

Desalación por ósmosis inversa y su aprovechamiento en agricultura en el valle del Yaqui, Sonora, México

• Germán Eduardo Dévora-Isiordia* • María Elena López-Mercado •
• Gustavo Adolfo Fimbres-Weihs • Jesús Álvarez-Sánchez •
• Sebastian Astorga-Trejo •

Instituto Tecnológico de Sonora, México

*Autor de correspondencia

Resumen

Dévora-Isiordia, G. E., López-Mercado, M. E., Fimbres-Weihs, G. A., Álvarez-Sánchez, J., & Astorga-Trejo, S. (mayo-junio, 2016). Desalación por ósmosis inversa y su aprovechamiento en agricultura en el valle del Yaqui, Sonora, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 7(3), 155-169.

Sonora, situado al noroeste de México, ocupa el segundo lugar en cultivos de riego en el país. Los problemas de disponibilidad de los recursos hídricos, principalmente para agricultura en ese estado, se deben a la alta concentración de sales en los pozos, que van desde 2 000 hasta 5000 mg/l de sólidos disueltos totales (SDT). Estos altos valores de SDT son atribuidos a efectos de intrusión salina (Dévora, Gonzalez, & Saldivar, 2009), al tener una excesiva explotación del manto acuífero (Conagua, 2011). Sin embargo, el uso de tecnologías de desalación y modelos de predicción del proceso permiten aprovechar el recurso de manera óptima tanto en agua producto como en el rechazo. Es por esto que el objetivo es definir un modelo matemático de simulación para la predicción de la operación de una planta desaladora de ósmosis inversa alimentada por agua salobre, validando que el agua producto cumpla con los límites permisibles para su uso en agricultura. Con motivo de validar el modelo, el experimento consistió en habilitar una planta desaladora por ósmosis inversa (OI), con capacidad nominal de 100 m³/d, compuesta por ocho membranas SWC4 de 8"X40", para ser utilizada en el riego del cultivo de sorgo (*Sorghum*), el cual presenta un rendimiento de 100%, a una concentración máxima de 2 000 mg/l de SDT en el agua de riego (4 mS/cm), en un área de 0.25 ha, con la finalidad de evaluar rendimiento en kg/m² (ton/ha). Se regó la mitad del terreno con agua desalinizada (promedio de 64.8 mg/l de SDT) y la otra mitad con agua salobre de pozos subterráneos (promedio de 6 610 mg/l de SDT). Con el apoyo de un equipo de medición multiparamétrico modelo YSI 556 se determinó en el agua de alimentación, rechazo y permeado, la conductividad eléctrica (µS/cm), sólidos disueltos totales (mg/l), pH y temperatura (°C). Con los datos obtenidos de la planta piloto se diseñó un modelo de simulación en la plataforma de MATLAB R2009a, usando *Simulink*, que cumple con la función de predecir el comportamiento de la planta desaladora, obteniendo concentraciones de agua producto y rechazo en diferentes arreglos con iteraciones de control, que incluye recirculación de salmuera en diferentes volúmenes. De forma subsecuente, este modelo fue utilizado para simular el aprovechamiento de caudal en el agua de rechazo, con la finalidad de incrementar la sustentabilidad

Abstract

Dévora-Isiordia, G. E., López-Mercado, M. E., Fimbres-Weihs, G. A., Álvarez-Sánchez, J., & Astorga-Trejo, S. (May-June, 2016). *Desalination by Reverse Osmosis and Its Use in Agriculture in Valle Del Yaqui, Sonora, Mexico*. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*, 7(3), 155-169.

Sonora, situated in northwest Mexico, ranks second among the country's irrigation crop producing states. The problems of water resource availability in Sonora, particularly for farming, are due to the high concentration of salts in well water, which go from 2 000 to 5 000 mg/l of total dissolved solids (TDS). High salt concentration in groundwater wells is attributed to the effects of saline intrusion related to the excessive exploitation of aquifers (Conagua, 2011). Nonetheless, desalination technologies and process prediction models can allow the optimal use of this resource. This work aims to develop a mathematical simulation model for predicting the performance of an RO desalination plant fed with brackish water, whilst ensuring that the product water achieves the permissible limits for its use in agriculture. In order to validate the model, an RO desalination plant with a nominal capacity of 100 m³/d, consisting of eight commercial SWC4 8"x40" membranes, was used to desalinate groundwater for the irrigation of 0.25 ha of sorghum crop. For a brackish feed water with 6 610 mg/L TDS, the product and rejected flows presented 64.8 and 21,300 mg/l TDS respectively. With the help of a YSI 556 multiparameter measuring unit, the electric conductivity (mS/cm), TDS (mg/l), pH and temperature (°C) were determined for the permeate, retentate and feed water of the desalination plant. Using data obtained from the pilot plant, a simulation model was developed in MATLAB 2009a using *Simulink*, which has the function of predicting the behavior of the desalination plant. The model is able to determine the concentration of dissolved solids in the retentate and product water depending of the process configuration and the number of control iterations. Each iteration includes different volumes of brine recirculation. For this study, this model is used to simulate the utilization of the flow of retentate, in order to increase the sustainability of the process. The results of the measurements in the desalination plant show that for a feed water with 6,610 mg/l TDS, the product and retentate flows have 64.8 and 21 300 mg/l TDS respectively. The economic assessment of the process shows that the water production cost without brine recirculation is MX\$6.16/m³. This is very similar to the MX\$6.70/m³ cost reported by the International Desalination Association. Using the desalinated water, a production increase of 1 ton/ha of sorghum was achieved, compared with brackish water irrigation. Using the data obtained from the pilot plant, the simulation model was developed, validated and calibrated, in order to predict the behavior of the desalination plant in terms of concentrations in the retentate and product water.

del proceso. Los resultados del estudio muestran que al alimentar un agua de 6 610 mg/l de SDT, las corrientes de producto y rechazo son de 64.8 y 21 300 mg/l de SDT, respectivamente. La evaluación del proceso muestra que el costo de producción de agua es de 6.05 MX\$/m³, muy similar a lo reportado por la International Desalination Association, que es de 6.70 MX\$/m³. Con el uso de esta agua desalinizada se logró un incremento de producción de 1 ton/ha de sorgo, comparado al riego con agua salada. Estos datos se usaron para validar y calibrar el modelo. Los resultados de la modelación de recirculación muestran que conforme sea menor el porcentaje de recirculación de salmuera se pueden realizar hasta cinco iteraciones, sin incrementar la concentración del agua de alimentación por arriba de 42 000 mg/l, que es lo máximo permitido por la membrana utilizada en la planta. Se incrementó la productividad agrícola, por lo cual las inversiones públicas y privadas en el sector rural se consideran viables en el corto plazo. Se encontró que es posible, para las condiciones de la planta de 100 m³/d, recircular total o parcialmente la corriente de salmuera. Se pueden hacer varias iteraciones con esta corriente sin afectar de modo significativo el agua producto ni llevar al máximo la capacidad de la planta. Entre mayor sea el porcentaje de salmuera recirculada, menos iteraciones podrán realizarse, pero serán reducidas en mayor medida las descargas al medio ambiente.

Palabras clave: desalación, ósmosis inversa, agricultura, sorgo, rendimiento, simulación, MATLAB.

The model was then used to simulate brine recirculation, in order to increase the sustainability of the process. It was found that, for the conditions of the 100 m³/d plant, it is possible to totally or partially recirculate the brine stream. Recirculation modeling results show several brine recirculation iterations can be carried out without significantly affecting the product water. Further, using a low brine recirculation rate, up to five iterations can be carried out without increasing the concentration in the feed water above 42 000 mg/l. At higher brine recirculation rates, less iterations can be achieved, but brine discharges to the environment would be reduced. Given that desalinated water increased the agricultural productivity, public and private investments in desalination for the rural sector appear viable in the short term.

Keywords: Desalination, reverse osmosis, agriculture, sorghum, yield, simulation, MATLAB.

Recibido: 11/03/2015

Aceptado: 07/11/2015

Introducción

La escasez de agua tiene lugar cuando la demanda supera el suministro de agua dulce en un área determinada. Los tres aspectos principales que caracterizan la escasez de agua son la falta física de agua disponible para satisfacer la demanda; el nivel de desarrollo de las infraestructuras que controlan el almacenamiento, distribución y acceso; y la capacidad institucional para aportar los servicios de agua necesarios (FAO, 2013). En México existe escasez crónica y aguda de agua, sobre todo en la parte norte del territorio nacional, donde la cantidad de la precipitación es mucho menor que la evapotranspiración potencial (Jürgen, 2000). En Sonora, situado al noroeste de México, aproximadamente 95% de la región se considera árida o semiárida, y se caracteriza por altas temperaturas y falta de precipitaciones. Dadas las condiciones anteriores, y debido a la sobreexplotación de los acuíferos y la falta

de recarga de los mismos, se ha producido una disminución en los niveles de agua disponible (Hallack-Alegría & Watkins, 2006).

Sonora ocupa el segundo lugar en cultivos de riego en México. Los problemas de disponibilidad de los recursos hídricos, principalmente para agricultura en Sonora, se deben a la alta concentración de sales en los pozos, que van desde 2 000 hasta 5 000 mg/l de sólidos disueltos totales (SDT). Estos altos valores de SDT son atribuidos a efectos de intrusión salina (Dévora *et al.*, 2009), al tener una excesiva explotación del manto acuífero (Conagua, 2011). Uno de los acuíferos en estado de sobreexplotación de mayor importancia es el de la Costa de Hermosillo, cuya cercanía a la zona de estudio de este trabajo refleja la situación general de las aguas subterráneas de dicha zona geográfica (Salazar, Moreno, & Lutz, 2012).

Un estudio realizado por Ingenieros Civiles y Geólogos, S. A. (ICGSA) en el año 2007 explica

que la escasez de agua dulce obliga a buscar otras fuentes de abastecimiento de agua dulce, entre ellas la desalinización de agua por ósmosis inversa (OI). La utilización de tecnologías de desalación (Dévora-Isiorda, González-Enríquez, & Ruiz-Cruz, 2013) y modelos de predicción del proceso abren la posibilidad de aprovechar el recurso de manera óptima tanto en agua producto como en el rechazo. Un número considerable de programas para simular procesos de desalinización han sido desarrollados en años recientes (Nafey, Fath, & Mabrouk, 2006). La simulación de procesos, en el caso de la tecnología de OI ha sido empleada para diferentes propósitos. Tal es el caso de Verhuelsdonk, Attenborough, Lex y Altmann (2009), quienes se dieron a la tarea de simular y predecir el comportamiento de los diferentes equipos que componen un proceso de OI mediante IPSEpro®. Por su parte, Villafila y Mujtaba (2002) realizaron análisis de sensibilidad para algunos parámetros de operación (flujo y presión de alimentación), y simularon la inferencia que tienen los dispositivos de recuperación de energía al ser utilizadas en OI. Otro *software* utilizado en la simulación de procesos de desalinización es MATLAB®, el cual puede ser usado para operaciones matemáticas, modelaciones y simulaciones, análisis de datos y procesamiento, visualización y gráficas, y desarrollo de algoritmos (Gilat, 2010). El objetivo de este trabajo es definir un modelo matemático de simulación para la predicción de la operación de una planta desaladora de ósmosis inversa alimentada por agua salobre, validando que el agua producto cumpla con los límites permisibles para su uso en agricultura.

Metodología

Habilitación de planta desaladora

Con motivo de validar el modelo, el experimento consistió en habilitar una planta desaladora por ósmosis inversa (OI) con capacidad nominal de 100 m³/d, compuesta por ocho membranas comerciales de la empresa Nitto Denko de Hydranautics, modelo SWC4 de 8"×40", para

ser utilizada en el riego del cultivo de sorgo (*Sorghum*). Las membranas antes descritas desalinizan corrientes de agua que van desde 35 000 mg/l de SDT hasta 50 mg/L de SDT; es decir, tienen una eficiencia de remoción entre 97 y 99%. La configuración de las ocho membranas están en paralelo, en una sola etapa, con la siguiente configuración: 4 en el bastidor 1, y 4 en el bastidor 2.

Pretratamiento

Para asegurar la calidad del agua de alimentación a los bastidores de membranas se aplicó un pretratamiento físico basado en especificaciones de los requerimientos de agua de alimentación propuesta por Hydranautics en 2005. El pretratamiento cuenta con filtros de cartucho de 5 µm, y un filtro multimedia compuesto de arena, carbón activado y grava, tanques con bomba para dosificación de antiescalante y ajuste de pH. Los filtros de cartucho y filtro multimedia serán evaluados durante la operación del proceso de desalinización para monitorear la caída de presión (una vez por semana). La sustitución de estos filtros se propone sea cada tres años (Hydranautics, 2005).

Selección de cultivo y área de estudio

Se eligió el cultivo de sorgo, por ser un material vegetal resistente a altas concentraciones de sal, dada la finalidad del proyecto de utilizar agua salobre (6 610 mg/l de SDT) y desalada (64.8 mg/l de SDT). Además de la salinidad, se eligió este cultivo por las condiciones de humedad ambiental de la zona del estado de Sonora (zona semiárida con atmósfera seca) y porque el drenaje del suelo del sitio cumple con las características necesarias para el crecimiento óptimo del sorgo.

El experimento se realizó en el campo agrícola ubicado en el block 1814, en el Valle del Yaqui, al sur de Ciudad Obregón, Sonora, México; en las coordenadas geográficas latitud norte 27° 11' 21.7", y longitud oeste 109° 52' 15.6" (figura 1). El Valle del Yaqui es uno de los mayores pro-

ductores agrícolas en todo el estado de Sonora. Aproximadamente 450 000 hectáreas es la extensión territorial del Valle del Yaqui. El principal cultivo que se siembra en la región es el trigo. Sin embargo, también se siembran oleaginosas, algodón y hortalizas. El clima predominante es cálido extremo. La temperatura media anual es de 24 °C y la media máxima es de 31 °C; de julio a agosto, la máxima es de 48 °C y en enero la mínima es de 16 °C (INIFAP, 2008).

En un área de 0.25 ha se regó la mitad del terreno con agua desalinizada (muestras 1, 2, 5 y 6) y la otra mitad (muestras 3, 4, 7 y 8) con

agua salobre de pozos subterráneos (6 610 mg/l de SDT), tal como se especifica en el cuadro 1. Se instalaron sensores electrónicos (Watermak 200) y tensiómetros manuales (figura 2) para monitorear la humedad del suelo (potencial mátrico), que permiten determinar el momento exacto para volver a regar el suelo.

Esta fuerza o tensión de humedad del suelo (potencial mátrico) con que el agua es retenida es producto de la adhesión o atracción entre la superficie de las partículas de suelo y el agua; y la cohesión, o atracción entre las moléculas de agua. Este proceso de retención que depende de

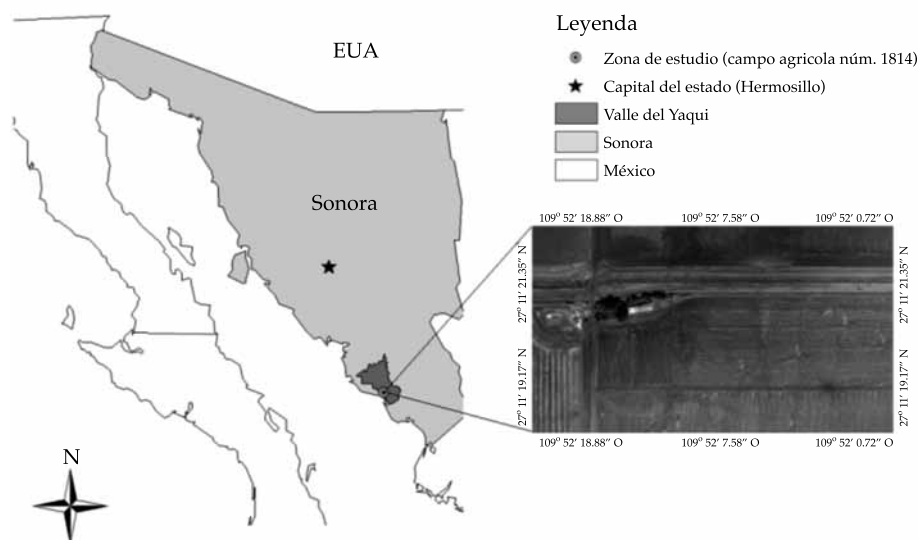


Figura 1. Ubicación de campo agrícola, 1814.

Cuadro 1. Ubicación geográfica de sitios de muestreo.

Muestra	Norte coordenada	Oeste coordenada	Elevación (m)
1	27° 11' 21.1"	109° 52' 16.6"	28
2	27° 11' 21.1"	109° 52' 16.1"	28
3	27° 11' 21.1"	109° 52' 15.5"	27
4	27° 11' 21.1"	109° 52' 15.0"	26
5	27° 11' 19.2"	109° 52' 15.1"	27
6	27° 11' 19.2"	109° 52' 15.6"	28
7	27° 11' 19.1"	109° 52' 16.0"	28
8	27° 11' 19.1"	109° 52' 16.6"	28



Figura 2. Lado izquierdo, sensores electrónicos (Watermak 200). Lado derecho, tensiómetro manual.

las características de tensión superficial del agua del suelo y del ángulo de contacto entre el agua y las partículas de suelo es el mecanismo principal de retención de agua en los suelos livianos, mediados y, dentro de determinados intervalos de humedad, también en los suelos pesados. Bajo este contexto, un potencial mátrico con valores de 30 a 40 kPa indica que el suelo necesita riego; por el contrario, un potencial mátrico con valores de 0 a 10 kPa revela que el suelo está saturado. Con base en dichas mediciones se determinó el momento de riego y duración del mismo. Estos instrumentos se colocaron en el cultivo de sorgo a una profundidad de 15 centímetros.

Se establecieron riegos de alrededor de 1.5 horas, tres veces por semana en los meses de abril y mayo de 2013. Cuando la demanda evaporativa fue más alta, como sucedió en el mes de julio, la frecuencia de los riegos aumentó de 3 a 6 veces por semana, con dos horas promedio por riego.

Calidad en agua y suelo

Con el apoyo de un equipo de medición multiparamétrico modelo YSI 556, se determinaron los siguientes parámetros de campo en el agua de alimentación, rechazo y permeado: conduc-

tividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$), sólidos disueltos totales (mg/l), pH y temperatura ($^{\circ}\text{C}$). También se midieron pH y conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) en muestras de suelo.

Por otra parte, se tomaron y preservaron muestras de suelo en los puntos geográficos de muestreo (cuadro 1) al inicio y fin del experimento, las cuales se llevaron al laboratorio central, donde se determinaron cationes, aniones, razón de adsorción de sodio (RAS) y porcentaje de sodio intercambiable (PSI) en el suelo.

Modelos de simulación usando Simulink

A pesar de la ventaja que ofrece la desalación de disminuir la concentración de sales en su agua producto para su uso en agricultura, existe un rechazo de sales del proceso que no se reutiliza en la mayoría de los casos y que puede provocar un daño ambiental. Cuando la alimentación de agua al proceso de desalación proviene de pozos salobres (de 1 000 a 7 000 mg/l), el rechazo del proceso oscila entre 2 000 y 14 000 mg/l . Este rechazo se puede recircular al agua de alimentación, formando una mezcla en promedio de 9 500 mg/l . Considerando que las membranas para agua de mar pueden desalinizar aguas de hasta 42 000 mg/l , es evidente que si se hace recircular agua rechazo para formar una nueva mezcla en el agua de alimentación, existe potencialmente un aprovechamiento de caudal y una disminución de vertidos hacia al ambiente. Esta recirculación tiene como límite la tolerancia 42 000 mg/l .

Para aplicar estos conceptos se diseñó un modelo de simulación en la plataforma de MATLAB R2009a, usando *Simulink*, que cumple con la función de predecir el comportamiento de la planta desaladora. El modelo permite obtener las concentraciones de agua producto y rechazo en dos diferentes configuraciones con iteraciones de control, que incluye recirculación de salmuera en diferentes volúmenes. De modo subsecuente, este modelo se usó para simular el aprovechamiento de caudal en el agua de rechazo, con la finalidad de incrementar la sustentabilidad del proceso.

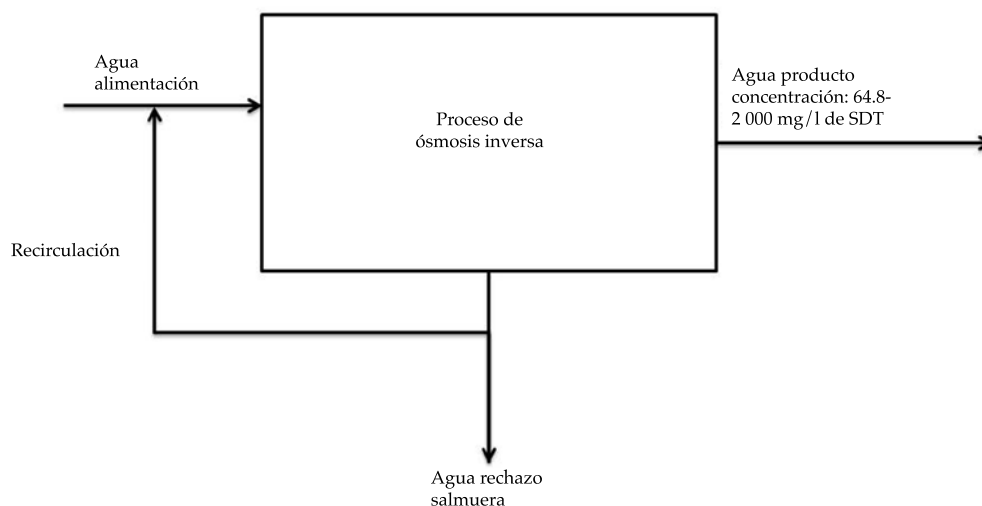


Figura 3. Arreglo para obtención de agua producto de 2 000 mg/l.

La primera configuración (figura 3) fue recirculación de salmuera al agua de alimentación, buscando determinar el máximo de iteraciones posibles para obtener un agua producto de concentración de su original de 64.8 mg/l hasta un máximo propuesto de 2 000 mg/l.

Estudios previos de López (2013) reportan que en la planta desaladora de 100 m³/d existe una conversión de 90% sin recirculación de salmuera y sin segundos pasos. En este experimento se planteó una segunda configuración, que fue la recirculación de salmuera al agua de alimentación, buscando determinar el máximo número de pasos (iteraciones posibles) para obtener una disminución de la conversión de agua producto de su original de 90 a 60% (figura 4).

Costo de producción de agua

Para el cálculo del costo de producción de agua se consideraron los siguientes rubros: costo energético (bombas de alta presión, bombas de dosificación y energía general); importe unitario de mano de obra (personal operativo y asesoría técnica); importe unitario de químicos (anti-incrustante o antiescalante y RO clean), e importe del mantenimiento expresados (tuberías, accesorios y soldadura) en MX\$/m³.

Resultados

Planta desaladora de OI 100 m³/d

Para el proceso, la planta tiene un sistema de control automatizado por Programmable Logic Controller (PLC), que controla la apertura y cierre de válvulas durante la operación. También cuenta con manómetros para monitorear las presiones del sistema. El tiempo de vida útil de las membranas en los arreglos y etapas descritas en metodología se espera que sea de siete años. Bajo este contexto se propone sustitución de membranas cada siete años, según lo reportado por Kucera (2008), Craig (2009) y GE Water & Process Technologies (2014).

En la figura 5 se muestra la fotografía de la planta desaladora descrita.

Pretratamiento

Se usaron tres litros de antiescalante y se aforó hasta 30 l (concentración de 10%). Se dosificó la mezcla de antiescalante a un flujo de 2.97 ml/min, a 30% pulsaciones y 30% de frecuencia. El anti-incrustante utilizado fue Flocon Plus N, de la marca BWA Water Additives. El costo de dosificación de este químico es de unos 0.06 MX\$/m³.

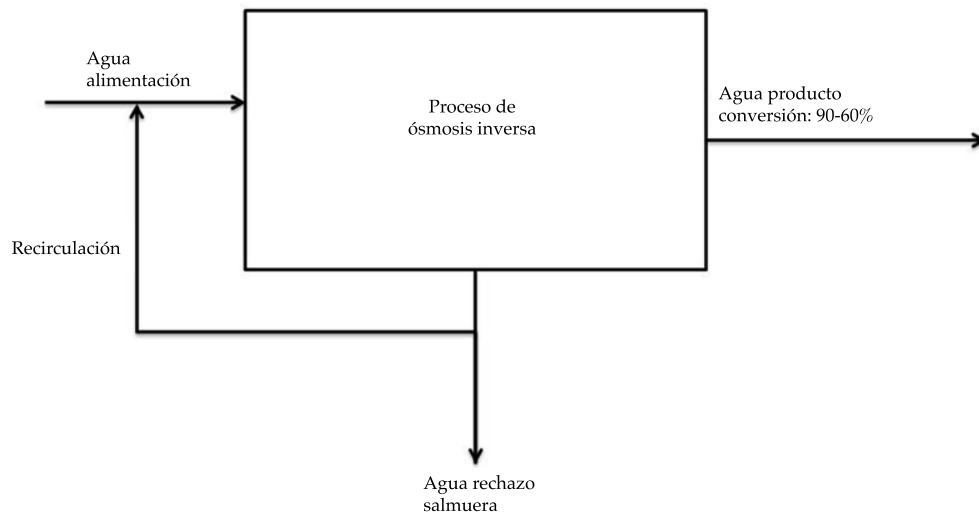


Figura 4. Arreglo para obtención de conversión final de 90 a 60%.



Figura 5. Planta desaladora de 100 m³/d, ubicada en un campo agrícola de Sonora, México. Lado izquierdo, PLC (Allen Bradley). Lado derecho, pretratamiento, filtros y membranas.

Calidad del agua, suelo y comportamiento del cultivo

Las mediciones en la planta desaladora muestran que al alimentar un agua de 6 610.2 mg/l de SDT, las corrientes de producto y rechazo son de 64.8 y 21 300 mg/l de SDT, respectivamente. Se presenta un aumento en la temperatura

de 0.5 y 3 °C en las corrientes de producto y rechazo, respectivamente, considerando que la temperatura en el agua de alimentación es de 26.5 °C (cuadro 2).

En el cuadro 3 se presentan de manera detallada los cationes y aniones presentes en las tres diferentes corrientes de agua (alimentación, producto y rechazo).

Cuadro 2. Caracterización del agua en diferentes corrientes de planta desaladora de 100 m³/d.

Muestra	pH	Temperatura (°C)	Conductividad eléctrica (μS/cm)	Sólidos disueltos totales (mg/l)
Alimentación	7.42	26.50	10 433.20	6 610.20
Producto	6.40	27.02	103.00	64.80
Rechazo	7.69	29.57	35 341.40	21 300.00

Cuadro 3. Composición fisicoquímica para las diferentes corrientes de agua en la planta desaladora de 100 m³/d.

Corriente	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	CO ₃ ⁼	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ⁼	Cl ⁻
Alimentación	12.00	16.00	22.40	0.10	0.00	13.20	17.65	24.50
Producto	0.04	0.04	0.00	0.00	0.00	0.32	0.43	0.08
Rechazo	30.00	30.00	45.00	0.40	0.00	36.00	45.65	61.00

Las mediciones en suelo al inicio y final del experimento se tienen en los cuadros 4 y 5. La figura 6 muestra la variación promedio en los parámetros de caracterización del suelo agrícola al inicio y final del experimento.

Con el uso del agua desalinizada se observan dos resultados favorables del experimento. El primer resultado se muestra en la figura 7, con la diferencia de alturas que existe en el cultivo de sorgo al estar expuesto a dos corrientes con

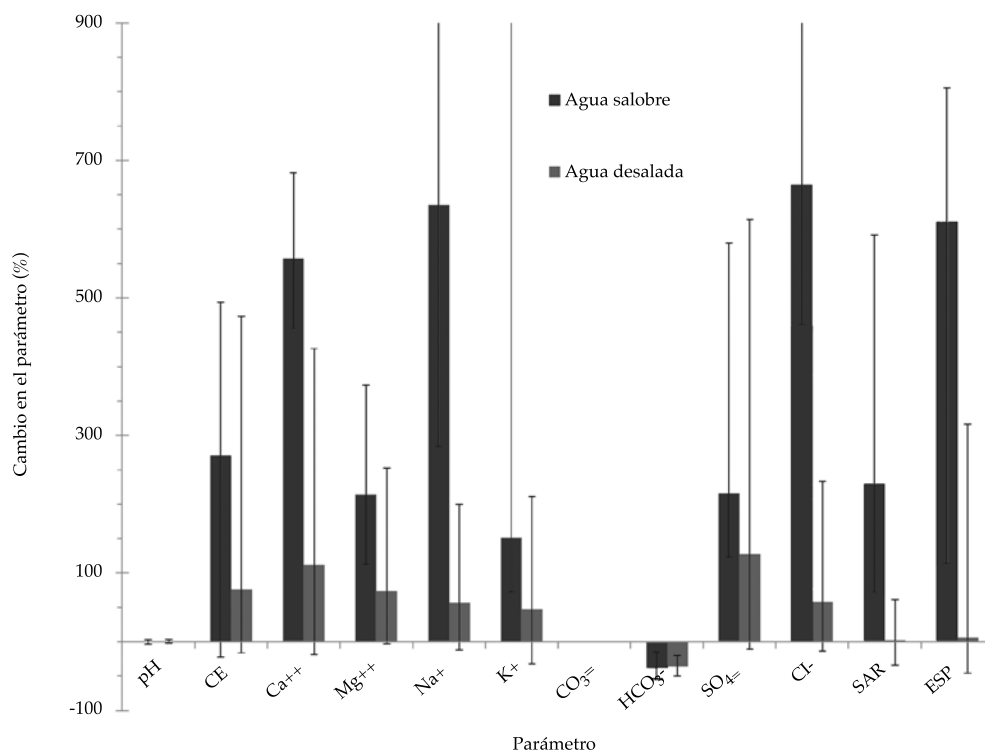


Figura 6. Variación promedio en los parámetros de caracterización del suelo agrícola entre el inicio y final del experimento. Las barras de error muestran los cambios máximos y mínimos, donde SAR: razón de adsorción de sodio (RAS); ESP: porcentaje de sodio intercambiable (PSI).

Cuadro 4. Caracterización del suelo agrícola en los diferentes puntos de muestreo al inicio del experimento.

Muestra	pH	CE $\mu\text{S}/\text{cm}$	(meq/l)								RAS	PSI
			Ca^{++}	Mg^{++}	Na^+	K^+	$\text{CO}_3^{=}$	HCO_3^-	$\text{SO}_4^{=}$	Cl^-		
1	7.22	4 060	15.00	12.20	4.50	1.62	0.00	3.10	11.24	16.56	1.27	0.63
2	7.48	2 340	5.00	7.00	7.80	0.20	0.00	3.00	16.00	3.00	3.18	3.32
3	7.48	2 340	11.00	8.00	1.80	1.20	0.00	4.40	5.00	18.00	0.58	0.00
4	7.23	2 730	15.00	10.50	7.80	0.10	0.00	2.80	12.50	13.50	2.18	1.92
5	7.14	2 040	9.50	8.50	4.40	0.90	0.00	2.60	7.00	9.00	1.47	0.90
6	7.25	2 830	14.00	13.00	3.90	1.40	0.00	2.80	12.00	12.50	1.06	0.30
7	7.05	2 590	13.50	9.50	2.30	1.50	0.00	2.80	13.00	12.50	0.68	0.00
8	7.43	3 180	15.00	12.00	4.60	1.50	0.00	3.00	11.00	16.00	1.25	0.58

Tipo de muestra: 1, 2, 5 y 6 (desalado); 3, 4, 7 y 8 (salobre).

Cuadro 5. Caracterización del suelo agrícola en los diferentes puntos de muestreo al final del experimento.

Muestra	pH	CE $\mu\text{S}/\text{cm}$	(meq/L)								RAS	PSI
			Ca^{++}	Mg^{++}	Na^+	K^+	$\text{CO}_3^{=}$	HCO_3^-	$\text{SO}_4^{=}$	Cl^-		
1	7.08	3 780	14.20	12.00	4.00	1.10	0.00	2.00	10.07	15.20	1.21	0.61
2	7.48	2 040	4.06	6.80	6.90	0.18	0.00	2.40	15.00	2.60	2.10	1.80
3	7.23	13 900	86.00	26.00	30.00	2.50	0.00	2.00	34.00	101.00	4.01	4.45
4	7.38	12 040	99.00	29.00	30.00	2.80	0.00	2.40	33.00	122.00	3.75	4.10
5	7.35	11 690	50.00	30.00	13.20	2.80	0.00	1.60	50.00	30.00	2.09	1.79
6	7.28	2 370	24.00	22.00	8.20	2.00	0.00	1.40	30.00	17.00	1.71	1.25
7	7.25	2 010	90.00	45.00	30.00	2.60	0.00	1.60	29.00	133.00	3.65	3.96
8	7.47	12 190	83.20	25.50	31.40	2.90	0.00	2.10	35.00	103.00	4.05	5.25

Tipo de muestra: 1, 2, 5 y 6 (desalado); 3, 4, 7 y 8 (salobre).

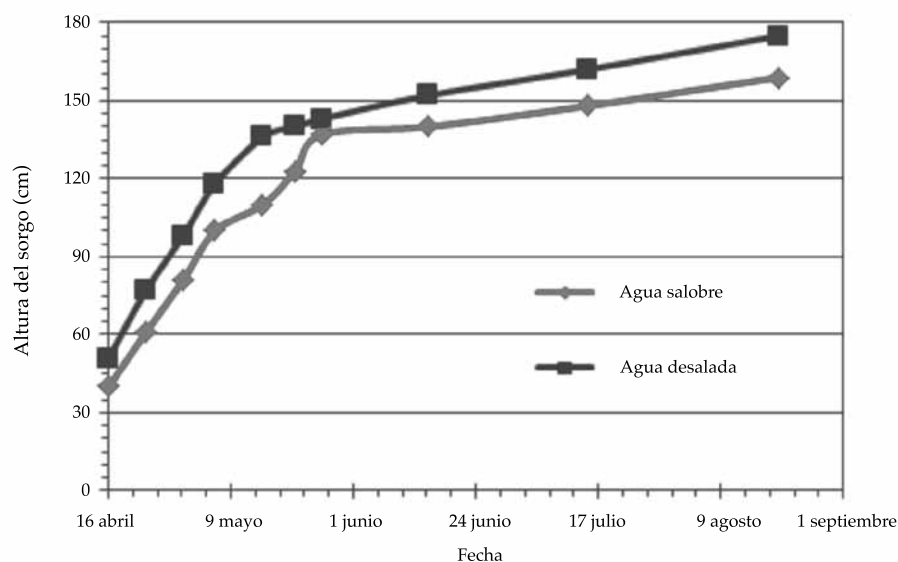


Figura 7. Comportamiento de altura promedio de sorgo en los dos experimentos.

diferente concentración de sales: una proveniente directa del pozo (6 610 mg/l de SDT) y la otra corriente de la planta desaladora (64.8 mg/l de SDT).

El segundo resultado se observa en el cuadro 6.

Al cosechar, se verifica que parámetros como altura (m), número de panojas por m² y peso por panoja (g) en todos los casos es mayor cuando se utilizó agua con baja concentración de sales, lo que da como resultado, al cuantificar la producción de ambos experimentos, un incremento de 1 ton/ha (12.6%) de sorgo comparado con el riego con agua salobre.

Concentraciones de agua producto y rechazo con iteraciones de control modeladas

El resultado de la modelación de recirculación de agua rechazo se presenta en la figura 8.

Este modelo se alimenta de una concentración y caudal de entrada, y requiere sólo del porcentaje de recuperación del producto para trabajar; de igual manera, muestra las concentraciones de producto y rechazo, además de sus caudales.

Por otra parte, los resultados sobre modelación de recirculación de salmuera hacia la corriente de alimentación en la planta de 100 m³/d

Cuadro 6. Comportamiento de parámetros en el cultivo de sorgo.

Parámetro	Riego con agua desalada	Riego con agua salobre	α 95%
Altura (m)	1.7	1.5	X
# panojas/m ²	29.0	28.0	
Peso/panoja (g)	30.0	29.0	
Rendimiento (ton/ha)	8.9	7.9	

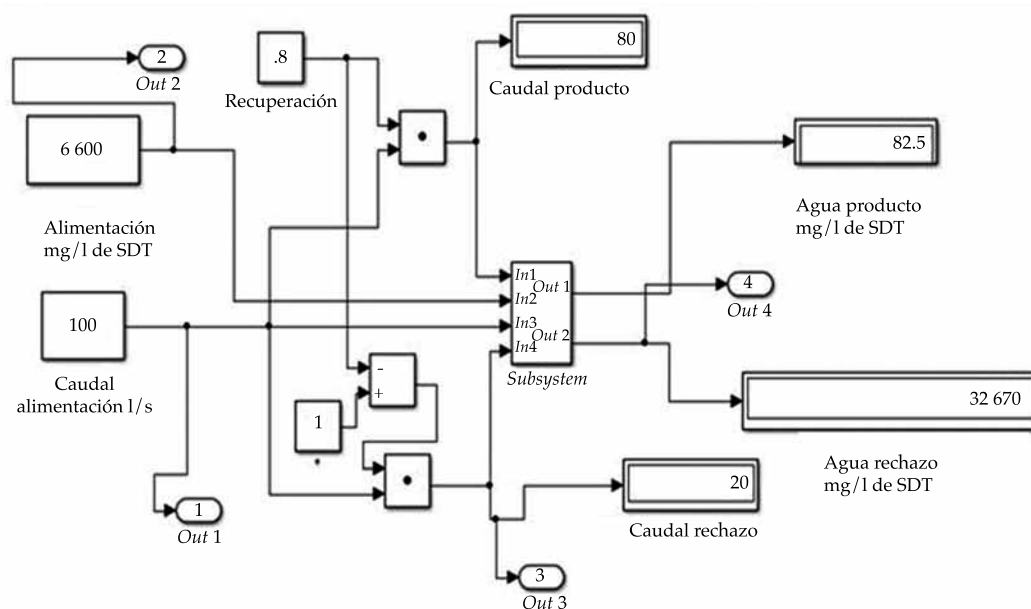


Figura 8. Modelo inicial del proceso de desalación.

muestran que conforme sea menor el porcentaje de recirculación de salmuera en 80 y 100% de recirculación, se pueden hacer hasta cinco iteraciones, sin incrementar la concentración de mezcla entre salmuera y agua de alimentación por arriba de 42 000 mg/l (figura 9), que es lo máximo permitido por la membrana utilizada en la planta, según ficha técnica de fabricante.

Ambas configuraciones (figuras 8 y 9) resuelven problemáticas ambientales, al minimizar el agua rechazo por medio de recirculación hacia el agua de alimentación (es decir, para la primera iteración, el caudal de rechazo baja de 0.22 a 0.205 l/s) y disminuir los efluentes hacia al ambiente, favoreciendo la obtención de agua en zonas áridas como la del estado de Sonora.

En el cuadro 7 se presentan las concentraciones de diferentes corrientes del proceso de desalación generadas del modelo matemático

propuesto con recirculación de 100% de salmuera. Al inicio del proceso, en la corriente de alimentación se tiene una concentración de 6 610 mg/l de SDT. De acuerdo con la ficha técnica de las membranas SWC4, la capacidad máxima de remoción es de 42 000 mg/l de SDT. Bajo este argumento, el modelo matemático propuesto por autores sólo permite realizar cinco iteraciones hasta llegar a la capacidad máxima de la membrana, en un proceso supuesto por lotes.

Por otra parte, la corriente de producto llega en la quinta iteración hasta una concentración de 507 mg/l de SDT. Evidentemente, la eficiencia de remoción de la membrana permite que no sufra una pérdida en la calidad del producto; sin embargo, en la corriente de rechazo, en cada iteración se puede observar un incremento elevado por efecto de reducción del caudal. Por último, la corriente de mezcla aumenta también

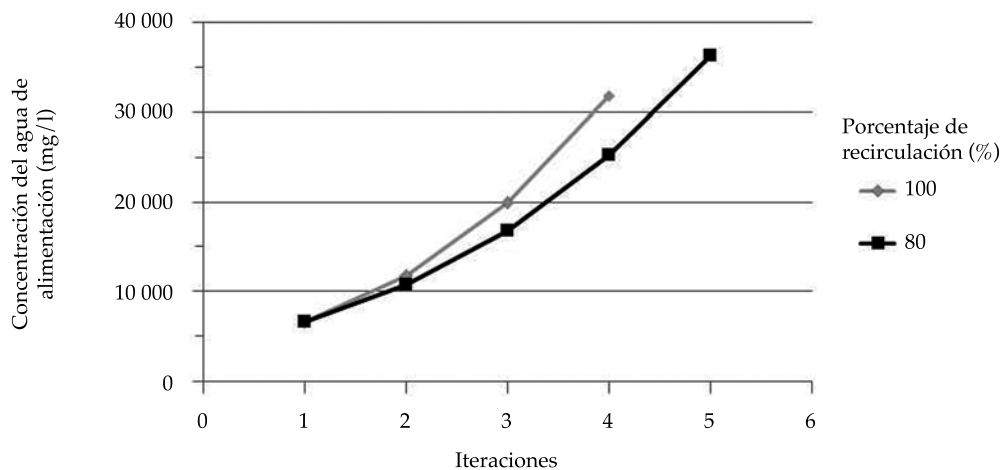


Figura 9. Concentraciones de agua de alimentación en diferentes porcentajes de recirculación.

Cuadro 7. Concentraciones en corrientes del proceso de desalación, en diferentes iteraciones del modelo matemático.

Corriente de agua	1	2	3 mg/l de SDT	4	5
Alimentación	6 610	10 787	16 742	25 314	36 250
Producto	196	231	320	405.03	507
Rechazo	32 719	35 598	47 356	55 691	65 250
Mezcla	10 787	16 742	25 314	36 250	-

su concentración de forma gradual por efecto de la mezcla de un caudal alto en la corriente de alimentación y un caudal pequeño en el rechazo.

Costo de producción de agua

La evaluación del proceso muestra que el costo de producción de agua sin recirculación de salmuera es de 6.16 MX\$/m³ (cuadro 8), muy similar a lo reportado por la International Desalination Association (IDA, 2008), que es de 6.70 MX\$/m³; ambos casos para agua salobre. La evaluación de implementar tubería para recirculación de salmuera hacia el agua de alimentación es de 12 000 MX\$, lo que representa un costo de producción de agua de 6.22 MX\$/m³.

A pesar de que el sorgo presentó números positivos de rentabilidad, fueron bajos por el precio de venta por tonelada del cultivo. Bajo este contexto, si el agricultor desea aumentar la rentabilidad, deberá buscar alternativas de alto rendimiento, como con hortalizas, para que el efecto costo-beneficio sea mayor.

Discusión

Calidad del agua

El análisis de la planta desaladora por ósmosis inversa muestra que trabaja de manera eficiente en cuanto a la relación producto-rechazo (80%-20%) y con remoción de sales de 99.7%, disminuyendo de modo satisfactorio la concentración de sales en el agua producto. Estos datos de operación de la planta concuerdan con los resultados reportados por la Asociación Internacional de Desalación (IDA, por sus siglas en inglés) en 2008.

Por otra parte, la temperatura del agua en el caudal de rechazo (29.57 °C) y de producción (27.02 °C) siempre fue mayor a la de alimentación (26.50 °C), esto debido a la fuerte presión que ejerce el bombeo en la ósmosis inversa, así como a la fricción dentro de los módulos de membranas. Según lo reportado por Hydranautics en 2015, se debe cuidar que la temperatura no presente un valor mayor a los 45 °C en el agua de alimentación, para no afectar al equipo.

Cuadro 8. Costos de producción de agua.

Concepto	Costo (MX\$/m ³)
Costo energético	3.78
Bombas de alta presión	
Bombas de dosificación	
Energía general	
Importe unitario (mano de obra)	1.73
Personal operativo	
Asesoría técnica	
Importe unitario químicos	0.08
Anti-incrustante	
RO Clean	
Importe del mantenimiento	0.57
Tuberías y accesorios	
Soldadura	
Total	6.16

Las altas temperaturas pueden causar que se abran los poros de la membrana, ocasionando el paso de sal sin ser retenida, así como otros daños a la estructura de la membrana.

Calidad del suelo

La eliminación de carbonatos y bicarbonatos del agua en la ósmosis inversa es lo que ocasiona la reducción del pH en el agua producto (de 7.42 a 6.40). Esto se debe a que el agua de alimentación proveniente de pozo suele contener bicarbonatos (cálcico, sódico, magnésico) y carbonatos (cálcico), que elevan el pH del agua (Infoagro, 2015).

Tomando como referencia al ion cloro, como el mayor indicador de sales presentes en una muestra, se puede verificar el evidente incremento en la salinidad (mayor a 600% en promedio) de las muestras 3, 4, 7 y 8, atribuido a la salinidad del agua del pozo con la que se regó el sorgo en el área de estudio. En contraste, en las muestras 1 y 2 se observa un decremento de alrededor de 11% en promedio en la concentración de sales, atribuido directamente a la baja concentración de éstas en el agua producto proveniente de la planta desaladora de OI con la que se regó el cultivo.

Por otra parte, el RAS y PSI al inicio y final del experimento no presentan cambios significativos en las muestras regadas con agua desalada, originado principalmente por la facilidad del drenaje interno del suelo (Gasca, Menjivar, & Torrente-Trujillo, 2011). Sin embargo, en las muestras con agua de pozo se observa un incremento promedio del 230% en RAS y de 610% en PSI. Debido a la alta concentración de sodio en el suelo en estas dos variables (RAS y PSI), se presenta una defloculación del suelo, perdiendo estructura, lo cual se refleja en la afectación del desarrollo vegetal, ya que al modificarse la estructura del suelo, disminuyen aireación y permeabilidad.

Comportamiento del cultivo

Por medio de un análisis elemental, en todos los casos se determinó sólo la altura promedio en

el periodo del 27 de marzo al 3 de septiembre de 2013 en el cultivo de sorgo regado con agua proveniente de la planta desaladora, que fue mayor en comparación con la altura promedio del cultivo regado con agua salobre (agua salada). Esto se atribuye de forma directa al manejo del suelo y concentración de sales en el agua y, por ende, en el suelo. Los resultados en el incremento de sales coinciden con lo reportado por la FAO (2015), que expresa que una salinidad alta afecta directamente la asimilación de nutrientes en los cultivos.

Conclusiones

El uso de agua desalinizada incrementó la productividad agrícola, por lo cual las inversiones públicas y privadas en desalación en el sector rural se consideran viables en el corto plazo. Se encontró que es posible, para las condiciones de la planta de 100 m³/d, recircular total o parcialmente la corriente de salmuera. Se pueden realizar varias iteraciones con esta corriente sin afectar de modo significativo el agua producto ni llevar al máximo la capacidad de la planta. Entre mayor sea el porcentaje de salmuera recirculada, menos iteraciones podrán ser realizadas. De manera sustentable, recircular salmuera permitirá extraer menos agua del pozo estudiado y reducir las descargas al medio ambiente de salmuera. En este estudio se descargó un promedio de 20 m³/d de salmuera. Se deberán buscar alternativas para evitar impactos negativos al ecosistema receptor; pudiera ser inyección en pozos profundos, estanques de evaporación, aplicación en suelo y cero descargas de líquidos, entre otras acciones. Las opciones de manejo y disposición se harán en puntos estratégicos que no afecten la flora y fauna del sitio.

La simulación es una herramienta útil para observar el funcionamiento de los procesos. En desalación, generar y utilizar modelos de simulación permite vislumbrar los escenarios que se pueden alcanzar al realizar modificaciones a las plantas o condiciones en las que trabajan. Reducir los impactos de las descargas de salmuera al medio ambiente es un reto y una gran

preocupación de los expertos en desalación en la actualidad; el uso de simulación sirve como una herramienta para iniciar el proceso de generación de soluciones a ésta y otras problemáticas que pueda presentar la desalación.

Se cumple el objetivo del proyecto, al desarrollar un modelo matemático de predicción, validando que las concentraciones en el agua producto después de los diferentes arreglos de recirculación de salmuera hacia la corriente de alimentación no excedieran los límites permisibles (2 000 mg/l de SDT) óptimos para obtener el crecimiento máximo del sorgo. Otro aspecto importante es que con el uso de desalación, los productores no se preocuparán por sembrar cultivos que soporten o toleren la concentración de sus pozos, pues podrán establecer siembras de alto rendimiento y valor comercial. Notablemente, el costo de producción es un factor de éxito en sitios donde se aplique la desalación, como en agricultura y otros. Es por ello que estos procesos de desalación deben incorporar la obtención de energía eléctrica por medio de fuentes renovables.

Agradecimientos

Los autores agradecen el financiamiento otorgado por la Fundación Produce Sonora, A. C., para llevar a cabo este proyecto de investigación, con folio de aprobación 26-2012-0030, según registros del organismo patrocinador. Asimismo, se agradece al ingeniero Fructuoso Alejandro Méndez González, quien participó como agricultor cooperante, facilitando terreno agrícola y pozo de alimentación a planta desaladora.

Referencias

- Conagua (2011). *Estadísticas del agua en México, edición 2011*. México, DF: Comisión Nacional del Agua.
- Craig, G. (2009). *Dow Water Solutions-FilmTec*, personal communication.
- Dévora-Isiordia, G. E., Gonzalez-Enriquez, R., & Saldivar, C. J. (2009). Diseño de procesos de desalinización de aguas subterráneas salobres mediante simulación química de electrodialisis reversible, con propósitos de consumo humano. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 5(1), 31-41.
- Dévora-Isiordia, G. E., Gonzalez-Enriquez, R., & Ruiz-Cruz, S. (2013). Evaluation of Desalination Processes and their Development in Mexico. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 4(3), 27-46.
- FAO (2013). *Afrontar la escasez de agua-un marco de acción para la agricultura y la seguridad alimentaria*. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- FAO (2015). *El manejo de suelos afectados por salinidad*. Portal de suelos de la FAO. Manejo de suelos problemáticos. Rome: Publications Division. Food and Agriculture Organization of The United Nations.
- Gasca, C. A., Menjivar, J. C., & Torrente-Trujillo, A. (2011). Cambios en el porcentaje de sodio intercambiable (PSI) y la relación de adsorción de sodio (RAS) de un suelo y su influencia en la actividad y biomasa microbiana. *Acta Agronómica*, 60(1), 27-38.
- GE Water & Process Technologies (2014). *Duratherm STD Series High Temperature Pure Water Elements*. Form number FS1271EN. New York: GE Water & Process Technologies.
- Gilat, A. (2010). *MATLAB® An Introduction with Applications*. Columbus, USA: John Wiley & Sons, Inc.
- Hallack-Alegría, M., & Watkins, D. J. (2006). Annual and Warm Season Drought Intensity-Duration-Frequency Analysis for Sonora, Mexico. *Journal of Climate*, 20(1), 1897-1909.
- Hydranautics (2005). RO/NF Polyamide Membrane Feed Water Requirements. *Hydranautics Technical Application Bulletin*, TSB 116.
- Hydranautics (2015). *Brackish Water RO Membranes*. Hydranautics: a Nitto Group Company. Consultado en agosto de 2015. Recuperado de <http://www.membranes.com/pdf/HYDRABrochure.pdf>.
- ICGSA (2007). *Estudio geohidrológico para el valle aluvial del río Yaqui*. Sonora, México: Ingenieros Civiles y Geólogos, S. A., ICGSA-SARG.
- IDA (2008). *Desalination Yearbook* (pp. 30-40, 91-125). United Kingdom: International Desalination Association, Market Profile. Pankratz T. IDA. Oxford, United Kingdom.
- Infoagro (2015). *Concepto de pH e importancia en fertirrigación*. Consultado en agosto de 2015. Recuperado de http://www.infoagro.com/abonos/pH_suelo.htm.
- INIFAP (2008). Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Consultado en agosto de 2015. Recuperado de http://www.pieaes.org.mx/caracteristicas_red_equipo.htm.
- Jürgen, H. (2000). Técnicas de desalinización de aguas salobres y del mar. *Memorias Técnicas*. Ciencia y conciencia compromiso nacional con el medio ambiente (pp. 1-11). Federación Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ciencias ambientales, AIDIS. México, D.F., del 14 al 18 de agosto, 2000.
- Kucera, J. (2008). Understanding RO Membrane Performance. *Chemical Engineering Progress*, 145(5), 450.

- López, M. E. (2013). *Evaluación de una planta desaladora de 100 m³/d para su empleo en agricultura* (p. 49). Tesis de Maestría. Cd. Obregón: Instituto Tecnológico de Sonora. México.
- Nafey, A., Fath, H., & Mabrouk, A. (2006). A New Visual Package for Design and Simulation of Desalination Processes. *Desalination*, 194, 281-296.
- Salazar, A., Moreno, J. L., & Lutz, A. N. (2012). Agricultura y manejo sustentable del acuífero de la Costa de Hermosillo. *Región y Sociedad*, 24(1). n.spe.3
- Verhuelsdonk, M., Attenborough, T., Lex, O., & Altmann, T. (2009). Design and Optimization of Seawater Reverse Osmosis Desalination Plants Using Special Simulation Software. *Desalination*, 250(2):729-733.
- Villafañila, A., & Mujtaba, I. (2002). Fresh Water by Reverse Osmosis Based Desalination: Simulation And Optimisation. *Desalination*, 155(1), 1-13.

Dirección institucional de los autores

Dr. Germán Eduardo Dévora Isiordia

Instituto Tecnológico de Sonora
Departamento de Ciencias del Agua y Medio Ambiente
Avenida Antonio Caso y Kino s/n Colonia Villa ITSON
85130 Ciudad Obregón, Sonora, México
Teléfono: + 52 (644) 4109 000, extensión 1716
Fax: +52 (644) 4109 001
german.devora@itson.edu.mx

M.C. María Elena López Mercado

Instituto Tecnológico de Sonora
Estudiante de posgrado
Maestría en Ciencias en Recursos Naturales
5 de febrero 818 Sur, Colonia Centro
85000 Ciudad Obregón, Sonora, México
Teléfono: + 52 (644) 4150648
Fax: + 52 (644) 4109 001
marielena_127@hotmail.com

Dr. Gustavo Adolfo Fimbres Weihs

Instituto Tecnológico de Sonora
Departamento de Ciencias del Agua y Medio Ambiente
Avenida Antonio Caso y Kino s/n Colonia Villa ITSON
85130 Ciudad Obregón, Sonora, México
Teléfono: + 52 (644) 4109 000, extensión 1863
Fax: + 52 (644) 4109 001
gustavo.fimbres@itson.edu.mx

Dr. Jesús Álvarez Sánchez

Instituto Tecnológico de Sonora
Departamento de Ciencias del Agua y Medio Ambiente
Avenida Antonio Caso y Kino s/n Colonia Villa ITSON
85130 Ciudad Obregón, Sonora, México
Teléfono: + 52 (644) 4109 000, extensión 1402
Fax: + 52 (644) 4109 001
jesus.alvarez@itson.edu.mx

Ing. Sebastián Astorga Trejo

Instituto Tecnológico de Sonora
Departamento de Ciencias del Agua y Medio Ambiente /
Ingeniero Químico
Avenida Antonio Caso y Kino s/n Colonia Villa ITSON
85130 Ciudad Obregón, Sonora, México
Teléfono: + 52 (687) 1207 716
Fax: 01 (644) 4109 001
sebastian.astorga@cuamoc.com