



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO**

FACULTAD DE QUÍMICA

**TESIS: TECNOLOGÍAS PARA EL TRATAMIENTO DE
AGUAS CONGÉNITAS**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERA QUÍMICA

PRESENTA

ARACELI ISIDRO ANGELES



MÉXICO, D.F.

AÑO 2013



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: **Profesor: José Antonio Ortiz Ramírez**
VOCAL: **Profesor: Fernando Barragán Aroche**
SECRETARIO: **Profesor: Martin Rivera Toledo**
1er. SUPLENTE: **Profesor: Milton Thadeu Medeiros de Oliveira**
2º SUPLENTE: **Profesor: Dulce Merari Cid de León**

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

ASESOR DEL TEMA: M.I JOSÉ ANTONIO ORTIZ RAMÍREZ

SUSTENTANTE: ARACELI ISIDRO ANGELES

Agradecimientos

A mi mamá, Ma. Leonor Angeles, por ser siempre la mujer que me ha ayudado en todo además de darme todo tu amor y entrega desde pequeña, este es un logro del cual eres la base. Espero poder reflejar algún día todo lo que me has enseñado.

A mi papá, Gerardo Isidro Federico, por ser siempre mi guía, compañero y apoyo. Por haberme enseñado a levantarme cuando caigo y por jamás haber dudado de mí. Esta meta jamás pudo haber sido cumplida sin ti.

A mi hermano, Gerardo Isidro Angeles, por ser siempre mi amigo, mi guía y confidente. Gracias por haber confiado en mí y por todos los momentos vividos en el desarrollo de esta meta recordando siempre “vibra positiva”.

A Lluvia, por ser ahora parte de mi familia y haberme apoyado en este camino que desde pequeñas empezamos.

A mi pequeña Valentina, que a pesar de su corta edad me ha enseñado a valorar las cosas de la vida y que debemos luchar para cumplir nuestras metas.

A Dante, por tu apoyo y cariño al recorrer este camino, además de las hermosas experiencias a tu lado.

A mi padrino, José Luis Martínez, por haberme motivado a estudiar esta carrera y por el gran corazón que ha tenido con mi familia.

A mi familia, mis abuelitos, mis tíos y primos. Ustedes han ayudado a formar la mujer que ahora soy.

A mis amigos. Ale, somos un gran equipo, gracias por todo. Chivis y Raquel, gracias por toda la confianza y apoyo, sin ustedes nada hubiera sido igual. Uguis, por ser mi gran amigo y por siempre tener una opinión que me ayuda a ver las cosas de diferente manera. Lety, por siempre creer en mí. Caro, por hacerme ver las cosas desde otro punto y por los buenos momentos vividos en este período. A todos mis compañeritos de primer semestre con los que viví momentos memorables.

Al profesor Ortiz, que siempre me apoyo en la elaboración de este trabajo y por hacerme ver a la Ingeniería Química en conjunto con otros aspectos de la vida.

Al profesor Barragán, que me dio su apoyo en el proceso de intercambio y por hacerme ver la Ingeniería Química de un modo más práctico desde el salón de clases.

Al profesor Rivera Toledo, que me brindó su apoyo en la revisión de este trabajo, dándome otro punto de vista lo cual hizo más completo el mismo.

Índice

Problemática y motivación	4
Objetivos	7
Capítulo 1 Aguas congénitas y su producción	8
Capítulo 2 Caracterización típica	10
2.1 Temperatura y presión	11
2.2 Cantidad de crudo	12
2.3 pH, alcalinidad y acidez	23
2.4 Conductividad	25
2.5 Dureza	26
2.6 Algunos otros parámetros del agua congénita	32
2.6.1 Densidad y Gravedad Específica	32
2.6.2 Turbiedad	32
2.6.3 Gases en solución.	33
2.6.3.1 Ácido Sulhídrico (H ₂ S)	33
2.6.3.2 Dióxido de Carbono (CO ₂)	33
2.6.3.3 Oxígeno Disuelto (O ₂)	34
2.6.4 Sólidos Disueltos Totales (SDT)	34
2.6.5 Sólidos Suspendidos Totales (SST)	35
2.6.6 Sílice	35
2.6.7 Compuestos de Hierro	36
2.6.8 Características bacteriológicas	37
2.6.8.1 Bacterias Aerobias	38
2.6.8.2 Bacterias Anaerobias	38
Capítulo 3 Normatividad en México	39
Capítulo 4: Tecnologías de tratamiento para aguas congénitas.	43
a. Remoción de hidrocarburos	45
b. Remoción de componentes orgánicos solubles.	46
c. Desalinización	46
d. Desinfección	47

4.1 Cama empacada de adsorción	47
4.2 Descomposición en humedales construidos	48
4.3 Intercambio iónico	50
4.3.1 Aplicaciones	52
4.3.1.1 Proceso Huggings Loop TM	52
4.3.1.2 DOWEX G-26®	54
4.3.2 Electrodiálisis Directa (ED) e Inversa (EDR)	55
4.3.2.1 Electrodiálisis Directa (ED)	55
4.3.2.2 Electrodiálisis Inversa (EDR)	56
4.3.2.3 Aplicaciones	57
4.3.2.3.1 Cuenca "Wind River", Lysite, WY.	57
4.3.2.3.2 Electrodiálisis de alta eficiencia (HEEDTM)	58
4.4 Tecnología de deionización capacitiva (CDT)	59
4.5 Tecnología de Activación Electroquímica	60
4.6 Electro deionización (EDI)	61
4.7 Evaporación	62
4.8 Evaporación por aspersion rápida (Rapid Spray Evaporation TM)	64
4.9 Congelamiento – Evaporación - Des congelamiento	65
4.1 Membranas de separación en base a diferencia de Presión.	66
4.10.1 Osmonics Inc ®	69
4.10.2 Cañón de Placerita, California, Estados Unidos	71
4.11 Ósmosis inversa de alta eficiencia. HERO TM	74
4.12 Reactor de Oxidación	75
Capítulo 5 Cuadro comparativo de tecnologías	78
5.1 Remoción de partículas de crudo (De oiling).	79
5.2 Desinfección	83
5.3 Desalinización	84
5.4 Tratamiento por medio de membranas	88
5.5 Tratamiento misceláneo	90

Conclusiones	91
Anexo A	93
Bibliografía	100

Problemática y motivación

Durante muchos años, el petróleo y gas natural son acumulados en sedimentos porosos, pudiendo contener agua en su conjunto por lo que generalmente al explotar los hidrocarburos de un yacimiento se tiene que manejar el agua en conjunto. En algunos otros casos, a los yacimientos, se inyecta agua para que el petróleo sea desplazado por la inyección de la misma. En muchos otros, durante la extracción de hidrocarburo se produce agua y se trata como un subproducto no aprovechable¹ conteniendo sales y metales, a la cual se le denomina como agua congénita. Ésta, debe ser separada para que el petróleo y el gas puedan ser procesados dentro de la plataforma o en tierra. En plataforma se manda la mezcla de hidrocarburos con agua por una tubería a algún lugar en tierra, donde se separan. Muchas veces se hace la separación en plataforma y se reinyecta en algún otro pozo como método de producción secundaria, para lo cual se requiere de un tratamiento previo y así, después, poder hacer la disposición de la misma en el océano o en algún otro cuerpo de agua de acuerdo a la normativa correspondiente.²

La mayoría de los problemas generados por el agua congénita en operaciones de producción, y por lo que el tratamiento de la misma es de suma importancia, son los siguientes:

- Corrosión e incrustación en las líneas y el equipo de inyección.
- Incrustación en las líneas y el equipo de inyección.
- Taponamiento de las formaciones.
- Microbiológico.

De acuerdo a Rodney Reynolds, en su artículo llamado *Produced Water and Associated Issues* (Oklahoma, 2003), la corrosión en los equipos

asociados en la explotación de hidrocarburos tiene lugar debido a la presencia de oxígeno, dióxido de carbono y sulfuro de hidrógeno disueltos en el agua congénita, los cuales aumentan la posibilidad de corrosión en el sistema, para lo cual se recomienda una mejora en la selección de químicos agregados para aumentar la productividad del pozo, además de monitorear el equipo periódicamente para observar cualquier tipo de cambio y asegurarse que no haya fugas que permitan que el oxígeno se infiltre en el sistema.³

La caracterización de un agua congénita es un factor determinante debido a que la presencia de diferentes sales en distintas proporciones en esta puede dar lugar a la formación de incrustaciones dependiendo de las condiciones en las que se encuentre el sistema. Esto es un efecto desfavorable ya que es sinónimo de un aumento en los costos de mantenimiento de todos los equipos.

En el caso particular de México, la inyección del agua congénita es el método más económico y por lo tanto, el más utilizado en las plantas de extracción nacionales. Éste también se utiliza como método de recuperación de los yacimientos disminuyendo el consumo de agua de primer uso. Debido a esta circunstancia, PEMEX ha realizado estudios en diferentes formaciones rocosas y la inyección del agua sin ningún tratamiento previo, más que una simple sedimentación, se han detectado problemas de reducción de permeabilidad en los pozos de inyección y taponamiento de las formaciones.⁴

En cuanto al efecto microbiológico en las aguas congénitas, en el trabajo de Veil² se describe que la presencia de bacterias puede ocasionar la obstrucción de equipos y tuberías dando lugar a la formación de emulsiones con sulfuro de hidrógeno presente en el agua congénita, las

cuales son muy difíciles de romper además de que tienen un carácter corrosivo.

Como se mencionó anteriormente, el agua congénita siempre debe pasar por un tratamiento, ya sea antes de ser almacenada o antes de ser reinyectada. Para tomar una decisión acerca del tratamiento adecuado al que se someterá un agua congénita, se necesita tomar en cuenta la ubicación del pozo, las características del agua, los recursos disponibles en la cercanía, la normatividad de la zona así como el costo de tratamiento. En este trabajo se dará un enfoque general de las tecnologías conocidas de tratamiento para aguas congénitas, así como la descripción de la normatividad mexicana y se propondrá a nivel general las posibilidades de tratamiento desde un punto de vista convencional.

Objetivos

Objetivo principal

Brindar un panorama general de las principales características de las aguas congénitas, así como algunos tratamientos para su reutilización y/o disposición.

Objetivos específicos

- Mostrar un panorama general de la producción de aguas congénitas en la industria petrolera mencionando la importancia de tratamiento de las mismas.
- Proporcionar los parámetros comúnmente reportados en los análisis de aguas además del comportamiento de algunos de estos al modificar las condiciones del proceso.
- Señalar la normatividad seguida en México para el manejo, tratamiento y disposición de las aguas congénitas asociadas a la producción de hidrocarburos.
- Presentar algunas tecnologías convencionales, que han sido utilizadas para el tratamiento de aguas congénitas.
- De acuerdo a los parámetros fisicoquímicos del agua congénita presentar una comparación entre los posibles métodos de tratamiento en función del destino del agua tratada, ya sea reúso o disposición final.

Aguas congénitas y su producción

Las rocas de formaciones geológicas en el subsuelo, están impregnadas por fluidos, estos pueden ser agua, mezcla de hidrocarburos o gas. Se cree que antes de que surgieran las formaciones de hidrocarburo, esas zonas estaban saturadas con agua. Después los hidrocarburos más ligeros desplazaron al agua y se fueron formando las reservas de hidrocarburos, por lo que en general, estas reservas contienen una mezcla de agua e hidrocarburo además de aditivos agregados para la explotación de las mismas.²

La producción de petróleo es un verdadero problema, aunque es una de las mayores fuentes de energía. Mientras es producido, algunos efectos desfavorables ocurren. La producción de aguas congénitas, es uno de estos. El volumen de esta agua es de aproximadamente el 70% del volumen total de agua involucrada en la producción de petróleo. En la mayoría de las circunstancias, esta corriente de desecho, es de siete a ocho veces mayor al volumen de petróleo producido en alguno de los pozos existentes. En México, durante 2002, en la explotación de petróleo crudo y gas natural, se produjeron 12.09 millones de metros cúbicos de agua congénita, de los cuales se reinyectó a los yacimientos el 86.4% y el 14.6% restante se dispuso en cuerpos receptores, tales como océano y presas.¹ La tendencia mundial coincide en que las opciones óptimas para la disposición del agua congénita asociada a la producción de hidrocarburos es su inyección en formaciones receptoras subterráneas,

o su disposición en el mar siguiendo las especificaciones técnicas ambientales para su manejo y disposición señaladas por la normatividad correspondiente.

Caracterización típica

Las características fisicoquímicas de un agua congénita varían considerablemente dependiendo de la localización geográfica del pozo, la formación geológica con la que el agua congénita ha estado en contacto por miles de años y del tipo de hidrocarburo que ha sido producido. Las características del agua congénita y el volumen generado pueden variar a lo largo de la vida del pozo. Si se lleva a cabo inundación dentro del pozo, las propiedades y volúmenes pueden variar drásticamente conforme más agua es reinyectada. Al conocer las propiedades de las aguas congénitas, se puede entender la conectividad entre pozos, caracterizar las diferentes zonas de carbonatos y así determinar en qué zonas puede haber algún problema de incrustación lo cual es crucial para el diseño de parámetros de inyección. También se pueden mejorar las condiciones de operación, y determinar la aplicación adecuada de agentes químicos, entre ellos los inhibidores de corrosión, surfactantes, desemulsificantes, etc.; que se agregan a los pozos para aumentar la productividad.

En el subsuelo existe agua confinada que a su vez reacciona con los minerales presentes, produciendo contenidos específicos de sales disueltas en el agua que van evolucionando a lo largo del tiempo. Una vez que se extrae agua durante la perforación, las condiciones de presión y temperatura así como la composición pueden llegar a variar considerablemente si se compara con las condiciones originales de yacimiento. Es por eso que algunos parámetros del agua congénita, como el pH y la concentración de ciertos iones deben ser monitoreados

periódicamente porque controlan las interacciones entre el agua y la roca y por lo tanto el carácter del agua congénita. Durante la explotación del yacimiento las condiciones de temperatura y presión cambian, lo cual implica que las características del agua cambien necesariamente, es por esto, que se recomienda tomar muestras en zonas específicas "in situ" periódicamente.

Cabe mencionar, que no todos los parámetros que se puedan medir de un agua congénita, son cuantificados en la realidad. Existen algunos parámetros que son reportados con mayor frecuencia debido a su importancia directa en el proceso, los cuales son:

- Temperatura y presión
- Cantidad de crudo
- pH
- Conductividad
- Dureza de carbonatos

La medición de cada uno de estos parámetros debe estar referenciada a una metodología en especial para así poder comparar los resultados y generar reportes oficiales. A continuación se mencionarán algunas metodologías que han sido utilizadas en la industria del petróleo.

2.1 Temperatura y presión

Estos dos parámetros son medidos directamente en campo con equipos instalados en las líneas de perforación. Algunos de estos equipos son:

- Para la medición de temperatura: Termopares, termo resistencias, transmisores de temperatura analógicos y digitales.

- Para la medición de presión: Transmisores de presión absoluta, relativa y diferencial además de manómetros.

Este tipo de equipos deben ser diseñados para operar en temperaturas y presiones elevadas. Es por eso, que empresas prestadoras de servicios tales como Schlumberger y Halliburton han generado tecnologías que puedan ser utilizadas bajo estas condiciones, tal como el HTHP⁵ por sus siglas en inglés de alta temperatura y alta presión, la cual genera equipos de medición, generalmente equipos en forma de bala que pueden determinar registros geofísicos y que a su vez pueden determinar las condiciones a las que se encuentra el yacimiento tales como presión, temperatura y conductividad.

En cuanto al rango de temperatura de las aguas congénitas, este varía de 35 a 70° C, éste parámetro es importante en estudios de saturación y estabilidad con respecto al carbonato de calcio (CaCO₃), en cálculos de salinidad y en general para controlar las condiciones de operación. Su control es importante en la descarga de aguas con impacto ecológico, en la identificación de suministro de fuentes de agua y en la profundidad de los pozos. La temperatura alta disminuye la solubilidad de oxígeno y aumenta la tendencia a generar actividad biológica pudiendo provocar condiciones sépticas, con problemas de olor y abatimiento de la vida acuática.

2.2 Cantidad de crudo

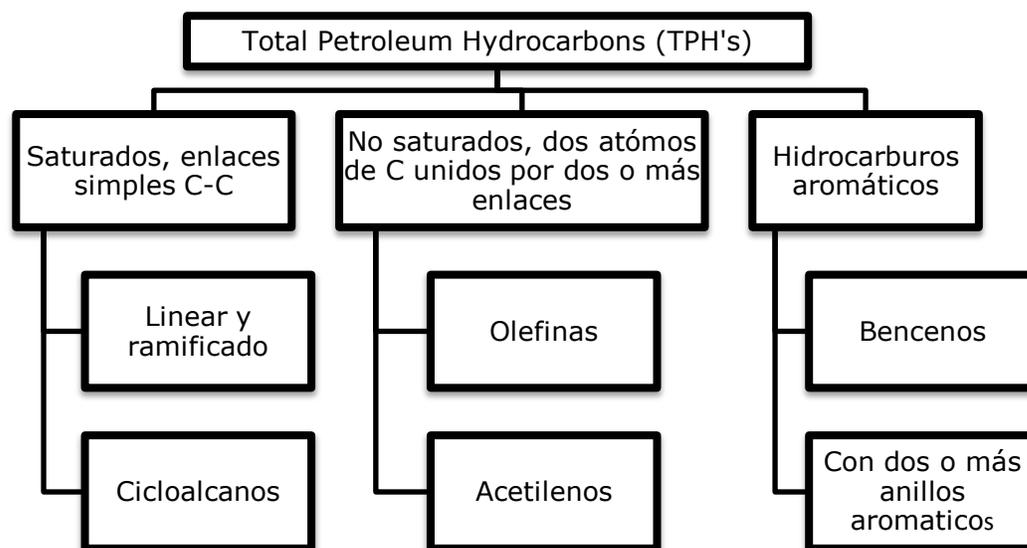
La concentración de crudo presente en el agua congénita es un parámetro generalmente determinado utilizando métodos de referencia basados en absorción por infrarrojo (IR), análisis gravimétrico, cromatografía de gases, detección de ionización de flama, etc., para el

cual no puede determinarse un parámetro característico debido a que depende estrictamente de cada yacimiento. Históricamente, uno de los parámetros clave utilizados para el control del cumplimiento de la normatividad es la concentración de aceite en el agua congénita debido a su relativa facilidad de medición. La medición de la cantidad de crudo en un agua congénita, debe estar acompañada de la metodología que se siguió para determinarla, los aspectos importantes que deben ser observados son los siguientes y que afectan directamente los resultados reportados.

- Establecer una base de comparación o referencia
- Procedimiento de muestreo
- Calibración de los equipos

Los componentes de petróleo presentes en la muestra de agua se pueden clasificar como hidrocarburos y compuestos hetero atómicos. Los hidrocarburos se miden en "Total Petroleum Hydrocarbons (TPH's)" refiriéndose a moléculas que solo contengan carbono e hidrógeno. Los compuestos heteroatómicos, son aquellos que contienen carbono e hidrógeno pero además pueden contener azufre, nitrógeno y oxígeno.⁶ Los hidrocarburos se pueden como indica la figura 1.

Figura 1: Tipos de hidrocarburos (Lee and Neff, 2011)



El término "contenido de crudo" en un agua congénita puede ser entendido de dos maneras, la primera como crudo disperso el cual se refiere generalmente a partículas de crudo en el agua congénita en forma de pequeñas gotas del orden de micras o cientos de micras. Este término, puede incluir a compuestos alifáticos e hidrocarburos aromáticos; la segunda manera como crudo disuelto, el cual generalmente se refiere a partículas de crudo solubles en el agua congénita. Los hidrocarburos alifáticos tienen poca solubilidad en agua, pero lo que si se puede encontrar son hidrocarburos aromáticos y ácidos orgánicos disueltos en agua.

Existen algunas otras definiciones, por ejemplo, de acuerdo a la OSPAR (Convención de Oslo y Paris, 2005), se pueden definir dos términos, el primero como crudo total y el segundo como crudo disperso. El crudo total se refiere a todos los hidrocarburos presentes en el agua y el crudo disperso se refiere a la suma de concentraciones de los compuestos extraídos con n-pentano. Los compuestos extraídos en n-pentano se caracterizan por no ser adsorbidos en los agentes químicos que se agregan a los yacimientos y que pueden salir reportados en una cromatografía con tiempos de retención entre los n-heptanos (C_7H_{16}) y los n-tetraoctanos ($C_{40}H_{82}$), sin tomar en cuenta la concentración de los compuestos aromáticos como tolueno, etilbenceno y los tres isómeros de xileno.⁶

No existe ningún método estándar para la determinación de la cantidad de crudo en un agua congénita que se deba seguir a nivel mundial, pero como se mencionó anteriormente, para poder comparar los resultados obtenidos entre diferentes muestras se debe contar con el método de determinación.

Por ejemplo, existen tres tipos de metodologías de referencia:

- Absorción de rayos infrarrojo,
- Gravimetría
- Cromatografía de gases con detector de ionización de flama (GC-FID)

Cuando se utiliza la absorción de rayos infrarrojo, la mezcla se acidifica en primer lugar y después se extrae con algún solvente. Una vez la muestra es extraída, lo resultante, es separado del agua congénita para ser purificado al remover compuestos polares. Una porción de esto se coloca en el instrumento de infrarrojo donde se mide la absorbancia. Al finalizar, se compara esta absorbancia con un extracto de una muestra conocida y así la cantidad de crudo en la muestra puede ser determinada. Los solventes de extracción son una parte importante ya que tienen impacto directo en los resultados obtenidos. Un buen solvente debe tener una buena capacidad de extracción además de otras cualidades tales como:

- Suficiente transmisión infrarroja
- Amigable con el ambiente
- Seguro de utilizar
- Más pesado que el agua, para tener una fácil separación del agua.
- Con un precio razonable y de fácil acceso.

Algunos solventes utilizados históricamente han sido compuestos de clorofluorocarbonos (CFC), pero, como es bien conocido desde la década de los noventas son compuestos cancerígenos, por lo que se optó alguna vez por utilizar freón. Este último a su vez daña a la capa de ozono, y se decidió que no debe ser utilizado. Hoy en día, es común encontrar que se utilice tetra cloro etileno, así como el solvente S-316, pero debido a que se siguen haciendo pruebas para determinar los

efectos desfavorables de los mismos, esta metodología se usa cada vez menos a nivel mundial.

La gravimetría es un método que cuantifica todo aquello que puede ser extraído con un solvente pero que no ha sido removido por la evaporación del mismo. El proceso típicamente se inicia con la extracción de la muestra de agua que contiene crudo por medio de un solvente. El resultante de este proceso (solvente ahora con partículas de crudo), se coloca en un matraz de peso conocido, el cual se coloca en un baño controlado de temperatura donde se evapora el solvente. A continuación se condensa la muestra y se colecta. El matraz que contiene el crudo residual, se deja secar para poder ser pesado en un tiempo determinado y así poder conocer la cantidad de crudo contenido en el agua congénita. Algunos métodos gravimétricos se muestran en la tabla 1.

Tabla 1: Métodos gravimétricos utilizados para determinar la cantidad de crudo en una muestra de agua congénita (Lee and Neff, 2011)

Método	País	Solvente	Temperatura de evaporación (°C)
Método 5520 B (2001)	USA	n-hexano	85
EPA 1664 A ⁷	USA	n-hexano	85

El método que se utiliza con mayor frecuencia es el USA EPA 1664 A⁷ en donde la muestra de agua congénita se acidifica a un pH menor a dos y luego se hacen las extracciones con tres volúmenes diferentes de hexano; el resultado de la extracción, se mezcla y seca para después ser evaporado a 85°C y después hacer la determinación de la cantidad de crudo.

El uso de cromatografía de gases ofrece la oportunidad de obtener resultados más detallados acerca de los diferentes tipos de hidrocarburo presentes en la muestra. El proceso se lleva a cabo al igual que los métodos anteriores, donde primero se extraen con un solvente y el efluente conteniendo las partículas de crudo es evaporado a cierta temperatura, pero en éste método, después de la extracción con un solvente, la muestra se pasa por un cromatógrafo de gases, en el cual, con ayuda de un gas portador se hace pasar a través de una columna cromatográfica, hace que los diferentes grupos de hidrocarburos dejen la columna a un determinado tiempo y puedan ser detectados. Al finalizar, éstos hidrocarburos son quemados y cuantificados por un detector de ionización de flama (FID).

Algunos métodos que utilizan la GC-FID se muestran a continuación en la tabla 2.

Tabla 2: GC-FID comúnmente utilizados para determinar la cantidad de crudo en una muestra de agua congénita (Lee and Neff, 2011)⁶

Método	País	Solvente utilizado	Hidrocarburos detectados
ISO 9377-2 (2000)	Internacional	Rango de evaporación 36°C – 69°C	C ₁₀ -C ₄₀
OSPAR GC-FID (OSPAR 2005)	Países del Convenio Oslo Paris (OSPAR)	n-pentano	C ₇ -C ₄₀ TEX (Tolueno, etil benceno, xileno)
TNRCC 1005 (2001)	USA	n-pentano	C ₆ -C ₃₅

Cuando se necesita obtener resultados de manera rápida y en campo, el uso de otras metodologías para la determinación de la cantidad de crudo en un agua congénita es necesario así como para otras propiedades. Estos métodos se pueden clasificar de dos maneras: los que simulan un laboratorio y aquellos que son monitores en línea. Entre los métodos que simulan un laboratorio se encuentran la colorimetría, los sensores químicos de fibra óptica, absorción de rayos infrarrojos y fluorescencia con rayos UV.

En la colorimetría, se extrae una muestra con un solvente y directamente se mide el color utilizando un espectrofotómetro a una cierta longitud de onda, siempre y cuando el agua congénita muestre algún color. Por ejemplo, la empresa Petrobras en Brasil, utiliza un método llamado "Hach 8041" que mide la cantidad de crudo en un rango de 0 a 800 ppm el cual se ha visto que es recomendable utilizar para muestras de agua congénita que posean un color oscuro con una concentración entre este rango.

Los sensores químicos de fibra óptica son revestidos de un polímero que pueda absorber hidrocarburos, los cuales se colocan en la corriente de agua y al absorber las partículas de crudo se puede pasar por un método de reflexión midiendo la cantidad de luz que permiten pasar y con la ayuda de una calibración de concentraciones de hidrocarburos conocidas se puede determinar la cantidad de crudo presente en el agua congénita. Este método no es muy utilizado ya que los sensores deben ser mantenidos casi intactos además de ser calibrados periódicamente.

El uso de infrarrojo directamente en campo, ha sido muy común y existen varios tipos, los cuales son descritos en la tabla 3.

Tabla 3: Metodologías a base de infrarrojo (Lee and Neff, 2011)⁶

Método	Descripción	Rango de aplicabilidad	Desventajas
Infrarrojo HATR (Horizontal Attenuated Total Reflection)	La luz infrarroja se refleja en una superficie de cristal que tiene encima una capa de crudo que se deposita una vez que el solvente se haya evaporado de la muestra. En cada reflexión, la luz infrarroja es absorbida.	Wilks Enterprise, Inc. Indica que el rango está entre 4-1000 ppm.	Durante la evaporación se pueden perder componentes volátiles.
Infrarrojo utilizando S-316 e instrumentos de Horiba ®	Es un método semiautomático, donde se utiliza como solvente S-316 y la extracción - separación son llevadas a cabo en el instrumento desarrollado por Horiba®	Horiba ®Indica que el rango está entre 0-200 ppm.	Uso de solventes a base de CFC's.
Infrarrojo utilizando extracción supercrítica de CO₂	La base de éste método radica en utilizar CO ₂ en condiciones supercríticas para extraer el crudo del agua congénita. Este proceso resulta laborioso ya que se necesita bombear CO ₂ líquido para después llevarlo a	No reportado	Manejo de altas presiones

	condiciones supercríticas lo cual implica presiones muy elevadas-		
Infrarrojo sin uso de solventes	El agua congénita se pasa por una membrana la cual retiene hidrocarburos dispersos. Después esta membrana se seca y se coloca en el aparato de medición de rayos infrarrojo.	Todavía no sale al mercado y se siguen haciendo pruebas, pero se estima un rango de 3-200 ppm	No se conocen los riesgos reales.

La fluorescencia de rayos UV se utiliza en la industria petrolera en sistemas portátiles que determinan la presencia de hidrocarburos aromáticos y a su vez se estima la cantidad de hidrocarburo total asumiendo que permanece relativamente constante, lo cual no es totalmente cierto pero que nos puede dar un aproximado.

El otro tipo de método utilizado directamente en campo es llamado monitoreo en línea y agrupa los siguientes métodos: análisis con transductores acústicos, análisis de imagen, dispersión de la luz y turbidez, sensores foto acústicos, fluorescencia UV inducida por láser (LIF), etc.

Un transductor acústico de alto enfoque se inserta directamente en el agua congénita y este detecta cuando una burbuja u otra partícula pasa por él y con esto se determina la cantidad de crudo presente. Los instrumentos de análisis de imagen se basan en la habilidad de captar un video de alta resolución y así determinar el contenido de una

muestra, multiplicando el número de imágenes por el área de cada partícula para los cuales se necesita contar con una referencia unificando los tamaños de partícula comúnmente encontrados.

Otra metodología seguida es la de dispersión de la luz, la cual, se ha utilizado frecuentemente en la industria del petróleo. En ésta, se utilizan monitores que miden el paso de la luz en una muestra teniendo una muestra de base para así por medio de tomas a diferentes ángulos se pueda determinar el tipo de partícula presente.

Cuando se utiliza un sensor foto acústico, un láser es dirigido a una muestra de agua congénita, donde, el crudo disuelto absorberá energía óptica causando un calentamiento repentino, este calentamiento produce una expansión térmica generando ondas de alta presión, mismas que son detectadas y relacionadas con las partículas de crudo. Esta técnica, puede manejar muestras en un rango de 20 -2000 ppm de crudo.⁶

Entre todas estas metodologías, los parámetros que se deben tomar en cuenta para determinar cuál es la que se puede utilizar, se pueden encontrar en la tabla 4 mostrada a continuación.

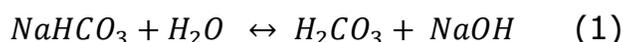
Tabla 4. Parámetros característicos para determinar el uso de metodología en laboratorio o directamente en línea. (Isidro Angeles, 2013)

Parámetro	Laboratorio	Monitoreo en línea
Propósito de medición	Si es para control de proceso los datos obtenidos deben ser repetibles, mientras para entrega de informes, precisión debe ser un parámetro decisivo.	
Características del agua congénita	El color de un agua congénita puede determinar la metodología de medición. La	Además de lo mencionada en una metodología de

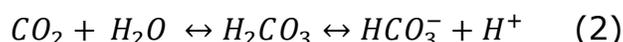
	presencia de sólidos, a su vez, puede afectar medición y si existen componentes ligeros y un método de evaporación es utilizado, se pueden perder los componentes ligeros.	laboratorio, para un método de monitoreo en línea deben tomarse en cuenta cambios repentinos en el agua congénita.
Uso de solventes	No debe dañar el ambiente, además de poder obtenerlo fácilmente a un precio moderado.	
Procesos de calibración	Para obtener resultados confiables se debe checar con qué frecuencia los equipos y soluciones parámetro deben ser calibrados.	Aunque todos los equipos utilizados deben ser calibrados, se recomienda hacer el muestreo utilizando un by-pass para que se pueda asegurar el equipo en cuestión en caso de un cambio brusco.
Tamaño de equipo	Deben ser de fácil manejo si se utilizaran en campo.	Se debe localizar un punto en la producción donde se pueda caracterizar el agua congénita, además de tomar medidas de seguridad en caso de estar en condiciones anormales.
Mantenimiento	Se debe determinar un periodo de mantenimiento para así poder confiar en los resultados obtenidos.	

2.3 pH, alcalinidad y acidez

La alcalinidad se define como la capacidad para neutralizar la acidez y generalmente proviene de la disolución de la caliza (roca sedimentaria compuesta mayoritariamente de carbonato de calcio (CaCO_3^{2-}) y dolomita (mineral compuesto de carbonato de calcio y magnesio ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) si están presentes en un yacimiento. La presencia de iones hidróxido (OH^-) se debe a la ionización de sales, producto de ácidos débiles y bases fuertes principalmente carbonatos (CO_3^{2-}) y bicarbonatos (HCO_3) como se observa en la reacción química 1.



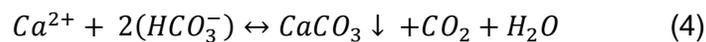
La acidez puede definirse como la capacidad para neutralizar bases o materiales alcalinos. Normalmente causada por la presencia del dióxido de carbono (CO_2), ácidos orgánicos y minerales. En la reacción química 2 se muestra el comportamiento del dióxido de carbono (CO_2) con agua lo que puede generar corrosión e interferir en el ablandamiento con una demanda excesiva de cal.



La escala de pH representativa para las aguas congénitas se puede dividir en tres zonas principalmente, la primera es la zona A, que va de un rango de $\text{pH} < 4.2$ y donde la alcalinidad es cero. Concentraciones altas de dióxido de carbono (CO_2) pueden forzar al pH del agua, libre de mineral, ir hacia abajo en este rango. Las soluciones acuosas de ácidos orgánicos tales como el fórmico o acético, algunas veces usados para la acidificación de pozos, producen valores de pH de 1 a 2, considerando que las soluciones de ácidos fuertes, tales como el ácido clorhídrico al 10%, están debajo de un pH de uno. Las soluciones de ácido clorhídrico (HCl) utilizadas en la estimulación de pozos, muestran típicamente

valores de pH en un rango de 2 a 3.5. Una muestra de agua con un pH menor a 4, debe ser considerada como contaminada, ya que las aguas naturales nunca son ácidas.

La segunda zona, es considerada como la zona B, donde la mayoría de las aguas naturales se encuentran, ya que caen dentro del rango característico de esta zona, $4.2 < \text{pH} < 8.3$ y la acidez disminuye cuando se es libre de dióxido de carbono (CO_2). Debido a que éste es volátil, escapa rápidamente del agua haciendo que el pH y la alcalinidad incrementen llevando a una disminución en la tendencia corrosiva pero incrementa la tendencia del agua a generar problemas de incrustación por carbonatos como se muestra en las reacciones químicas 3 y 4.⁸



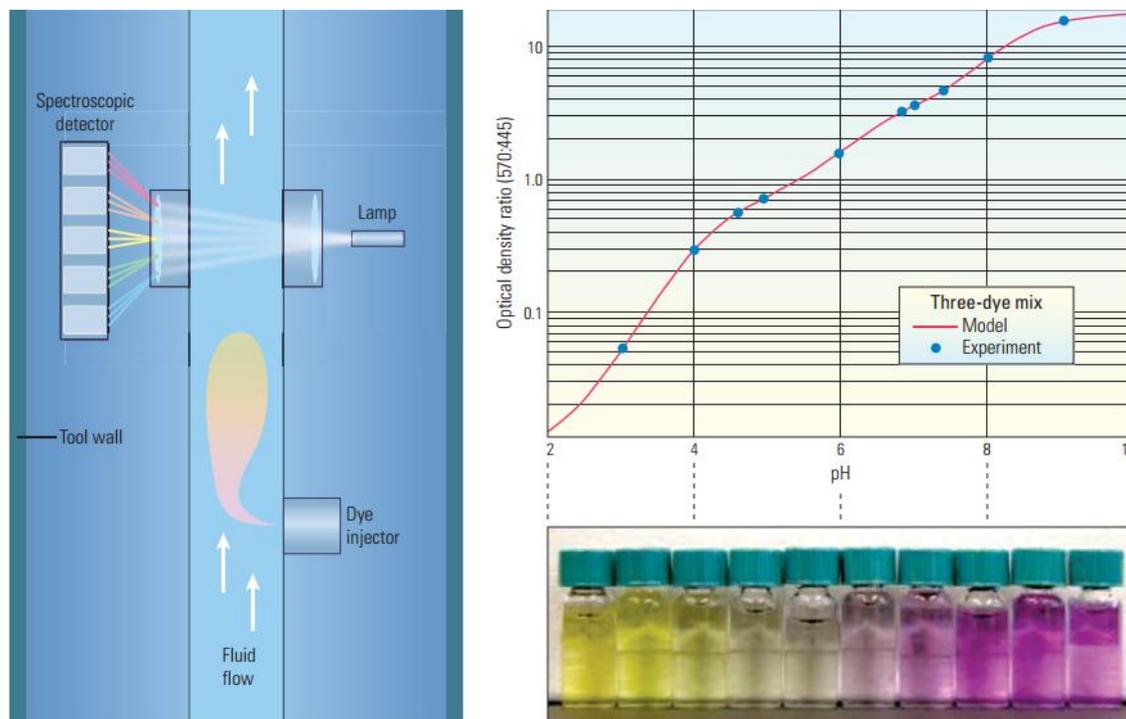
La zona C, es el rango de mayor alcalinidad, la cual está en un rango de $8.3 < \text{pH} < 12$ en donde existen iones en solución tales como carbonatos (CO_3^{2-}) y bicarbonatos (HCO_3^-). Algunas aguas naturales pueden tener un pH alrededor del extremo interior de este rango.

Debido a que la mayoría de las veces, las muestras son tomadas para después ser analizadas, es crucial que se mantengan las condiciones del yacimiento. Para esto, se han utilizado dispositivos adaptados con nitrógeno para mantener la presión original de pozo, y a su vez se mantenga la composición del agua congénita.

El pH es un parámetro clave en el entendimiento de la química del agua congénita y juega un papel importante en la predicción de corrosión y de posible incrustamiento en los equipos y tuberías, es por eso que se necesitan mediciones confiables, preferentemente tomadas in situ y por lo que día a día se sigue investigando en el tema.⁹ Investigadores de

Schlumberger, desarrollaron un método para la medición de pH in situ a base de colorantes sensibles al mismo. Básicamente, la tecnología consta de un sensor que se coloca en la línea de perforación, en la que se inyecta un colorante para ser mezclado con el agua congénita, éste, hace que el fluido cambie de color para que el sensor óptico sea capaz de cuantificar el cambio midiendo diferentes longitudes de onda.⁸ Esta metodología se aplica, normalmente en un rango de pH de 3 a 9 y una muestra de este tipo de medición se muestra en la figura 2.

Figura 2: Medición de pH directamente en pozo (Abdou, 2011)⁹



2.4 Conductividad

La conductividad es la medida de que tanto una solución puede conducir la electricidad, esta solución debe contener iones que hagan posible la conducción. El tener el valor de esta propiedad indica la presencia de los electrolitos presentes en un agua congénita tales como cloruro de sodio,

sulfato de magnesio, ácido clorhídrico, ácido acético, hidróxido de sodio, amoníaco, etc.¹³ La cantidad de sólidos disueltos totales es la cantidad de iones totales en solución. La conductividad eléctrica es la medida de actividad iónica de una solución en términos de la capacidad para transmitir corriente. Las unidades de conductividad son siemens por centímetro (S/cm) y la resistividad es el inverso de la conductividad la cual se expresa en (Ωcm). Generalmente, la conductividad se mide con el mismo equipo que ingresa a tomar temperatura y presión, para determinar la concentración de algunos iones presentes en el agua congénita.

2.5 Dureza

La dureza es una propiedad que refleja la presencia de metales alcalinotérreos en el agua. De estos elementos, el calcio y el magnesio constituyen los principales, pero como se mencionó anteriormente la presencia de bario y estroncio también puede ser esperada.

La dureza del agua es el resultado de la disolución y lavado de los minerales que componen el suelo y las rocas, entre estas la caliza y dolomita, que contienen calcio (Ca^{2+}) y magnesio (Mg^{2+}) como se mencionó anteriormente. Aunque los carbonatos de calcio y magnesio son frecuentes en la corteza terrestre, su solubilidad es muy baja tal como puede deducirse de sus constantes de solubilidad que se muestran a continuación en la tabla 5. Algo que afecta este comportamiento es la presencia de dióxido de carbono ya que básicamente transforma los carbonatos en bicarbonatos aumentando la solubilidad como se muestra en las reacciones 5 a 8.¹⁰ Las aguas se pueden clasificar de acuerdo a su dureza como se muestra en la tabla 6¹⁰.

Tabla 5. Constante de solubilidad para diferentes sales. (Rafferty,1999)¹⁰

Sustancia	-logKps
CaCO₃	8.32
MgCO₃	5
CaSO₄	5.92
BaSO₄	10

Tabla 6: Clasificación de dureza del agua (Carrier, 1965)

Dureza como ppm de CaCO₃	Clasificación
<15	Muy blanda
15 a 50	Blanda
50 a 100	Medianamente dura
100 a 200	Dura
>200	Muy dura

La dureza de calcio es un parámetro fundamental para evaluar la posibilidad de incrustaciones. Generalmente constituye el 70% o más de la dureza total del agua¹⁰. En los peores casos, cuando no se tiene acceso a realizar una prueba más detallada para determinar la composición de otros componentes, se asume la dureza de calcio como dureza total y con solo la composición del ion calcio, se puede determinar la dureza de calcio.

Se han desarrollado modelos que describen el equilibrio del carbonato de calcio y que se utilizan para determinar el carácter corrosivo o incrustante de una muestra de agua, lo cual es el principal objetivo de todas las pruebas de un agua. Existen tres métodos que son utilizados con frecuencia en la industria, éstos son: el Índice de Saturación de Langelier (LSI) que se utiliza para determinar el potencial de un agua

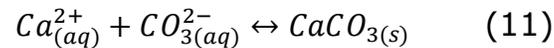
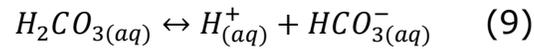
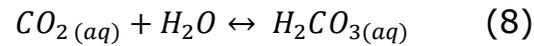
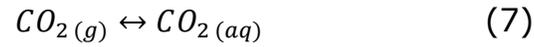
para formar incrustaciones de carbonato de calcio (CaCO_3), el índice de saturación de Stiff and Davis (S&DI) el cual surge como una mejora al LSI y se utiliza para determinar lo mismo pero se necesita mayor información acerca de la concentración de otros iones presentes en el agua, tales como, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , SO_4^{2-} y Cl^- , el cual puede dar mayor información acerca de la tendencia corrosiva de un agua ; y finalmente el Índice de Estabilidad de Ryznar (RSI) ¹¹ que indica además de la probabilidad de tener incrustaciones de carbonato de calcio, la tendencia de un agua a ser corrosiva. La diferencia entre los dos primeros índices es, el LSI y S&DI es la aplicabilidad para diferentes rangos de sólidos disueltos totales (SDT) en un agua congénita, el LSI es aplicable para aguas con $\text{SDT} < 10,000 \text{ mg/L}$ y el S&DI para aguas con $\text{SDT} > 10,000 \text{ mg/L}$ ¹¹. Estos índices se basan en un cálculo de pH de saturación del carbonato de calcio (pH_s), éste valor se usa con el pH actual del agua congénita y se determina el índice de la siguiente manera¹⁰:

$$LSI = pH - pH_s \quad (5)$$

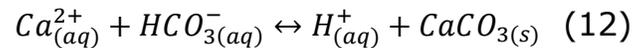
$$RSI = 2pH_s - pH \quad (6)$$

Cabe mencionar que la precisión en la predicción de incrustamiento es mucho más grande que para la predicción de corrosión por un agua congénita al utilizar estos dos índices. Esto es por que ambos índices se basan en la saturación de carbonato de calcio. En términos generales, se asume que si la concentración de carbonato de calcio excede a la necesaria para que este en solución y ocurra el incrustamiento. La manera de determinar el carácter corrosivo del agua congénita es por medio del pH y cuanto más disminuye, la probabilidad de generar corrosión aumenta. El pH de la solución es conocido pero se desarrolla

un modelo para determinar el pH de saturación, el cual se presenta a continuación. El equilibrio del carbonato se muestra en las reacciones



Para determinar el pH de la solución, se utilizan ecuaciones de equilibrio 10 y 11 generando la ecuación total como muestra la ecuación 12:



Después se plantea una constante de equilibrio para la reacción 10 y la constante de producto de solubilidad para la reacción 11 para poder determinar la constante de equilibrio para la reacción 12 y así determinar el pH de saturación y así determinar el LSI. La interpretación del LSI se muestra en la tabla 7 así como la interpretación del RSI en la tabla 8.

Tabla 7: Valores interpretados del LSI (Carrier, 1965)

LSIndex	Indicador
2.0	Se formara incrustación pero no sera un agua con carácter corrosivo
0.5	Se formara incrustación ligeramente y el agua tendrá un carácter corrosivo
0.0	Equilibrada pero con tendencia corrosiva
-0.5	Ligeramente corrosiva pero no formara incrustación
-2.0	Carácter corrosivo fuerte

Tabla 8: Valores interpretados del RSI (Carrier, 1965)

RSIndex	Indicador
4 - 5	Carácter incrustante fuerte
5 - 6	Carácter incrustante débil
6 - 7	Carácter incrustante y corrosivo muy débil
7 - 7.5	Carácter corrosivo considerable
7.5 - 9.0	Carácter corrosivo fuerte
> 9.0	Carácter corrosivo intolerable

En cuanto al índice de Stiff and Davis se utiliza prácticamente para aguas congénitas y los resultados de cálculo se interpretan de la siguiente manera:

- Si el SI es negativo, el agua esta subsaturada con CaCO₃ y la formación de la incrustación no es posible.
- Si SI es positivo, el agua esta sobresaturada con CaCO₃ y la formación de la incrustación es posible.
- Si SI=0 el agua esta en su punto de saturación. ¹²

Para la determinación de todos estos índices, se necesita por lo menos saber la concentración del ion Ca^{2+} para realizar los cálculos. La medición de estos, se hace siguiendo diversas metodologías como espectrofotometría, cromatografía de gases y líquidos además de diversos equipos previamente contruidos exclusivamente para determinar la concentración de algunos iones presentes en un agua congénita.

Acerca del carbonato de calcio (CaCO_3)

Es una sal inorgánica de color blanco de densidad variable entre 2.72 y 2.92 gr/cm^3 . Sus formas minerales son:

- Calcita: Cristaliza trigonal, densidad 2.72 gr/cm^3
- Aragonita: Cristaliza rómbica, densidad 2.95 gr/cm^3

Es soluble con efervescencia de dióxido de carbono (CO_2) en ácidos por ejemplo ácido clorhídrico (HCl) y presenta solubilidad limitada en ácido sulfúrico (H_2S) y fluorhídrico. El carbonato de calcio (CaCO_3) se forma por la descomposición principalmente térmica (en ausencia de dióxido de carbono) de la especie bicarbonato de calcio. En agua libre de CO_2 , la solubilidad del carbonato de calcio es de 15 ppm a 0°C y de 13 ppm a 100°C . Sin embargo en aguas saturadas de CO_2 a presión atmosférica, 1620 ppm de CaCO_3 pueden llegar a disolverse para formar bicarbonato de calcio ($\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$), si el agua se aérea y pierde CO_2 , la solubilidad se cae a 13 ppm separándose como insolubles 1605 ppm de CaCO_3 . El agua con un contenido específico de CO_2 disuelve una cantidad específica de CaCO_3 a una temperatura particular, este valor desciende con el aumento de la temperatura. Es por ello que un agua en equilibrio en superficie puede incrustar en fondo. El carbonato de calcio es la única incrustación cuya solubilidad disminuye con la temperatura ya que la

mayor parte de las sales inorgánicas son más solubles en agua a mayor temperatura.

2.6 Algunos otros parámetros del agua congénita

2.6.1 Densidad y Gravedad Específica

La densidad de las aguas congénitas varía de 1.010 a 1.060 g/cm³, dependiendo de la cantidad de sólidos disueltos totales (SDT). La gravedad específica se refiere a la relación de la densidad del agua que se está analizando y la densidad del agua sin sales disueltas a una temperatura. Las sales disueltas incrementan la densidad del agua; por lo tanto, la gravedad específica. Debido a que el incremento con respecto al tipo de sales es diferente, los valores de densidad o gravedad específica no pueden ser utilizados directamente como una medida de SDT.

2.6.2 Turbiedad

Es la obstrucción al paso de la luz que pasa a través de una muestra de agua, puede ser mineral u orgánica. Si la mineral es baja, la orgánica es alta y viceversa. La turbiedad del agua depende de los suelos por los cuales haya circulado la misma así como de su velocidad de arrastre. La turbiedad se expresa en Unidades Formadoras de Turbiedad "FTU" y se definen como la turbiedad producida por 1 miligramo de óxido de silicio en un litro de agua.

2.6.3 Gases en solución.

Como se mencionó en la problemática de este trabajo, existen algunos gases en disolución en el agua congénita asociada a la extracción de hidrocarburos. Estos pueden ser ácido sulfhídrico (H_2S), dióxido de carbono (CO_2) y oxígeno (O_2), de los cuales se hablara a continuación.

2.6.3.1 Ácido Sulfhídrico (H_2S)

El sulfuro de hidrogeno (H_2S) y otros sulfuros, se encuentran presentes en los yacimientos petroleros ya que son parte de la descomposición de la materia orgánica en condiciones anaerobias. Las aguas congénitas que tienen ácido sulfhídrico, se conocen como aguas amargas. Los yacimientos pueden pasar a ser amargos debido a la actividad de las Bacterias Reductoras de Sulfato (BSR) presentes en la producción. Cualquier aumento en la concentración de ácido sulfhídrico en el agua que no haya sido causado por mezclado, se considera indicativo de actividad bacteriana. El ácido sulfhídrico en contacto con el hierro, produce sulfuro de hierro, el cual acelera la corrosión y también se considera como un agente taponador. Los sulfuros de la mayor parte de los metales, son insolubles en agua.

2.6.3.2 Dióxido de Carbono (CO_2)

En un gas ionizable que forma ácido carbónico (H_2CO_3) cuando reacciona con el agua (Reacción química 8) y que además está presente en el yacimiento de manera natural. Las aguas superficiales

normalmente contienen menos de 10 mg/L de CO₂, mientras que otras, pueden fácilmente exceder esa concentración.

2.6.3.3 Oxígeno Disuelto

Los niveles de oxígeno disuelto en el agua, dependen de la temperatura, presión, así como de la actividad física, química y bioquímica que prevalece en la fuente natural. El oxígeno disuelto, rara vez está presente en los fluidos producidos por los yacimientos petroleros, a menos que éste sea arrastrado por infiltración. Es quizá el agente corrosivo más serio en los yacimientos petroleros y, también es responsable de la creación de agentes taponantes.

2.6.4 Sólidos Disueltos Totales (SDT)

En las aguas congénitas, los sólidos disueltos totales (SDT), alcanzan valores de hasta de más de 350 000 mg/L, siendo el cloruro de sodio [NaCl] el principal constituyente, aproximadamente del 80%.

Entre los componentes del agua congénita figuran sólidos insolubles. Normalmente no se realiza un análisis detallado de los sólidos suspendidos, pero en general, su presencia puede ser indicada como incrustación de carbonato de calcio [CaCO₃], sulfuro de hierro [FeSO₄], arcilla, arena, etc. Algunos de los materiales encontrados con mayor frecuencia en las aguas congénitas se muestran en la tabla 9.

Tabla 9. Material suspendido y orgánico encontrado en el agua congénita (Pizano,2001)

Inorgánicos	Orgánicos
Carbonatos y Sulfatos de calcio	Bacterias, mohos y levaduras
Arcillas	Algas, Protozoarios, Di átomos
Cuarzo y Arena	Vegetación Putrefacta
Óxidos de Hierro, Manganeso y Aluminio	Tanino – Extracto de Madera
Sulfato de Hierro	Jabones
Sulfato de Bario	Polímeros
Sílice, suspendida o disuelta como SiO ₂	Aceites

2.6.5 Sólidos Suspendidos Totales (SST)

Son el peso de la materia insoluble filtrada de un volumen conocido de agua, preferentemente expresado como mg/L. Las membranas de plástico tipo Millipore retienen sólidos mayores a 0.45 micrómetros y son normalmente usadas para determinar los sólidos suspendidos totales "SST". Se considera que los sólidos no capturados, son coloides o están disueltos.

2.6.6 Sílice

La sílice es un componente común de las rocas ígneas de cuarzo y arena. Está presente en el agua de forma soluble o coloidal, debido a su complejidad, es difícil predecir las condiciones en las cuales se mantendrá en solución. La sílice es indeseable a altas concentraciones,

ya que puede formar incrustaciones por la precipitación del anión bisilicato (HSiO_3).

2.6.7 Compuestos de Hierro

Los iones de hierro pueden estar presentes en el agua congénita de forma natural o como resultado de la corrosión. Estas generalmente tienen una concentración baja de hierro en forma natural. Se pueden llegar a encontrar valores de 100 mg/L los cuales son raros, y si se encuentran valores más altos pueden ser resultado de la corrosión.

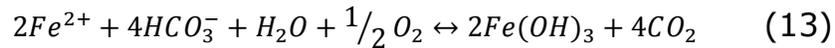
Otro problema muy importante cuando se tiene presencia de compuestos de hierro precipitados, es que pueden ser causa común de formación de depósitos y taponamientos de los pozos inyectores.

La corrosión normalmente es ocasionada por el dióxido de carbono (CO_2), ácido sulfhídrico (H_2S) u oxígeno disueltos en el agua. El dióxido de carbono (CO_2) reaccionará con el hierro para formar carbonato de hierro II (FeCO_3). La formación de la incrustación, realmente dependerá del pH del sistema, el cual generalmente estará alrededor de 7.

La mayoría de las incrustaciones conteniendo hierro son productos de corrosión. Sin embargo, los compuestos de hierro también se pueden formar por precipitación del hierro natural, incluso si la corrosión es relativamente suave.

El ácido sulfhídrico (H_2S) formará sulfuro de hierro (FeS) como un producto de corrosión, el cual es bastante insoluble y normalmente forma una incrustación delgada y adherente. El sulfuro de hierro (FeS) suspendido es la causa de tener "agua negra".

El oxígeno se combina para formar varios compuestos: el hidróxido ferroso, $(\text{Fe}(\text{OH})_2)$, hidróxido férrico $(\text{Fe}(\text{OH})_3)$ y óxido férrico (Fe_2O_3) que son incrustaciones comunes, resultado del contacto con el aire, como se muestra en la reacción química 13:



El ion (Fe^{2+}) es oxidado por el aire para formar (Fe^{3+}) e hidróxido de hierro III $\text{Fe}(\text{OH})_3$. Éste es insoluble a un pH arriba de 4. Si se tiene "agua roja" es debido al resultado de partículas de óxido férrico (Fe_2O_3) , más oxígeno y hierro presentes en el agua congénita.

Los compuestos de hierro también pueden resultar de la acción de cierta bacteria llamada, *Gallionella Ferruginea*, la cual vive en el agua con la presencia de aire. Esta bacteria toma iones $[\text{Fe}^{2+}]$ del agua y deposita hidróxido de hierro $\text{Fe}(\text{OH})_3$.

La química de los compuestos de hierro es mucho más compleja que los compuestos previamente discutidos, esto se debe a los dos estados de oxidación del hierro que permiten la formación de diversos compuestos que aunque unidos con el mismo ion, dan solubilidades muy diferentes. Es por eso que es difícil predecir cuantitativamente su comportamiento, de ahí que prevenir su formación sea el objetivo más importante.

2.6.8 Características Bacteriológicas

El control de las bacterias es importante en las operaciones de manejo del agua congénita, debido a que la presencia de estas, pueden causar taponamientos y/o una seria corrosión. Las bacterias encontradas en las aguas congénitas con mayor frecuencia son las anaeróbicas reductoras de sulfatos que forman precipitados de sulfuro de hierro $[\text{FeS}]$, el cual

es un agente taponador. Las bacterias se pueden clasificar como aerobias y anaerobias.

2.6.8.1 Bacterias Aerobias

En el manejo de aguas congénitas, la presencia de estas bacterias causa restricciones en la tubería y equipo utilizados en la inyección de agua, así como en los pozos de desecho al crear microambientes para las mismas. Las bacterias aerobias generalmente son las que causan más problemas en aguas frescas que en salmueras. Los lagos, estanques y pozos poco profundos, son frecuentemente fuentes para este tipo de microorganismos. Sin embargo, tanques abiertos pueden ser infectados con esporas aero transportadas que pueden causar problemas.

2.6.8.2 Bacterias Anaerobias

Uno de los problemas más grandes encontrados en la recuperación secundaria de crudo, ha sido la corrosión y el taponamiento de las tuberías con sulfuro de hierro, causado por la presencia de bacterias anaerobias, Reductoras de Sulfato (BSR), de las cuales la *Desulfovibrio desulfuricans* es la más común. Estas bacterias reductoras de sulfato son un grupo versátil y viven en un gran rango de temperatura, presión y salinidad. Por ejemplo, han sido encontradas a 3°C y cultivadas a 100°C bajo presión. El pH es un factor importante, sin embargo su rango está entre 6.5 a 8.3⁸

Capítulo 3

Normatividad en México

Los riesgos ambientales que se presentan en el manejo y disposición del agua congénita son: la contaminación eventual de mantos acuíferos en el proceso de inyección conectados a los yacimientos, la contaminación de los cuerpos receptores tales como cuerpos marítimos y ríos si no se cumple con la normatividad que señala el límite máximo permisible de ciertas sustancias, y la contaminación del suelo cuando se producen derrames accidentales en su transporte. Lo anterior hace necesaria la elaboración y expedición de una Norma Oficial Mexicana que establezca las especificaciones técnicas ambientales para su adecuado manejo y disposición. ¹ De la normatividad mexicana, existen las siguientes referencias que deben tomarse en cuenta para no violar con los límites máximos permisibles de algunas sustancias presentes en el agua congénita.

Tabla 10. Referencia de normatividad mexicana aplicable a manejo de aguas (Isidro Angeles, 2013)

Norma	Descripción
NOM-143-SEMARNAT-2003	Que establece las especificaciones ambientales para el manejo de agua congénita asociada a hidrocarburos
NOM-001-SEMARNAT-1996	Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas residuales en aguas y bienes nacionales (aclaración publicada en el

	DOF, el 30 de abril de 1997).
NOM-004-CNA-1996	Requisitos para la protección de acuíferos durante el mantenimiento y rehabilitación de pozos de extracción de agua y para el cierre de pozos en general
NOM-115-SEMARNAT-2003	Que establece las especificaciones de protección ambiental que deben observarse en las actividades de perforación y mantenimiento de pozos petroleros terrestres para exploración y producción en zonas agrícolas, ganaderas y eriales, fuera de áreas naturales protegidas o terrenos forestales.

La NOM-143-SEMARNAT-2003, señala que la caracterización del agua congénita se debe realizar con el método establecido en el Anexo 1 de dicha norma, el cual, se llama "Análisis de agua- determinación de hidrocarburos totales del petróleo (HTP's) en aguas naturales, potables y residuales tratadas - método de prueba". Éste método esta basado en la extracción de los compuestos orgánicos no polares de la muestra, principalmente hidrocarburos por su afinidad al tetracloruro de carbono. Los hidrocarburos disueltos en el tetracloruro de carbono se determinan cuantitativamente por comparación de la absorbancia leída a un número de onda de 2930 cm^{-1} (correspondiente a la región media infrarroja del espectro electromagnético), con una curva de calibración preparada con tres tipos de hidrocarburos.

Para la determinación de sólidos y sales disueltas en un agua congénita, se debe seguir la metodología descrita en esta misma norma pero en el Anexo 2, el cual se llama "Análisis de agua- determinación de solidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas – método de prueba", éste método se basa en la medición cuantitativa de los sólidos y sales disueltas así como de la cantidad de materia orgánica contenidos en aguas naturales y residuales, mediante la evaporación y calcinación de la muestra que puede ser filtrada o no, a temperaturas específicas, en donde los residuos son pesados y sirven de base para el cálculo del contenido de éstos.

En cuanto a la caracterización de contaminantes básicos y metales pesados referenciados en el agua congénita al momento de descarga en cuerpos receptores se debe seguir la NOM-001-SEMARNAT-1996 como se mencionó con anterioridad.

Los límites máximos permisibles de parámetros para la descarga del agua congénita a un cuerpo receptor son descritos en la NOM-143-SEMARNAT-2003 los cuales se muestran en la tabla 11.

Tabla 11. Límites máximos permisibles de parámetros para la descarga del agua congénita a un cuerpo receptor (NOM-143-SEMARNAT-2003)

Sustancia	Limite Máximo Permissible	Disposición
Hidrocarburo	15 mg/L	Descarga en cuerpos receptores de agua dulce.
	40 mg/L	Descarga en cuerpos receptores de aguas costeras y zonas marinas.
Sólidos Disueltos Totales (SDT)	500 mg/L	Descarga en cuerpos receptores de agua dulce.
	32 000 mg/L	Descarga en cuerpos receptores

		de aguas costeras, debiendo estar a una distancia de que sobrepase los 2 km mar adentro
--	--	---

Esta norma, también señala las características que deben tener los pozos para la inyección de agua congénita. Estos generalmente son pozos petroleros agotados, en los cuales no debe existir comunicación entre los acuíferos y los pozos, es decir, la tubería de revestimiento debe ir cementada desde la superficie del suelo hasta la formación receptora.

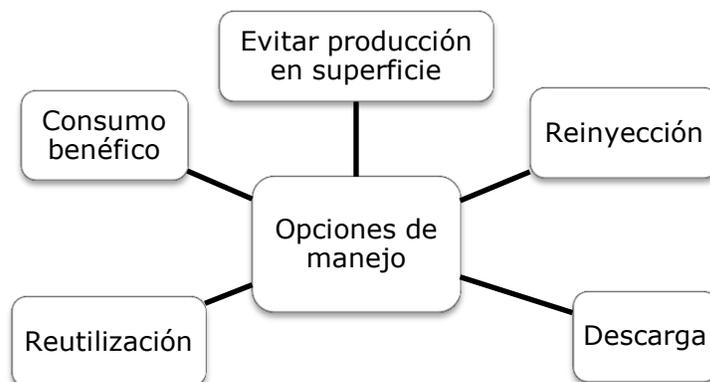
La inyección de agua congénita sólo podrá realizarse toda vez que en su manejo no se incorporen sustancias diferentes a los desincrustantes, inhibidores de corrosión y secuestrantes de oxígeno, desemulsificantes, biocidas y en general, las sustancias necesarias para proteger el pozo y realizar un manejo seguro de dicha agua congénita. Cuando se le añadan sustancias adicionales al agua congénita a inyectar, ésta debe tratarse para restaurarle sus características previas a la adición de dichas sustancias y después ser inyectada. Cuando un pozo ya no se considera activo y después de haber sido inyectado con agua congénita, se debe seguir el procedimiento descrito en la NOM -004-CNA-1996 para el taponamiento del mismo, además de seguir la NOM-115-SEMARNAT-2003 para cumplir con los requisitos para abandonamiento de pozos no productivos.

Tecnologías de tratamiento para aguas congénitas

El agua congénita varía en su composición, cantidad y en algunos casos puede ser útil o incluso llegar a ser un “commodity”. Como cualquier efluente, el agua congénita tiene costos de manejo que tienen que alinearse a los parámetros específicos de cada proyecto y región o de lo contrario puede tener efectos graves.

Después de un tratamiento adecuado, se puede lograr que las aguas congénitas tengan las características necesarias para su reutilización. Esto se puede lograr a base de diferentes tratamientos, los cuales difieren en requerimientos de instalación, costos de inversión y operación además de la cantidad de agua a tratar. Algunas de las opciones de manejo para el agua congénita asociada a la extracción de hidrocarburo se muestran en la figura 3.

Figura 3 Opciones de manejo de agua congénita (Isidro Angeles, 2013)



Se evita la producción de agua congénita en la superficie utilizando un polímero que bloquea las fisuras por donde puede salir el agua o que separa el agua debajo de la superficie para reinyectarla. Esta opción elimina el agua congénita pero no es una solución que siempre sea posible.

Cuando se decide reinyectar el agua congénita al mismo pozo o a otro con condiciones similares lo cual conlleva el transporte de la misma. Se puede llegar a requerir tratamiento previo a la reinyección.

Para descargar un agua congénita se necesita dar un previo tratamiento a la misma para cumplir con la normatividad dependiendo del cuerpo receptor; en algunos casos, puede no llegar a necesitar tratamiento alguno.

También existe la posibilidad de reutilización en las operaciones de extracción de hidrocarburos: Se necesitara tratamiento del agua congénita para cumplir la calidad requerida para el uso de la misma en la perforación del pozo. Desde hace una década el consumo benéfico se ha convertido en una posibilidad y se sigue investigando en posibles tratamientos para que un agua congénita llegue a tener la calidad para poder ser utilizada en riego, consumo animal, o en sistemas públicos de agua.

Existen algunos objetivos que se deben lograr cuando se realizara el tratamiento de aguas congénitas, los cuales se listan a continuación no sin antes mencionar que la selección del método adecuado para el tratamiento es un problema comprometedor, pero como en todos los casos el objetivo principal es encontrar el más redituable.

a. Remoción de hidrocarburos

Cuando hablamos de crudo, nos podemos referir a crudo líquido, disperso o emulsificado. Los métodos de remoción de crudo dependen del uso final que se le dará al agua además de la composición de la misma. La tabla 13 que sigue demuestra el desempeño típico para la remoción de crudo expresada en tamaño de partícula.

Tabla 12 Desempeño típico para la remoción de crudo (Daniel, 2005)

Tecnología de remoción de crudo	Tamaño mínimo de partícula removida (micras)
Separador a gravedad API	150
Separador de plato corrugado	40
Flotación de gas inducido sin floculante	25
Flotación de gas inducido con floculante	3-5
Hidrociclón	10-15
Malla de coalescencia	5
Filtrado	5
Centrifugación	1
Membranas de filtrado	0.01

Los separadores a gravedad API, dependen de tiempo de retención, diseño tanque, condiciones del crudo, no son efectivos para partículas de crudo pequeñas emulsificadas, cuanto más pequeño es el tamaño de partícula, mayor es el tiempo de retención. Por otra parte, los separadores de plato corrugado, son platos empacados que hacen el papel de separadores por gravedad solo que las partículas pequeñas de

crudo forman partículas más grandes. En las flotaciones de gas, se utiliza aire para sacar de manera más rápida el crudo del agua congénita, con esto se reduce la densidad del crudo y es más fácil que llegue a la superficie.

b. Remoción de componentes orgánicos solubles.

El proceso de adsorción es el más utilizado para la remoción de componentes orgánicos solubles en el agua congénita. Las columnas de adsorción son empacadas con material sólido poroso en las que los hidrocarburos presentes en el agua se adsorberán y serán retenidos en los poros de la misma así que el efluente tendrá una cantidad muy baja de hidrocarburos. Como material sólido poroso se puede usar carbón activado, organoclay entre otros.

La oxidación es otro método para remover la materia orgánica soluble, tal como bacterias y nitratos; para esto se puede utilizar Ozono (O_3) y peróxido de hidrogeno (H_2O_2). Es importante mencionar que durante este proceso se produce dióxido de carbono (CO_2) el cual puede ser removido por separación de aire. También se puede llevar a cabo la oxidación por medio de rayos UV, los cuales hacen que el agua se ionice y se eliminen bacterias y otros microorganismos. La oxidación ayuda a reducir la demanda química de oxígeno (DQO), la demanda biológica de oxígeno (DBO), hierro, nitratos, etc.

c. Desalinización

La remoción de sólidos disueltos, sales o impurezas es la parte más importante en la mayoría de los tratamientos de un agua congénita. La

cantidad de sólidos disueltos totales (SDT) varía entre 2000 y 150000 ppm (el promedio de sólidos disueltos totales (SDT) en agua marina es de 35000 ppm). Este parámetro es muy importante ya que la opción de desalinización del agua depende de la cantidad de sólidos disueltos totales (SDT). Los métodos utilizados generalmente para la remoción de los mismos son: evaporación, destilación, membranas de filtración, separación eléctrica y tratamientos químicos más específicos.

d. Desinfección

La remoción de bacterias, virus, microorganismos, algas, etc. del agua congénita es necesaria para prevenir contaminación del agua con la que se pueda poner en contacto. Procesos avanzados de filtrado son los más utilizados para la desinfección de agua así como tratamientos a base de rayos UV.

A continuación se discutirán algunas tecnologías comúnmente utilizadas para el tratamiento de aguas congénitas, las cuales se brindan de manera informativa para que al finalizar este trabajo se pueda tomar una decisión a partir de la caracterización previa del agua congénita a tratar.

4.1 Cama empacada de adsorción.

Este método se probó por primera vez en Julio de 1996 por la empresa ET Ventures ® en el "Rocky Mountain Oilfield Testing Center" en Carolina del Sur, Estados Unidos para determinar la efectividad de la adsorción de hidrocarburos presentes en un agua congénita. Esta agua era proveniente de la formación de "Tensleep". Este proceso se llevó a

cabo en una planta móvil que operaba a 10GPM y máximo 10 psi de caída de presión. Primero se enfriaba a 90°C atmosféricamente y se pasaba en un sistema de adsorción de tres camas empacadas. La primera y segunda etapa contenían como adsorbato, organoclay modificado conteniendo sodio y bentonita, la cual es una arcilla de grano muy fino que tiene presencia de hierro, y la última etapa era a base de carbón activado. En la tabla 13 se presentan resultados obtenidos:

Tabla 13. Resultados obtenidos por ETVentures ® (Daniel, 2005)

Contaminante	Antes del tratamiento	Después del tratamiento
	[ppm]	[ppm]
TPH	148	1.1
Aceite y grasas	151	1.2
Benceno	3.14	<0.5
Tolueno	4.97	<0.5
Etil benceno	4.95	<0.5
Xileno	29.7	<1

4.2 Descomposición en humedales construidos

El departamento de energía de la Reserva Naval de Petróleo de Estados Unidos del condado de Natrona en Wyoming, construyó una planta de tratamiento que maneja un caudal promedio de 35000 barriles/día. Esta comenzó a operar en Enero de 1996, generando una opción viable para reinyectar y utilizar esta agua congénita en beneficio de la flora y fauna de la comunidad. Estos humedales son bioreactores compuestos por una capa delgada de varias especies de plantas, microbios y algunas arenas que oxidan los contaminantes presentes en el agua.¹⁵

Antes de ingresar al proceso de tratamiento, esta agua congénita se mezcló con otras provenientes de alguna otra formación, lo cual es un proceso muy común. El proceso es como se muestra en la tabla 14 y los resultados obtenidos en la tabla 15.

Tabla 14 Proceso de humedales propuesto por Reserva Naval de Petróleo de Estados Unidos del condado de Natrona en Wyoming (Daniel, 2005)

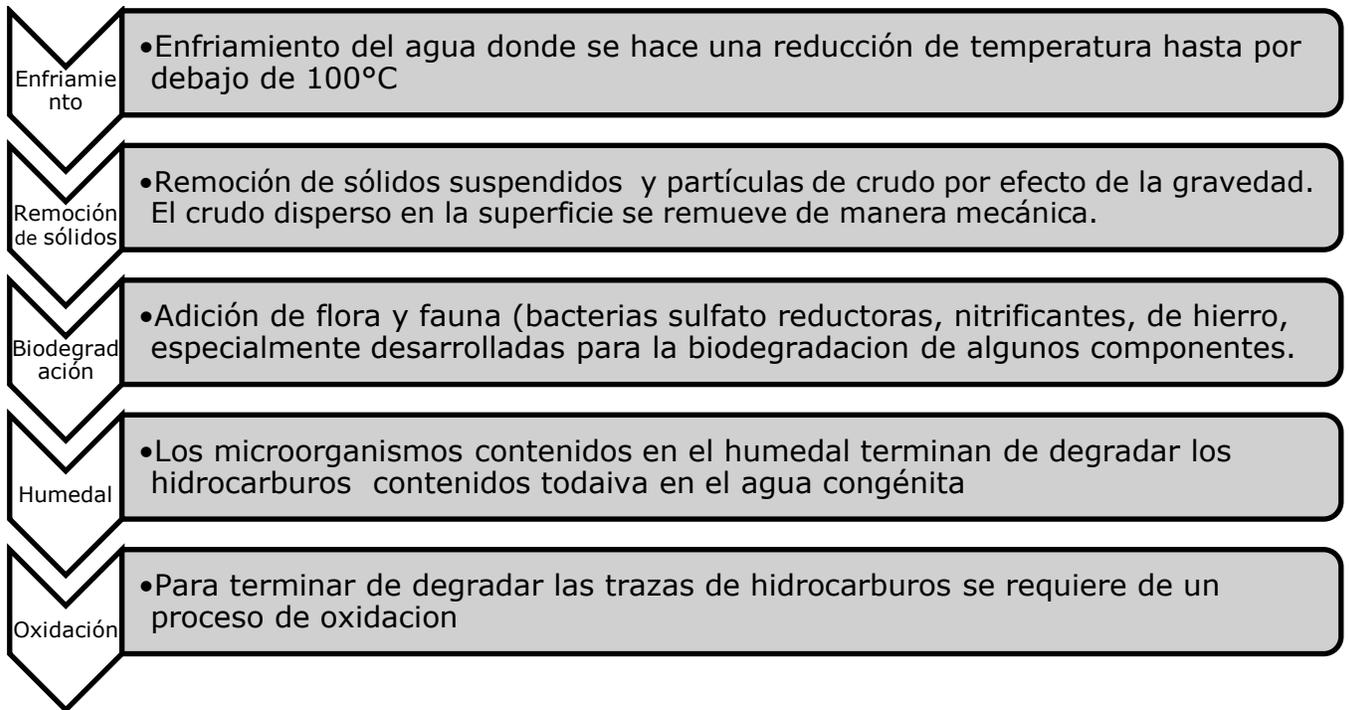


Tabla 15 Resultados obtenidos con el tratamiento a base de humedales (Daniel, 2005)

Contaminantes	Antes del tratamiento [ppm]	Después del tratamiento [ppm]	% Remoción
NH₃	2.03	0.54	73
NO₃	<0.1	<0.1	-
Fosfatos	1.83	0.46	75
DBO	28	2.3	92
DQO	48	29	40
TPH	112	5.8	90
Crudo	71.9	4.2	94

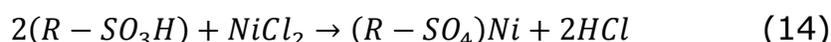
Benceno	0.143	<0.001	100
Tolueno	0.135	<0.001	100
Etil benceno	0.035	<0.001	100
Xileno	0.162	<0.001	100
Turbiedad	45.4	4.76	90
SST	4380	4010	9
Alcalinidad	713	190	73

4.3 Intercambio iónico

Se trata de una reacción química reversible donde los iones positivos o negativos presentes en el agua congénita son remplazados por algunos iones similares cargados en una resina, las cuales se pueden clasificar como catiónicas o aniónicas. Este proceso remueve eficazmente el arsénico, metales pesados, nitratos, sales, etcétera.

- ✓ Resinas de intercambio catiónico de ácidos fuertes (SAC).

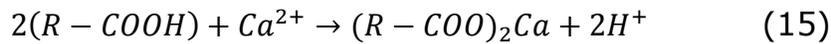
Las resinas de cationes hidrógeno (H^+) y sodio (Na^+) se disocian muy fácilmente y funcionan en todo el rango de pH. La remoción de una sal en una resina SAC se muestra en la reacción 14.



Estas resinas se utilizarían para la remoción de iones sodio (Na^+), calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}), bario (Ba^{2+}), etc., es decir en el ablandamiento de agua. Cuando las resinas se saturan, estas se regeneran a su forma original poniéndolas en contacto con una solución de ácido fuerte o si es una resina de sodio (Na^+), se regenera poniéndola en contacto con una solución de cloruro de sodio ($NaCl$).

- ✓ Resinas de intercambio catiónico de ácidos débiles (WAC).

En este tipo de resinas el ácido comúnmente utilizado es el ácido carboxílico (COOH). Estas resinas se comportan de manera similar a los ácidos orgánicos débiles que se disocian débilmente. Se utilizan generalmente cuando se tienen sales divalentes y la alcalinidad presente como bicarbonato también puede ser removida con este tipo de resinas. En la reacción 15 se muestra un ejemplo de la remoción de calcio (Ca^{2+}) usando una resina de intercambio catiónico de ácidos⁽¹⁸⁾débiles (WAC).



Estas resinas, tienen mucho mayor afinidad al ion hidrógeno (H^+) comparado con las resinas de intercambio catiónico de ácidos fuertes (SAC). Esta característica les permite la regeneración del ion hidrógeno (H^+) con una cantidad más pequeña de ácido que el requerido con una resina de intercambio catiónico de ácidos fuertes (SAC). El pH es un factor importante en este tipo de resinas ya que el grado de disociación depende de este.

- ✓ Resinas de intercambio de aniones de bases fuertes.

Son altamente ionizables, trabajan en todo el rango de pH y se utilizan para remover el ion hidroxilo (OH^-) del agua. Estas resinas reaccionarán con los aniones en solución y pueden convertir una solución ácida en una solución de agua neutra. La reacción que representa el intercambio aniónico es la mostrada en la reacción 16:



La regeneración con hidróxido de sodio (NaOH) concentrado convierte a la resina saturada en forma de hidróxido (OH^-).

- ✓ Resinas de intercambio de aniones de bases débiles.

Este tipo de resinas tienen un intercambio casi nulo a pH mayores a 7. Generalmente se utilizan para intercambiar aniones en un ácido débil.¹⁵

4.3.1 Aplicaciones

Este tipo de tratamiento de agua tiene muchos usos tales como la desalinización, remoción de dureza, alcalinidad, amoníaco y de metales pesados. Se han encontrado algunos ejemplos en *Technical Summary of oil and gas produced water treatment technologies*. Daniel, Langhus, Patel. Tulsa OK. March 2005, los cuales son citados a continuación:

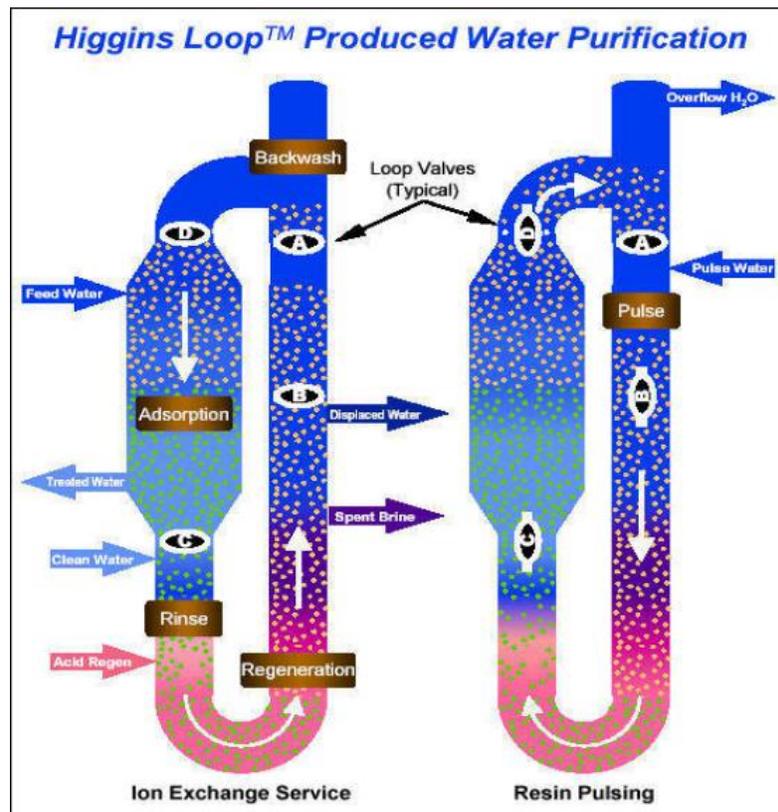
4.3.1.2 Proceso Higgings Loop™

Se propuso un tratamiento de agua congénita proveniente de la producción de Coal Bed Methane (CBM) en ocho pozos en el área norte de la reserva "Tongue River" en el condado de Big Horn al sureste de Montana, Estados Unidos. El tratamiento propuesto se trató de un intercambio iónico a contra corriente antes de la descarga al Rio Tongue al cual se le llamo Higgings Loop™ por la empresa Severn Trent Services®.

El sodio (Na^+) y bario (Ba^{2+}) contenido en este tipo de agua congénita, además de metales pesados se removerían a través de resinas de intercambio catiónico de ácidos fuertes (SAC). La remoción del dióxido de carbono (CO_2) presente durante el intercambio iónico, y el ajuste del pH se realiza por la adición de hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). El dióxido de carbono (CO_2) también puede ser removido por medio de aire o de una membrana de-gasificadora, siendo regido por la ley de equilibrio entre la fase gaseosa y la concentración del gas en el líquido.

El sistema de tratamiento de agua Higgins Loop™ es un circuito cerrado vertical que contiene una cama empacada de resina de intercambio iónico de ácido fuerte (SAC) que se separa en cuatro zonas de operación por medio de válvulas mariposa. Estas cuatro zonas se refieren a los siguientes procesos: Adsorción, regeneración, lavado y efecto pulsante como se puede ver en la figura 4.

Figura 4. Representación del proceso Higgins Loop™ (Daniel, 2005)



En este proceso de cuatro etapas se pasa el agua congénita por la zona de adsorción a la resina mientras los iones son removidos en la zona de regeneración simultáneamente. Mientras tanto, una pequeña porción de resina se remueve de la zona en cuestión y se reemplaza con resina regenerada o recién cargada, esto se logra mediante un efecto hidráulico. Los cationes se reemplazan por el ion hidrógeno (H⁺) y éste es

el que queda en el agua haciendo de esta un agua con pH ácido. Después se inyecta ácido clorhídrico (HCl) en la parte superior generando un efecto contra corriente y así se descarga la salmuera, dejando la resina en forma original, es decir cargada con iones hidrógeno (H^+). La corriente de desecho generada, es de aproximadamente 60 barriles de salmuera por día, y un caudal de agua tratada de aproximadamente 250 gpm.¹⁵

4.3.1.2 DOWEX G-26®

Se desarrolló un nuevo proceso de tratamiento que utiliza la resina DOWEX G-26®, la cual es una resina de intercambio de cationes de ácidos fuertes desarrollada por DOW Chemical®. Esta resina esta compuesta por ácido sulfónico (SO_3H^+) que intercambia iones sodio (Na^+), bario (Ba^+), calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}) con el ion hidrógeno (H^+). Este proceso consta de dos partes, la primera utilizando la tecnología anterior, es decir, Higgins Loop™, seguido de la adición de calcio (Ca^{2+}) para controlar el pH y mantener balanceada la resina, incrementando la concentración de calcio (Ca^{2+}). La tabla 16 muestra los resultados del tratamiento de agua congénita de la cuenca "Powder River" en Wyoming, Estados Unidos, el cual tuvo como objetivo principal la remoción de iones sodio (Na^+).¹⁶

Tabla 16 Resultados obtenidos utilizando resinas DOWEX G-26® (DOW, 2003)

Contaminantes	Antes del tratamiento [ppm]	Después del tratamiento [ppm]	% Remoción
Na⁺	486	12	97.53
Ca²⁺	22.2	113	-409
Mg²⁺	13.2	<1	>93
K⁺	13.5	<1	>93
Ba⁺	0.72	No determinado	100

Carbonatos	<1	<1	-
Bicarbonatos	1430	311	78.52
Cloruros	18	42	-133.33
Sulfatos	1	1.1	-10
SAR	20.2	0.3	98.51
pH	8.1	6.5	-

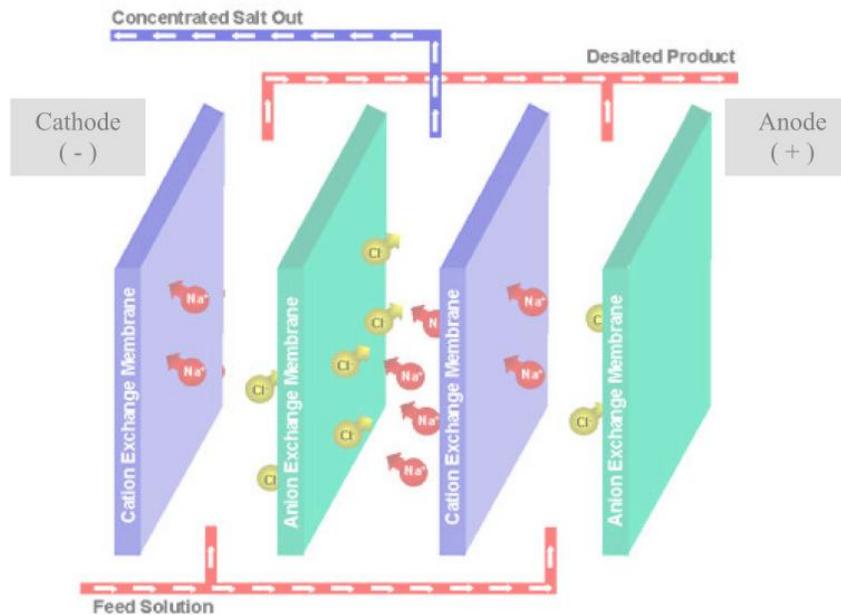
El incremento en calcio (Ca^{2+}), cloruros (Cl^-) y sulfatos (SO_4^{2-}) se debe a la adición de químicos para el mantenimiento de la resina. El efluente de este proceso, puede ser descargado al medio ambiente y el residuo puede desecharse.

4.3.2 Electrodiálisis Directa (ED) e Inversa (EDR)

4.3.2.1 Electrodiálisis Directa (ED)

La mayoría de las aguas congénitas están cargadas positiva o negativamente por medio de los iones contenidos en ellas, si estos iones se someten a una diferencia de potencial, serán atraídos por los electrodos con la carga opuesta. En la electrodiálisis directa (ED), se colocan membranas que permiten pasar cationes o aniones, pero no los dos al mismo tiempo, entre estas se colocan un par de electrodos y son colocadas alternadamente como se muestra en la figura 5.

Figura 5 Proceso de electrodiálisis Directa (Daniel, 2005)



El agua congénita pasa simultáneamente en pasos paralelos para producir un flujo continuo de agua desalada y un efluente de salmuera. El agua de alimentación debe pasar por un pre tratamiento para evitar que algunos contaminantes presentes dañen las membranas. Además de esto, un rectificador es generalmente utilizado para transformar corriente alterna (AC) en la corriente directa (DC) suministrada a los electrodos en el exterior de las pilas de membrana. El tratamiento posterior a este proceso, consiste en la estabilización del agua, y la preparación para su distribución. Este post-tratamiento podría consistir en la eliminación de gases como el sulfuro de hidrógeno (H_2S) y el ajuste de pH. ¹⁵

4.3.2.2 Electrodialisis Inversa (EDR)

Una unidad de electrodialisis inversa (EDR) opera en base al mismo principio de una electrodialisis directa (ED) pero los canales para el agua tratada y la salmuera son idénticos en construcción. Cada cierto

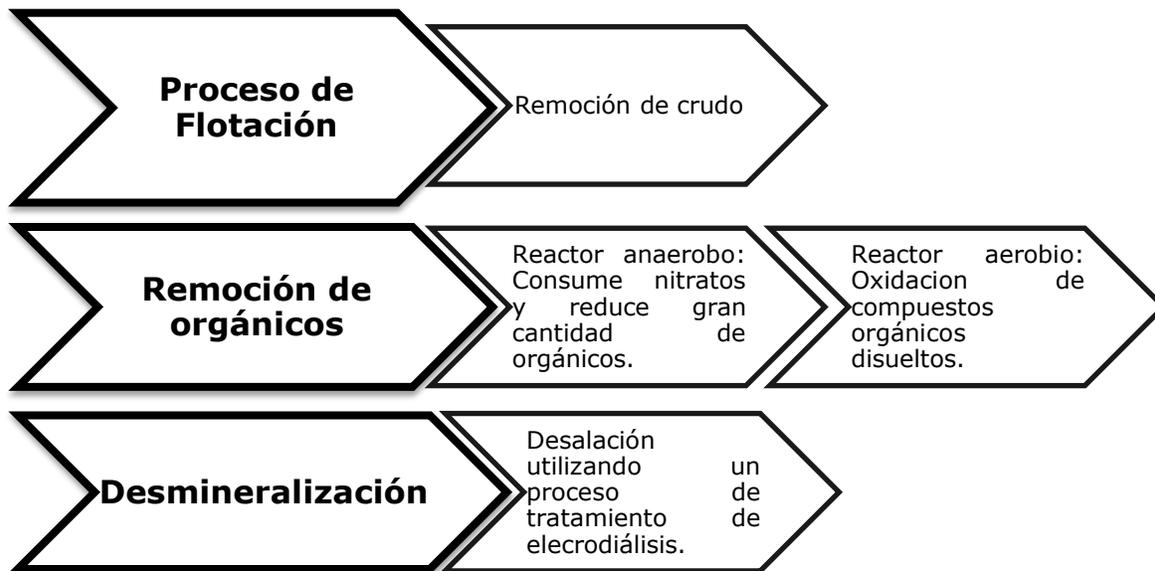
intervalo de tiempo, la polaridad de los electrodos así como los flujos en los canales de producto (agua tratada y salmuera) son cambiados. El resultado es que los iones son atraídos en la dirección opuesta a través de la membrana. Inmediatamente después de la inversión de la polaridad y de flujo, se descarga lo suficiente del producto hasta que la pila y las líneas se enjuagan y la calidad del agua es la deseada. Esto tarda alrededor de 1 a 2 minutos, y entonces la unidad puede volver a trabajar. El proceso de inversión es útil en la separación o el lavado de depósitos en los canales antes de que puedan acumularse y crear un problema. El lavado permite la operación si añadir tantos productos químicos de pre tratamiento y minimiza el ensuciamiento de la membrana.¹⁵

4.3.2.3 Aplicaciones

4.3.2.3.1 Cuenca “Wind River”, Lysite, WY.

El agua congénita proveniente de los pozos de “Wind River” en Wyoming contiene generalmente ácido sulfhídrico (H_2S), crudo, ácidos, BTEX (acrónimo para benceno, tolueno, etil benceno y xilenos) sólidos disueltos, etc. Alrededor del 93% de los sólidos disueltos totales (8300 - 10000 ppm) son sodio (Na^+), cloruros (Cl^-), calcio (Ca^{2+}) y bicarbonatos (H_2CO_3). El contenido de crudo y aceite es alrededor de 65 ppm con una demanda bioquímica de oxígeno (DBO) de más de 300 ppm.

Figura 6. Tren de tratamiento en la Cuenca "Wind River" (Daniel, 2005)

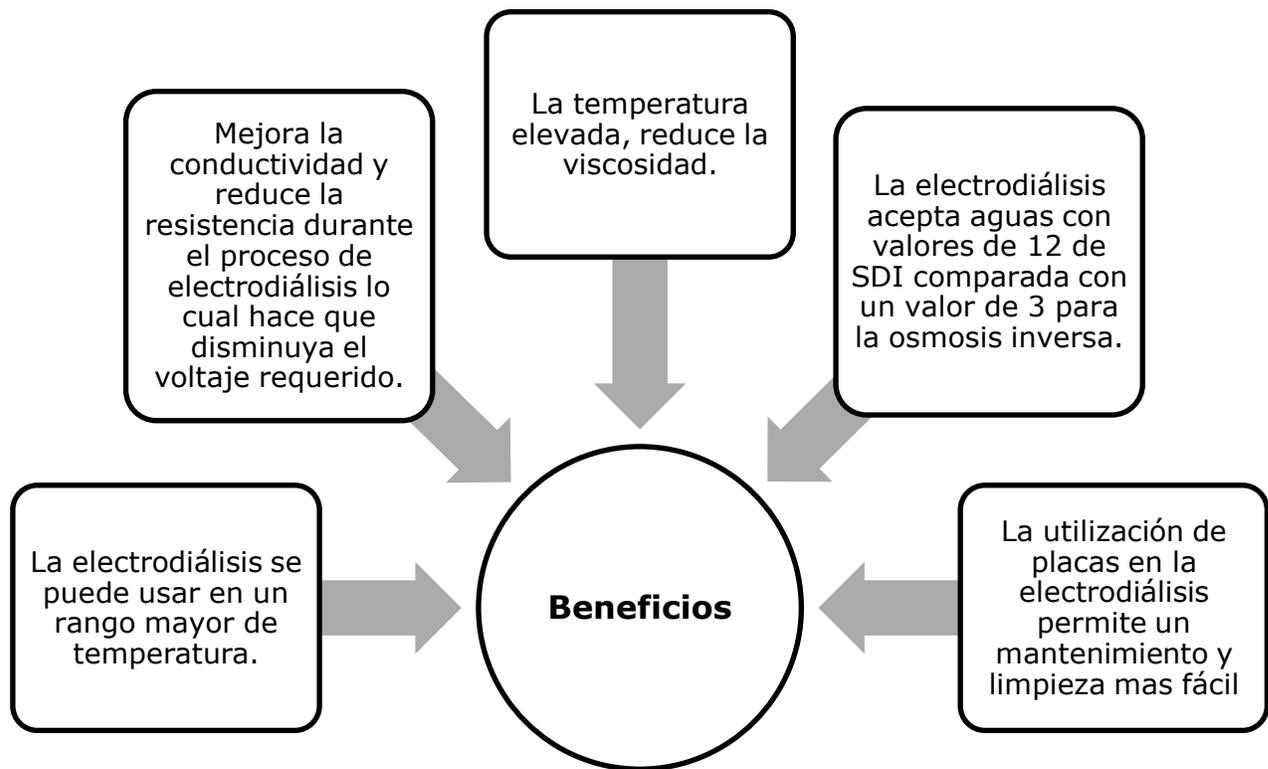


En este caso, el uso de electrodiálisis fue económicamente viable. El agua congénita tenía aproximadamente 9000 ppm de sólidos disueltos totales (SDT), y el costo de la electrodiálisis incrementa en cuanto incrementa la remoción de SDT. Cabe mencionar que la electrodiálisis removió el 89% de los sólidos disueltos totales (SDT) contenidos en el agua congénita.¹⁵

4.3.2.3.2 Electrodiálisis de alta eficiencia (HEED™)

La compañía *Frac Water Inc*® desarrolló un equipo móvil de electrodiálisis para tratar el agua congénita proveniente de la producción de Coal Bed Methane.¹⁵ Varios casos de estudio demuestran que esta unidad móvil de tratamiento puede tratar aguas congénitas con valores de sólidos disueltos totales (SDT) de aproximadamente 11400 a 27000 ppm y de sulfatos (SO_4^{-2}) de 4000 a 14000ppm. La electrodiálisis tiene más beneficios frente a una osmosis inversa como se observa en la figura 7.

Figura 7. Beneficios de la electrodiálisis frente a la ósmosis inversa (Isidro Angeles, 2013)



Donde un valor menor de SDI indica la necesidad de tratamientos previos. Las membranas son sensibles al inundamiento si el agua congénita tiene un valor mayor de SDI, donde SID significa (Silt Densitiy Index).

4.4 Tecnología de deionización capacitiva (CDT)

Es una tecnología que fue desarrollada para la purificación de agua de mar y aguas subterráneas salobres. Se aplica un voltaje constante y las sales solubles se colocan en la superficie de electrones de carbón. En este tipo de tecnología, una corriente de agua salubre fluye por en medio de electrodos de carbón con mayor área de contacto los cuales mantienen una diferencia de potencial de 1.2 V. Los iones y otras

partículas, tales como los microorganismos, que mantienen una carga, son atraídos y mantenidos en el electrodo de carga contraria. Eventualmente, los electrodos se saturados por los iones y deben ser regenerados, por lo cual se les deja de pasar la diferencia de potencial para que dejen de atraer a los iones produciendo una corriente todavía más saturada de iones. ¹⁵

Se utilizan electrodos de carbón tipo gel de aproximadamente 500 m²/g de área superficial. Proveen una conductividad eléctrica alta y alta permeabilidad iónica. Este tipo de electrodos son caros ya que están hechos a base de Resorcinol Fluoride y su capacidad de retención iónica es relativamente baja. Debido a esto se han desarrollado electrodos que proveen mayor área superficial que son nanotubos impregnados de Resorcinol Fluoride sobre carbono.

4.5 Tecnología de Activación Electroquímica

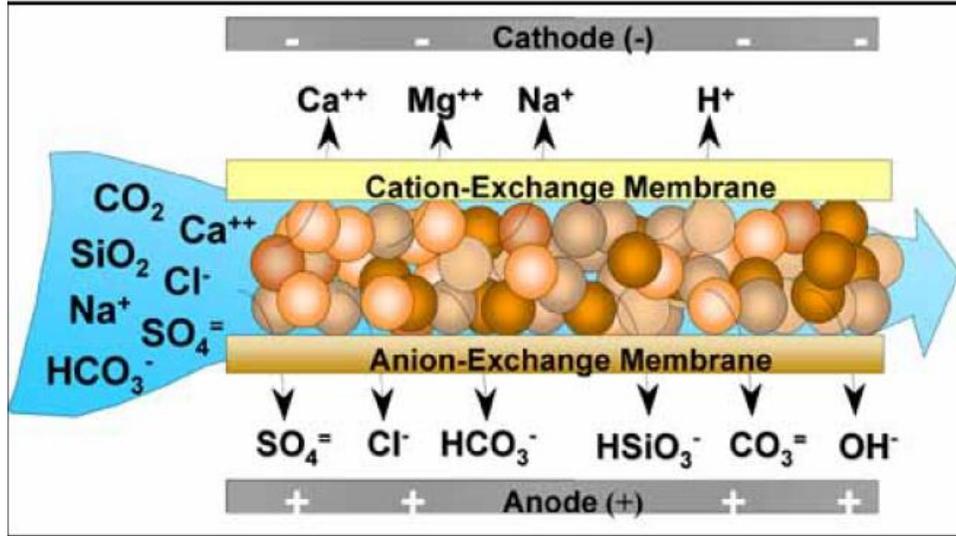
Es una tecnología que innova en el campo de desinfección de agua, en la cual se somete al agua congénita con todos sus componentes a una diferencia de potencial. Debido a que ya existe un ánodo (+) y un cátodo (-) en el agua y una diferencia de potencial es aplicada, es entonces cuando la electrodiálisis del agua ocurre en los polos haciendo que las partículas se vayan separando. Si se utiliza cloruro de sodio (NaCl) como solución, el efluente predominante será hipoclorito de sodio (NaClO) el cual es utilizado ampliamente para desinfectar agua y matar microorganismos. Esta tecnología se esta aplicando en conjunto a la tecnología de deionización capacitiva (CDT) obteniendo agentes que contribuyen a la desinfección y destrucción de virus y bacterias utilizando únicamente las reacciones químicas del agua

4.6 Electro deionización (EDI)

Debido a que existen partículas que se ionizan débilmente tales como dióxido de carbono (CO_2) y amoníaco (NH_3) y son difíciles de remover solo al pasarlos por una membrana, como en una ósmosis inversa y electrodiálisis, se necesita otro tipo de proceso. Una opción es el uso de la electro deionización. Este proceso de membranas es promovido por electricidad, en el cual se combinan resinas y membranas de intercambio iónico con una diferencia de potencial aplicado.¹⁵

Las sustancias ionizadas se remueven como en la electrodiálisis pero con un aumento en la remoción de iones por la presencia de resinas de intercambio iónico en las celdas, en las cuales por medio de una diferencia de potencial, manda el agua a la superficie de las membranas de intercambio iónico produciendo iones hidrogeno (H^+) e hidroxilo (OH^-) que regeneran las resinas de intercambio iónico. Una vez que las partículas están ionizadas, se remueven por la diferencia de potencial así que primero se remueven las sustancias que ionizan fácilmente y en una segunda etapa se remueven las sustancias que no ionizan con tanta facilidad. En la figura 21 se muestra cómo pasa el agua por las celdas de electro deionización. La remoción de especies ionizadas tales como sodio (Na^+), cloruros (Cl^-), sulfatos (SO_4^{2-}) y calcio (Ca^{2+}) con esta tecnología es de aproximadamente 99%. La ventaja de este tipo de tecnología es que no requiere la adición de ninguna otra sustancia química para la remoción de especies que no ionizan fácilmente contenidas en un agua congénita.

Figura 8. Proceso de electro deionización (Ionics Inc, 2005)



4.7 Evaporación

Cuando se somete a un tratamiento de evaporación directamente al agua congénita se eliminan los diversos tratamientos físicos y químicos posteriores. El principio de esta tecnología es proveer al agua congénita el calor latente para que el agua congénita genere vapor el cual puede ser condensado después como agua pura y el agua remanente se constituirá por una alta concentración de sólidos.¹⁵

Evaporadores verticales poseen el coeficiente de transferencia de calor más alto el cual es necesario para salvar energía. Además minimiza el ensuciamiento, ya que las paredes se mantienen mojadas durante la operación. El proceso se ejemplifica en las figuras 9 y 10.

Figura 9. Proceso de evaporación de un agua congénita (Isidro Angeles, 2005)

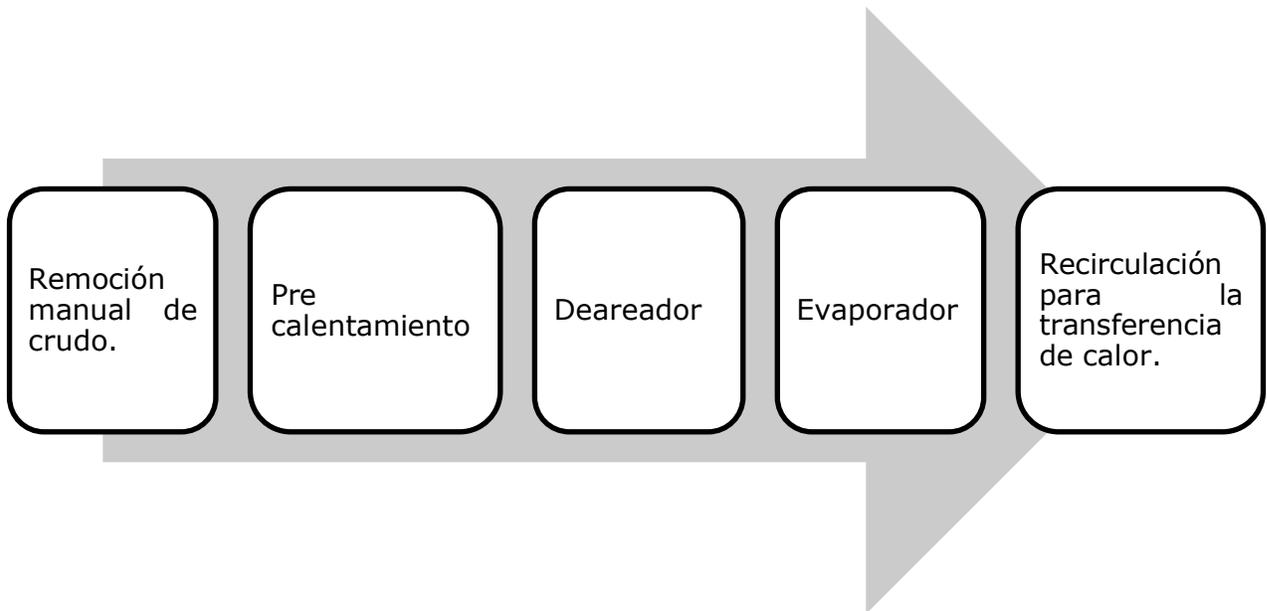
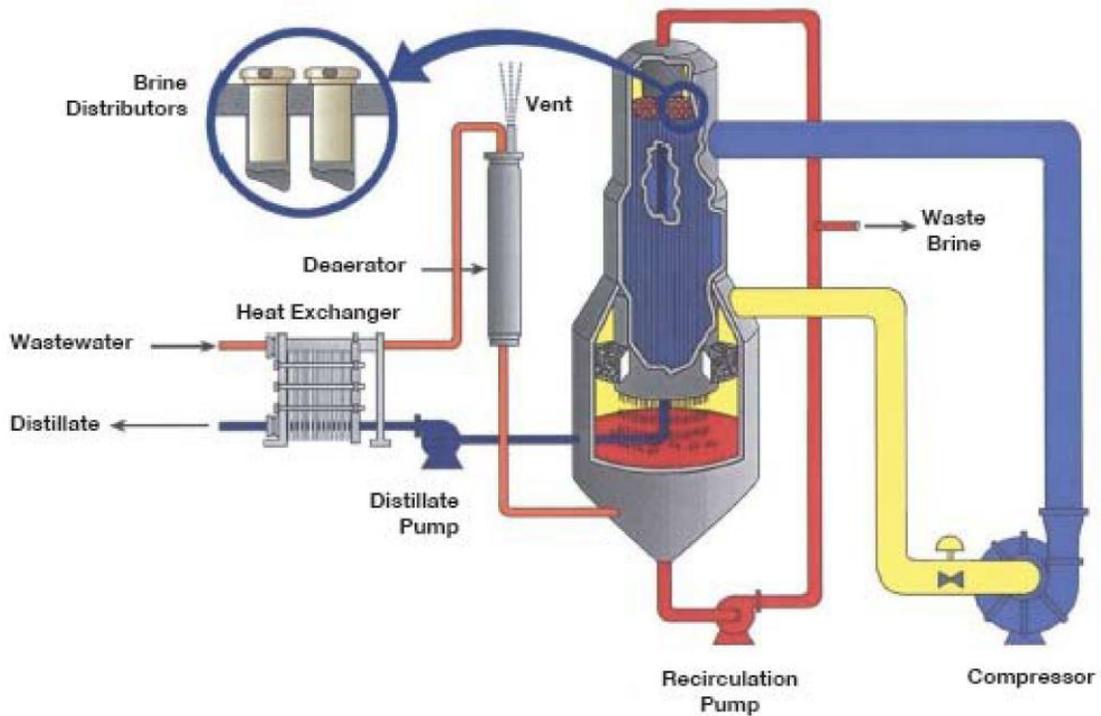


Figura 10. Esquema de proceso de evaporación (Ionics, Inc, 2005)



4.8 Evaporación por aspersión rápida (Rapid Spray Evaporation™)

Se trata de una nueva tecnología patentada por AquaSonics® que hace uso eficaz del calor residual generado en un proceso en su totalidad para la desalinización o recuperación de sustancias disueltas. El agua a presión se nebuliza en una corriente de aire caliente en movimiento. Debido al área superficial extremadamente alta de las gotas de agua, el agua se vaporiza instantáneamente y de manera eficiente. Mediante el control cuidadoso del sistema, la sal que queda detrás se concentra en una salmuera para los propósitos de manipulación de materiales¹⁴. Se ha encontrado que este proceso puede ser utilizado para aguas congénitas con aproximadamente 16% de sales y cuyo costo es un tercio del costo de los métodos convencionales para la desalación. La tabla 17 muestra los resultados reportados por West Water Resource Inc.

Tabla 17 Resultados del tratamiento de evaporación por aspersión rápida (West Water Resource Inc, 2005)

Soluto	Antes del tratamiento (ppm)	Después del tratamiento (ppm)	del Concentrado (ppm)
Calcio	79	1.6	20
Magnesio	490	1.7	600
Sodio	25000	160	57000
Potasio	610	1.9	1100
Cloruro	5000	90	8400
Sulfato	31000	150	35000
Bicarbonato	5700	20	2900
Fosfato	1200	0	-
CO₂	3100	0	-
TDS	130000	4	180000

4.9 Congelamiento – Evaporación - Des congelamiento

El proceso de Congelamiento – Des congelamiento- Evaporación (Freeze Taw Evaporation) es un proceso en el cual primero se almacena el agua congénita hasta que la temperatura del aire alcance y/o este por debajo de cero grados Celsius para promover el congelamiento de la misma. El agua se mueve del lugar almacenado por medio de bombas y se pasa a otro lugar de congelamiento por medio de una red de tuberías con rociadores en puntos específicos los cuales se pueden mover conforme se va formando el hielo en la red de tuberías. La salmuera resultante se transporta a almacenes separados para un tratamiento secundario o para la disposición inmediata de esta. Cabe mencionar que esta tecnología se utiliza en ambientes donde se puede lograr esta temperatura para así poder congelar y descongelar el agua congénita y hacer uso de la salmuera y agua tratada que puede ser utilizada en diferentes escenarios.¹⁵

Durante el periodo del año 1999-2000 se sometió un agua congénita de aproximadamente 14000 ppm de sólidos disueltos totales (SDT) y al final del tratamiento se logró la obtención de una salmuera de aproximadamente 64300 ppm. El agua proveniente de la descongelación del hielo fue de 924 ppm sólidos disueltos totales (SDT). Aproximadamente el 55% de la alimentación fue la que se obtuvo por efecto de descongelamiento, alrededor del 30% se pierde por evaporación y/o sublimación; y solo el 15% de la alimentación se obtiene como salmuera.

4.10 Membranas de separación en base a diferencia de Presión.

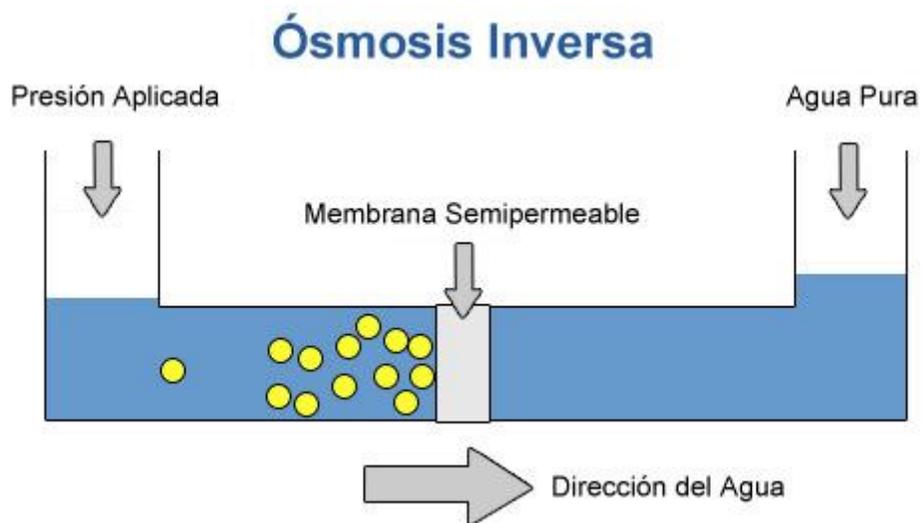
Los procesos de micro filtración, ultra filtración, nano filtración y ósmosis inversa utilizan diferencias de presión muy grandes a lo largo de las membranas para lograr la filtración de los contaminantes de un agua congénita. En la tabla 18 se muestran los procesos de separación por membranas en base a diferencia de presión y sus aplicaciones así como la habilidad de las membranas para rechazar las especies de cierto peso molecular expresado en Daltons.¹⁵

Tabla 18 Tipos de filtración por medio de membranas, donde MWCO significa Molecular Weight Cutoff (Daniel, 2005)

Tipo de filtración por membrana	Rango de Separación	de Aplicación / Remoción
Micro filtración (MF)	>100 000 Daltons 10 – 0.1 μm	Bacteria, virus, sólidos suspendidos, etc.
Ultrafiltración (UF)	10 000 a 100 000 Daltons 0.05 – 5e ⁻³ μm	Proteínas, almidón, virus, silica coloidal, orgánicos, grasas, pintura, etc.
Nano filtración (NF)	1 000 a 100 000 Daltons 5e ⁻³ - 5e ⁻⁴ μm	Almidón, azúcares, pesticidas, iones divalentes, DBO, DQO, detergentes, etc.
Ósmosis Inversa (RO)	Sales y partículas 1 e ⁻⁴ - 1e ⁻⁵ μm	Iones metálicos, ácidos, azúcares, sales acuosas, colorantes, resinas naturales, sales monovalentes, DBO, DQO, iones, etc.
Membrana de separación líquido gas	CO ₂ , H ₂ S	Remoción de ácido sulfhídrico y dióxido de carbono.

Las tres primeras técnicas, se basan en el principio de no aceptar a las especies con tamaño de poro más grande que el de la membrana bajo presión. El proceso de ósmosis inversa utiliza una presión de operación mayor a la presión osmótica de una sal presente en el agua para así dejar pasar por la membrana agua sin estas sales (figura 24). En el momento en el se invierte el proceso es cuando el agua fluye de mayor concentración de sales a menor concentración al equilibrio.

Figura 11. Proceso de Ósmosis Inversa (Isidro Angeles, 2013)



En la separación líquido gas, la diferencia de presión a lo largo de la membrana que tiene un tamaño de poro alrededor de 0.3 micro metros, lo cual es suficiente para dejar pasar dióxido de carbono (CO_2).

En los procesos de operación de las industrias de crudo y gas, se tiende a optar por unidades móviles de tratamiento. Existe una empresa llamada Osmonics Inc[®], que se ha encargado de desarrollar membranas especializadas en tratamiento de aguas congénitas tales como en forma de espiral, que son fáciles de manejar en sistemas móviles. Este tipo de membranas ofrecen una mayor área de contacto en un espacio limitado. La temperatura elevada limita su desarrollo, algunas pueden ser útiles

hasta 113 o 122°F pero algunas otras pueden ser utilizadas hasta 194°F, cabe mencionar que a temperaturas elevadas, también se disminuye la viscosidad, lo cual puede ser un efecto positivo, pero se debe tomar en cuenta que cuando se manejan temperaturas más altas, se requiere aplicar una mayor caída de presión en las membranas además de que se requiere mayor energía para obtener la separación requerida. El pH de la solución, puede ser un efecto importante en el desempeño de filtrado en las membranas, ya que, por ejemplo, si se tiene un pH alto, se podrá remover de manera eficiente la presencia de Boro si es que la membrana resiste a esas condiciones de pH.

El ensuciamiento en las membranas es un problema común entre los procesos de separación por membranas. Si se pasa por la membrana un flujo relativamente alto, puede producir un efecto de no acumulación de crudo y de otros componentes. También se puede optar por membranas hidrofílicas que no permiten el paso de crudo ya que tienen mayor afinidad con el agua. Se ha desarrollado un mecanismo de vibración de membrana para evitar el proceso de ensuciamiento de las mismas. La vibración sinusoidal hace que los coloides se adhieran a la superficie de la membrana.

El centro de investigación y recuperación de petróleo del Instituto de Minería y Tecnología de Nuevo México ha desarrollado membranas inorgánicas para el tratamiento de aguas congénitas, concentrándose en el tratamiento de la alta salinidad de este efluente. Estas membranas estas hechas de zeolitas, permiten el manejo de un mayor volumen de agua, y son más estables química y térmicamente. La tabla 19 muestra el porcentaje de remoción aún para bajas diferencias de presión y flujos mayores por membrana.¹⁵

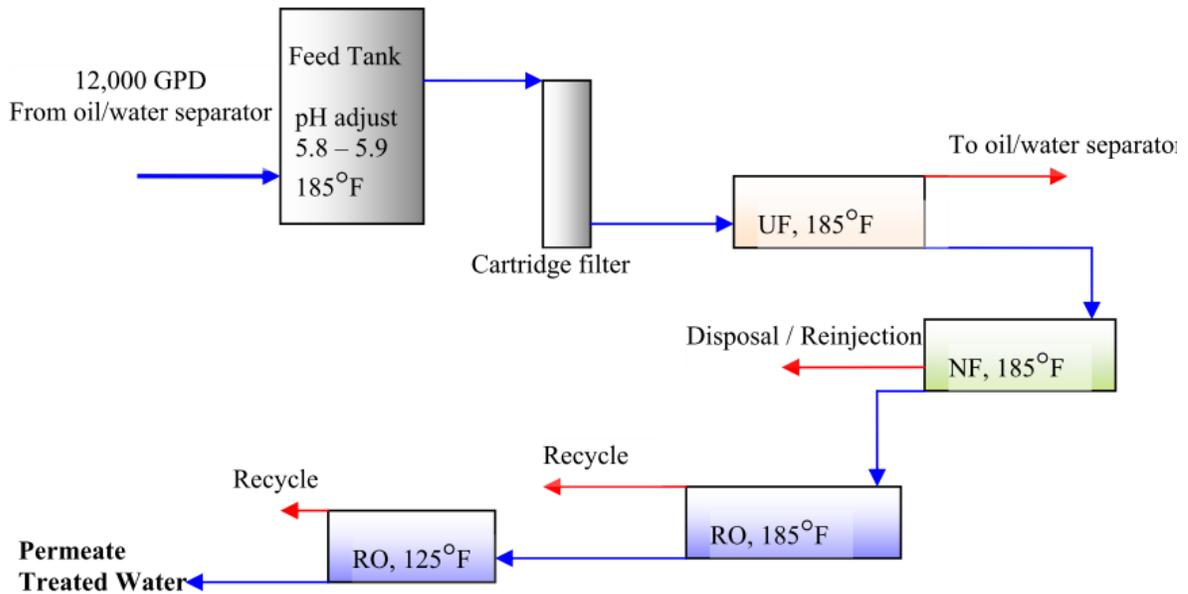
Tabla 19 Porcentaje de remoción aún para bajas diferencias de presión y flujos mayores por membrana. (Daniel, 2005)

Membrana	Iones presentes	SDT (ppm)	Presión (psi)	Flujo (kg/m²h)	Remoción (%)
1	Na ⁺ , K ⁺ , Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , NH ₄ ⁺ , Cl ⁻	39000	350	0.112	74.5
2	Na ⁺ , Cl ⁻	5500	300	0.135	89.2
3	Mg ²⁺ , Cl ⁻	9400	300	0.081	68.6
4	Ca ²⁺ , Cl ⁻	11000	300	0.096	57.6
5	Na ⁺ , SO ₄ ⁻	14200	300	0.097	57.4
6	Na ⁺ , Cl ⁻	5000	300	0.24	76.8

4.10.1 Osmonics Inc[®]

En 2001, Osmonics Inc[®] desarrolló una planta piloto para evaluar este tipo de membranas para el tratamiento de aguas congénitas en el norte de California, cerca de Bakersfield, Estados Unidos.¹⁵ La temperatura de esta agua en la superficie era de 185 °F con aproximadamente 10 000 ppm de sales y un alto contenido de sólidos suspendidos además de crudo disperso. El proceso se montó como sigue: se montó una separación por membrana de tres etapas además del intercambio iónico. Lo cual fue suficiente para tener menos de 1000 ppm de sólidos disueltos totales (SDT) en el agua, lo cual se muestra de manera gráfica en la figura 12.

Figura 12. Proceso de Osmonics Inc® (Daniel, 2005)



Al finalizar este tratamiento, se controló el pH del efluente a 5.8 agregando ácido sulfúrico (H_2S). Los sólidos suspendidos totales (SST) que resultaron, se dejaron en un tanque de forma cónica hasta que se asentaron por completo, en cuanto al dióxido de carbono [CO_2] y ácido sulfhídrico (H_2S) se recircularon. El "Cartridge filter" se utilizó para remover partículas pequeñas y crudo. El efluente de este filtro se pasó por un par de filtraciones más, además de osmosis inversa. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 20.

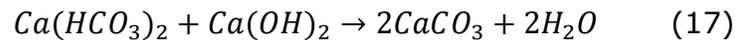
Tabla 20. Resultados obtenidos en el proceso de tratamiento llevado a cabo en Osmonics Inc ® (Daniel, 2005)

Compuesto	Alimentación (ppm)	Ultrafiltración (ppm)	Nano filtración (ppm)	Osmosis Inversa (ppm)
Sodio	9614	9610	5250	144
Calcio	715	715	163	5
Magnesio	412	412	115	2
Potasio	174	174	77	2
Amoniaco	110	110	68	2
Cloruro	8010	8010	4710	114
Sulfatos	1090	1090	No detectable	No detectable
Crudo	10 - 50	10 - 50	No detectable	No detectable
Recuperación (%)	-	90 - 95%	90 - 95%	80 - 90 %

4.10.2 Cañón de Placerita, California, Estados Unidos

Cerca del cañón de Placerita en las Montañas de San Gabriel, norte de Los Ángeles, California, Estados Unidos se desarrolló una planta piloto en un pozo petrolero que consistía en un ablandamiento, filtración, enfriamiento, paso por un filtro trotante, intercambio iónico y ósmosis inversa. El proceso removió aproximadamente 95% de la dureza del agua congénita. Más del 95% de los sólidos disueltos totales (SDT) fueron removidos por ósmosis inversa. Aproximadamente el 90% de boro fue removido a pH de 10.5 o mayor. La remoción de amoniaco fue del 80% aproximadamente a un pH de 8.7 o menor. El

endulzamiento con cal caliente fue como se muestra en la reacción 17, se agregó cloruro de Magnesio ($MgCl_2$) y un polímero iónico al agua congénita para así precipitar la dureza de calcio y magnesio como se muestra a continuación.



En la tabla 21 se muestran más especificaciones y detalles de este proceso de tratamiento. El efluente proveniente del proceso de endulzamiento se descargaba en el intercambiador tipo "fin fan" para enfriar el agua desde aproximadamente 150F a un poco arriba de la temperatura ambiente ya que las unidades consecuentes podían sufrir daños a temperaturas mayores de 100F. El siguiente paso fue el filtro percolador para la oxidación de los sólidos orgánicos, el cual es un plástico o un sistema de roca lleno de gran diámetro en relación con la profundidad. El agua pasaba en presencia de aire (oxígeno), los microorganismos presentes en el agua se juntan para formar una capa biológica y así el material orgánico se va degradando por medio de esta capa. A medida de que esta crece, la entrada de oxígeno cada vez se ve más afectada además la película biológica va perdiendo efectividad así que los lodos que se van formando se van retirando usando filtros de presión. Después de que el agua pasa del filtro percolador, esta se pasa directamente al intercambiador. Seguido de un proceso de intercambio iónico para la remoción de la dureza residual. Finalmente, el proceso de ósmosis inversa se usa para remover los sólidos disueltos totales (SDT), boro y orgánicos remanentes. El efluente se envió a un tanque de polietileno para almacenamiento, el que después se envió a un sistema de secado. El control de pH es un factor muy importante ya que la remoción de boro, sílice, amoníaco y dureza depende del pH de la solución. Por ejemplo: si el pH aumenta, la solubilidad de la sílice incrementa y eso puede disminuir la remoción de la misma. La

solubilidad de sílice aumenta las posibilidades de ensuciamiento de la membrana debido a la disminución de la precipitación de sílice, lo que mejora el rendimiento de la membrana de ósmosis inversa. También al aumentar el pH de la solución, la solubilidad de amoníaco disminuye lo cual disminuye la remoción del mismo utilizando ósmosis inversa.¹⁵

Tabla 21 Detalles de tratamiento en el pozo petrolero cerca del Cañón de Placerita en las Montañas de San Gabriel, norte de Los Ángeles, California, Estados Unidos (Daniel, 2005)

Proceso	Especificaciones	Tratamiento	Comentarios
Endulzamiento con cal caliente	100 gpm adicionando al menos 10 gpm/ft ² de precipitado	Remoción de dureza, Boro, Sílice, amoníaco.	Se necesitó agregar hidróxido de sodio y cloruro de Magnesio.
Enfriamiento	Intercambiador "fin fan"	Efluente para la unidad de endulzamiento	Necesario para prevenir las unidades restantes.
Filtro percolador	400 ft ³ de polipropileno 2.5 gpm/ft ² de carga hidráulica	Oxidación biológica de carbón orgánico	Efluentes con niveles menores a 2 ppm de TOC
Intercambio Iónico	5 ft ³ de resina Ionac C-249 con una capacidad de 25-30 espacios/f ³	Pre tratamiento de Ósmosis Inversa y remoción de dureza residual.	Membranas de Intercambio Iónico
Ósmosis Inversa	4 x 40 membrana espiral	Remoción de SDT, Boro,	Se necesita mayor pH para

	enrollada	Sílice	la remoción de Boro
Absorbedor GAC	Carbón activado	Remoción de orgánicos	Tratamiento posterior con un filtro percolador.

4.11 Ósmosis inversa de alta eficiencia. HERO™

La compañía Ionics Inc® desarrolló esta tecnología para generar un mejor proceso de recuperación de aguas congénitas y que a su vez pudiera manejar volúmenes más grandes con costos más bajos que los necesarios para un proceso de ósmosis inversa convencional. El paso más importante en este proceso es el pre tratamiento del influente antes del proceso de ósmosis inversa, el cual es el aumento de pH que permite tener una mayor eficiencia como se muestra a continuación.

1. Remoción de dureza: La dureza de calcio (Ca^{2+}) y magnesio (Mg^{2+}) pueden precipitar en la membrana de ósmosis inversa a un pH elevado, lo cual provoca el ensuciamiento de la membrana. Se añade una base para mantener el pH y para mejorar el proceso de intercambio catiónico con ácido débil. La adición de ácido promueve la conversión de bicarbonatos (HCO_3^{2-}) en dióxido de carbono (CO_2).
2. Remoción de dióxido de carbono (CO_2): Se da por un proceso de degasificación. La separación por aire elimina el dióxido de carbono (CO_2) lo cual genera un aumento en el pH.
3. Ósmosis Inversa a alto pH: Cuando se tiene un pH alto se incrementa la solubilidad de sílice y se destruyen organismos

biológicos que causan el ensuciamiento de la membrana. Los sólidos disueltos son removidos por este proceso.

4.12 Reactor de Oxidación

La empresa Newpark Environmental Services® ofrece una alternativa de tratamiento innovador que se basa en una oxidación agresiva seguida de la precipitación de contaminantes contenidos en un agua congénita. La oxidación, que es lo más importante, se lleva a cabo en un reactor, diseñado e implementado por la misma compañía y llamado "Reactor HB"¹⁵. El proceso tiene tres partes principales, las cuales son:

1. Estado físico – químico: Incluyendo degasificación, remoción de sólidos, ajuste de pH, reactor HB, coagulación- floculación, flotación, clarificación y filtrado.
 - a. Degasificación: Recuperación de metano (CH_4) del agua congénita y remoción del dióxido de carbono (CO_2).
 - b. Remoción de sólidos: El agua proveniente de la unidad de degasificación se pasa por un equipo patentado que se hace cargo de la remoción de sólidos de un rango variado.
 - c. Ajuste de pH: Se ajusta para que sea lo más neutral posible lo cual hace que la eficiencia del reactor sea máxima.
 - d. Anillo líquido: Un volumen alto de aire a baja presión es bombeado antes del reactor al agua congénita
 - e. Reactor HB: La mezcla aire agua es oxidada agresivamente. El agua entra al reactor donde miles de partículas pequeñas son generadas por el aire entrante por una fuerza mecánica, con una caída de presión de alrededor de 5 a 10 psi. Las micro burbujas tienen una carga positiva así que se repelen

entre sí mismas pero atraen iones cargados negativamente, los cuales están asociados con iones cargados positivamente en la forma de contaminantes. En cuanto las micro burbujas van atrayendo los contaminantes la tensión superficial incrementa, por lo que el tamaño de la burbuja disminuye y la presión y temperatura dentro de la burbuja aumentan. Bajo estos efectos los contaminantes reaccionan con más facilidad con el oxígeno presente en el aire dentro de las micro burbujas. La energía asociada a esta reacción resulta en una onda ultrasónica y una oxidación de los contaminantes muy agresiva.

- f. Degasificador: En este punto casi todo el oxígeno ha sido consumido pero queda una porción de nitrógeno que queda en el agua, así que este es removido en el degasificador.
- g. Coagulación- floculación: Un coagulante (cal) y un floculante (polímero aniónico) es mezclado con el agua para precipitar los contaminantes previamente tratados en forma de floculantes.
- h. Proceso de flotación: Este proceso ayuda a asentar y remover las partículas floculantes.
- i. Alta tasa de clarificación: Una serie de tubos se instala y elimina los floculantes más pequeños.
- j. Filtración con arena y carbón activado: El agua se filtra a través de una arena y carbón activado para eliminar los más pequeños floculantes. El agua se hace clara a través de este proceso.

2. Estado de Desmineralización: Se logra una completa remoción de contaminantes disueltos

- a. Unidad de micro filtración: Se remueven micro partículas y contaminantes. Este paso asegura que no entre a la unidad de ósmosis inversa ninguna micro partícula disuelta y ensucie las membranas.
 - b. Unidad de Ósmosis Inversa: El agua se bombea a alta presión en una serie de membranas de ósmosis inversa para la concentración y futura remoción de contaminantes disueltos.
3. Eliminación de residuos: El efluente de las membranas de ósmosis inversa puede ser utilizado ya como agua "fresca" y el concentrado que se obtuvo se dispone en algún lugar de almacenamiento cercano. Debido a que esto puede presentar grandes costos, se busca poder secar el concentrado y después poder ser manejado en forma sólida.
- a. Cristalizador y evaporador: El cristalizador compacta el concentrado de las membranas de ósmosis inversa separándolo del agua. Esta agua es recirculada a la unidad de ósmosis inversa para así saturar las membranas y obtener mayor cantidad de concentrado a través de un evaporador.¹⁵

Cuadro comparativo de tecnologías

El propósito de esta sección es hacer una recopilación de las tecnologías abarcadas en la que se describan sus ventajas y desventajas además de rangos de aplicabilidad. Cada cuadro comparativo está enfocado al tratamiento principal al que se quiera someter el agua congénita. En términos de durabilidad y costos de cada tecnología, se dará un enfoque general ya que todo depende de las condiciones específicas de cada sitio y de las características del agua congénita como se habló en los capítulos anteriores; debido a esto el enfoque no tiene parámetros económicos, los mismos que no se pretendieron uniformar en este trabajo para dar un estimado final.

5.1 Remoción de partículas de crudo (De oiling).

Tabla 22 Resumen de tecnologías enfocadas a la remoción de crudo en un agua congénita (Isidro Angeles, 2013)

Tratamiento	Descripción breve	Ventajas	Desventajas	Efluente	Aplicación en aguas congénitas
Separador de plato corrugado	Separación de partículas de crudo libres de agua por efecto de la gravedad mejorado por un proceso de floculación en la superficie de platos corrugados.	*No se requiere energía extra *Bueno para remover grandes cantidades de crudo y sólidos suspendidos *Puede resistir cambios bruscos de operación.	*No es buen removedor de partículas pequeñas de crudo *Necesita mucho tiempo de retención *Mantenimiento	Se trata de un lodo de partículas suspendidas.	Recuperación de partículas de crudo en el agua congénita previa a su descarga. El agua congénita para la que se recomienda este tratamiento es aquella que contenga crudo

					y grasas > 1000 mg/L.
Centrifugado	Separación de partículas de crudo libres de agua por efecto de una fuerza centrífuga generada por una máquina.	*Buena remoción de pequeñas partículas de crudo. *Menor tiempo de retención *Puede manejar mayor efluente.	*Se necesita energía para utilizar la máquina centrifugadora. *Altos costos de mantenimiento	Se trata de un lodo de partículas suspendidas y es una	
Hidrociclón	Separación de partículas de crudo libres de agua por efecto de la presión tangencial de la corriente de entrada.	*Módulos compactos *Buena eficiencia * Alto rendimiento para partículas de crudo	*Se necesita energía para presurizar la entrada. *No separación de sólidos. *Ensuciamiento *Altos costos de mantenimiento	tecnología utilizada como pre tratamiento	

Flotación de gas	Las partículas de crudo se adjuntan a las burbujas de aire y flotan a la superficie.	*Mayor eficiencia por efecto de coalescencia. *Fácil operación *Robusto y de larga duración.	*Generación de largas cantidades de aire. *Tiempo de retención para la separación. *Generación y remoción de espuma.	*Espuma *Grumos de crudo.	
Extracción	Remoción de crudo libre o disuelto por medio de un disolvente a base de un hidrocarburo ligero.	*No se requiere de energía. *Remoción de crudo disuelto	*Uso de solvente. *Manejo de fases *Regeneración de solvente.	Desecho de regeneración de solvente	Remoción de crudo en un agua congénita con presencia de un bajo contenido de crudo (<1000 mg/L) o remoción de trazas de crudo previo al
Ozonización	Agentes oxidantes de carácter fuerte	*Fácil manejo *Tratamiento primario	*Inyección in- situ del agente oxidante.	Sólidos precipitados en forma de	remoción de trazas de crudo previo al

	que llevan a cabo la oxidación de contaminantes, los que se pueden remover como precipitado.	eficiente para la remoción de partículas solubles.	*Separación de las partículas oxidadas. *CO ₂ como sub producto.	lodo.	tratamiento de membranas.
Adsorción	Un medio poroso adsorbe los contaminantes del agua congénita.	*Módulos compactos empacados. *Eficiente	*Gran tiempo de retención. *En cuanto aumenta la concentración de contaminantes deja de ser eficiente.	*Medio poroso agotado *Desecho	

5.2 Desinfección

Tabla 232 Resumen de tecnologías enfocadas a la desinfección en un agua congénita (Isidro Angeles, 2005)

Tratamiento	Descripción breve	Ventajas	Desventajas	Efluente	Aplicación en aguas congénitas
Ozonización / Rayos UV	Al pasar rayos UV u ozono se producen iones hidroxilo, los cuales matan a las bacterias presentes.	*Operación limpia y de fácil manejo. *Desinfección con alta eficiencia.	*Abastecimiento "in situ" de ozono. *La presencia de algunos contaminantes reducen la eficiencia.	Efluente de bajo volumen con sólidos suspendidos al final del tratamiento.	La presencia de microbios en la superficie de las reservas o en la producción de crudo e incluso durante el mismo tratamiento. La desinfección puede ser necesaria para mantener la potabilidad del agua tratada o para prevenir el enlodamiento del mismo pozo así como de los equipos asociados.
Cloramiento	Partículas de cloro reaccionan con agua, produciendo ácido hipocloroso que mata a los microbios.	*Método barato y simple			

5.3 Desalinización

Tabla 24. Resumen de tecnologías enfocadas a la desalinización de un agua congénita (Isidro Angeles, 2005)

Tratamiento	Descripción breve	Ventajas	Desventajas	Efluente	Aplicación en aguas congénitas
Ablandamiento con cal	Adición de cal para la remoción de carbonatos, bicarbonatos, dureza.	*Método barato y simple	*Adición de químicos *Se necesita un tratamiento posterior.	*Químicos previamente utilizados. *Precipitado como desperdicio.	Estas tecnologías generalmente no requieren grandes cantidades de energía pero requieren un pre tratamiento menor que las tecnologías a base de membranas. Las aguas congénitas recomendadas para este tratamiento deberán de tener entre 1000 y 10000
Intercambio iónico	Sales disueltas o mineralizadas son ionizadas y removidas por intercambio iónico.	*Bajo requerimiento de energía. *Posible regeneración continúa de la resina. *Eficiente.	*Pre y post tratamiento necesitan ser de gran eficiencia. *Produce un efluente muy concentrado.	Sustancias químicas regeneradas.	

		*Tratamiento móvil.			mg/L de SDT. Algunos tratamientos
Electrodiálisis	Sales ionizadas son atraídas a electrodos cargados opuestamente pasando por membranas de intercambio iónico.	*Tecnología limpia. *No se necesita adición de químicos. *Tratamiento móvil. *Pre tratamiento menos riguroso.	*La eficiencia disminuye en cuanto aumenta la cantidad de influente. *Se requiere de regeneración de membrana.	Desperdicio de regeneración.	remueven muy bien las partículas de crudo, otros necesitan post tratamiento.
Electrodeionización	Electrodiálisis mejorada debido a la presencia de resinas de intercambio iónico entre las membranas de	*Remoción de especies débilmente ionizadas. *Alta velocidad de remoción. *Tratamiento	*Regeneración de resinas de intercambio iónico. *Se necesita pre y post	Desperdicio de regeneración.	

	intercambio iónico.	móvil.	tratamiento.		
Deionización capacitiva	Sales ionizadas son adsorbidas por electrodos cargados opuestamente.	*Requerimiento bajo de energía. *Mayor rendimiento.	* Electrodos de alto costo. *Ensuciamiento.	Desperdicio de regeneración.	
Activación electroquímica	Agua ionizada reacciona con cloro ionizado para producir hipoclorito que mata a los microbios.	*Remoción simultánea de sales y microbios. *Disminuye el ensuciamiento.	*Electrodos de alto costo.	Desperdicio de regeneración.	
Evaporación por aspersión rápida (Rapid Spray Evaporation®)	El proceso de inyección de agua a alta velocidad en aire caliente evapora el agua que puede ser	*Agua tratada de alta calidad. *Alta eficiencia en la conversión.	*Se necesita gran energía para calentar el aire. *Manejo de sólidos.	Desperdicio en forma de lodo al final de la evaporación.	

	condensada y así obtener agua tratada.				
Congelamiento -Evaporación - Des congelamiento	Uso de ciclos de temperatura normales para congelar el agua en forma de cristales de agua contaminada y deshielar para producir agua pura	*No se necesita energía. *Proceso natural. *Barato.	*El proceso de congelación puede ser deficiente. *Largo proceso de operación.	Contaminantes en forma de sólidos.	

5.4 Tratamiento por medio de membranas

Tabla 25. Tecnologías de tratamiento de aguas congénitas por medio de membranas (Isidro Angeles, 2005)

Tratamiento	Descripción breve	Ventajas	Desventajas	Efluente	Aplicación en aguas congénitas
Micro filtración	Remoción de micro partículas por medio de una membrana bajo presión.	*Mayor obtención de agua tratada. *Módulos compactos.	*Se necesita mucha energía. *Eficiente para partículas monovalentes.	Desperdicio concentrado de la membrana generado mediante la limpieza de la misma. Además de una corriente de la filtración.	Remoción de partículas de crudo, microbios y sólidos orgánicos, sales disueltas, ácidos etc. Los contaminantes pueden ser eliminados si la tecnología de membrana es seleccionada adecuadamente.
Ultra filtración	Remoción de ultra partículas por medio de una membrana bajo presión.	*Mayor obtención de agua tratada. *Módulos compactos. *Remoción de virus y orgánicos.	*Se necesita gran cantidad de energía. *Ensuciamiento de membrana.		
Nano	Tecnología de	*Remoción de	*Se necesita		

filtración	separación por medio de membranas que remueve especies que se encuentran en el rango de UF y OI.	orgánicos de bajo peso molecular. *Remoción de dureza. *Remoción de sales divalentes. *Módulos compactos.	gran cantidad de energía. *Ensuciamiento de membrana. *Menos eficientes cuando se trata de sales monovalentes.		
Ósmosis inversa	Se obtiene agua tratada de agua congénita por medio de la aplicación de una diferencia de presión.	*Remoción de sales mono valentes. *Remoción de contaminantes disueltos. *Módulos compactos.	*Se requiere manejo de altas presiones. *Las trazas de crudo y aceite pueden ensuciar las membranas.		Remoción de cloruro de sodio, otras sales mono valentes y orgánicos. A medida que la concentración de SDT, OI puede remover eficientemente sales en exceso de 10 000 mg/L.

5.5 Tratamiento misceláneo

Tabla 26. Tecnologías misceláneas para el tratamiento de aguas congénitas (Isidro Angeles, 2005)

Tratamiento	Descripción breve	Ventajas	Desventajas	Efluente	Aplicación en aguas congénitas
Filtro percolador	Desarrollo de una capa microbiana en la superficie de un material empacado para degradar los contaminantes presentes en el agua.	*Barato *Tecnología limpia y simple.	*Requerimiento de oxígeno. *El filtro puede ser de largas dimensiones.	Desperdicio en forma de lodo al final del tratamiento	Remoción de sólidos suspendidos, amoníaco, boro, metales, etc. Se requiere post tratamiento para remover la biomasa
Humedales	Oxidación natural y descomposición de contaminantes por flora y fauna.	*Barato *Remoción eficiente de SDT y SST	*Tiempo de retención. *Mantenimiento *Efectos de pH y temperatura.		generada, sólidos precipitados, sólidos disueltos, etc.

Conclusiones

1. Las características de un agua congénita dependen de la ubicación del yacimiento, tiempo y zona de muestreo, por lo que no se puede dar una característica general o típica pero lo que si se puede saber son los parámetros típicamente utilizados en la caracterización los cuales son:
 - a. Temperatura y presión
 - b. Cantidad de crudo
 - c. pH
 - d. Conductividad
 - e. Dureza de carbonatos

2. La importancia de conocer las opciones de tratamiento de las aguas congénitas es debido a que la mayoría de los problemas generados por estas se generan en la producción. Los problemas se pueden agrupar de la siguiente manera:
 - a. Incrustación en las líneas y el equipo de inyección.
 - b. Corrosión en las líneas y el equipo de inyección.
 - c. Taponamiento de los yacimientos.
 - d. Microbiológico.

3. Para escoger determinado tratamiento debe primero obtenerse la caracterización específica del agua congénita asociada al pozo, determinación de las necesidades de la población próxima, características del medio ambiente, normatividad en la región, así como información de los posibles usos del efluente de tratamiento.

4. Se debe tener en claro el propósito principal del tratamiento de agua propuesto para así determinar el tren de tratamiento de acuerdo a la disposición que se le dará a los efluentes. Por ejemplo, en el anexo A se encuentra una serie de análisis de agua congénita asociada a la zona de Cantarell en Campeche, para poder determinar que tratamiento se debe aplicar en esta zona, se debería hacer un estudio de impacto ambiental como se menciona en el punto tres de esta sección y después con el análisis de laboratorio en el anexo A, plantear el tratamiento. Dicho tren de tratamiento no se presenta en este trabajo debido a los alcances del mismo, pero se abre una oportunidad para que tomando como base las tecnologías mencionadas aquí, se tome una decisión y se continúe la investigación

Anexo A

En este anexo se presentan los análisis de Stiff & Davis realizados en el Instituto Mexicano del Petróleo, los cuales se brindan de manera informativa con apoyo del Ingeniero Luis Manuel Pizano sin fines de lucro.

La información con la que se cuenta es del activo KU-MALOOB-ZAAP el cual está formado por tres pozos el primero Ku, segundo Maloob y el tercero Zaap los cuales forman parte de la zona de mayor producción de crudo en México ubicada en la zona de Cantarell en la Sonda de Campeche.

ANÁLISIS FÍSICO, QUÍMICO Y BACTERIOLÓGICO DEL AGUA.

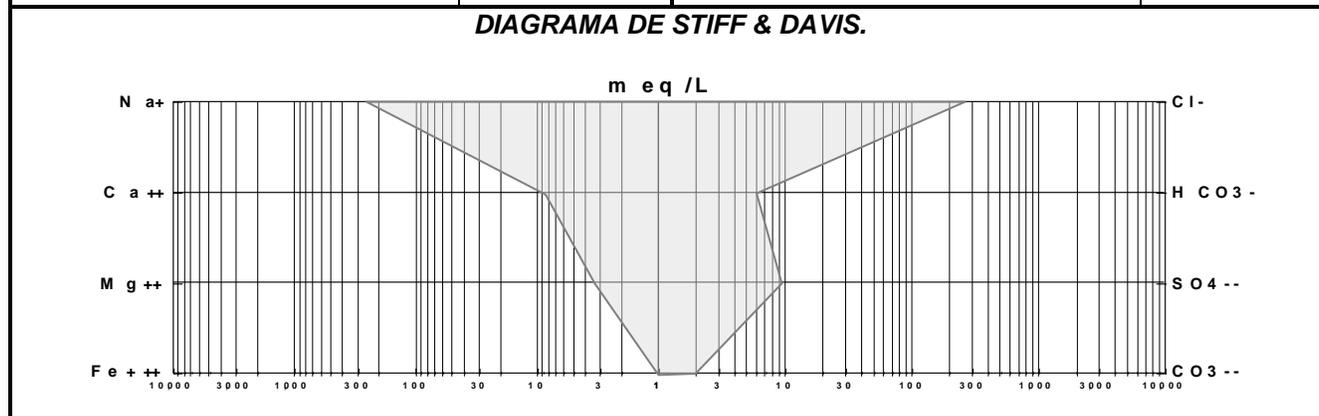
POZO: ZAAP-106 **INSTALACIÓN:** KU-M **ACTIVO:** KU-MALOOB-ZAAP
PUNTO DE MUESTREO: BAJANTE **FECHA DE MUESTREO:** 10-JUN-2004 **FECHA DE ANÁLISIS:** 31-AGO-2004

PROPIEDADES FÍSICAS.		
TEMPERATURA..... °C	GASES EN SOLUCIÓN. (mg/L)	
pH..... 7.61 @ 19.1°C	ÁCIDO SULFÚDRICO (H ₂ S).....	
DENSIDAD..... 1.0125 g/cm ³ , @ °C	BIÓXIDO DE CARBONO (CO ₂).....	
CONDUCTIVIDAD..... μmhos/cm., @ °C	OXÍGENO DISUELTO (O ₂).....	
TURBIEDAD..... 5.0 FTU		
COLOR..... 36.0 Pt-Co.		
OLOR.....		

PROPIEDADES QUÍMICAS.					
CATIONES:	(mg/L)	(meq/L)	ANIONES:	(mg/L)	(meq/L)
SODIO (Na ⁺).....	6,732.077	292.699	CLORUROS (Cl ⁻).....	10,200.00	287.32
POTASIO (K ⁺).....	0.000	0.000	SULFATOS (SO ₄ ⁼).....	450.00	9.38
CALCIO (Ca ⁺⁺).....	172.000	8.600	CARBONATOS (CO ₃ ⁼).....	60.00	2.00
MAGNESIO (Mg ⁺⁺)...	41.330	3.400	BICARBONATOS (HCO ₃ ⁼)..	366.00	6.00
HIERRO (Fe ⁺⁺).....	0.020	0.001	HIDRÓXIDOS (OH ⁻).....	0.00	0.00
MANGANESO (Mn ⁺⁺)			NITRITOS (NO ₂ ⁼).....		
BARIO (Ba ⁺⁺).....			NITRATOS (NO ₃ ⁼).....		
ESTRONCIO (Sr ⁺⁺)...			FOSFATOS (PO ₄ ⁼).....		
TOTAL;	6,945.427	304.7	TOTAL:	11,076	304.7

SÓLIDOS DISUELTOS Y EN SUSPENSIÓN.			
	(mg/L)		(mg/L)
SÓLIDOS TOTALES.....		DUREZA TOTAL como CaCO ₃	600.0
SÓLIDOS DISUELTOS TOTALES (SDT).....	18,021.43	DUREZA DE CALCIO como CaCO ₃	430.0
SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES (SST)		DUREZA DE MAGNESIO como CaCO ₃	170.0
GRASAS Y ACEITES.....		ALCALINIDAD A LA "F" como CaCO ₃	50.0
SÍLICE SOLUBLE (SiO ₂).....		ALCALINIDAD A LA "M" como CaCO ₃	400.0
ÓXIDO FÉRRICO (Fe ₂ O ₃).....		SALINIDAD como NaCl.....	
ACIDEZ como CaCO ₃		ÍNDICE DE ESTABILIDAD.....	- 0.002
		TENDENCIA.....	CORROSIVA

PROPIEDADES BACTERIOLÓGICAS.			
	(Colonia/mL)		(Colonia/mL)
BACTERIAS MESOFÍLICAS AEROBIAS.		BACTERIAS REDUCTORAS DEL SULFATO.	



OBSERVACIONES:

ANALIZÓ:

M. en C. LUIS MANUEL PIZANO GALLARDO
NOMBRE Y FIRMA

ANÁLISIS FÍSICO, QUÍMICO Y BACTERIOLÓGICO DEL AGUA.

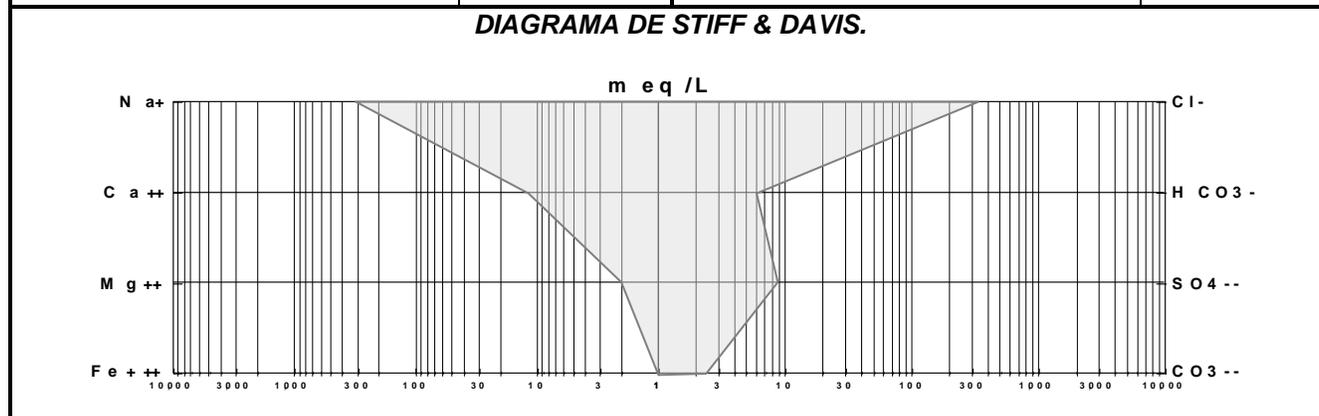
POZO: ZAAP-106 **INSTALACIÓN:** KU-M **ACTIVO:** KU-MALOOB-ZAAP
PUNTO DE MUESTREO: BAJANTE **FECHA DE MUESTREO:** 24-OCT-2004 **FECHA DE ANÁLISIS:** 18-NOV-2004

PROPIEDADES FÍSICAS.		
TEMPERATURA..... °C	GASES EN SOLUCIÓN. (mg/L)	
pH..... 8.16 @ 20.8°C	ÁCIDO SULFÚDRICO (H ₂ S).....	
DENSIDAD..... 1.0140 g/cm ³ , @ °C	BIÓXIDO DE CARBONO (CO ₂).....	
CONDUCTIVIDAD..... μmhos/cm., @ °C	OXÍGENO DISUELTO (O ₂).....	
TURBIEDAD..... 8.0 FTU		
COLOR..... 44.0 Pt-Co.		
OLOR.....		

PROPIEDADES QUÍMICAS.					
CATIONES:	(mg/L)	(meq/L)	ANIONES:	(mg/L)	(meq/L)
SODIO (Na ⁺).....	7,502.347	326.189	CLORUROS (Cl ⁻).....	11,500.00	323.94
POTASIO (K ⁺).....	0.000	0.000	SULFATOS (SO ₄ ⁼).....	425.00	8.85
CALCIO (Ca ⁺⁺).....	260.000	13.000	CARBONATOS (CO ₃ ⁼).....	72.00	2.40
MAGNESIO (Mg ⁺⁺)...	24.310	2.000	BICARBONATOS (HCO ₃ ⁼)..	366.00	6.00
HIERRO (Fe ⁺⁺).....	0.040	0.001	HIDRÓXIDOS (OH ⁻).....	0.00	0.00
MANGANESO (Mn ⁺⁺)			NITRITOS (NO ₂ ⁼).....		
BARIO (Ba ⁺⁺).....			NITRATOS (NO ₃ ⁼).....		
ESTRONCIO (Sr ⁺⁺)...			FOSFATOS (PO ₄ ⁼³).....		
TOTAL;	7,786.697	341.19	TOTAL:	12,363	341.19

SÓLIDOS DISUELTOS Y EN SUSPENSIÓN.			
	(mg/L)		(mg/L)
SÓLIDOS TOTALES.....		DUREZA TOTAL como CaCO ₃	750.0
SÓLIDOS DISUELTOS TOTALES (SDT).....	20,149.70	DUREZA DE CALCIO como CaCO ₃	650.0
SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES (SST)		DUREZA DE MAGNESIO como CaCO ₃	100.0
GRASAS Y ACEITES.....		ALCALINIDAD A LA "F" como CaCO ₃	60.0
SÍLICE SOLUBLE (SiO ₂).....		ALCALINIDAD A LA "M" como CaCO ₃	420.0
ÓXIDO FÉRRICO (Fe ₂ O ₃).....		SALINIDAD como NaCl.....	
ACIDEZ como CaCO ₃		ÍNDICE DE ESTABILIDAD.....	+ 0.6582
		TENDENCIA.....	INCRUSTANTE

PROPIEDADES BACTERIOLÓGICAS.			
	(Colonia/mL)		(Colonia/mL)
BACTERIAS MESOFÍLICAS AEROBIAS.		BACTERIAS REDUCTORAS DEL SULFATO.	



OBSERVACIONES:

ANALIZÓ:

M. en C. LUIS MANUEL PIZANO GALLARDO
NOMBRE Y FIRMA

ANÁLISIS FÍSICO, QUÍMICO Y BACTERIOLÓGICO DEL AGUA.

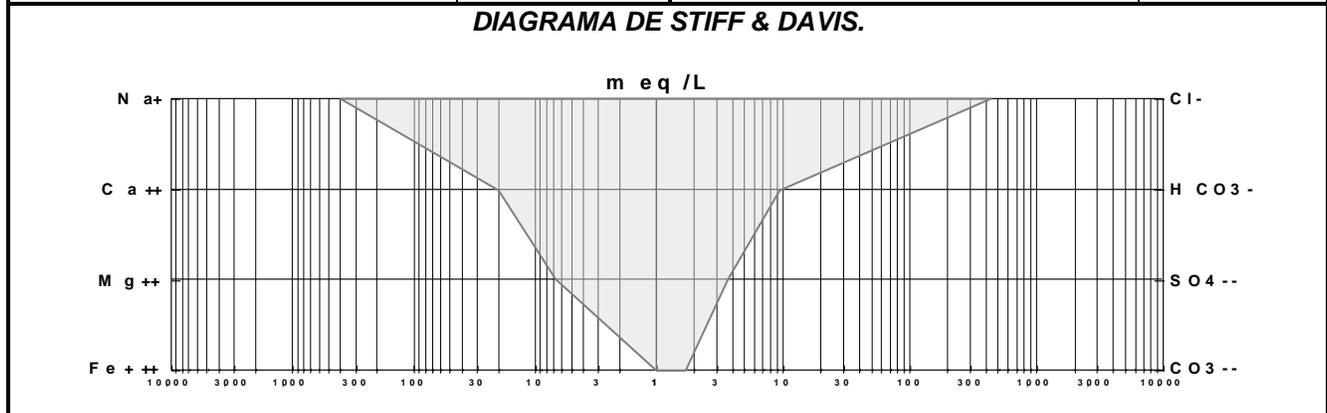
POZO: ZAAP-7DA **INSTALACIÓN:** ZAAP-C **ACTIVO:** KU-MALOOB-ZAAP
PUNTO DE MUESTREO: BAJANTE **FECHA DE MUESTREO:** 26-OCT-2004 **FECHA DE ANÁLISIS:** 18-NOV-2004

PROPIEDADES FÍSICAS.		
TEMPERATURA..... °C	GASES EN SOLUCIÓN. (mg/L)	
pH..... 7.95 @ 19.4°C	ÁCIDO SULFÚDRICO (H ₂ S).....	
DENSIDAD..... 1.0179 g/cm ³ , @ °C	BIÓXIDO DE CARBONO (CO ₂).....	
CONDUCTIVIDAD..... μmhos/cm., @ °C	OXÍGENO DISUELTO (O ₂).....	
TURBIEDAD..... 5.0 FTU		
COLOR..... 28.0 Pt-Co.		
OLOR.....		

PROPIEDADES QUÍMICAS.					
CATIONES:	(mg/L)	(meq/L)	ANIONES:	(mg/L)	(meq/L)
SODIO (Na ⁺).....	9,429.747	409.989	CLORUROS (Cl ⁻).....	15,000.00	422.54
POTASIO (K ⁺).....	0.000	0.000	SULFATOS (SO ₄ ⁼).....	175.00	3.65
CALCIO (Ca ⁺⁺).....	400.000	20.000	CARBONATOS (CO ₃ ⁼).....	48.00	1.60
MAGNESIO (Mg ⁺⁺)...	85.09	7.000	BICARBONATOS (HCO ₃ ⁼)..	561.20	9.20
HIERRO (Fe ⁺⁺).....	0.020	0.001	HIDRÓXIDOS (OH ⁻).....	0.00	0.00
MANGANESO (Mn ⁺⁺)			NITRITOS (NO ₂ ⁼).....		
BARIO (Ba ⁺⁺).....			NITRATOS (NO ₃ ⁼).....		
ESTRONCIO (Sr ⁺⁺)...			FOSFATOS (PO ₄ ⁼).....		
TOTAL;	9,914.857	436.99	TOTAL:	15,784.2	436.99

SÓLIDOS DISUELTOS Y EN SUSPENSIÓN.			
	(mg/L)		(mg/L)
SÓLIDOS TOTALES.....		DUREZA TOTAL como CaCO ₃	1,350.0
SÓLIDOS DISUELTOS TOTALES (SDT).....	25,699.06	DUREZA DE CALCIO como CaCO ₃	1,000.0
SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES (SST)		DUREZA DE MAGNESIO como CaCO ₃	3500.0
GRASAS Y ACEITES.....		ALCALINIDAD A LA "F" como CaCO ₃	40.0
SÍLICE SOLUBLE (SiO ₂).....		ALCALINIDAD A LA "M" como CaCO ₃	540.0
ÓXIDO FÉRRICO (Fe ₂ O ₃).....		SALINIDAD como NaCl.....	
ACIDEZ como CaCO ₃		ÍNDICE DE ESTABILIDAD.....	+ 0.7346
		TENDENCIA.....	INCRUSTANTE

PROPIEDADES BACTERIOLÓGICAS.			
	(Colonia/mL)		(Colonia/mL)
BACTERIAS MESOFÍLICAS AEROBIAS.		BACTERIAS REDUCTORAS DEL SULFATO.	



OBSERVACIONES:

ANALIZÓ:

M. en C. LUIS MANUEL PIZANO GALLARDO
NOMBRE Y FIRMA

ANÁLISIS FÍSICO, QUÍMICO Y BACTERIOLÓGICO DEL AGUA.

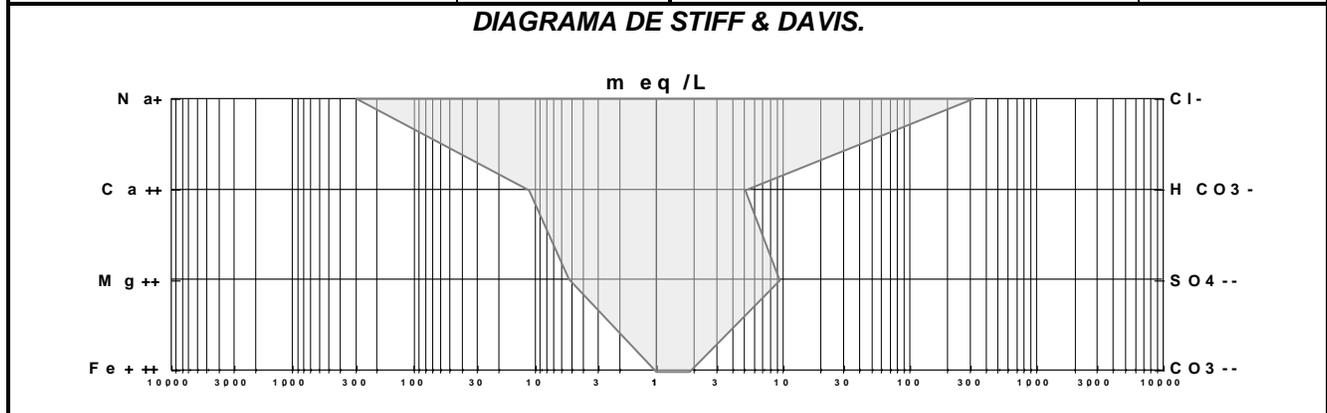
POZO: KU-10 **INSTALACIÓN:** KU-A **ACTIVO:** KU-MALOOB-ZAAP
PUNTO DE MUESTREO: BAJANTE **FECHA DE MUESTREO:** 16-OCT-2004 **FECHA DE ANÁLISIS:** 23-NOV-2004

PROPIEDADES FÍSICAS.		
TEMPERATURA..... °C	GASES EN SOLUCIÓN. (mg/L)	
pH..... 8.19 @ 19.5°C	ÁCIDO SULFÚDRICO (H ₂ S).....	
DENSIDAD..... 1.0136 g/cm ³ , @ °C	BIÓXIDO DE CARBONO (CO ₂).....	
CONDUCTIVIDAD..... µmhos/cm., @ °C	OXÍGENO DISUELTUO (O ₂).....	
TURBIEDAD..... 14.0 FTU		
COLOR..... 76.0 Pt-Co.		
OLOR.....		

PROPIEDADES QUÍMICAS.					
CATIONES:	(mg/L)	(meq/L)	ANIONES:	(mg/L)	(meq/L)
SODIO (Na ⁺).....	7,240.538	314.806	CLORUROS (Cl ⁻).....	11,200.00	315.49
POTASIO (K ⁺).....	0.000	0.000	SULFATOS (SO ₄ ⁼).....	450.00	9.38
CALCIO (Ca ⁺⁺).....	228.000	11.400	CARBONATOS (CO ₃ ⁼).....	540.00	1.80
MAGNESIO (Mg ⁺⁺)...	60.780	5.660	BICARBONATOS (HCO ₃ ⁼)..	317.20	5.20
HIERRO (Fe ⁺⁺).....	0.100	0.004	HIDRÓXIDOS (OH ⁻).....	0.00	0.00
MANGANESO (Mn ⁺⁺)			NITRITOS (NO ₂ ⁻).....		
BARIO (Ba ⁺⁺).....			NITRATOS (NO ₃ ⁻).....		
ESTRONCIO (Sr ⁺⁺)...			FOSFATOS (PO ₄ ⁼³).....		
TOTAL;	7,529.418	331.87	TOTAL:	12,507.2	331.87

SÓLIDOS DISUELTOS Y EN SUSPENSIÓN.			
	(mg/L)		(mg/L)
SÓLIDOS TOTALES.....		DUREZA TOTAL como CaCO ₃	820.0
SÓLIDOS DISUELTOS TOTALES (SDT).....	19,550.42	DUREZA DE CALCIO como CaCO ₃	570.0
SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES (SST)		DUREZA DE MAGNESIO como CaCO ₃	250.0
GRASAS Y ACEITES.....		ALCALINIDAD A LA "F" como CaCO ₃	45.0
SÍLICE SOLUBLE (SiO ₂).....		ALCALINIDAD A LA "M" como CaCO ₃	350.0
ÓXIDO FÉRRICO (Fe ₂ O ₃).....		SALINIDAD como NaCl.....	
ACIDEZ como CaCO ₃		ÍNDICE DE ESTABILIDAD.....	+ 0.5593
		TENDENCIA.....	INCRUSTANTE

PROPIEDADES BACTERIOLÓGICAS.			
	(Colonia/mL)		(Colonia/mL)
BACTERIAS MESOFÍLICAS AEROBIAS.		BACTERIAS REDUCTORAS DEL SULFATO.	



OBSERVACIONES:

ANALIZÓ:

M. en C. LUIS MANUEL PIZANO GALLARDO
NOMBRE Y FIRMA

ANÁLISIS FÍSICO, QUÍMICO Y BACTERIOLÓGICO DEL AGUA.

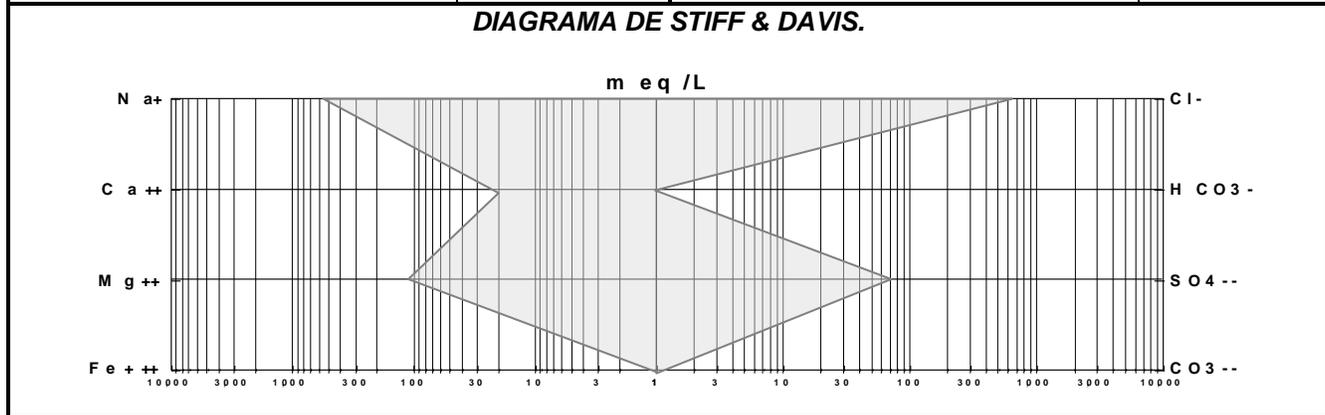
POZO: AGUA MAR **INSTALACIÓN:** KU-A **ACTIVO:** KU-MALOOB-ZAAP
PUNTO DE MUESTREO: B. CONTRAI **FECHA DE MUESTREO:** 16-OCT-2004 **FECHA DE ANÁLISIS:** 15-NOV-2004

PROPIEDADES FÍSICAS.			
TEMPERATURA..... °C			
pH..... @	8.01	@ 18.0°C	
DENSIDAD..... g/cm ³ , @		°C	
CONDUCTIVIDAD..... µmhos/cm., @		°C	
TURBIEDAD..... FTU	3.0		
COLOR..... Pt-Co.	7.0		
OLOR.....			

PROPIEDADES QUÍMICAS.					
CATIONES:	(mg/L)	(meq/L)	ANIONES:	(mg/L)	(meq/L)
SODIO (Na ⁺).....	13,521.240	587.880	CLORUROS (Cl ⁻).....	22,900.00	645.07
POTASIO (K ⁺).....	0.000	0.000	SULFATOS (SO ₄ ⁼).....	3,450.00	71.88
CALCIO (Ca ⁺⁺).....	412.000	20.600	CARBONATOS (CO ₃ ⁼).....	13.20	0.44
MAGNESIO (Mg ⁺⁺)...	1,337.050	109.950	BICARBONATOS (HCO ₃ ⁼)..	64.66	1.06
HIERRO (Fe ⁺⁺).....	0.600	0.020	HIDRÓXIDOS (OH ⁻).....	0.00	0.00
MANGANESO (Mn ⁺⁺)			NITRITOS (NO ₂ ⁻).....		
BARIO (Ba ⁺⁺).....			NITRATOS (NO ₃ ⁻).....		
ESTRONCIO (Sr ⁺⁺)...			FOSFATOS (PO ₄ ⁼³).....		
TOTAL;	15,270.89	718.45	TOTAL:	26,427.86	718.45

SÓLIDOS DISUELTOS Y EN SUSPENSIÓN.			
	(mg/L)		(mg/L)
SÓLIDOS TOTALES.....			6,530.0
SÓLIDOS DISUELTOS TOTALES (SDT).....	41,698.75		1,030.0
SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES (SST)			5,500.0
GRASAS Y ACEITES.....			11.0
SÍLICE SOLUBLE (SiO ₂).....			75.0
ÓXIDO FÉRRICO (Fe ₂ O ₃).....			
ACIDEZ como CaCO ₃			- 0.3748
			CORROSIVA

PROPIEDADES BACTERIOLÓGICAS.			
	(Colonia/mL)		(Colonia/mL)
BACTERIAS MESOFÍLICAS AEROBIAS.		BACTERIAS REDUCTORAS DEL SULFATO.	



OBSERVACIONES:

ANALIZÓ:

M. en C. LUIS MANUEL PIZANO GALLARDO
NOMBRE Y FIRMA

ANÁLISIS FÍSICO, QUÍMICO Y BACTERIOLÓGICO DEL AGUA.

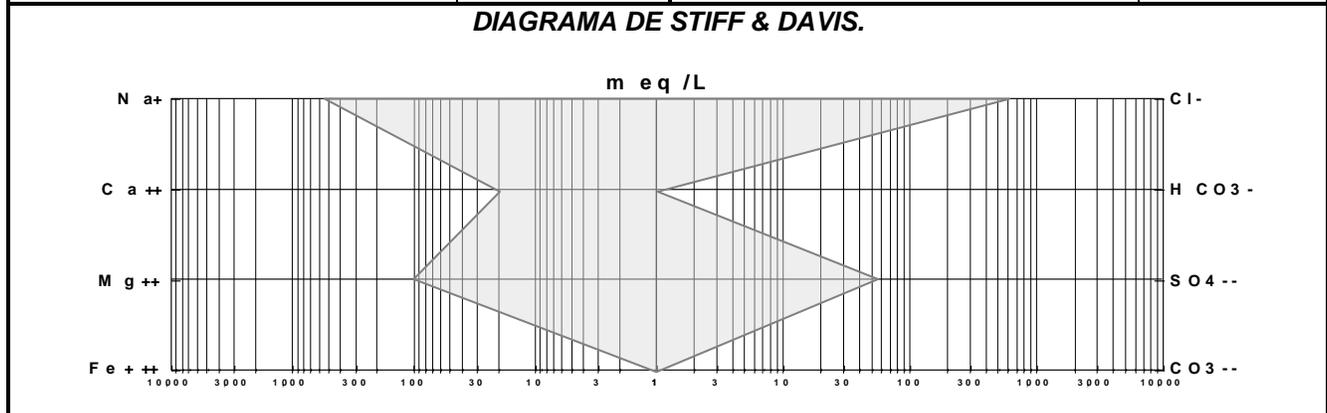
POZO: AGUA MAR **INSTALACIÓN:** ZAAP-C **ACTIVO:** KU-MALOOB-ZAAP
PUNTO DE MUESTREO: B. CONTRAI **FECHA DE MUESTREO:** 26-OCT-2004 **FECHA DE ANÁLISIS:** 15-NOV-2004

PROPIEDADES FÍSICAS.		
TEMPERATURA..... °C		GASES EN SOLUCIÓN. (mg/L)
pH..... 8.21 @ 18.0°C		ÁCIDO SULFHÍDRICO (H ₂ S).....
DENSIDAD..... 1.0268 g/cm ³ , @ °C		BIÓXIDO DE CARBONO (CO ₂).....
CONDUCTIVIDAD..... µmhos/cm., @ °C		OXÍGENO DISUELTUO (O ₂).....
TURBIEDAD..... 0.0 FTU		
COLOR..... 0.0 Pt-Co.		
OLOR.....		

PROPIEDADES QUÍMICAS.					
CATIONES:	(mg/L)	(meq/L)	ANIONES:	(mg/L)	(meq/L)
SODIO (Na ⁺).....	12,496.705	543.335	CLORUROS (Cl ⁻).....	21,600.00	608.45
POTASIO (K ⁺).....	0.000	0.000	SULFATOS (SO ₄ ⁼).....	2,750.00	57.29
CALCIO (Ca ⁺⁺).....	388.000	19.400	CARBONATOS (CO ₃ ⁼).....	15.60	0.52
MAGNESIO (Mg ⁺⁺)...	1,273.840	104.760	BICARBONATOS (HCO ₃ ⁼)..	75.64	1.24
HIERRO (Fe ⁺⁺).....	0.130	0.005	HIDRÓXIDOS (OH ⁻).....	0.00	0.00
MANGANESO (Mn ⁺⁺)			NITRITOS (NO ₂ ⁻).....		
BARIO (Ba ⁺⁺).....			NITRATOS (NO ₃ ⁻).....		
ESTRONCIO (Sr ⁺⁺)...			FOSFATOS (PO ₄ ⁼).....		
TOTAL;	14,158.675	667.5	TOTAL:	24,441.24	667.5

SÓLIDOS DISUELTOS Y EN SUSPENSIÓN.			
	(mg/L)		(mg/L)
SÓLIDOS TOTALES.....		DUREZA TOTAL como CaCO ₃	6,210.0
SÓLIDOS DISUELTOS TOTALES (SDT).....	38,599.92	DUREZA DE CALCIO como CaCO ₃	970.0
SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES (SST)		DUREZA DE MAGNESIO como CaCO ₃	5,240.0
GRASAS Y ACEITES.....		ALCALINIDAD A LA "F" como CaCO ₃	13.0
SÍLICE SOLUBLE (SiO ₂).....		ALCALINIDAD A LA "M" como CaCO ₃	88.0
ÓXIDO FÉRRICO (Fe ₂ O ₃).....		SALINIDAD como NaCl.....	
ACIDEZ como CaCO ₃		ÍNDICE DE ESTABILIDAD.....	- 0.0901
		TENDENCIA.....	CORROSIVA

PROPIEDADES BACTERIOLÓGICAS.			
	(Colonia/mL)		(Colonia/mL)
BACTERIAS MESOFÍLICAS AEROBIAS.		BACTERIAS REDUCTORAS DEL SULFATO.	



OBSERVACIONES:

ANALIZÓ:

M. en C. LUIS MANUEL PIZANO GALLARDO
NOMBRE Y FIRMA

Bibliografía

1. Norma Oficial Mexicana NOM-143-SEMARNAT-2003, que establece las especificaciones ambientales para el manejo de agua congénita asociada a los hidrocarburos.
2. Veil, et. Al., A white paper describing produced water from production of crude oil, natural gas and Coal Bed Methane, Redweik,US. Department of Energy, National Energy Technology Laboratory, January 2004
3. Reynolds, Produced water and associated issues, Oklahoma Geological Survey – Open File Report 6-2003, 2003
4. Nacheva et. Al, Tratamiento de aguas de la desalación del petróleo para su aprovechamiento en inyección al subsuelo, Revista AIDIS, Vol.1, No.2, 2007, Instituto de Ingeniería, UNAM <http://revistas.unam.mx/index.php/aidis/article/viewArticle/14391>
5. Avan et Al., Testing the limits in Extreme Well Conditions Oilfield Review Autumn 2012: 24,no3, Schlumberger, 2012
6. Lee and Neff, Produced Water: Environmental Risks and Advances in Mitigation Technologies, Springer, 2011.
7. EPA, Analytical Methods- Method 1664, Revision A:N-hexane extractable material (HEM: Oil and Grease) and Silica Gel treated N-hexane extractable material (SGT-HEM; non polar material) by extraction and gravitometry, United States Environmental Protection Agency, EPA-821-R-98-002; February 1999 <http://water.epa.gov/scitech/methods/cwa/oil/1664.cfm>
8. Luis Manuel Pizano, Manejo y tratamiento de las aguas de proceso de deshidratación de crudo, Instituto Politécnico Nacional en conjunto con el Instituto Mexicano del Petróleo, 2011.

9. Finding value in Formation Water, Abdou, Carnegie, et. Al, Oilfield Review Spring 2011:23, no.1, Schulmberger 2011
10. Scaling in Geothermal Heat Pump systems, Rafferty, US Department of energy, Idaho Operations Office, Oregon Institute of Technology, July 1999. <http://geoheat.oit.edu/otl/scaleghp.pdf>
11. Dow Chemical , Calcium carbonate scale prevention, Tech manual excerpt FILMTEC Membranes, Form No. 609-02017-1004 http://msdssearch.dow.com/PublishedLiteratureDOWCOM/dh_003e/0901b8038003e635.pdf?filepath=/609-02017.pdf&fromPage=GetDoc
12. G.P.A Estudios y Servicios Petroleros, hoja técnica 40 http://www.oilproduction.net/files/GPA-Nota%2040_Carbonatos.pdf
13. EMERSON, Conductivity article http://www2.emersonprocess.com/siteadmincenter/PM%20Rosemount%20Analytical%20Documents/Liq_ADS_43-018.pdf
14. Turner and William, Report of Treatment of Power Plant Waste water using Aquasonics® Rapid Spray Evaporation™ process, , <http://www.waterbank.com/Newsletters/nws43.html>
15. Daniel, Langhus, Patel, Technical Summary of oil and gas produced water treatment technologies, Tulsa OK, March 2005
16. DOW, Case history, A Low Cost Option to Reduce Sodium Levels in Coal Bed Methane Coproduced Wastewater using DOWEX G-26 Resin, Form No. 177-02016-904.
17. PFC Roundup, Produced Water Treatment: Yesterday, Today and Tomorrow, February 2012, Oil and Gas Facilities.
18. Challenges in Reusing Produced Water, SPE White Paper, 2011
19. Ducanson, Managing Produced Water from Coalbed Methane Operations: A critical examination of Alberta's Regulatory

Framework, Universidad de Calgary, Facultad de Derecho, Febrero de 2010

20. Yang, et. Al., Characteristics of CoalBed Produced Water in the Process of Coal Bed Development, Environmental Engineering and Management Journal , Key Lab of Computational Geodynamics of Chinese Academy of Sciences, College of Earth Science, Graduate University of Chinese Academy Sciences, Beijing, 100049, China, Julio 2011
21. Johnson, et. Al, Chemical, Physical, and Risk Characterization of Natural Gas Storage Produced Waters, , Springer Science + Business Media, January 2008
22. Navarro, Tratamiento de aguas congénitas de extracción de pozos mediante ferrato de potasio. Planta de dos Bocas, Veracruz, UNAM, Facultad de Ingeniería, 2008
23. Rodgers and Castle, Characteristics of produced waters and biogeochemical processes for effective management using constructed wetland treatment systems, , Clemson University, Clemson, SC29634, USA
24. Cakmackr, Desalination of produced water from oil production fields by membrane processes, Environmental Energy Department, Istanbul Technical University, Turkey, January 15th 2007
25. Isidro Angeles, Tecnologías para el tratamiento de aguas congénitas , Facultad de Química UNAM, 2013.