
Diseño de procesos de desalinización de aguas subterráneas salobres mediante simulación química de electrodiálisis reversible, con propósitos de consumo humano

G. E. Dévora-Isiordia*, R. González-Enríquez y J. Saldivar

Instituto Tecnológico de Sonora, 5 de Febrero 818 Sur, Colonia Centro, Cd. Obregón, Sonora, México C.P. 85000.

Recibido 10 Octubre 2008, Revisado 12 Noviembre 2008, Aceptado 17 Diciembre 2008

Salty groundwater desalinization processes design by reversible electrodiálisis chemical simulation, for human consumption

Abstract

In the Valle del Mayo region, some communities do not have access to fresh water sources but have the option to extract brackish water from subterranean sources. The objective was to apply a mathematical model simulating RED to estimate actual design parameters and evaluate the feasibility of implementation in two communities: Adolfo López Mateos and Las Águilas. Methodology consisted of processing data on the physicochemical properties of water from communities with salinity problems. This data was then used on Ionics enterprise's WatSys 2.1 and MathWorks, Inc.'s MatLab 7.0.1 software, which were used to simulate the optimal parameters of the product water and the size of the RED plant, respectively. The results are the determination of the removal efficiency parameters and the calculation of a real design that will supply the selected communities with an appropriate volume of water fit for human consumption, up to the year 2030. The treated water was compared with the parameters demanded by drinking water safety regulations. The most severe case of salinity presented itself in Las Águilas, with 18,200 mg l⁻¹ TDS on intake and was simulated until it complied with the Mexican NOM-0127-SSA-1994 potable water parameters.

Keywords: Desalination, treatment, modeling, physicochemical.

Resumen

En el Valle del Mayo al noroeste de México, algunas comunidades rurales costeras no disponen de agua dulce, pero pueden extraer aguas salobres subterráneas. En este trabajo se aplicó un modelo matemático de Simulación de EDR con el objetivo de estimar parámetros de diseño real y evaluar la factibilidad de implementarlos en dos comunidades con problemas de salinidad: Adolfo López Mateos y Las Águilas. La metodología consistió en procesar datos fisicoquímicos de agua de las comunidades, con esos datos se utilizó el software WatSys 2.1 de Ionics y MatLab 7.0.1 de MathWorks, Inc. los cuales se usaron para simular los parámetros óptimos del agua producto del proceso, el tamaño de la planta de EDR respectivamente, además de la determinación de los parámetros de eficiencia de remoción y se estableció el cálculo de un diseño real que abastecerá a las comunidades seleccionadas en volumen y calidad apropiada para el consumo humano, con proyección hasta el año 2030. Al agua tratada se le comparó con parámetros que exigen las normas de agua potable. El caso más crítico de salinidad se presentó en Las Águilas con 18,200 mg l⁻¹ STD en la entrada y se simuló hasta que cumplió con la norma mexicana de agua potable NOM-0127-SSA-1994.

Palabras clave: Desalinización de aguas salobres, Tratamiento de agua, modelación geoquímica, simulación matemática.

Introducción

* Autor de correspondencia

E-mail: edevora@itson.mx; Tel. +52 644-4100900; Fax: + 52 644-4100910

El agua es indispensable para la vida y por ello el hombre históricamente ha buscado establecerse en lugares que le ofrecen mayor acceso, comodidades y facilidades para el desarrollo de sus diferentes actividades. Pero no siempre ha podido sostener su desarrollo, debido a que quizá no fueron los sitios más adecuados para su desenvolvimiento (Valencia, 2000), ya sea por problemas de calidad o de cantidad de agua. En el caso de mala calidad, se requiere de la selección del tratamiento de acondicionamiento más adecuado, por ejemplo, para la potabilización del agua para el consumo humano deben tenerse en cuenta diversos aspectos, como el nivel de riesgo a la salud de la población, el consumo energético, los costos y la eficacia, entre otros (Powell, 1986 y Weber, 1979). En el caso de cantidad de agua disponible, Leitz (1976) menciona que una opción importante, son los procesos de tratamiento de aguas, como la purificación y desalinización.

La provisión de agua potable por la desalación de agua de mar generalmente es considerada una ventaja a pesar del tiempo de construcción y los gastos de operaciones de plantas, (Al-Sofi, 2001). Esto es sobre todo verdadero cuando las fuentes convencionales de agua dulce son ausentes o no pueden ser explotadas sin el daño ambiental, (Hopner, 2002). Sin embargo debe de cuidarse la calidad del agua de alimentación debido al ensuciamiento de membranas por alto contenido de microorganismos, es por ello que la capacidad de producción de una planta de desalación baja a la mitad de la capacidad de producción de diseño debido al aumento de presión diferencial y disminución de la cantidad de agua de producto (Fujiwara, 2008).

La desalación de agua marinas y salobres se presenta actualmente como la principal apuesta tecnológica para satisfacer la demanda de agua de las regiones costeras (Morton, 1998). Además con el aumento de población y con el aumento de demanda de agua la tecnología de desalación ha tomado un gran repunte como alternativa de solución a los problemas de desabasto de agua, (Wangnick, 2000).

La Electrodialisis es un proceso de desalinización que consiste en una separación electroquímica, donde los iones son transferidos a través de membranas de intercambio iónico por medio de un campo de corriente continua (Belfort, 1984 y Mani,

1991). La electrodialisis permite purificar agua a costos de operación relativamente bajos comparados con otros procesos como el de la Osmosis Inversa, ya que la operación de la planta consiste en aplicación de energía eléctrica y la vida útil de las membranas es alto comparado con otras membranas de operación y uso similar (Lacey, 1972).

La Electrodialisis hoy en día es utilizada ampliamente para la desalinización de agua salobre y en algunas zonas del mundo, es el proceso principal para la producción de agua potable (Leitz, 1981).

Las características de la EDR permiten obtener elevadas recuperaciones de agua en cualquier circunstancia por lo que se ha convertido en un sistema fundamental para aquellos usuarios en los que el recobro es un factor prioritario (Torrent, 1998). Según Scott (1990) el nivel de salinidad del agua salobre puede variar entre 1000 a 10000 mg l⁻¹ de SDT y este factor en particular afecta a la economía relativa de la Electrodialisis ya que el agua potable generalmente debe de tener un parámetro de salinidad menor a 500 mg l⁻¹ de SDT. Según Devora (2006) para el caso de diseños de procesos de desalinización con agua salobres lo más recomendado es utilizar plantas desalinizadoras basadas en la técnica de electrodialisis reversible, ya que esta tecnología de membranas soportan calidades de agua del rango de aguas salobres, mientras que para aguas salinas y de mar lo recomendado es utilizar sistemas de Osmosis Inversa.

Un estudio geofísico realizado por González y Canales (2004) para el Municipio de Huatabampo reporta que algunas poblaciones que están muy próximas a la costa manifiestan problemas por efecto de salinidad ya que algunas están sobre la interfase subterránea de agua dulce-agua de mar ocasionada por un frente natural de intrusión salina y sus rangos de salinidad están en el rango de agua salobre. Las poblaciones que están en estas condiciones son: Las Águilas y Adolfo López Mateos (Fig. 1 y 2).

Para las figuras 1 y 2, los cuadros de las figuras indican la profundidad a la cual se hizo el estudio geofísico resistivo en metros sobre el nivel del mar (msnm). Al lado derecho de la figura la barra

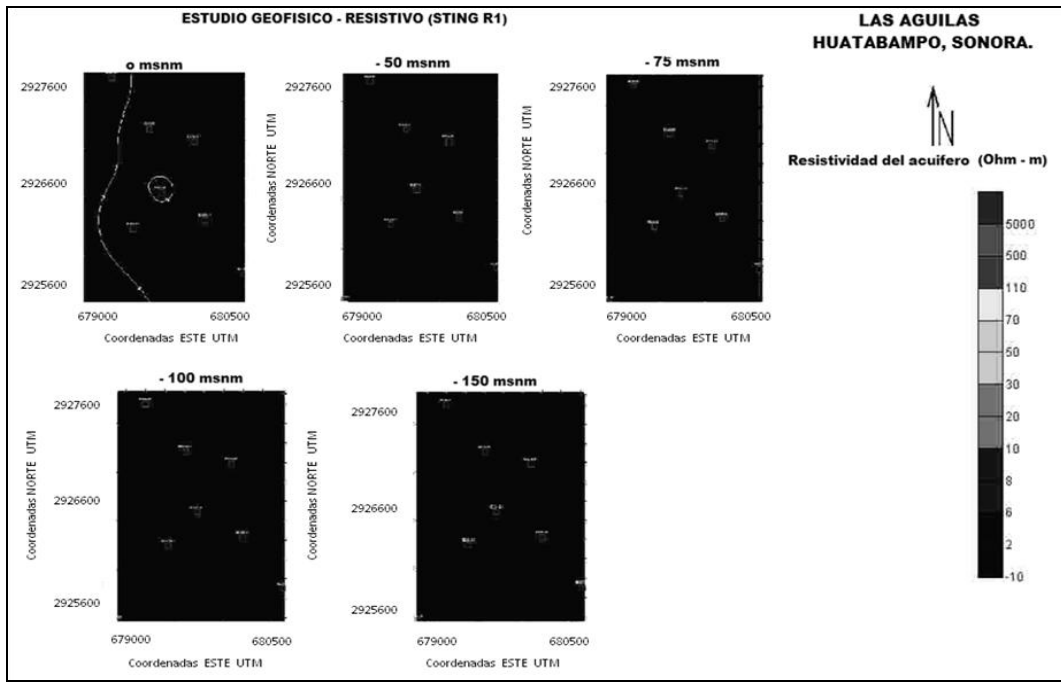


Figura 1. Estudio Geofísico realizado entre 0 y -150 msnm en Las Águilas.

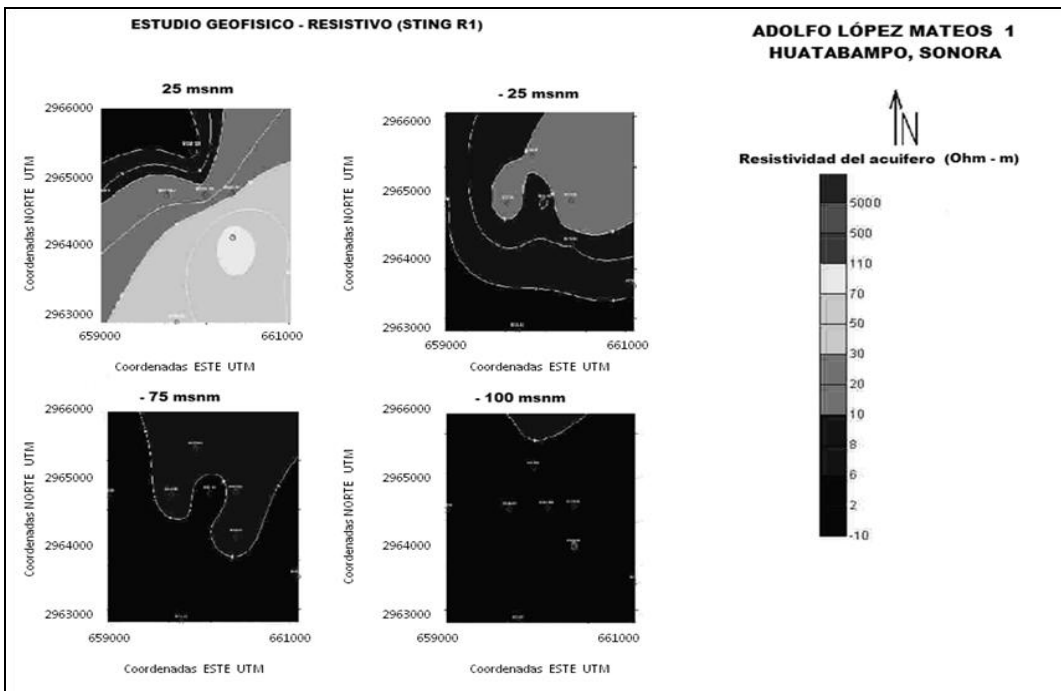


Figura 2. Geofísica realizada entre 25 y -100 msnm en Adolfo L. Mateos.

muestra diferentes tonalidades, que significa la resistividad que registra el aparato de medición STING-R1, en ohm-m, que matemáticamente es el inverso de la conductividad eléctrica, un parámetro indicativo de salinidad en cuerpos de agua.

Por lo anterior se propuso aplicar un modelo matemático de Simulación Química de EDR, que permita el acondicionamiento del agua y con ello se estimen los parámetros de diseño real que permita evaluar la factibilidad de implementarlos en comunidades con problemas de salinidad en sus fuentes de abastecimiento.

Material y Métodos

Se utilizó una planta virtual de electrodiálisis reversible (Simulador Watsys 2.1) la cual modela la siguiente instrumentación: Membranas permeables selectivas catiónicas y aniónicas, electrodos de titanio con carga positiva-negativa y fuente de

poder. Para la determinación del tamaño de las plantas de electrodiálisis se utilizó el Software de simulación MatLab 7.0.1. Para el procesamiento de datos de muestreo en campo se utilizó una Computadora LANIX Pentium IV, con 80 GB de Disco duro, 512 MB de Memoria RAM y 3.00 GHz de velocidad.

Para el muestreo de campo se utilizó un muestreador tipo Bailer y recipientes de 1.0 l, en todo el procedimiento se usaron las recomendaciones del AWRRC (1995) contenidas en el Manual de Campo para el muestreo de la calidad del agua.

Para la recolección de muestras se elaboró un programa de muestreo y se colectaron muestras según el manual de campo para el muestreo de la calidad del agua (AWRRC, 1995) para lo cual se acudió a los sitios de muestreo (Fig. 3) en las poblaciones de Las Águilas y Adolfo López Mateos, en el municipio de Huatabampo (Tabla 1).



Figura 3. Zona de estudio en 2 poblados de Huatabampo, Sonora, México.

Tabla 1. Pozos muestreados en el período de Julio de 2005.

Pozo muestreado	Fecha de muestreo	Coordenadas (UTM)	
		Este	Norte
Las Águilas	Sep-13-2005	660280	3006753
Adolfo López Mateos 1	Sep-13-2005	650782	3004265
Adolfo López Mateos 2	Sep-13-2005	640244	3004251

Se muestrearon 3 pozos en total, 2 en el poblado Adolfo López Mateos y uno en el poblado Las Águilas.

Para el estudio de factibilidad del tratamiento de electrodiálisis, se tomaron muestras según la zona de estudio y se analizaron aniones y cationes mayores, además de conductividad eléctrica y Sólidos Totales Disueltos (Tabla 2), utilizando métodos analíticos estandarizados (APHA, 1998).

A los poblados de Las Águilas y Adolfo López Mateos se les determinó la demanda de agua actual y futura, de acuerdo a información recopilada de censos de población realizados por INEGI en los años 1980, 1990, 2000 y 2005 (Tabla 3).

Para estimar la demanda potencial de agua potable se utilizó un consumo estándar per cápita de 200 l(hab·d)⁻¹ (Chauveau, 2004).

Con los resultados fisicoquímicos realizados al agua, se utilizó el software de simulación WatSys 2.1, el cual generó datos de salida como balance entre cationes y aniones, el consumo de energía para cada alimentación de agua, se elaboró gráfico de regresión entre los parámetros de STD (mg l⁻¹) contra consumo de energía (kWh año⁻¹) así como el grado de remoción para cada ion, mediante la siguiente fórmula.

$$\text{Remoción (\%) = } \frac{X - Y}{X} \times 100$$

Donde:

X= Concentración agua de alimentación,

Y= Concentración último arreglo

El simulador WatSys 2.1 de Ionics está programado para diseñar procesos de desalinización, a partir de datos de entrada provenientes de análisis fisicoquímicos, un ejemplo es el que se muestra en la figura 4, que tiene 1 tren y 3 módulos de acondicionamiento.

Para determinar el número de horas de operación de la planta de EDR para cada población, se utilizó la demanda de agua potable de cada población según el período a proyectar. Para ello se utilizó las siguientes consideraciones: 350 días trabajados efectivos en el año, debido a mantenimientos, circuitos de limpieza y días festivos. Además de tener en cuenta que cada módulo ofrece 2 litros por segundo.

Para optimizar la inversión inicial de la planta de Electrodiálisis Reversible de acuerdo al número de habitantes y de acuerdo a la demanda de agua potable, se utilizó el Software de simulación MatLab 7.0.1 para encontrar el tamaño adecuado de la planta en cuanto a trenes y módulos que satisfagan las necesidades de cantidad y de calidad de agua, y se optimice la inversión de la planta de tratamiento, teniendo como principal restricción el crecimiento de la demanda de agua potable.

Para esto se programó un algoritmo de simulación con la sintaxis de los parámetros centrales como población y calidad del agua de entrada. Una vez conocido el tamaño de la planta, se propuso un

Tabla 2. Parámetros analizados al agua y métodos analíticos.

Parámetro Analizado	Formula Química	Método Analítico utilizado ¹	Límite Permitido
			NOM-127-SSA1-1994 (mg l ⁻¹)
Conductividad Eléctrica	CE	NMX-AA-093-SCFI-2000	1850
Sólidos Totales Disueltos	STD	1030 F (5)	1000
Calcio	Ca ⁺⁺	3500-Ca D	NA
Magnesio	Mg ⁺⁺	3500-Mg E	NA
Sodio	Na ⁺	3500-Na D	200
Potasio	K ⁺	3500-D K	NA
Carbonatos	CO ₃ ⁼	2320 B	NA
Bicarbonatos	HCO ₃ ⁻	2320 B	NA
Sulfatos	SO ₄ ⁼	4500-SO ₄ ⁼ C	400
Cloruros	Cl ⁻	4500-Cl B	250

Tabla 3. Datos de crecimiento poblacional para el período 1980-2005 para las poblaciones de Las Águilas y Adolfo López Mateos.

Población	Censo de Población y vivienda			
	1980	1990	2000	2005
Adolfo López Mateos	262	240	229	223
Las Águilas	177	121	84	72

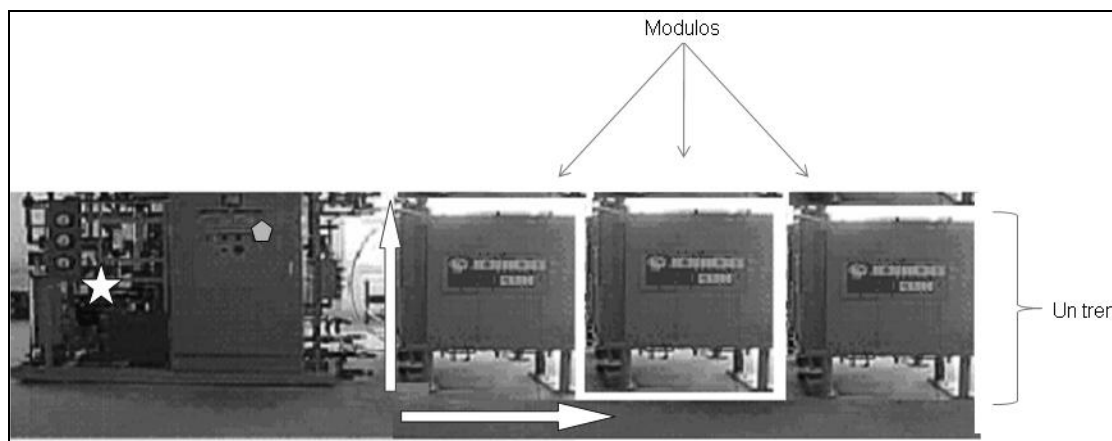


Figura 4. Esquema de la planta de EDR con 1 tren y 3 módulos.

Los datos de operación del proceso de simulación son los siguientes:

- ↑ Cada tren y 3 módulos de trabajo aportan un caudal de producto de 6 l s^{-1} .
- ⇒ Cada uno de los módulos aportan la eliminación de sales a través de membranas de intercambio iónico por etapas, y donde el rango de remoción del simulador opera en un 80-89 %.
- ◡ El consumo de energía oscila entre los $1\text{-}2.5 \text{ kWh m}^{-3}$
- ☆ El agua de alimentación tiene una concentración de entrada de $5,000\text{-}9,000 \text{ mg l}^{-1}$ de Sólidos Totales Disueltos (STD).

esquema de diseño de un tren de tratamiento, para el acondicionamiento de diferentes rangos de concentración de cuerpos de agua, que se utilizarán como fuentes de abastecimiento, de tal forma que la planta de tratamiento contiene pre-tratamiento, tratamiento y post-tratamiento.

Resultados y discusión

Los resultados de la demanda de agua potable y del crecimiento poblacional se listan en la tabla 4, proyectados en intervalos a cada 5 años.

Se observa un decremento en la demanda de agua potable ocasionado por el crecimiento poblacional negativo, con tasa anual de -0.47% para Adolfo López Mateos y -3.85% para Las Águilas, lo anterior puede ser atribuido a una emigración por falta de agua potable en la zona.

Si se instala una planta de electrodiálisis como la que aquí se propone, el efecto de la tendencia podría cambiar, logrando con ello restablecer integralmente las actividades de las poblaciones estudiadas.

Los resultados generados por el simulador WatSys 2.1, para acondicionar la calidad del agua de las diferentes fuentes de abastecimiento, se muestran

en las tablas 5 y 6.

Para la tabla 5, se observa un grado de remoción dentro del rango de 68.5 a 98.8% en los parámetros fisicoquímicos del agua de alimentación. Para los parámetros de Sólidos Totales Disueltos, Calcio, Cloruros y Sodio, dado que no están dentro de la norma NOM-127-SSA-1994 con un arreglo de 1 tren y 3 módulos, es necesario colocar más módulos en serie para lograr que todos los parámetros estén dentro de los límites permisibles de la Norma de agua potable. El arreglo óptimo y que presenta el mayor grado de remoción corresponde a un tren con cinco módulos (Fig. 5).

El consumo de energía proporcionado por el Simulador WatSys 2.1 de Ionics es de 5.0 kWh m^{-3} para un dato de entrada de $23,296 \text{ mg l}^{-1}$ de STD que corresponde al pozo del poblado de Las Águilas.

Para la tabla 6, se observa un grado de remoción dentro del rango de 66.5 a 93.8% en los parámetros fisicoquímicos del agua de alimentación. Para los parámetros de Sólidos Totales Disueltos, Calcio, Cloruros y Sodio, dado que no están dentro de la norma NOM-127-SSA-1994 con un arreglo de 1 tren y 2 módulos, es necesario colocar más módulos en serie para lograr que todos los parámetros estén

Tabla 4. Crecimiento poblacional y demanda de agua potable proyectados al año 2030, para Adolfo López Mateos y Las Águilas.

Poblado	2005		2010		2015		2020		2025		2030		Tasa crecim.
	Hab	m ³ año ⁻¹	Hab	m ³ año ⁻¹	Hab	m ³ año ⁻¹	Hab	m ³ año ⁻¹	Hab	m ³ año ⁻¹	Hab	m ³ año ⁻¹	
A. López M.	223	16,279	217	15,841	211	15,403	205	14,965	199	14,527	193	14,089	-0.47
Las Águilas	72	5,256	62	4,526	53	3,869	45	3,285	38	2,774	32	2,336	-3.85

Tabla 5. Efectividad de remoción del equipo simulado por WatSys 2.1 de Ionics, para Las Águilas, municipio de Huatabampo.

Parámetro	Agua de alimentación mg l ⁻¹	Agua tratada por el simulador WatSys 2.1			% de Remoción
		1 tren y 3 módulos	1 tren y 4 módulos	1 tren y 5 módulos	
		mg l ⁻¹	mg l ⁻¹	mg l ⁻¹	
Ca	** 1,403	* 268	* 213	147	89.5
Mg	1,033	204	126	85	91.7
Na	** 6,207	* 1,160	* 365	190	96.9
CO ₃	70	30	26	22	68.5
HCO ₃	509	81	65	59	88.4
Cl	** 13,210	* 2,394	* 850	150	98.8
STD	** 23,296	* 4,859	* 1,357	835	96.4

** Parámetros fuera de NOM-127-SSA1-1994 que requiere tratamiento de desalinización.

* Parámetros fuera de NOM-127-SSA1-1994 que requiere ampliar el tren a un mayor No. de módulos.

Tabla 6. Efectividad de remoción del equipo simulado por WatSys 2.1 de Ionics, para Adolfo López Mateos 1, municipio de Huatabampo.

Parámetro	Agua de alimentación mg l ⁻¹	Agua tratada por el simulador WatSys 2.1		% de Remoción
		1 tren y 2 módulos	1 tren y 3 módulos	
		mg l ⁻¹	mg l ⁻¹	
Ca	** 220	85	36	83.6
Mg	243	120	35	85.5
Na	** 1,494	* 420	180	87.9
CO ₃	20	14	6.7	66.5
HCO ₃	265	102	35	86.7
Cl	** 2,355	* 796	240	89.8
STD	** 8,330	* 2,500	514	93.8

** Parámetros fuera de NOM-127-SSA1-1994 que requiere tratamiento de desalinización.

* Parámetros fuera de NOM-127-SSA1-1994 que requiere ampliar el tren a un mayor No. de módulos.

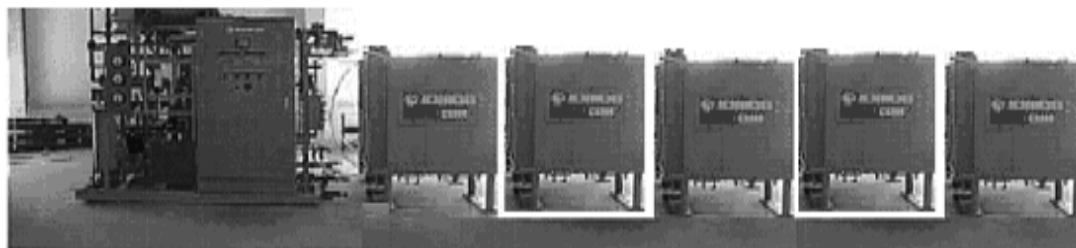


Figura 5. Proceso óptimo para el agua de Las Águilas, 1 tren con 5 módulos.

dentro de los límites permisibles de la norma mexicana de agua potable. El arreglo óptimo y que presenta el mayor grado de remoción corresponde a un tren con tres módulos, como el que se indica en la figura 6.

Para un agua de alimentación de 8,330 mg l⁻¹ de STD, presentó un consumo de energía de 2.5 kWh m⁻³ que corresponde al pozo del poblado Adolfo López Mateos 1. Para un agua de alimentación de 3,070 mg l⁻¹ de STD, presentó un consumo de energía de 1.5 kWh m⁻³ que corresponde al pozo del poblado Adolfo López Mateos 2.

Con los tres datos de STD de cada muestreo y su consumo de energía, se obtiene el gráfico de STD

(mg l⁻¹) contra consumo de energía (kWh m⁻³) que se presenta en la figura 7. Se obtiene una r² de 0.9938 indicando un grado de ajuste lineal aceptable.

Los resultados generados por el simulador WatSys 2.1, para acondicionar la calidad del agua de las diferentes fuentes de abastecimiento, se muestra en la tabla 7, donde se expresa el número de módulos, las horas de operación y consumo de energía por planta de EDR, para las poblaciones de Las Águilas y Adolfo López Mateos.

Una vez conocido el tamaño de la planta, el consumo de energía eléctrica por período y los gastos de abastecimiento para las poblaciones de



Figura 6. Tren óptimo para el pozo 1 de Adolfo López Mateos, 1 tren con 3 módulos.

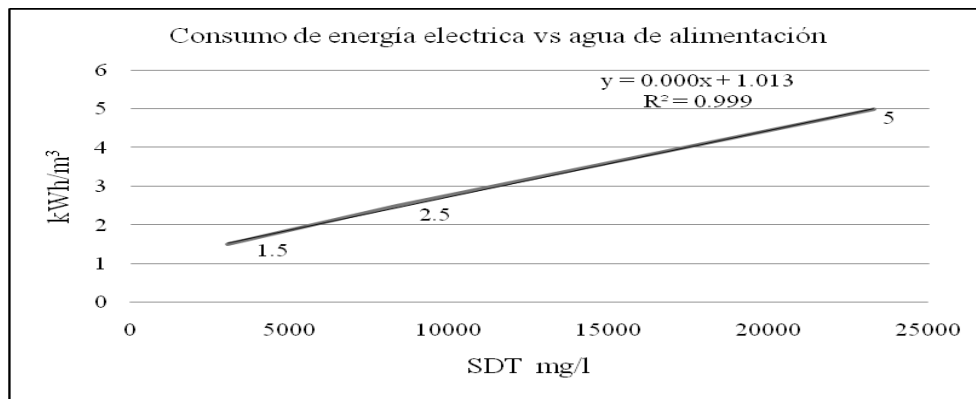


Figura 7. Ajuste de STD (mg l⁻¹) contra Consumo de energía (kWh m⁻³).

Tabla 7. Propuesta de planta con cantidad de módulos, horas de operación diarias y consumo anual de energía, según el período proyectado.

Poblado	Capacidad de la planta	2005		2010		2015		2020		2025		2030	
		hd ⁻¹	kWh año ⁻¹	hd ⁻¹	kWh año ⁻¹	hd ⁻¹	kWh año ⁻¹	hd ⁻¹	kWh año ⁻¹	hd ⁻¹	kWh año ⁻¹	hd ⁻¹	kWh año ⁻¹
Las Águilas	1 tren y 5 módulos	0.5	25,200	0.5	21,700	0.4	18,550	0.4	15,750	0.3	13,300	0.2	11,675
A. López Mateos 1	1 tren y 3 módulos	2.2	39,025	2.1	37,975	2.0	36,925	1.9	35,875	1.9	34,825	1.8	33,775
A. López Mateos 2	1 tren y 5 módulos	2.2	23,415	2.1	22,785	2.0	22,155	1.9	21,525	1.9	20,895	1.8	20,265

Las águilas y Adolfo López Mateos, se propuso el diseño de un tren de tratamiento completo, el cual consiste de unidades de pre y post-tratamiento (Fig.8).

La planta de Electrodialísis Reversible (EDR) incluye equipos de pre-tratamiento y post-tratamiento. Los equipos de pre-tratamiento ayudan a eliminar cuerpos indeseados en el agua, además de favorecer el tiempo de vida de las membranas de EDR, por lo que dentro del pre-tratamiento se incluye un Filtro de Carbón activado, el cual consiste en hacer pasar el agua a través de un tanque o filtro con carbón activado, ya sea en bloque o granular. Este medio es sumamente eficiente para remover el cloro, mal olor y sabor del agua.

También cuenta con Filtro para retener sólidos suspendidos, el cual consiste en retener las partículas más pequeñas que el filtro de carbón no puede atrapar, está constituido por una piel extremadamente fina sobre la superficie de un sustrato más poroso y más grueso, permite atrapar partículas menores a 0.1 micrómetro.

Por otra parte, el Suavizador es un equipo que ablanda el agua por el proceso de intercambio iónico, es decir, substituye minerales duros (calcio, magnesio, sílice, etc.), por suaves como sodio a través de su carga eléctrica. El efluente atraviesa

una cama de resina con carga iónica, removiendo los minerales contenidos en el fluido (Kemmer, 1989). Posteriormente, las aguas pre-tratadas entran en mejores condiciones al proceso de desalinización propuesto con anterioridad, incrementando la remoción de sales por la técnica de EDR.

Los equipos de post-tratamiento tienen como fin asegurar la calidad del agua en toda la red de consumo de la población, para esto se consideró un proceso de desinfección constituido por un clorador y un Ozonador. El clorador, es un desinfectante activo, debido a su costo, confiabilidad y facilidad de manejo. La cloración exitosa del agua depende no solo en el método de aplicación sino también en la dosificación adecuada, la cual es determinada por la cantidad de cloro adicionado y la cantidad de material presente en el agua de consumo (Arboleda, 2000). Según la NOM-127-SSA-1994, se requiere una concentración de cloro residual de 0.2 mg l^{-1} en las tomas más alejadas de la red de agua potable.

Se considero un equipo alternativo de desinfección para cuando el clorador este en mantenimiento, este es un Generador de Ozono, que se utiliza para la desinfección de agua ya que descompone agresivamente a los organismos vivos sin dejar residuos químicos que puedan afectar la salud o el sabor del agua. El Ozono se genera a partir del aire u oxígeno aplicando una descarga de alto voltaje

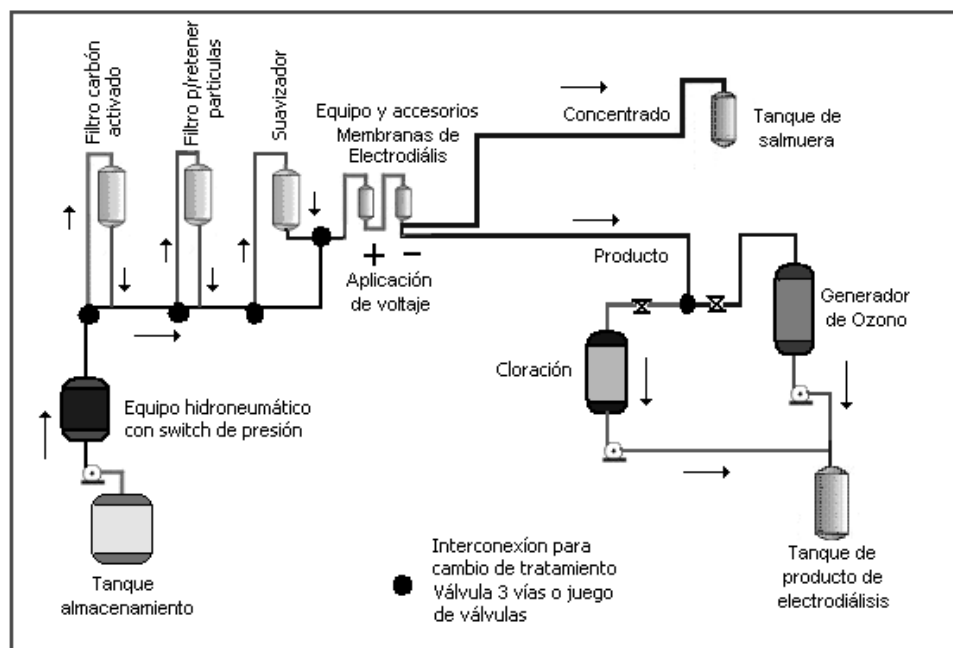


Figura 8. Planta piloto de tratamiento de agua por Electrodialísis Reversible.

para convertir parte del oxígeno (O₂) a Ozono (O₃). El gas ozonizado se mezcla con el agua para disolverse. La desinfección más eficiente se logra con 0.4 mg l⁻¹ sostenido por 4 minutos.

Conclusiones

Para el poblado de Las águilas se requiere una planta con 1 tren y 5 módulos durante el período de 2005 a 2030, con una operación de 0.5 hd⁻¹ y un consumo de energía eléctrica de 25,200 kWh año⁻¹ en el período del 2005, mientras que para el año del 2030 se tendrá una operación de 0.2 hd⁻¹ equivalente a un consumo de energía de 11,675 kWh año⁻¹.

Para el pozo del Poblado de Adolfo López Mateos 1 se requiere una planta con 1 tren y 3 módulos durante el período de 2005 a 2030, con una operación de 2.2 hd⁻¹ y un consumo de energía eléctrica de 39,025 kWh año⁻¹ en el período del 2005, mientras que para el año del 2030 se tendrá una operación de 1.8 hd⁻¹ equivalente a un consumo de energía de 33,775 kWh año⁻¹.

Para el pozo del Poblado de Adolfo López Mateos 2 se requiere una planta con 1 tren y 3 módulos durante el período de 2005 a 2030, con una operación de 2.2 hd⁻¹ y un consumo de energía eléctrica de 23,415 kWh año⁻¹ en el período del 2005, mientras que para el año del 2030 se tendrá una operación de 1.8 hd⁻¹ equivalente a un consumo de energía de 20,265 kWh año⁻¹.

Para la población de Adolfo López Mateos la mejor opción para el tratamiento de aguas salobres corresponde al pozo ubicado en Adolfo López Mateos 2, ya que con el mismo ritmo de operación de la planta, se tiene un menor consumo de energía eléctrica, haciendo más rentable su proceso de desalinización.

La planta piloto desaladora propuesta consiste en equipos de pretratamiento, membranas catiónicas y aniónicas para desalinizar agua de mar por la técnica de Electrodiálisis Reversible y equipos de postratamiento para asegurar la calidad final en el usuario final del agua producto de la planta desalinizadora.

Agradecimientos

Para el desarrollo de este trabajo se obtuvieron recursos del ITSON aportados por el proyecto de

vinculación: Estudios Geofísicos y de Calidad del Agua con clave 1B4330304014, a cargo del Maestro Rodrigo González Enríquez y adscrito a la Dirección de Recursos Naturales, en el Departamento de Ciencias del Agua y Medio Ambiente. Cd. Obregón, Sonora, México.

También se conto con apoyo económico del proyecto: Funcionamiento, análisis de la problemática y contaminación generada en plantas desalinizadoras ubicadas en la república mexicana, con el fin de determinar la normatividad aplicable a este rubro. Proveniente de fondo sectorial de investigación y desarrollo sobre el agua, fondos financiados por CONACYT y CONAGUA en la convocatoria: S0013-2006-1, en el fondo: S0013 y solicitud: 48804.

Bibliografía

- Al-Sofi MAK, 2001. Seawater desalination - SWCC experience and vision. *Desalination* (1-3): 121-139.
- American Water Works Association, (1998). Agua, su calidad y tratamiento. Kedem, O. and Y, Maoz (Ed.), Tratamiento del agua por procesos de membrana principios, procesos y aplicaciones. Ed. Mc Graw-Hill, Madrid. pp 320-398.
- American Water Works Association, (1998). Electrodiálisis. Schoeman, J. and M. Thompson (Ed.), Tratamiento del agua por procesos de membrana principios, procesos y aplicaciones. Ed. Mc Graw-Hill, Madrid. pp 521-643.
- APHA.AWWA.WPCF. 1998. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 20th Ed. American Public Health Association, American Water Works Association Water Pollution Control Federation, USA. 800 p.
- Arboleda, V. 2000. Teoría y práctica de la purificación del agua. Ed. McGraw-Hill, Colombia. 250 p.
- AWRRC, 1995. Field Manual For Water Quality Sampling. Arizona Water Resources Research Center. Tucson, AZ. USA. pp 6-37.
- Belfort G. (1984). Synthetic membrane processes, fundamentals and water applications. Ed. Academic, Nueva Cork. 287 pp.
- Chauveau, L. 2004. Riesgos ecológicos. ¿Una amenaza evitable? México: Ediciones Larousse S.A.
- Dévora-Isiordia, G.E., 2006. Diseño de procesos de desalinización de aguas subterráneas salobres mediante simulación química de electrodiálisis reversible, con propósitos de consumo humano. Tesis de Maestría en Ingeniería en Administración de Recursos Hidráulicos. Instituto Tecnológico de Sonora. México.
- Domenico, P.A. and F.W. Schwartz., (1998). Physical and chemical hydrogeology. Editorial Jonh Wiley, Nueva York, 509 pp.
- Fujiwara, N. 2008. Elimination of biological fouling in seawater reverse osmosis desalination plants. *Desalination*, 227 (2008) 295-305.
- González, R. y A.G. Canales. (2004). Actualización del estudio geohidrológico de cuenca del Río Mayo (Elaboración de

- estudios geofísicos) en varias localidades del municipio de Navojoa y Huatabampo en el Estado de Sonora. Informe Técnico del Instituto Tecnológico de Sonora elaborado para la Comisión Estatal del Agua con Registro: CEA-ED-CO-EST-04-038. Cd. Obregón, Sonora, México. 200 p.
- Hopner, T. and S. Lattemann, 2002. Chemical impacts from seawater desalination plants — a case study of the northern Red Sea. *Desalination* 152 (2002) 133–140
- Kemmer, F. 1989. *Manual del agua; Naturaleza, tratamiento y aplicaciones*. Editorial McGraw-Hill, México, D.F. 325 p.
- Lacey, R. E. and S. Loeb. (1972). *Industrial processing with membranes*. Ed. Wiley interscience, Nueva York. 320 p.
- Leitz, F. (1976). Desalination of seawater by Electrodiálisis. 5th international symposium on fresh water the sea. Alghero, Italy. 3:105-114.
- Leitz, F. (1981). Electrodiálisis as separation process. *Journal of membrana science*, 46:15-25.
- Mani, K. (1991). Electrodiálisis water splitting technology. *Journal of membrana science*, 58:117-138.
- Morton, A., Callister, I.K., Wade, N.M., Environmental impacts of seawater distillation and reverse osmosis processes, *Desalination*, 108, 1998, pp. 1-10.
- Powell, S., (1986). *Water Conditioning for Industry*. Editorial McGraw-Hill, Nueva York. 631 p.
- Scott, K., (1990). *Membrane separation technology*. Editorial McGraw-Hill, Oxxford. 837 p.
- Sporn, P. (1996). *Fresh water from saline waters: The political social, engineering and economic aspects of desalination*. Ed. Mc Graw-Hill, Oxford. 450 pp.
- Stumm, W. and J. Morgan. (1981). *Aquatic chemistry and introduction emphasizing chemical equilibria in nature water*, 2nd Ed. Ed. Wiley interscience, Nueva York. 780 pp.
- Torrent, A. (1998). *Desalinización por Electrodiálisis reversible, Características del proceso y casos prácticos*. (www.ionics.com.)
- Valencia, J. (2000). *Teoría y práctica de la purificación del agua*. Editorial Mc Graw-Hill, Bogota, 793 pp.
- Wangnick, K. 2000. *IDA Worldwide Desalting Plants Inventory Report No. 16, IDA*.