

# Modelo *Seawat* para intrusión salina en el acuífero de Boca Abierta, Sonora

• Armando G. Canales •  
*Hidrogeólogo independiente*

• Carlos E. Velázquez • Luis Islas\* •  
*Instituto Tecnológico de Sonora, México*

\*Autor para correspondencia

• Randall T. Hanson • Alyssa Dausman •  
*US Geological Survey*

## Resumen

Canales, A. G., Velázquez, C. E., Islas, L., Hanson, R. T., & Dausman, A. (julio-agosto, 2016). Modelo *Seawat* para intrusión salina en el acuífero de Boca Abierta, Sonora. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 7(4), 155-160.

El acuífero del valle de Boca Abierta está en una planicie costera y se encuentra sobreexplotado, con un alto índice de contaminación del agua subterránea por intrusión salina del agua de mar. El objetivo de este trabajo fue probar la eficiencia de una doble barrera de pozos de bombeo para controlar el avance de la intrusión salina, mediante la aplicación del modelo *Seawat*. Este modelo de densidad variable parte de condiciones iniciales de elevaciones de niveles estáticos y concentraciones del ion cloruro en el agua. En el periodo de calibración 1990-2012, los valores de concentración de cloruros calculados por el modelo mostraron una diferencia con los medidos en campo, que se expresa con el error medio cuadrático de 2.87% (RMS). La etapa predictiva comprendió un periodo de simulación de 20 años (2012-2032). Se propusieron dos ubicaciones para la doble barrera de bombeo, la cual constituye el escenario con dos variantes de la etapa predictiva. Como resultado se obtuvo que la ubicación "doble barrera 1" con 10 pozos, un gasto de 120 l/s por pozo, mantuvo o redujo gradualmente concentraciones de cloruros del agua del acuífero inferiores a la norma.

**Palabras clave:** acuíferos costeros, intrusión salina, modelo *Seawat*, predicción, doble barrera de pozos de bombeo.

## Introducción

La salinización es una de las formas más extendidas de contaminación de agua en el mundo. La extracción de agua subterránea en acuíferos

## Abstract

Canales, A. G., Velázquez, C. E., Islas, L., Hanson, R. T., & Dausman, A. (July-August, 2016). *Seawat Model for Saline Intrusion in Boca Abierta, Sonora Aquifer*. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*, 7(4), 155-160.

The "Boca Abierta" Valley's aquifer at a coastal plain has been overexploited with the consequence of some high rate of contamination by saline intrusion of Seawater. The study objective was to test a double barrier of pumping wells to control salt water intrusion in Boca Abierta Valley aquifer by applying the model *Seawat*. In the calibration period 1990-2012 the difference between observed chloride concentration and the model calculated value in several wells got a value of residual mean square (RMS) of 2.87%. The predictive phase a simulation period of 20 years (2012-2032), with two locations for 10 pumping wells and flow rate of 120 l/s per well, in the named "double barrier 1" kept or reached gradually chloride concentration of water from the aquifer below the permitted value.

**Keywords:** Coastal aquifer, saline intrusion, *Seawat* model, prediction, double barrier of pumping wells.

---

Recibido: 12/09/2014  
Aceptado: 05/02/2016

---

costeros no confinados modifica las condiciones naturales de la descarga de agua dulce al mar y da por resultado una inversión del flujo del agua subterránea, y una posibilidad de movimiento lateral del agua de mar hacia el interior de la costa

(Nuno & Haie, 2001; Cardona, Carrillo, Huizar, & Graniel, 2003). Los valles de Guaymas y Boca Abierta han estado bajo desarrollo agrícola desde 1940. La sobreexplotación del acuífero de Boca Abierta ha provocado una intrusión salina significativa.

La preservación de la vida útil del acuífero del valle de Boca Abierta requiere de medidas, como barreras de pozos de inyección y/o bombeo, que controlen la intrusión salina que en el citado acuífero ha afectado la franja costera en más de 7 km (Quiñonez, Canales, Sánchez, & Islas, 2005).

La aplicación de un modelo de simulación de flujo subterráneo y densidad variable en un acuífero permite plantear alternativas que consisten en la colocación de barreras de pozos de bombeo sobre la interfase salina "dispersa", descrita por Marín (1995), para interceptar el flujo de agua salada que avanza sobre el acuífero (Canales, 2013).

Entre los trabajos previos al que aquí se presenta se tiene:

- Díaz (2009) simuló el flujo subterráneo en el acuífero de Boca Abierta con el *software Aquif* (Díaz, 2013), para determinar la factibilidad de colocar una barrera de pozos de inyección, mediante el empleo del agua residual tratada de las ciudades de Guaymas y Empalme, llegando a la conclusión de que sólo se tenía para inyectar una disponibilidad de agua residual tratada inferior a 10% de la requerida.
- En otro trabajo, Manjarrez (2011) utilizó el programa *Seawat* en una porción del acuífero del Valle de Guaymas para simular el avance de la intrusión salina, con el objetivo de determinar los efectos del bombeo de agua subterránea en el movimiento de la interfase agua dulce-agua salada. Para llevar a cabo la calibración, se empleó el programa *PEST*, acoplado al *Seawat*, utilizando los contenidos observados de cloruros y niveles estáticos de los años de 1978 a 2007.

Como antecedente inmediato de este trabajo se aplicó el modelo de flujo subterráneo *Visual*

*Modflow* (Velázquez, Islas, Canales, & Encinas, 2010) para simular los niveles de agua subterránea en el acuífero del Valle de Boca Abierta, con el fin de estimar el bombeo que permita mantener el acuífero sin incrementar el grado de sobreexplotación.

Un caso muy similar al que se desarrolló con este trabajo fue la aplicación del modelo *Sutra* (Pool & Carrera, 2010), para probar el efecto de una doble barrera de pozos de bombeo sobre la interfase salina en el acuífero costero Mar de Plata, Argentina, afectado por la presencia de agua de mar. El resultado es una caída significativa en los niveles de salinidad de los pozos con intrusión salina.

El objetivo de este trabajo fue probar la eficiencia de una doble barrera de pozos de bombeo para controlar el avance de la intrusión salina, mediante la aplicación del modelo *Seawat*, en el acuífero del valle de Boca Abierta. El resultado permitió determinar el gasto de extracción y su distribución correcta con la localización de dicha barrera de pozos con concentraciones del ion cloruro, aceptables para consumo humano (Velázquez, 2013).

## Método

La simulación de la intrusión salina en el acuífero de Boca Abierta en este trabajo es una continuación de la simulación de flujo subterráneo y densidad constante con *Modflow* (Velázquez et al., 2010), referida como antecedente inmediato. Por tal motivo, el presente trabajo se inició actualizando el modelo anterior mediante la revisión del modelo conceptual. A continuación se aplicó el modelo *Seawat* (Guo & Langevin, 2002), para simular el efecto de una doble barrera de pozos de bombeo hasta el año 2032.

## Aplicación de los modelos

El modelo conceptual se revisó con la información de pozos de la zona que se muestra en la figura 1, la cual se utilizó para definir la estratigrafía del lugar, además de los niveles estáticos, volúmenes de extracción y análisis de calidad del agua, que permitieron alimentar los modelos

y establecer una frontera de carga constante en la parte norte del modelo para simulación de flujo subterráneo de entrada al acuífero, y en la frontera sur, que colinda con el Golfo de California, de acuerdo con las coordenadas geográficas y niveles medios del mar para la zona.

La etapa de calibración se realizó a partir de la simulación con *Modflow*, con densidad constante para el periodo de modelación establecido (1990-2012). Se compararon los niveles estáticos calculados por el modelo y los medidos en campo, y se obtuvo una diferencia estimada por el valor del error medio cuadrático (RMS) de 3.85%; con *Seawat*, con densidad variable, para el mismo periodo, 1990-2012, se obtuvo como estimación de la diferencia entre valores de concentración de cloruros medidos en campo y los obtenidos por el modelo un error medio cuadrático (RMS) de 2.87%.

La etapa de predicción, de 2012 a 2032, se llevó a cabo una vez calibrado el modelo. Se propusieron dos filas conformadas por cinco pozos cada una para formar una doble barrera de bombeo, con el propósito de detener el avance de la intrusión salina en el acuífero. Se evaluó su efectividad mediante la estimación de la entrada de agua de mar proveniente de la frontera sur del acuífero.

Se probaron dos ubicaciones distintas para las dos filas de pozos ya mencionadas, como se muestra en las figuras 2a y 2b.

La primera, denominada "doble barrera 1" (figura 2a), tiene una separación entre sus filas de 2.0 km; la fila 2 está a una distancia de 1.8 km al sur con respecto a la zona de explotación del acuífero; la fila 1 tiene una distancia media en relación con la frontera del acuífero con el Golfo de California de 4.0 km.

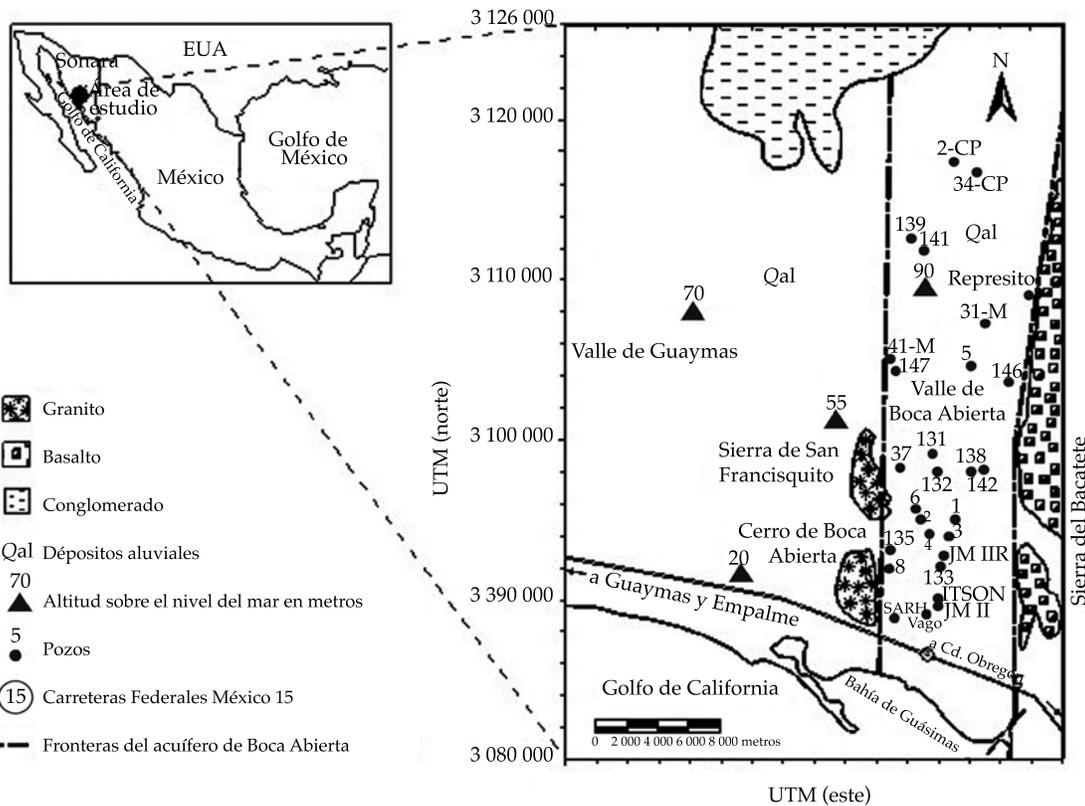


Figura 1. Localización de la zona de estudio.

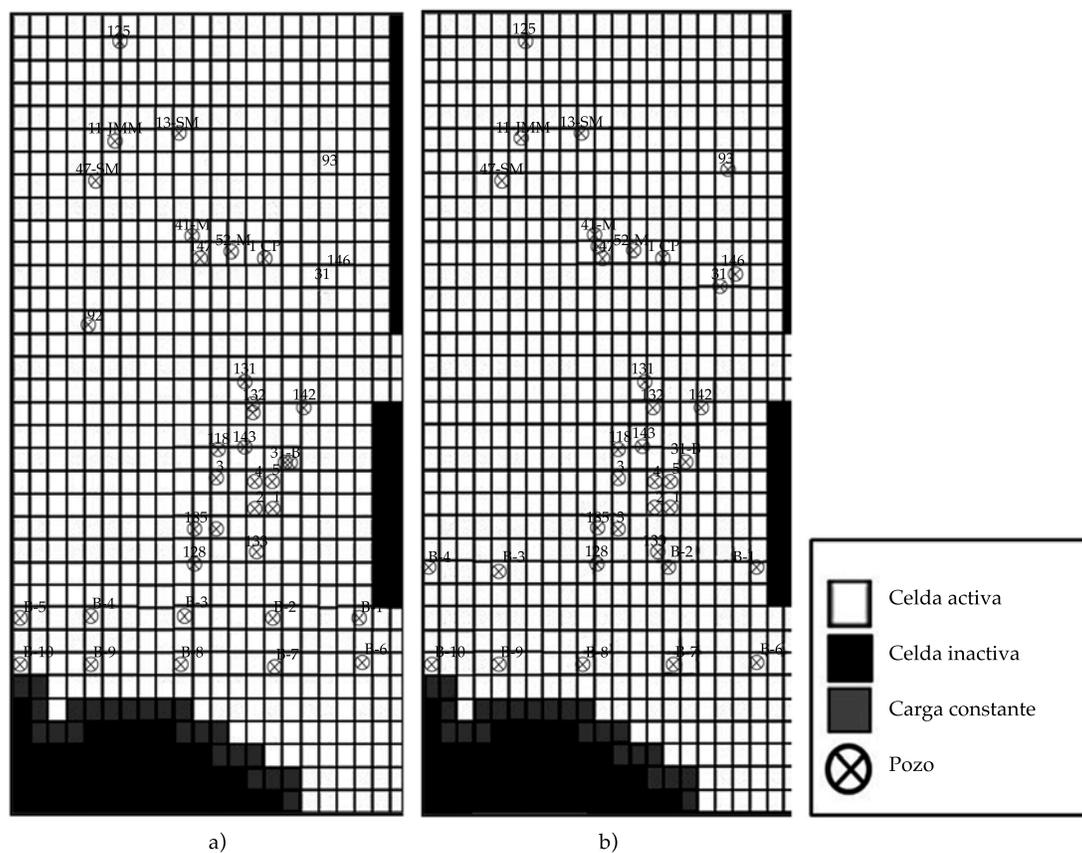


Figura 2. a) Ubicación doble barrera 1, b) Ubicación doble barrera 2.

Para la segunda ubicación, “doble barrera 2” (figura 2b), la fila 1 no cambia de posición; la fila 2 se recorrió al inicio de la zona de explotación del acuífero, en particular formando la línea con 4 de los 6 pozos en funcionamiento para agua potable. En ambas figuras, las celdas con relleno en color negro representan inactividad en el modelo: al este, por efecto de la sierra del Bacatete, y al sur el Golfo de California; asimismo, las celdas con relleno gris al sur representan el flujo de agua de mar al acuífero proveniente del Golfo de California (frontera de carga constante).

### Discusión de resultados

Los resultados del efecto de la simulación de la doble barrera de bombeo sobre el acuífero del valle de Boca Abierta provinieron del

planteamiento de tres escenarios distintos. El primero, “condiciones normales”, representa no aplicar algún control, como la doble barrera de bombeo. Los escenarios dos y tres fueron las propuestas del modelo “doble barrera 1” y “doble barrera 2”, respectivamente, con un gasto de extracción igual a 120 l/s para cada uno de los 10 pozos que las conforman.

En la gráfica 1 de la figura 3 se observa el comportamiento de la evolución de la concentración de cloruros (Cl<sup>-</sup>) una vez simulados los tres escenarios ya descritos para el periodo (2012-2032). Del conjunto de pozos analizados se eligieron los números 135 y 3 para ilustrar dicha evolución. En todos los casos se apreció una disminución favorable respecto a “las condiciones normales”, que incluye quedar dentro de la norma NOM-127-SSA1-1994 en la

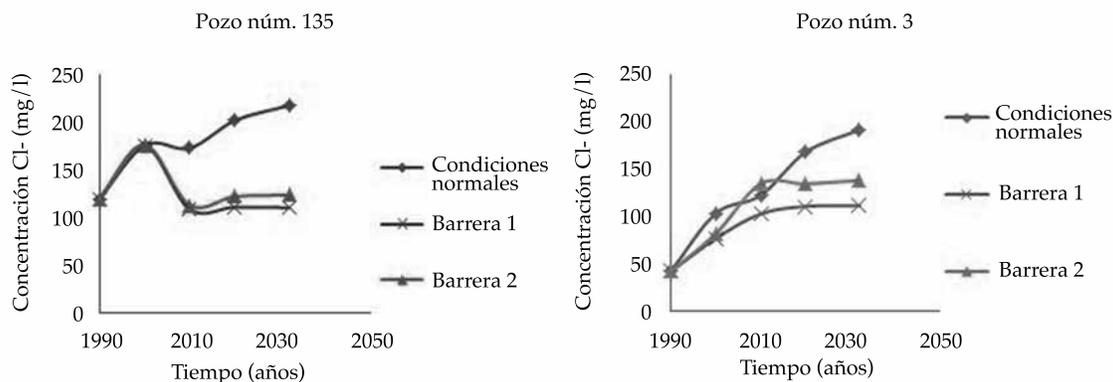


Figura 3. Comportamiento de la concentración de cloruro para los pozos número 135 y 3.

concentración de cloruros con las barreras de pozos; y entre “doble barrera 1 y 2”, la ventaja de la “doble barrera 1” es que mejora aún más la concentración de cloruros que el escenario doble barrera 2.

## Conclusión

Se concluyó que la opción “doble barrera 1” presenta las condiciones ideales para lograr el objetivo propuesto en los pozos de la porción sur del acuífero.

Hay opciones de aprovechamiento del agua, producto del bombeo en la barrera de pozos.

Se identifican de manera potencial tres opciones de aprovechamiento del agua extraída de la doble barrera, las cuales, previo análisis y estudios correspondientes, pudieran redituar en mejoras tanto para el ámbito económico como el social de la región: desalinización para agua potable de Guaymas y Empalme; riego de halófitas para producción de biocombustibles; abastecimiento de estanques para la siembra y reproducción de especies acuáticas.

Se recomienda mantener actualizado el modelo de simulación del acuífero del valle de Boca Abierta, considerando nueva información referente a niveles estáticos y análisis fisicoquímicos del agua, con la finalidad de realizar la posauditoria, al verificar las predicciones del

modelo. Asimismo, se requiere la creación de una red de pozos de monitoreo en campo que respalde la obtención de datos para llevar a cabo el mantenimiento propuesto.

## Agradecimiento

Esta nota se basa en el trabajo de tesis de maestría (Velázquez, 2013) realizado gracias al financiamiento del Instituto México-Estados Unidos de la Universidad de California (UC MEXUS) y el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México (Conacyt) para el proyecto Control de intrusión salina de acuíferos costeros.

## Referencias

- Canales, E. A. G., & Islas, E. L. A. (2013). *Hidrología subterránea*. Ciudad Obregón, Sonora: Instituto Tecnológico de Sonora.
- Cardona, A., Carrillo, R. J. J., Huizar, A. E. R., & Graniel, C. E. (2003). Salinization in Coastal aquifers of Arid Zones: An Example from Santo Domingo, Baja California Sur, México. *Environmental Geology*, 45, 350-366.
- Díaz, M. S. (2013). Modelos de acuíferos (pp. 195-213). En: *Hidrología subterránea*. Canales E. A. G., & Islas, E. L. A. (eds.). Ciudad Obregón, Sonora: Instituto Tecnológico de Sonora.
- Díaz, O. M. L. (2009). *Evaluación de factibilidad de una barrera de pozos de inyección contra la intrusión salina en el acuífero del Valle de Boca Abierta, Sonora*. Titulación por tema de sustentación para obtener el título de Ingeniería en Ciencias Ambientales. Ciudad Obregón, Sonora: Instituto Tecnológico de Sonora.

- Guo, W., & Langevin, C. D. (2002). *User's Guide to Seawat: A Computer Program for Simulation of Three-Dimensional Variable-Density Ground-Water Flow*. Tallahassee, USA. (No. 06-A7) Geological Survey.
- Manjarrez, G. D. G. (2011). *Aplicación del modelo Seawat para prevenir la intrusión salina en los acuíferos de Guaymas y Boca Abierta, Sonora*. Tesis para obtener el grado de Maestra en Ciencias Geológicas. Hermosillo, México: Universidad de Sonora.
- Marín, L. E. (1995). Técnicas para la simulación numérica de acuíferos costeros con intrusión salina. *Tecnología y Ciencias del Agua*. Recuperado el 21 de enero de 2016. [https://www.imta.gob.mx/tyca/index.php?page=shop.product\\_details&flypage=flypage.tpl&product\\_id=220&category\\_id=46&keyword=Luis+E+Marin&option=com\\_virtuemart&Itemid=88&lang=es](https://www.imta.gob.mx/tyca/index.php?page=shop.product_details&flypage=flypage.tpl&product_id=220&category_id=46&keyword=Luis+E+Marin&option=com_virtuemart&Itemid=88&lang=es).
- Nuno, J. M. A., & Haie, N. (2001). *Modeling of Rural Usage of Groundwater subject to Saltwater Intrusion* (pp. 1-12). First International Conference on Saltwater Intrusion and Coastal Aquifers Monitoring, Modeling and Management.
- Pool, M., & Carrera, J. (2010). Dynamics of Negative Hydraulic Barriers to Prevent Seawater Intrusion. *Hydrogeology Journal*, 18, 95-105.
- Quiñonez, P. J. A., Canales, E. A. G., Sánchez, C. S., & Islas, E. L. A. (2005). *Avance de un modelo para la construcción de una barrera de pozos de infiltración contra la intrusión salina en Boca Abierta, Sonora*. Resumen para el VIII Seminario de Acuíferos Costeros de Sonora, Hermosillo, Sonora, México.
- Velázquez, N. C. E. (2013). *Utilización del modelo Seawat para simulación de una doble barrera de pozos de bombeo sobre la interfase salina del acuífero del Valle de Boca Abierta, Sonora, que permita frenar el avance de la intrusión salina*. Tesis para obtener el grado de Maestría en Ciencias en Recursos Naturales. Ciudad Obregón, México: Instituto Tecnológico de Sonora.
- Velázquez, N. C. E., Islas, E. L. A., Canales, E. A. G., & Encinas, Y. D. H. (2010). *Utilización del modelo visual Modflow para predicción del bombeo de equilibrio en el acuífero del Valle de Boca Abierta, Sonora*. IV Congreso Regional de Ciencias Ambientales, Ciudad Obregón, Sonora, México.

## Dirección institucional de los autores

Mtro. Armando G. Canales

Consultor hidrogeólogo  
Francisco Almada # 614, Col. Villaitson  
85130 Ciudad Obregón, Sonora, México  
Tel. +52 (644) 4152 533  
agcanales@live.com.mx

M.I. Carlos E. Velázquez

Instituto Tecnológico de Sonora  
Departamento de Ingeniería Civil  
Campus Náinari  
Antonio Caso s/n y E. Kino, Colonia Villa Itson  
85130 Ciudad Obregón, Sonora, México  
Teléfono: +52 (644) 4109 000, extensión 1380  
carlos.velazquez@itson.edu.mx

M.I. Luis Islas

Instituto Tecnológico de Sonora  
Departamento de Ingeniería Civil  
Campus Náinari  
Antonio Caso s/n y E. Kino, Colonia Villa Itson  
85130 Ciudad Obregón, Sonora, México  
Teléfono: +52 (644) 4109 000, extensión 1737  
luis.islas@itson.edu.mx

M.C. Randall T. Hanson

Research Hydrologist  
US Geological Survey  
California Water Science Center  
San Diego Projects Office  
4165 Spruance Road, Suite 200  
San Diego, CA 92101, USA  
Phone: (619) 225-6139 (office #)  
rthanson@usgs.gov

Dr. Alyssa Dausman

US Geological Survey  
Southeast Region  
1770 Corporate Drive Suite 500  
Norcross, GA 30093, USA  
Phone: (228) 688 2530  
adausman@usgs.gov