

---

## Desalación de aguas salobres por Electrodiálisis Reversible: Viabilidad para rescate de pozos abandonados en Sonora, México.

German-Eduardo Dévora-Isiordia<sup>1\*</sup>, Adriana Robles-Lizárraga<sup>2</sup>, Luis-Alberto Lares-Rangel<sup>3</sup>,  
Juan-Carlos Valdez-Valdez<sup>3</sup>, Ilsa-Yaraceli Torres-Valenzuela<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Ciencias del Agua y Medio Ambiente

<sup>2</sup>Programa de Maestría en Ciencias en Recursos Naturales

<sup>3</sup>Programa Educativo de Ingeniero Químico

Instituto Tecnológico de Sonora, 5 de febrero sur, C.P. 85000, Cd. Obregón, Sonora, México.

Artículo recibido el 4 de noviembre de 2019 y aceptado el 22 de noviembre de 2019

---

*Brackish water desalination by Reversible Electrodialysis: Viability to rescue abandoned wells in Sonora Mexico.*

### Abstract

Currently, a large part of the wells for agricultural use located in the state of Sonora are overexploited, which generates a high degree of saline intrusion and abandonment by nearby communities. The following article proposes electrodialysis and reverse electrodialysis as an alternative to conserve these wells and counteract water scarcity. To carry out the study, an electrodialysis equipment composed of 20 cationic membranes and 20 anionic membranes was operated, using saline solutions at different concentrations and applying voltages of 10V and 20V, depending on whether the experiment was electrodialysis (ED) or reverse electrodialysis (RED). The ED test was performed with a 2,300 and 4,300 ppm solution at 10 and 20V, respectively, and it was reported that the higher the applied voltage, the shorter the desalination time and the greater the removal efficiency. Equations were also obtained to predict the behavior of the tests at later times. In the RED test, a saline solution of 3,000 and 5,000 ppm was used at 20V, in which it was observed that the efficiency of the RED was higher compared to the ED and the concentration factor turned out to be higher for the solution with greater concentration. It can be concluded that desalination is a real and viable alternative to combat water scarcity and the recovery of abandoned wells.

*Key words:* Desalination, Electrodialysis, Water Scarcity, Saline Intrusion, Wells

### Resumen

Actualmente, gran parte de los pozos de uso agrícola localizados en el estado de Sonora se encuentran sobreexplotados, lo que genera un alto grado de incrustación salina y abandono por parte de las comunidades cercanas. El siguiente artículo propone a la electrodiálisis y la electrodiálisis reversible como una alternativa para conservar estos pozos y contrarrestar la escasez de agua. Para la realización del estudio se operó un equipo de electrodiálisis compuesto por 20 membranas catiónicas y 20 membranas aniónicas, utilizando soluciones salinas a diferentes concentraciones y aplicando voltajes de 10V y 20V, dependiendo si el experimento era electrodiálisis (ED) o electrodiálisis reversible (EDR). La prueba con ED se realizó con una solución de 2,300 y 4,300 mg/L a 10 y 20V, respectivamente, y se reportó que, a mayor voltaje aplicado, menor era el tiempo de desalinización y mayor era la eficiencia de remoción. También se obtuvieron ecuaciones para predecir el comportamiento de los ensayos a tiempos posteriores. En la prueba de EDR se utilizó una solución salina de 3,000 y 5,000 mg/L a 20V, en la cual se consiguió observar que la eficiencia de la EDR fue mayor en comparación a ED y el factor de concentración resultó ser mayor para la solución de

---

\*Autor de correspondencia

Email: german.devora@itson.edu.mx

ISSN 2594-0384 (Electrónica)

concentración más elevada. Se puede concluir que la desalinización es una alternativa real y viable para combatir la escasez de agua y recuperación de pozos abandonados.

*Palabras claves:* Desalinización, Electrodialisis, Escasez de agua, Intrusión salina, Pozos.

## Introducción

El agua es considerado un compuesto de gran importancia para la vida cotidiana, y para la realización de todas las actividades que se realizan en nuestro día a día, como los procesos industriales, producción agrícola, ganadera, entre otros, así como también es un factor influyente para promover la economía de un país. Sin embargo, el tamaño de la población ocasiona grandes esfuerzos para abastecer de agua a todos, incluyendo a los sectores productivos, por ello la preocupación por la escasez del vital líquido, se ha convertido en un problema mundial y cada día se encuentran más dificultades por falta de agua dulce y procesos que contaminan e impactan al medio ambiente, así como la seguridad alimentaria (Dévora *et al.*, 2012).

En Sonora, los problemas de disponibilidad del recurso hídrico en materia de agricultura, se deben principalmente a que la región se encuentra en una zona árida, con acuíferos que presentan problemas de sobreexplotación e intrusión salina, lo cual provoca altos niveles de concentración de sales en los pozos (Medina *et al.*, 2002). Tan solo en la región suroeste de la entidad, existen más de 400 pozos agrícolas abandonados debido a esta problemática, ya que, utilizar este recurso para riego, ocasiona daños en las propiedades del suelo y en el desarrollo vegetativo del cultivo (Dévora *et*

*al.*, 2018).

Por otra parte, en la región centro y norte del estado de Sonora, Según el censo realizado por CONAGUA de pozos del Río Zanjón realizado en el estudio del año de 2007, en esta subcuenca existían 540 captaciones de agua subterránea. (CONAGUA, 2015). Un estudio realizado por Medina (2003) registró conductividad eléctrica vertical (CEV) en una red de monitoreo de 10 pozos abandonados por alta salinidad, ubicados a lo largo de la línea de costa de Hermosillo, Sonora. Los datos de los resultados de cationes se encuentran en la tabla 1 donde el ion sodio (Na<sup>+</sup>) es el más predominante con concentraciones de 85.01 hasta 225.5 mg/L en el pozo La Yaqui y San Daniel respectivamente en Caborca, Sonora.

Por lo anterior, la desalinización de aguas salobres se presenta como una alternativa para la recuperación de pozos agrícolas abandonados por alta salinidad o intrusión salina. El proceso consiste en separar la sal del agua salobre y/o salina con el uso de sistemas por membrana o de cambio de fases. La Electrodialisis (ED), la Electrodialisis Reversible (EDR) y Ósmosis inversa (OI) son procesos de desalinización por membranas que ayudan a la obtención de agua dulce potable, para su empleo en usuarios municipales e industriales. Este proceso apoya en la conservación de los recursos hídricos actuales y la recuperación de

**Tabla 1. Datos de las concentraciones de cationes en mg/L y µS/cm.**

No.	Pozos	Ca (mg/L)	CE (µS/cm)	Mg (mg/L)	CE (µS/cm)	Na (mg/L)	CE (µS/cm)
1	Jawey 1	19.39	30.11	8.43	13.09	138.5	215.06
2	Jawey 2	194.4	301.86	47.24	73.35	120.4	186.96
3	Don Manuel	53.26	82.70	35.57	55.23	154.6	240.06
4	Sta. Patricia	33.74	52.39	22.14	34.38	141.4	219.57
5	Campo Nuevo 1	41.29	64.11	25.35	39.36	128.9	200.16
6	Campo Nuevo 2	39.46	61.27	24.22	37.61	122.6	190.37
7	Campo Norte	40.2	62.42	36.86	57.24	173.5	269.41
8	San Daniel	92.06	142.95	68.17	105.85	224.5	348.60
9	La Yaqui	90.77	140.95	19.56	30.37	85.01	132.00
10	Sta. Minerva	55.89	86.79	11.38	17.67	135.1	209.78

Fuente: (Duarte, 2014).

pozos abandonados por alta salinidad o intrusión salina, como el caso de estudio en el Estado de Sonora (Armas, 1998).

La desalinización mediante ED es un proceso electroquímico para la separación de iones del agua a través de membranas polares desde una solución a otra, con la influencia de una diferencia de potencial eléctrico utilizada como fuerza impulsora (Kabay *et al.*, 2003; Strathmann, *et al.*, 2004; Lechuga, Rodríguez y Lloveras, 2007; Sadzadeh y Mohammadi, 2008; Valerdi Pérez, 2011). En EDR, se alteran periódicamente las polaridades de los electrodos de manera que los flujos de agua cambian temporalmente de sentido, pasando a recibir agua depurada aquellos conductos que transportaban el concentrado y al revés. Este método elimina el riesgo de formación de precipitados, incrustaciones y obstrucción de las membranas, ya que el cambio periódico del sentido del flujo del agua colabora en la limpieza de conducciones y membranas, además evita la aparición de limos y otros depósitos en la planta (figura 1).

La electrodiálisis es principalmente usada en plantas de escala baja a mediana, con capacidades menor a 100 m<sup>3</sup>/d a poco más de 20,000 m<sup>3</sup>/d. El éxito de la electrodiálisis se observa en mayor medida cuando se desaliniza agua con concentración de sales totales menores a 10,000 mg/L como el caso de los pozos en Sonora; sin embargo fuentes de alimentación con salinidades mayores cercanas al agua de mar o salmueras es preferible usar ósmosis inversa. En

este contexto ED y EDR son atractivas por el bajo costo de producción, sistemas más pequeños de fácil instalación y por aprovechamiento del recurso salobre de pozos abandonados (Strathmann, *et al.*, 2004; Dévora *et al.*, 2012). El objetivo de este estudio, es operar un sistema de Desalinización, mediante la comparación entre Electrodiálisis y Electrodiálisis Reversible, para encontrar la relación salinidad de alimentación-consumo energético que reduzca la escasez de agua y aprovechamiento de pozos abandonados por alta salinidad.

## Materiales y métodos

### Zona de estudio

El experimento se realizó en Latitud: 28.6, Longitud: -111.517 28° 36' 0" Norte, 111° 31' 1" Oeste en Ciudad Obregón, Sonora, México, en el Laboratorio de Investigación de Desalación de aguas marinas con empleo de Energías Renovables (figura 2).

Preparación de muestras de agua de alimentación  
Se prepararon dos diferentes pruebas a nivel laboratorio con concentraciones de 2,300 y 3,300 mg/L de sólidos disueltos totales (SDT) para primera prueba; y de 3,000 y 5,000 mg/L de SDT para segunda prueba, mezclando sal sintética de marca instant ocean (con las mismas características que el agua de mar) y agua de red. Las cantidades a mezclar se determinaron mediante la siguiente ecuación:

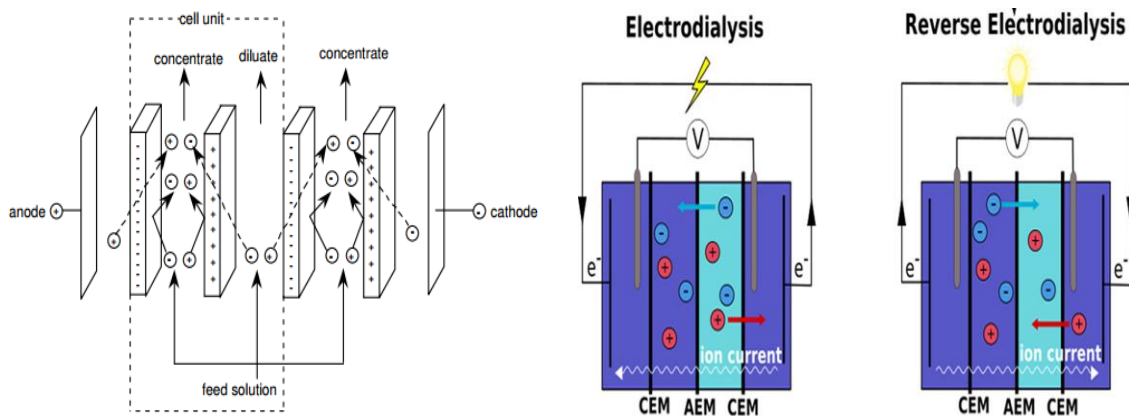


Figura 1. Diagrama del principio de Electrodiálisis y Electrodiálisis Reversible.  
Fuente: Strathmann, et al., 2004.

$$C1V1+C2V2=C3V3 \quad (1)$$

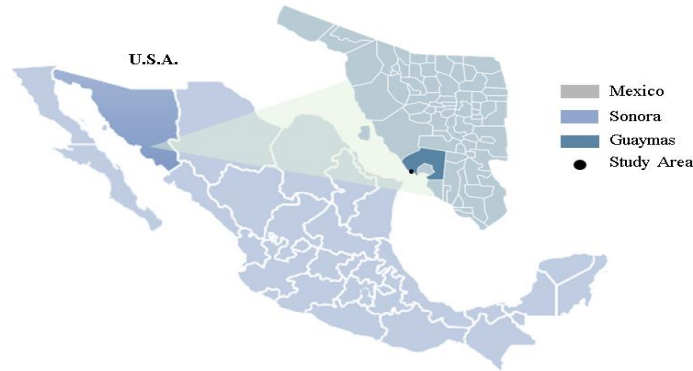
Donde:

- C1: concentración del agua de red (mg/L de SDT);
- C2: concentración del agua de mar (mg/L de SDT);
- C3: concentración del agua de alimentación (mg/L de SDT);
- V1: volumen del agua de red (L);
- V2: volumen del agua de mar (L);
- V3: volumen del agua de alimentación (L);

*Descripción del equipo de desalinización por membrana*

Para realizar las pruebas de desalinización de agua salobre se utilizó un equipo ED-EDR de 1 LPM. El sistema cuenta con 20 membranas catiónicas, 20

membranas aniónicas y 20 separadores de la empresa GE-Ionics, tres bombas centrífugas de 0.1HP, arreglo de tuberías de pvc de 0.5 pulgadas y 10 válvulas para la circulación del flujo y obtención de muestras respectivamente, 3 rotámetros con lecturas hasta 20 L/min. Las placas que dividen a las membranas cationicas, anionicas y separadores son de Titanio, donde se aplica el voltaje del experimento. También se utilizó un rectificador controlador de carga para parámetros específicos: voltaje nominal: 220 v/110v, máx. corriente: 30 A, máx. voltaje ajustable: 20v Modelo BX-Precision. Los tanques producto, electrodo y concentrado son de 3 L (figura 3).



**Figura 2. Zona de estudio en Sonora, México.**  
Fuente: Robles (2019).



**Figura 3. Equipo de Electrodiálisis- Electrodiálisis Reversible**

#### Retrolavado del sistema

Se realizó un retrolavado al equipo para garantizar la confiabilidad de los resultados, a modo de evitar contaminación entre cada experimento, se vertió un litro de agua destilada a una concentración de 2 mg/L de SDT en los tanques de producto, electrodo y concentrado, se encendió cada una de las tres bombas durante 5 minutos. Al final de la recirculación del lavado se drenó cada tanque. Esta operación se repitió entre experimentos y cuantas veces se requirió.

#### Operación del sistema de desalinización por membrana

Se realizó dos pruebas con el equipo de electrodiálisis (ED). La primera consistió en evaluar el efecto del voltaje aplicado al sistema y el tiempo de desalinización. Para ello se alimentó un agua salobre de 2,300 mg/L operado a 10V y 1A. Se comparó contra un agua salobre de 4,300 mg/L operado a 20V y 1A. La segunda prueba consistió en evaluar el efecto entre el tiempo de desalinización y la concentración del agua de alimentación en 3,000 y 5,000 mg/L, para ello se operó el equipo a 20V y 1A de manera constante.

#### Medición de calidad del agua

Para conocer la calidad del agua de alimentación se utilizó un equipo de medición multiparamétrico YSI 556. Estos parámetros fueron conductividad eléctrica (mS/cm), sólidos disueltos totales (mg/L), pH y temperatura (°C), oxígeno disuelto (mg/L). Para medición de viscosidad (kg/m-s) y densidad (kg/m<sup>3</sup>) se utilizó instrumentación de laboratorio como el viscosímetro de Ostwald. El agua producto y rechazo, se muestreó en intervalos de 3 a 5 minutos y se midió sólo la conductividad eléctrica (mS/cm), sólidos disueltos totales (mg/L) y caudal (L/min).

#### Parámetros de control del proceso

Los parámetros medidos para control del proceso fueron eficiencia del proceso (%), factor de concentración, rechazo de sales (%) y conversión (%) Kucera (2015) ver ecuaciones 2, 3, 4 y 5. Además para conocer la confiabilidad del experimento y tiempo de desalinización respecto a la salinidad de alimentación se utilizó ajuste de regresión R2 en cada prueba que permita proyectar cualquier salinidad y conocer con ello el requerimiento energético.

La eficiencia de los experimentos se estimó mediante la razón de las sales removidas y las sales contenidas inicialmente:

$$\text{Ef. del proceso (\%)} = \frac{\text{SDT}_{\text{inicial}} - \text{SDT}_{\text{final}}}{\text{SDT}_{\text{inicial}}} \times 100 \quad (2)$$

Donde:

SDT<sub>inicial</sub>: Concentración de sales en agua de alimentación (mg/L);

SDT<sub>final</sub>: Concentración del tanque producto al final del experimento (mg/L);

El rechazo de sales se estimó mediante la razón de las sales removidas y las sales contenidas inicialmente:

$$\text{Rechazo de sales (\%)} = \frac{\text{SDT}_{\text{inicial}} - \text{SDT}_{\text{producto}}}{\text{SDT}_{\text{inicial}}} \times 100 \quad (3)$$

Donde:

SDT<sub>inicial</sub>: Concentración de sales en agua de alimentación (mg/L);

SDT<sub>producto</sub>: Concentración de sales en agua producto (mg/L);

El factor de concentración es la medida de cuánto se concentró la solución almacenada en el tanque de rechazo respecto a la contenida en el tanque de alimentación; la expresión utilizada fue la siguiente:

$$F_c = \frac{\text{SDT}_{R \text{ Final}}}{\text{SDT}_{\text{inicial}}} \quad (4)$$

Donde:

SDT<sub>inicial</sub>: Concentración de sales en agua de alimentación (mg/L);

SDT<sub>R, final</sub>: Concentración del agua rechazo al final del experimento (mg/L);

El porcentaje de conversión es el volumen de agua que es obtenido como producto o el porcentaje de agua recuperado, se obtiene a través de la ecuación siguiente:

$$\text{Conversión (\%)} = \frac{Q_p}{Q_a} \times 100 = \frac{Q_p}{Q_r + Q_p} \times 100 \quad (5)$$

Donde:

Q<sub>p</sub>: Caudal de permeado (L/min);

Q<sub>a</sub>: Caudal de alimentación (L/min);

Q<sub>r</sub>: Caudal de rechazo (L/min);

## Resultados y discusión

### Calidad del agua

La calidad del agua que se utilizó en el experimento, se muestra en la tabla 2.

Los parámetros fisicoquímicos del agua de alimentación corresponden a calidad típica del agua de pozo con alta salinidad, estos datos coinciden con lo reportado por (Valero, 2001).

### Prueba 1 en el proceso de desalinización ED

Los resultados de la prueba 1 de un agua de alimentación de 2,300 y 4,300 mg/L de SDT operado a 10V-1A y de 20V-1A, se muestran en las tablas 3 y 4 respectivamente.

Las tablas 3 y 4 muestran un decremento gradual en la concentración del agua producto y una disminución en el agua de rechazo a medida que transcurre el tiempo, dado por el transporte de iones durante el paso del agua por las membranas. Un experimento similar pero realizado con una solución con plomo fue hecho por Gherasim, *et al.*, (2014). En dicha prueba se reportó un comportamiento similar, donde la concentración de la solución de rechazo comienza a aumentar paulatinamente y la

concentración de la solución producto disminuye aproximadamente a la misma tasa. Las diferencias entre gráficos se deben a la cantidad de intervalos de tiempo estudiados.

Se realizó un análisis de regresión lineal a la concentración de SDT a través del tiempo para obtener una ecuación con  $R^2$  que permita extrapolar concentraciones de sales en tiempos posteriores. Ver figura 4 y 5.

La figura 4 muestra una confiabilidad aceptable de  $R^2=0.9712$ , mientras que la figura 5 muestra una confiabilidad menos aceptable de  $R^2=0.907$ , debido al cambio de concentración inicial de 2,300 a 4,300 mg/L de SDT se muestra un cambio abrupto de concentración en los primeros tres minutos, sin embargo, a pesar de ello, la eficiencia de remoción y el rechazo de sales fue mayor en la prueba de mayor concentración y voltaje. Lo anterior coincide con un estudio realizado por Feijoo, *et al.*, (2018) quien observó que la desalinización por electrodiálisis de  $Co^{+2}$ ,  $Mn^{+2}$ ,  $Mg^{+2}$  y  $Cr^{+3}$  decrecía a medida que aumentan las veces que se recircula el agua salina por el equipo y que las membranas cargadas eléctricamente retienen iones de forma lineal durante los primeros minutos del

**Tabla 2. Calidad fisicoquímica en el agua de alimentación.**

Tipo de agua	T (°C)	CE (µS/cm)	SDT (mg/L)	OD (mg/L)	pH	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Viscosidad (kg/m s)
Salobre	22.3	5,270	3,393.8	1.22	6.26	976	2.108

**Tabla 3. Desalinización por ED de 2,300 mg/L a 10 volts y 1 Ampere**

Tiempo (min)	Agua producto			Agua rechazo		
	CE (µS/cm)	SDT (mg/L)	Caudal (L/min)	CE (µS/cm)	SDT (mg/L)	Caudal (L/min)
0	3,624	2334	0	302	195.0	0
3	2,994	1928	2.5	428	275.6	3.1
7	2,773	1785	2.2	837	539.1	3.0
10	2,390	1539	2.25	1,136	731.5	3.0
14	1,919	1235.8	2.25	1449	933.1	3.0

**Tabla 4. Desalinización por ED de 4,300 mg/L a 20 volts y 1 Ampere**

Tiempo (min)	Agua producto			Agua rechazo		
	CE (µS/cm)	SDT (mg/L)	Caudal (L/min)	CE (µS/cm)	SDT (mg/L)	Caudal (L/min)
0	6,700	4,314.8	0	200	128.8	0
3	2,843	1,830.8	2.1	403	259.5	3.0
7	2,485	1,600.3	2.2	881	567.3	3.0
10	2,027	1,305.3	2.2	1,281	824.9	3.0
14	1190	766.3	2.2	1678	1080.6	3.0

experimento. También reportó que el pH de la solución de rechazo disminuía, mientras que el de la solución producto aumentaba.

La intensidad de corriente que corre a lo largo de las membranas para el proceso de 10V y 20V fue de 0.19 y 0.29 A, respectivamente. Durante los dos procesos se presencié un decremento gradual de la corriente eléctrica, lo cual puede deberse a que existe menor paso de densidad de corriente cuando se diluye la solución debido a que la ausencia de iones desfavorece el transporte de la misma. Lo detectado en el experimento también fue reportado por (Gherasim, et al., 2014), donde muestra que la densidad de corriente decrece a medida que el

tiempo transcurre. Además, es apreciable que a mayor voltaje la densidad de corriente disminuye con una tasa de cambio más pronunciada (figura 6). Por otra parte, se observa que en el proceso donde se usó el doble de potencial eléctrico, se obtuvo mayor remoción de sólidos disueltos; esto puede explicarse a partir de la expresión de Nernst – Planck para el flux de transporte de masa (Strathmann, et al., 2004).

$$J_i = -D_i \frac{dC_i}{dz} - D_i \frac{z_i C_i F}{RT} \frac{dV}{dz} + v_k C_i \quad (6)$$

Donde el primer, segundo y tercer término representan la difusión debido al gradiente de

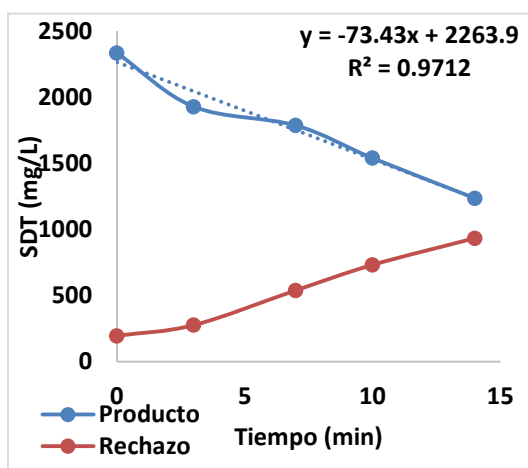


Figura 4. SDT producto a 10V con ED.

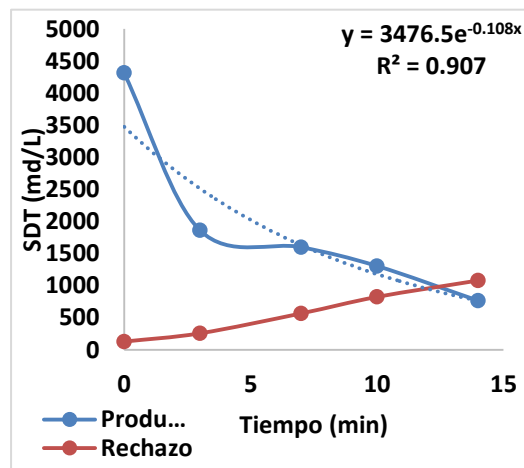


Figura 5. SDT producto a 20V con ED.

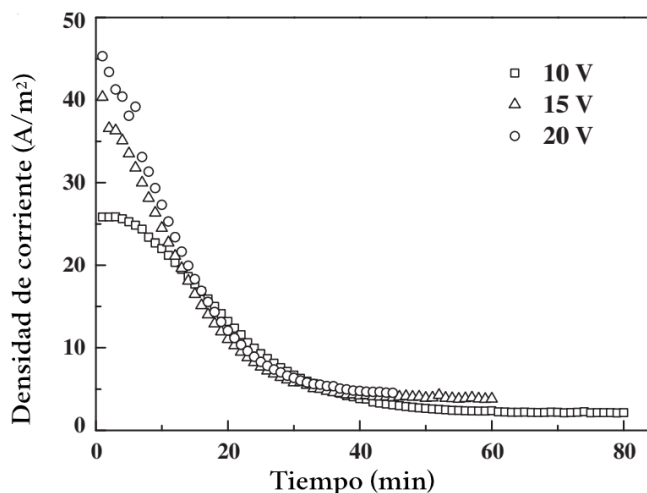


Figura 6. Densidad de corriente a través del tiempo.

concentración, la migración debido al gradiente del potencial eléctrico y la convección dada al gradiente de presiones, respectivamente. Si se incrementa el voltaje aplicado (potencial eléctrico) se incrementará la transferencia de masa por unidad de área. Es importante no aumentar el voltaje sin medida ya que llegará un punto en el que las membranas pueden estropearse por el paso tan alto de energía eléctrica.

Los parámetros de control para el agua de alimentación de 2,300 y 4,300 mg/L de SDT operado a 10V-1A y 20V-1A, respectivamente se muestran en la tabla 5.

La eficiencia de remoción y el rechazo de sales fue mayor al utilizar una solución de alimentación de mayor concentración y al aplicar el doble del voltaje. Como ya se detalló, estos resultados se atribuyen a la forma en la que actúa flux de transferencia de masa dado a la ecuación de Nernst – Planck y puede comprobarse con los cambios de

concentración de permeado del experimento con plomo realizado por Gherasim, *et al.*, (2014), donde a mayor voltaje aplicado, se observa una desalinización más rápida. El factor de concentración para la solución de 2,300 mg/L resultó ser 0.1222 mayor al de la solución de 4,300 mg/L posiblemente debido a que inicialmente el agua rechazo se concentraba a la misma velocidad en los dos experimentos. Por su parte, la conversión para los dos ensayos se obtuvo aproximadamente igual dado a que se trató de mantener un caudal de permeado y de rechazo de 2.2 y 3, respectivamente, durante todo el proceso.

*Prueba 2 en el proceso de desalinización ED-EDR*

Los resultados de la prueba 2 de un agua de alimentación de 3,000 y 5,000 mg/L de SDT operado a 20 V-1A para ambos casos, se muestran en las tablas 6 y 7.

El caudal de producción en ED-EDR, es constante y

**Tabla 5. Parámetros de control para desalinización ED del agua de 2,300 y 4,300 mg/L**

Voltaje Amperaje	Concentración (mg/L)	Eficiencia (%)	Rechazo sales (%)	Fc	Conversión (%)
10V-1A	2,300	34.0617	34.0617	0.3134	43.3022
20V-1A	4,300	69.7483	69.7483	0.1912	41.9355

**Tabla 6. Desalinización por ED-EDR de 3,000 mg/L a 20 Volts y 1 Ampere**

Tiempo (min)	Agua producto			Agua rechazo		
	CE (µS/cm)	SDT (mg/L)	Caudal (L/min)	CE (µS/cm)	SDT (mg/L)	Caudal (L/min)
<i>Electrodiálisis (ED)</i>						
0	4,826	3,140.1	0	300	193.2	0
3	2,759	1,776.7	1.7	665	428.2	3
7	1,822	1,173.3	1.7	1,314	846.2	3
14	821	560.9	1.7	3,422	2,203.7	3
<i>Electrodiálisis reversible (EDR)</i>						
0	3,422	2,203.7	0	871	560.9	0
3	3,123	2,011.2	3	1,151	741.2	1.5
7	2,165	1,394.2	2.9	1,254	807.5	1.5
14	689	249.7	2.9	3,578	2,007.6	1.5

**Tabla 7. Desalinización por ED-EDR de 5,000 mg/L a 20 Volts y 1 Ampere**

Tiempo (min)	Agua producto			Agua rechazo		
	CE (µS)	SDT (mg/L)	Caudal (L/min)	CE (µS)	SDT (mg/L)	Caudal (L/min)
<i>Electrodiálisis (ED)</i>						
0	7,680	4,945.9	0	297	191.3	0
3	6,760	4,372.7	1.5	726	467.5	3
7	5,700	3,670.8	1.5	1,890	1217.1	3
14	3,143	2,024.1	1.5	4,610	2968.8	3
<i>Electrodiálisis reversible (EDR)</i>						
0	4,610	2,968.8	0	3,143	2024.1	0
3	4,352	2,802.6	3	3,324	2140.6	1.5
7	1,740	1,120.5	3	4,070	2621.1	1.5
14	816	525.5	3	5,520	3554.8	1.5



solo es diferente en el cambio de polaridad. Por otra parte se mantiene la proporción de desalinización-concentración del agua, sin embargo la CE entre ambos se encontró que el cambio en desalinización es más abrupto en los primeros minutos, esto ocurre, porque la fricción de los iones a través de la membrana causa pérdida de energía irreversible, la cual es directamente proporcional a la concentración de sal en el agua; por lo que altas concentraciones de sales representan altas pérdidas de energía que la hace insuficiente para separar los iones de sal del agua, esta pérdida de energía es menor en EDR, lo que la hace más selectiva para desalinizar (Strathmann, 1995, 2010).

El análisis de regresión lineal a la concentración de SDT a través del tiempo, para obtener una ecuación que pueda extrapolar concentraciones de sales en tiempos posteriores, se muestra en las figuras 7, 8, 9 y 10.

Los resultados obtenidos en las dos pruebas son diferentes, en el caso de la solución a 3,000 mg/L la ED removi6 en un lapso menor el 75% de SDT, 11.57 min, mientras que EDR requiere de 10.49 min. Por otra parte, en la muestra problema con una concentración de 5,000 mg/L se aprecia lo opuesto, EDR requiere de 10 minutos para remover el 75%, mientras que ED 18.07 minutos, igualmente, se obtiene un mejor porcentaje de remoci6n en EDR

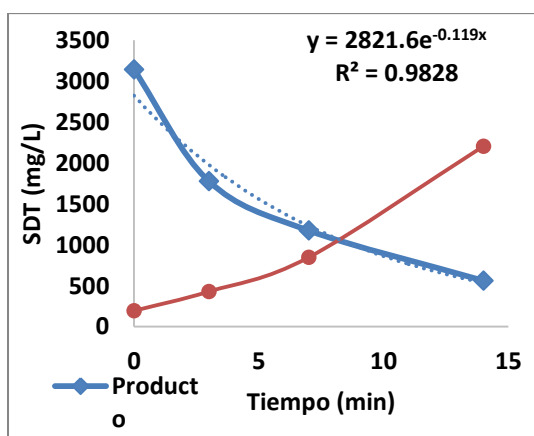


Figura 7. SDT de 3,000 mg/L a 20V-1A ED

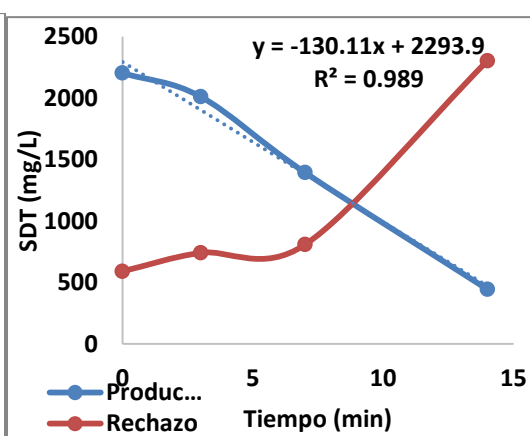


Figura 8. SDT de 3,000 mg/L a 20V-1A EDR

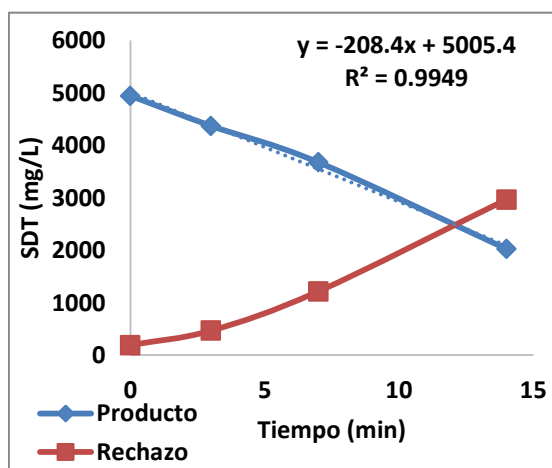


Figura 9. SDT de 5,000 mg/L a 20V-1A ED

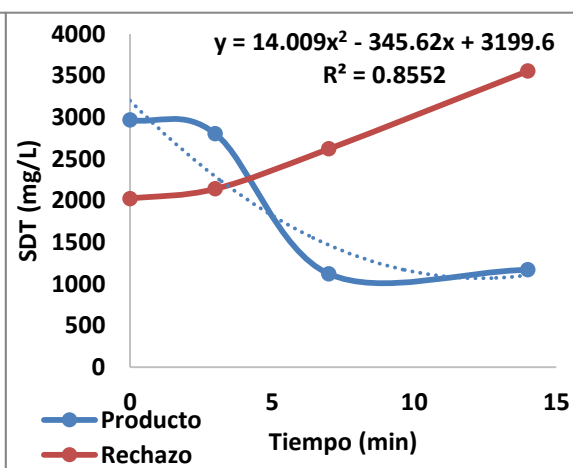


Figura 10. SDT de 5,000 mg/L a 20V-1A EDR

(82.29%) superior al 59.07% mostrado por ED. Además, se comprueba que el tiempo donde se traslapan las corrientes de producto y rechazo en ambas pruebas, es menor para el proceso de EDR, lo que reafirma su selectividad y afinidad para desalinizar aguas salobres.

Los parámetros de control en ED y EDR para las soluciones salinas de 5,000 y 3,000 mg/L, que se operaron a 20V y 1A, se muestran en la tabla 8.

Se puede observar que la eficiencia y el rechazo de sales es mayor en EDR para la mayor concentración de 5,000 mg/L a 20V y 1A, esto es debido a que el paso de voltaje es factor para una mayor remoción, además se aumenta la transferencia iónica deseada y aumenta la selectividad, esto coincide a un estudio realizado por Strathmann en 2010, quien obtuvo mejores remociones de sales usando EDR.

conversión ni el tiempo de desalinización, siendo más favorable para EDR, debido a la capacidad de intercambiar la polaridad, lo que ayuda a evitar las incrustaciones en el cuerpo de membranas y a separar los iones adheridos a las membranas selectivas sin requerir un alto total del equipo.

La Desalinización por EDR demuestra que es factible combatir la escasez de agua y recuperar pozos abandonados por alta salinidad efecto de sobre-explotación o intrusión salina, lo que permitirá al sector agroindustrial hacer frente a situaciones de sequías como se presentan en el estado de Sonora. Además el reutilizar pozos abandonados con EDR, permitirá que se recuperen los niveles freáticos y acuíferos del norte, centro y sur de Sonora.

**Tabla 8. Parámetros de control para ED y EDR del agua de 3,000 y 5,000 mg/L**

Voltaje Amperaje	Concentración (mg/L)	Eficiencia (%)	Rechazo de sales (%)	Fc	Conversión (%)
Electrodialísis (ED)					
20V-1A	3,000	82.13	82.13	0.70	36.17
20V-1A	5,000	59.07	59.07	0.60	33.33
Electrodialísis Reversible (EDR)					
20V-1A	3,000	88.66	88.66	0.91	66.16
20V-1A	5,000	82.29	82.29	1.19	66.66

## Conclusiones

Se cumplió el objetivo del estudio. Se logró establecer la relación del efecto de salinidad-voltaje para determinar el tiempo de desalinización de 15 minutos que logra remover el 75% de la salinidad de alimentación. Además, se establecieron 6 ecuaciones de regresión lineal con una máxima correlación del 88.66% para un agua de 5,000 mg/L, 20 V-1A para el proceso de EDR, mientras que la correlación más baja se encontró en la muestra de 5,000 mg/L, 20 V-1A del 59.07%.

Respecto a la conversión de agua producto la mayor se presentó en EDR con un valor de 66.66% para la concentración de 5,000 mg/L, y el menor se presentó en ED con 33.33 % para la misma concentración.

El factor de concentración es mayor a concentraciones más altas, sin embargo no afecta la

## Referencias

- Armas, J. C. (1998). Alta recuperación de agua con electrodialísis reversible. *Revista Digital Del Cedex*, (110), 133. Recuperado a partir de <http://ingenieriacivil.cedex.es/index.php/ingenieria-civil/article/view/1417>
- CONAGUA. (2015). Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Río Zanjón y Río San Pedro, estado de sonora. México: Diario Oficial de la Federación.
- Dévora-Isiordia, G. E., Enriquez, R. G., & Fernández, N. E. P. (2012). Técnicas para desalinizar agua de mar y su desarrollo en México. *Ra Ximhai*, 8(2.), 57-68.
- Dévora-Isiordia, G. E., Lizárraga, A., Valdez-Torres, L., Moreno, K., & Macías, M. (2018). Evaluation of the effect of the salinity of irrigation water on the yield of castor plant hybrids (*Ricinus communis* L.) in Mexico. *Journal of Hydrology*, 2, 613-616. doi:10.15406/ijh.2018.02.00133
- Duarte Martínez, L.A. (2014). Disponibilidad del recurso hídrico y caracterización hidrogeoquímica de la subcuenca del municipio de Caborca, Sonora. Tesis de Maestría en Ciencias. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California. 59 pp.

- Feijoo, Gustavo & Scarazzato, Tatiana & Trovão, Renata & Aliprandini, Paula & Tenório, Jorge & Espinosa, Denise. (2018). Treatment of a synthetic solution containing Cobalt (II), Manganese (II), Magnesium (II) and Chromium (III) from nickel laterite processing using ion exchange membrane electrodialysis. Paper presented at the 6th International Conference on Industrial and Hazardous Waste Management · CRETE 2018, Chania, Greece.
- Gherasim, C.-V., Křivčík, J., & Mikulášek, P. (2014). Investigation of batch electrodialysis process for removal of lead ions from aqueous solutions. *Chemical Engineering Journal*, 256, 324–334. doi:10.1016/j.cej.2014.06.094
- Kabay, N., Arda, M., Kurucaovali, I., Ersoz, E., Kahveci, H., Can, M., . . . Yuksel, M. (2003). Effect of feed characteristics on the separation performances of monovalent and divalent salts by electrodialysis. *Desalination*, 158(1), 95-100. doi:https://doi.org/10.1016/S0011-9164(03)00439-9
- Kucera, J., 2015. Reverse Osmosis. Second ed. Massachusetts, United States of America: Scrivener Publishing.
- Lechuga, J., Rodríguez, M., & Lloveras, J. (2007). Análisis de los procesos para desalinización de agua de mar aplicando la inteligencia competitiva y tecnológica. *Ingeniería*, 11(3), 5-14.
- Medina Miguel, Saavedra Rogelio, Morales Mariano, Castillo José, (2002). Vulnerabilidad a la intrusión marina de acuíferos Costeros en el pacífico norte mexicano; un caso, el Acuífero costa de Hermosillo, Sonora, México. *Revista Latinoamericana de Hidrogeología*. 2(1), 31-51.
- Medina, M. (2003). Caracterización geoquímica e isotópica del agua subterránea y determinación de la migración de la intrusión marina en el acuífero de la costa de Hermosillo, Sonora, México. *Tecnología de la intrusión de agua de mar en acuíferos costeros: países mediterráneos*, 325-335.
- Robles Lizárraga, A., Martínez Macías, M. D. R., Encinas, M., Aganza, Ó., Rodríguez López, J., & Dévora-Isiordia, G. E. (2019). Design of reverse osmosis desalination plant in Puerto Peñasco, Sonora, México. *Desalination and Water Treatment*, 175, 1-10. doi:10.5004/dwt.2020.24739
- Sadrzadeh, M., & Mohammadi, T. (2008). Desalination. Sea water desalination using electrodialysis. 221(1), 440-447. https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.01.103
- Strathmann, H. (1995). Chapter 6 Electrodialysis and related processes. In R. D. Noble S. A. Stern (Eds.), *Membrane Science and Technology* (Vol. 2, pp. 213-281): Elsevier.
- Strathmann, H. (2004). Assessment of electrodialysis water desalination process costs. Paper presented at the Proceedings of the International Conference on Desalination Costing, Limassol, Cyprus.
- Strathmann, H. (2010). Electrodialysis, a mature technology with a multitude of new applications. *Desalination*, 264(3), 268-288. doi:https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.04.069
- Valerdi Pérez, R. (2011). Caracterización, evaluación y optimización de una planta de desalación por electrodiálisis reversible. Universidad de Murcia.
- Valero, A (2001). La desalinización como alternativa al plan hidrológico nacional [en línea]. Universidad de Zaragoza y el Centro de Investigación de recursos y Consumos Energéticos (CIRCE), España, 2001.