso, se garantiza que no se generan vapores o gases tóxicos y la formación de incrustaciones disminuye notablemente.	Se requiere realizar un seguimiento estricto a las aguas subterráneas y al aire circundante, para verificar la no afectación de los mismos por el proceso.
Los evaporadores trabajan con ajuste automático de variables en tiempo real, lo cual permite que se adapte fácilmente a cambios de caudal.	Los Evaporadores generan poco más de 85 dB de forma constante mientras estén en funcionamiento.
Aunque se genera un rechazo procedente de la humedad de los <i>slurries</i> , este puede ser ingresado nuevamente al proceso y ser tratado sin generar cortos circuitos en el sistema o necesitar grandes cambios en los equipos.	Se requiere la implementación de una técnica adicional para la disposición por tercero autorizado o aprovechamiento de los sólidos que se generan en el tratamiento.

Fuente: Petróleos del Norte S.A.

Para la implementación de esta técnica en el campo Santa Lucia se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones mínimas de adecuaciones civiles y de infraestructura, equipos y personal.

- Es necesario realizar la modificación de la piscina de oxigenación del campo, para dividir la misma en dos secciones de procesos, una para dividir en 4 y realizar la ubicación de los evaporadores y en la otra sección se manejaría el *slurry* que sale del proceso.
- Se requiere realizar la construcción de un compartimiento adicional a la piscina facultativa, para tener un espacio de reserva donde se pueda almacenar el agua de producción en caso de falla de los evaporadores.
- En las áreas de ubicación de los evaporadores, se requiere la instalación de mamparas para que no se presente dispersión de los sólidos fuera del área de procesos.
- Es necesaria la construcción de los cuartos de control de los evaporadores y la ubicación de la estación meteorológica con la cual funcionan los equipos.
- Para el control y evacuación de los sólidos retirados del proceso en forma de *slurry* se requiere la instalación de equipos de bombeo y el diseño especial de las facilidades necesarias para el secado y manejo de este sub producto del proceso, ya que se esperan alrededor de 1.66 t/d del mismo, el cual puede ocupar un volumen de 0.76 m³/d.
- Al igual que en las otras técnicas, el personal técnico capacitado para la operación de los equipos, es indispensable.

Los costos iniciales, para la implementación de esta técnica en el campo Santa Lucia, son los siguientes:

- Por ser un proyecto llave en mano el cual se ha trabajado para la empresa, el costo del primer año para la compra de los equipos es de 240.000 USD.

- Igualmente se debe hacer el pago mensual de los barriles tratados, que en teoría se espera sea de 18.510 USD/mes.
- Sin embargo al final de 5 años de operación se pagarían por los equipos de evaporación y la transferencia de la tecnología, 456.000 USD más los 240.000 iniciales, para un total de 696.000 UDS.
- Por otra parte las obras civiles requeridas para adecuación de las áreas existentes que se necesitan, tienen un costo aproximado de 170.000 USD.
- Los costos de la disposición final de los sólidos generados en un mes del tratamiento es aproximadamente de 21580 USD, teniendo en cuenta que en promedio disponer cada tonelada vale 433 USD.

6. CONCLUSIONES

Con base en los resultados de los análisis realizados al agua del campo Santa Lucia, se confirma que los sólidos que la componen de forma mayoritaria, son los cloruros y el sodio, por tal razón se deben realizar las gestiones para encontrar un aprovechamiento de estos y eliminar el alto costo de su disposición final.

La inyección es una técnica viable para el campo Santa Lucia porque, a pesar de su alto costo inicial, ha sido probada en el país, es avalada por la autoridad ambiental y soluciona de raíz la disposición de los cloruros y demás sólidos disueltos en el agua. Aunque en los procesos de pretratamiento requeridos se generan lodos, sus volúmenes son menores que los *slurries* que se esperan en otras técnicas como las evaporaciones y sus características resultan apropiadas para la implementación de tratamientos convencionales de biorremediación.

El costo para implementar la técnica de inyección en el campo Santa Lucia es aproximadamente de 3.700.000 USD y el costo del barril tratado e inyectado sería aproximado de 2.2 dólares por barril, lo cual tendría un costo promedio mensual de 40.722 USD si se mantiene estable el corte de agua del campo.

La electrodiálisis inversa se descarta como técnica aplicable para el campo Santa Lucia, ya que el tratamiento no aplica para efluentes con cargas mayores a 5000 mg/l de cualquier tipo de sólido suspendido que se encuentre en el agua.

La ósmosis inversa es una técnica con alta sensibilidad a los cambios del afluente que presenta frecuentemente problemas operativos con las membranas utilizadas para las aguas que se consideran en este proyecto. Adicionalmente los costos iniciales de montaje de los equipos de ósmosis inversa son elevados (>1.000.000 USD) y no se soluciona completamente al problema debido a la generación de rechazos (salmueras) altamente concentrados, que posteriormente requieren de otros tratamientos. Por estas razones se descarta la aplicación de la ósmosis inversa en el campo Santa Lucia.

La evaporación térmica representa una solución técnicamente importante, ya que aunque genera al igual que las osmosis y la evaporación mecánica un rechazo que necesita tratamiento para reutilizar o para disponer, es la opción que entrega este rechazo en la mejor condición para su posterior manejo, cualquiera que sea que se decida implementar. Sin embargo, económicamente la tecnología se descarta para el campo Santa Lucia, ya que los costos de los equipos superan los 4.000.000 USD y la energía requerida para la operación los 708.000 USD anuales.

La evaporación mecánica es una técnica que es aplicable al campo Santa Lucia, siendo la de menor costo en su implementación y operación. Sin embargo se hace necesario definir la disposición final o aprovechamiento de los sólidos o *slurries* que se obtienen después del proceso, lo cual puede significar un costo elevado si no se encuentra un reuso para este subproducto, ya que de acuerdo a los balances de masas realizados se espera un estimado de 1.66 t/d de lo que se espera sea en su gran mayoría cloruro de sodio. Esto significaría invertir en un año, aproximadamente 259.000 USD para su disposición final.

La implementación de la evaporación mecánica en el campo Santa Lucia, al ser un proyecto llave en mano, tiene un costo aproximado de 2.000.000 USD en los primeros 5 años del proyecto. Sin embargo de no encontrarse un aprovechamiento de los sólidos obtenidos en el proceso, se tendría un costo adicional mensual promedio por disposición de estos residuos de 21.580 USD, lo cual aumentaría la inversión en los cinco primeros años a 3.294.800 USD.

Se puede afirmar, que de las 5 técnicas trabajadas en este documento, todas requieren en mayor o menor medida, facilidades especiales adicionales para retirar los lodos, sólidos o *slurries* que se generan en los tratamientos del agua y definir el manejo y disposición final de los mismos. Sin embargo la inyección es la única que ofrece una ventaja importante en este sentido, ya que solo genera lodos en el pre tratamiento.

Como conclusión general de este proyecto, se puede afirmar, que la evaporación mecánica es la técnica más factible para aplicar en el campo Santa Lucia, ya que sus costos de implementación y operación, son los más bajos y los resultados esperados garantizarían una correcta e interesante forma de disposición final de estas aguas, logrando realizar un ciclo cerrado si se encuentra un aprovechamiento para los sólidos obtenidos en el proceso.

7. RECOMENDACIONES

Es indispensable antes de implementar la evaporación mecánica realizar análisis más profundos a los sólidos presentes en el agua del campo, para conocer las cantidades exactas de los diferentes elementos presentes en estos, y realizar la respectiva gestión para buscar alternativas de reutilización en procesos productivos, y no asumir costos de tratamiento posiblemente innecesarios.

Igualmente es muy importante poder verificar la efectividad y eficiencia de la evaporación mecánica antes de comprar los equipos evaporadores y realizar las modificaciones necesarias en el campo, ya que al ser una técnica no probada en Colombia, es necesario comprobar su funcionalidad y lograr igualmente la aceptación de la autoridad ambiental nacional.

Por otra parte se recomienda mantener vigente el permiso de vertimiento del campo Santa Lucía y diseñar un tratamiento que en dado momento por cualquier falla que se pudiera presentar en los evaporadores permita realizar un vertimiento que cumpla con las condiciones básicas de la normatividad nacional en la materia.

Así mismo es importante evaluar la inyección en otros campos de la empresa, ya que en algunos pozos que no han resultado como se esperaban en su producción, se podría implementar esta técnica con un costo sustancialmente menor en su inversión inicial y esta alternativa sigue siendo muy atractiva ya que ofrece una solución total a las aguas con altos contenidos de cloruros.

8. BIBLIOGRAFÍA

BENITO, J. M; CONESA, A. y RODRIGUEZ, M. A. Membranas Cerámicas. Tipos, métodos de obtención y caracterización. En : Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio. Vol. 43, No. 5 (enero. 2004); p. 829 – 842.

BINNIE, Chirs; KIMBER, Martin y SMETHURST, George. Basic Water Treatment. Third Edition. London: Thomas Telford IWA, 2002. 169 p.

CURSO DE TRATAMIENTO DE AGUAS DE PRODUCCIÓN PARA INYECCIÓN Y VERTIMIENTO. (5: 8-9, julio, 2013: Bogotá, Colombia). Memorias. Bogotá: Elite Training, 2013.

ELÍAS CASTELLS, Xavier. Tecnologías aplicables al tratamiento de residuos. Madrid: Diaz de Santos, 2012. p. 106 - 108.

GARCIA, Idoia y SOLDEVILA, Josep. Tratamiento por evapo-concentración al vacío de las aguas residuales industriales. En : INFOENVIRO : Depuración y Reutilización. Vol. 67, No. 3 (noviembre. 2011); p. 1- 2.

HERNANDEZ, A., et al. Microfiltración, Ultrafiltración y Osmosis Inversa. Murcia : Universidad de Murcia,1990. v. 4, 23 – 37, 93 – 113, 119 -137 p.

KATZ, William. E. The electro dialysis reversal (EDR) process. En : Desalination. Vol. 28, No. 1 (January. 1979); p. 31- 40.

KORNGOLD, E., et al. Fouling of anion-selective membranes in electro dialysis. En : Desalination. Vol. 8, No. 2 (october. 1970); p.195 – 220.

LEITZ, F. B. and EISENMANN, J. L. Tutorial Lectures in Electrochemical Engineering and Technology : Electro dialysis as a Separation Process. New York : (AIChE Symposium Series Number 204). (1981), Vol. 77, 204 - 209 p.

MACHADO, Ana Graziella y CÁRDENAS, Antonio. Desalinización del Suero Lácteo por Electrodiálisis utilizando un Equipo Piloto de Asahi Glass, Co. Tesis de Grado Ingeniero Químico. Mérida. Universidad de los Andes, Venezuela. Facultad de Ingeniería. 2002.

MANI, K. N. Electro dialysis water splitting technology. En : Journal of membrane science. Vol. 58, No. 2 (may. 1991) p. 117-138.

PETROBRAS, Medio Ambiente – Recursos Hídricos. En : Informe de Sostenibilidad 2012 [en línea]. (2012). [consultado 30 octubre. 2013]. Disponible en <http://www.petrobras.com.br/rs2012/downloads/Informe_Sostenibilidad_2012.pdf>

SCHOEMAN, J. J. The status of electro dialysis technology for brackish and industrial water treatment. En : Water SA. Vol. 11, No. 2 (april. 1985); p. 79 – 86.

STRATHMANN, Heinrich. Membrane Handbook, Ho W.S.W., Sirkar K.K. (Eds) : Applications, Electro dialysis. New York : Van Nostrand Reinhold, 1992. 217 p.

SUSIAL, P. Evaluación de membranas espiral industriales de ósmosis inversa.
En : INGENIERÍA QUÍMICA-MADRID Vol. 35, No. 403 (2003); p. 150 -167.

9. ANEXOS

Anexo A. Análisis de Aniones y Cationes del agua industrial del campo Santa Lucia

CLBIV-Columbia Branch
Petroleos Del Norte

Water Analysis

Complete Water Analysis with Common Metals

PENCOR ID No. 39650-02

Date collected: September 13, 2012

File No.: 1203461; Record No. 1451

Petroleos Del Norte - Stari Santa Lucia

Cations		Test Method	(mg/l)	MW	Valence	Meq/l
Barium	Ba ⁺²	ICP	41	137.34	2.0	0.60
Calcium	Ca ⁺²	ICP	1,400	40.08	2.0	69.79
Copper	Cu ⁺²	ICP	<0.009	63.55	2.0	0.00
Iron (dissolved)	Fe ⁺²	ICP	3.5	55.85	2.0	0.12
Iron (total)	Fe ⁺²	ICP	5.9	55.85	2.0	0.21
Lead	Pb ⁺²	ICP	<2.2	207.20	2.0	0.00
Magnesium	Mg ⁺²	ICP	200	24.31	2.0	16.38
Manganese	Mn ⁺²	ICP	0.48	54.94	2.0	0.02
Nickel	Ni ⁺²	ICP	<0.02	58.69	2.0	0.00
Potassium	K ⁺	ICP	55	39.10	1.0	1.41
Silicon	Si ⁺⁴	ICP	11	28.09	4.0	1.57
Sodium	Na ⁺	ICP	5,960	22.99	1.0	259.33
Strontium	Sr ⁺²	ICP	63	87.62	2.0	1.44
Vanadium	V ⁺³	ICP	<0.01	50.94	2.0	0.00
Zinc	Zn ⁺²	ICP	<0.004	65.39	2.0	0.00

Anions		Test Method	(mg/l)	MW	Valence	Meq/l
Alkalinity (as Bicarbonate)	HCO ₃ ⁻	Titration	400	61.02	1.0	6.52
Borate	B(OH) ₃ ⁻	ICP	1.6	78.84	1.0	0.02
Bromide	Br ⁻	Titration / IC	43	79.90	1.0	0.54
Carbonate	CO ₃ ⁻²	Titration	<2.0	60.01	2.0	0.00
Chloride	Cl ⁻	Titration / IC	12,100	35.45	1.0	341.24
Iodide	I ⁻	Titration / IC	<4.0	126.90	1.0	0.00
Sulfate	SO ₄ ⁻²	IC	7.8	96.06	2.0	0.16
Sulfide	S ⁻²	IC	0.0	32.06	2.0	0.00

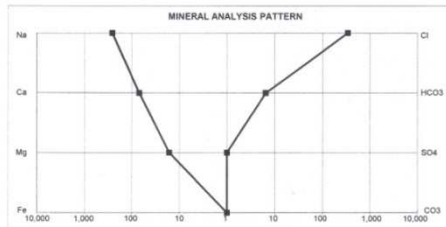
Total Cation Meq's	351
Total Anion Meq's	348
TDS (mg/l)	20,292
TDS (ppm)	19,980
Ion Balance	0,003

Stability Index at 100 °F	0.37
Stability Index at 200 °F	2.24

% Deviation in Meq. Bal.	0.34
% Deviation in TDS	5.47

pH	8.70
Resistivity (Ohm-Meter) at 77 °F	0.29
Conductivity, microSiemens/cm	34,200
Specific Gravity 60 / 60 °F	1.0166

QA/QC Run ID's	
ICP	09262012_1 to 4
IC - Anions	2012 March # 819
IC - Organic Acids	W9260931
Titration - Bicarbonates and Chloride	9262012



PENCOR
An ISO 9001 Registered Company
info.pencor@CoreLab.com • (800) 234-4205

Report No. 39650-505059001194
Project Manager: Terry Daigle
9/27/2012, pg 1 of 1