

## EFFECTOS MECÁNICOS INDUCIDOS POR MAREA EN EL ACUÍFERO PUELICHE

<sup>1,2</sup>Cuello, Julián E.; <sup>1,2,3</sup>Guarracino, Luis; <sup>1,2</sup>Monachesi, Leonardo B. y <sup>2,3</sup>Kruse, Eduardo E.

<sup>1</sup> Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, Paseo del Bosque s/n, La Plata, Argentina.

Tel: 0221-423-6593. Fax: 0221-423-6591. e-mail: [julianc@fcaglp.unlp.edu.ar](mailto:julianc@fcaglp.unlp.edu.ar)

<sup>2</sup> Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Avda. Rivadavia 1917, C1033AAJ, Ciudad de Buenos Aires, Argentina. Tel: 011-5983-1420.

<sup>3</sup> Facultad de Ciencias Naturales y Museo, Av. 122 y 60, La Plata, Argentina.  
Tel: 0221-422-8479. Fax: 423-2734 int. 28.

### Resumen

En la mayoría de los acuíferos costeros las variaciones periódicas de la marea inducen fluctuaciones en los niveles piezométricos debido a una conexión hidráulica entre el acuífero y el río. Cuando el acuífero y el río no se encuentran conectados hidráulicamente, las fluctuaciones observadas tienen un origen puramente mecánico. En este caso, la marea actúa como una fuente de compresión oscilatoria induciendo en el acuífero variaciones de altura piezométrica. Para modelar este fenómeno se asume que la región del acuífero ubicada debajo del río responde como un cuerpo elástico a las variaciones de presión inducidas por la marea. En este contexto, el objetivo del presente trabajo es estimar la difusividad hidráulica del acuífero Puelche mediante el análisis de señales de marea inducida medidas en pozos de monitoreo y señales de marea del río. La estimación se realiza utilizando una solución analítica y un modelo numérico. Las señales de marea fueron provistas por el Servicio de Hidrografía Naval y las mediciones en pozos cercanos a la costa fueron realizadas por los autores en el marco del Proyecto de Investigación Orientado (PIO CONICET-YPF) "Dinámica del acuífero Puelche en la planicie costera del Río de La Plata". La estimación de la difusividad hidráulica del acuífero Puelche mediante los métodos propuestos resultó satisfactoria y consistente con los parámetros hidráulicos de la zona.

**Palabras claves:** Marea inducida, Acuífero Puelche, Efecto mecánico, Difusividad hidráulica.

### Abstract

In most coastal aquifers the periodic variations of tides induce fluctuations of the pressure head due to the hydraulic connection between the river and the aquifer. When this hydraulic connection is absent, the observed head fluctuations are produced by a purely mechanical effect. In this case, the tides produce an oscillatory compression that generates head fluctuations in the aquifer. In order to model this phenomenon we assume that the aquifer below the river behaves as an elastic body in response to the pressure variations induced by the river tides. The aim of this work is to analyze both the tidal signals and the induced head fluctuations in order to estimate the hydraulic diffusivity in a coastal zone of Río de La Plata. This estimate is performed using an analytical solution and a numerical model. The tidal signals are provided by the Naval Hydrographic Service and the head fluctuation data was measured by the authors within the framework of an oriented research project called "Puelche aquifer dynamics in the Río de La Plata". The estimated value for the hydraulic diffusivity of Puelche aquifer is satisfactory and consistent with the hydraulic parameters of the area.

**Keywords:** Induced Tides, Puelche aquifer, Mechanical effect, Hydraulic diffusivity.

## INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

La marea inducida en acuíferos costeros es un caso particular de interacción entre aguas superficiales y subterráneas. Jacob (1950) y Ferris (1951) sentaron las bases teóricas del método de marea inducida al resolver la ecuación de flujo clásica para un acuífero homogéneo en contacto hidráulico con un cuerpo de agua superficial. Esta solución analítica ha sido muy utilizada para la caracterización hidráulica de acuíferos costeros. En casos en los que el acuífero y el cuerpo de agua superficial no están hidráulicamente conectados por encontrarse total o parcialmente confinados, las variaciones de altura piezométrica se deben a efectos puramente mecánicos, como ocurre en la interacción entre el Puelche y el Río de La Plata. Las variaciones de marea actúan como una fuente oscilatoria de presión que comprime y descomprime el material subyacente, generando variaciones de altura piezométrica que se propagan tierra adentro. Para describir este fenómeno, van der Kamp (1972) derivó una ecuación bajo la hipótesis de que el acuífero está perfectamente confinado y se extiende infinitamente por debajo del cuerpo de agua superficial.

El objetivo del presente trabajo es estudiar las fluctuaciones de niveles piezométricos medidas en pozos de monitoreo generadas por los efectos de carga del Río de La Plata sobre el acuífero Puelche en la localidad de Ensenada. Las señales de marea fueron provistas por el Servicio de Hidrografía Naval y las mediciones en pozos fueron realizadas en el marco del Proyecto de Investigación Orientado (PIO CONICET-YPF) “Dinámica del acuífero Puelche en la planicie costera del Río de La Plata”.

El acuífero Puelche constituye el recurso más importante de la región por su calidad y productividad. Está constituido por arenas de origen fluvial, posee un espesor que varía entre 20 y 30 metros y se encuentra semiconfinado por capas de baja permeabilidad. El acuífero se extiende por debajo del Río de La Plata hasta alcanzar la margen de la República Oriental del Uruguay (Rinaldi et al., 2006 y Parker, 1990). Por debajo del río, el acuífero se encuentra semiconfinado por la formación Atalaya (arcillas marinas). La figura 1 es una imagen de Google Earth que muestra la zona de estudio y las ubicaciones de los pozos de monitoreo y la estación mareográfica.

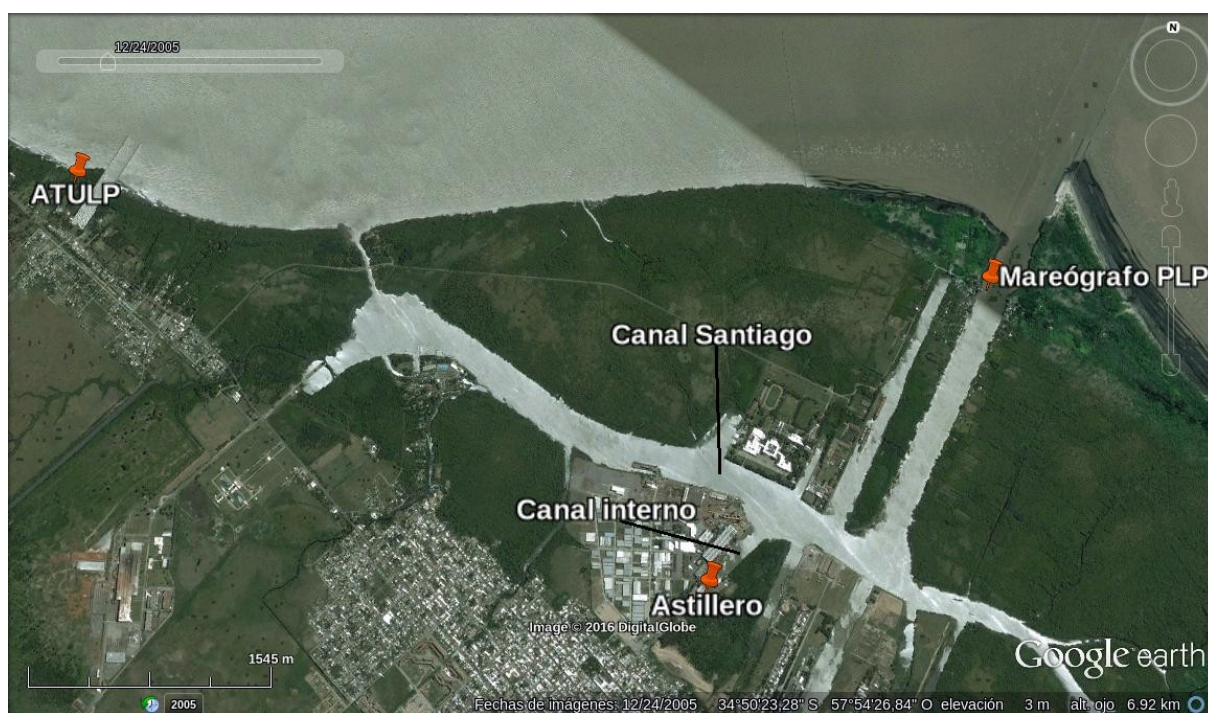


Figura 1. Área de estudio. Las marcas “ATULP” y “Astillero” corresponden a los 2 pozos de monitoreo y la marca “Mareógrafo PLP” corresponde al mareógrafo Puerto La Plata.

El primero de los pozos, que denominaremos ATULP por encontrarse en el predio de dicha asociación, se sitúa a 130 metros de la costa del Río de La Plata. Las señales de este pozo serán utilizadas para realizar una estimación de la difusividad hidráulica empleando una solución analítica. El segundo de los pozos (Astillero) se encuentra dentro del predio de Astillero Río Santiago. Este pozo tiene la particularidad de estar ubicado cerca de tres cursos de agua: a 60 metros de un canal interno, a 600 metros del cuerpo principal del Canal Santiago y a 2500 metros de la costa del Río de La Plata. Mediante un modelo numérico se analizará la influencia de estas distancias para determinar cuál de estos tres cursos de agua es el responsable de la mayor contribución a la marea inducida observada.

## METODOLOGÍA

En esta sección se presenta el modelo conceptual junto con la solución analítica y el modelo numérico empleados para el análisis de los datos. El modelo conceptual del sistema acuífero considerado para el análisis de las fluctuaciones de altura piezométrica se ilustra en la figura 2. Se asume que no existe contacto hidráulico entre el acuífero Puelche y el Río de La Plata y que el efecto de goteo de la capa semiconfinante es despreciable. Esta hipótesis es válida para la señal de marea cuyo principal período de análisis es de aproximadamente 12 horas.

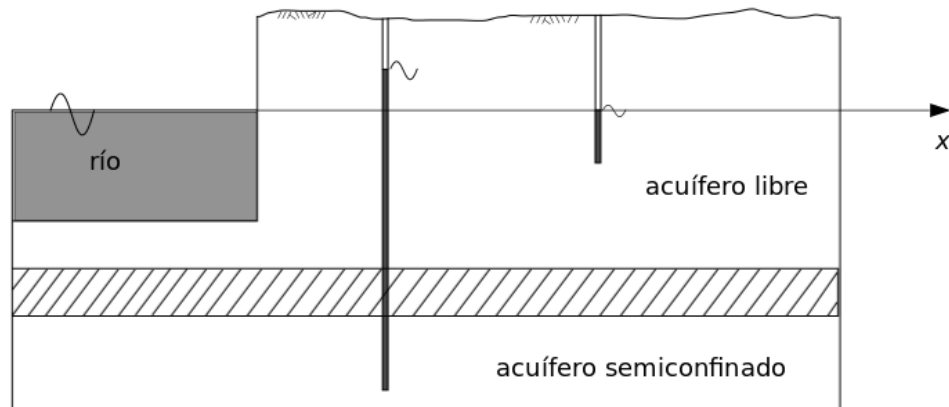


Figura 2. Modelo conceptual de interacción entre el río y el acuífero.

## Solución analítica

Si asumimos una señal de marea cosenoidal ( $A \cos(\omega t)$ ) de amplitud  $A$  [m] y de frecuencia  $\omega$  [ $s^{-1}$ ], la fluctuación de altura piezométrica inducida en el acuífero Puelche puede expresarse de la siguiente forma (van der Kamp, 1972):

$$h(x, t) = \frac{L_e}{2} A e^{-ax} \cos(\omega t + ax) \quad (1)$$

donde  $L_e$  es un factor denominado eficiencia de carga, que depende de las compresibilidades de la formación y del agua que la satura,  $x$  [m] la distancia a la línea de costa y  $t$  [d] el tiempo. El factor  $a$  [ $m^{-1}$ ] se denomina coeficiente de propagación de marea y se expresa de la siguiente manera:

$$a = \sqrt{\frac{\omega S_s}{2K_s}} \quad (2)$$

siendo  $K_s$  [m/d] la conductividad hidráulica y  $S_s$  [ $m^{-1}$ ] el almacenamiento específico. De

acuerdo a la ecuación (1), la amplitud de la variación de altura piezométrica en el acuífero Puelche  $A_p$  [m] puede expresarse de la siguiente forma:

$$A_p(x) = \frac{L_e}{2} A e^{-ax} \quad (3)$$

A partir de las dos últimas expresiones puede despejarse el valor de difusividad hidráulica del acuífero  $D_h$  [m<sup>2</sup>/d]:

$$D_h = \frac{K_s}{S_s} = \frac{\omega x^2}{2[\ln(A/A_p)]^2} \quad (4)$$

Esta última expresión será utilizada para determinar la difusividad del acuífero Puelche a partir de la marea observada en el primer pozo.

### Modelo numérico

La solución dada por la ecuación (1) sólo es válida para una marea de una única frecuencia. En caso de contar con una marea más realista que contiene distintas frecuencias debe resolverse el siguiente problema diferencial:

$$\frac{\partial^2 h(x,t)}{\partial x^2} = \frac{S_s}{K_s} \frac{\partial h(x,t)}{\partial t} \quad (5)$$

$$h(0,t) = \frac{L_e}{2} m(t) \quad (6)$$

$$q(L,t) = 0 \quad (7)$$

$$h(x,0) = 0 \quad (8)$$

donde  $m(t)$  es la señal de marea medida en el río,  $q$  [m/d] es el flujo de agua y  $L$  [m] la longitud del acuífero medida desde la línea de costa ( $x=0$ ) en dirección tierra adentro. Este sistema fue resuelto en forma numérica mediante un método híbrido mixto de elementos finitos utilizando un código en lenguaje Fortran (Cuello 2014, Cuello et. al., 2014). A partir de un valor de difusividad hidráulica, el código permite obtener de manera rápida y eficiente la variación de altura piezométrica en función del tiempo para cualquier distancia a la línea de costa, utilizando como condición de borde una señal mareográfica con un amplio contenido de frecuencias. En el presente trabajo, la solución numérica se utilizará para validar los resultados de la solución analítica y para determinar el curso de agua responsable de la mayor contribución a la marea observada en el pozo Astillero.

### RESULTADOS, ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

En la figura 3 se ilustran los datos utilizados en el presente análisis. Estos datos corresponden a las variaciones temporales de altura piezométrica correspondientes al acuífero Puelche para las estaciones ATULP y Astillero, y las variaciones de altura del Río de La Plata. Las 3 señales tienen un intervalo de muestreo de 1 hora y una extensión de 10 días, comenzando el día 9 de septiembre de 2015.



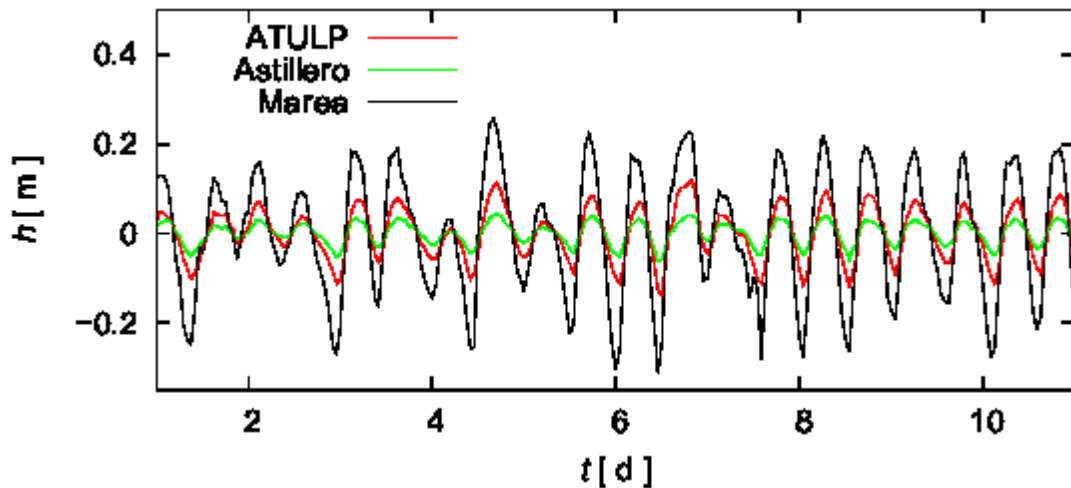


Figura 3. Variación de altura piezométrica del acuífero Puelche correspondiente a las estaciones ATULP y Astillero y variación de altura del Río de La Plata.

Para calcular la difusividad hidráulica mediante la ecuación (4) se utilizarán las amplitudes de la componente principal de marea. Con este fin se calcularon los espectros de Fourier de las señales. La figura 4 muestra el espectro de amplitud de la señal de marea del Río de La Plata y el espectro de amplitud de las fluctuaciones de altura piezométrica del acuífero Puelche en el pozo ATULP.

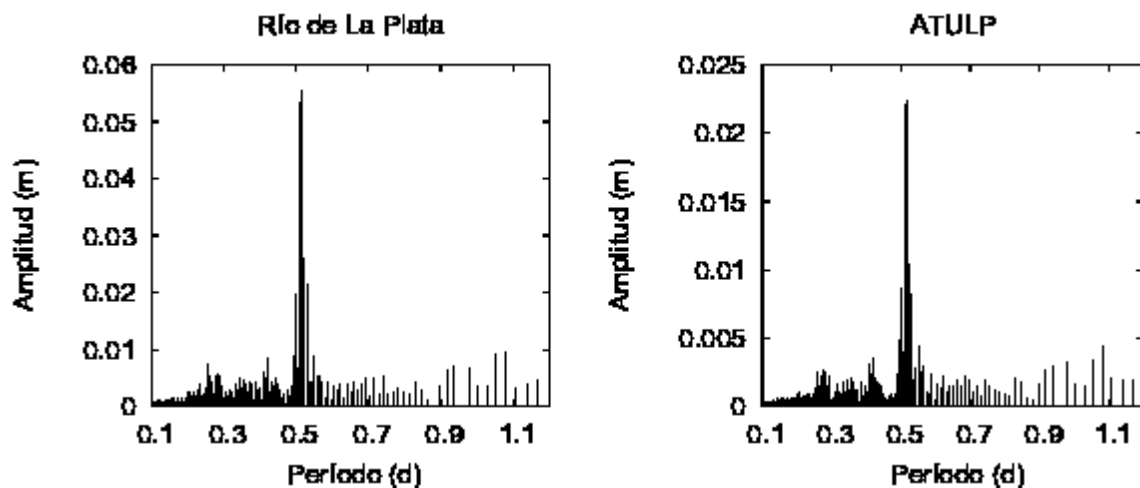


Figura 4. Espectros de amplitud de las señales Río de La Plata y ATULP.

En ambas señales se evidencia un marcado predominio de la componente semidiurna (12,4 hs) que corresponde a  $\omega=12.16 \text{ d}^{-1}$ . Las amplitudes correspondientes a dicha componente son  $A=0,0553 \text{ m}$  y  $A_p=0.0224 \text{ m}$ . Utilizando estos valores en la ecuación (4) se obtiene un valor de difusividad hidráulica  $D_h=2,3 \times 10^5 \text{ m}^2/\text{d}$  para el acuífero Puelche en la región de estudio. El valor medio de conductividad hidráulica obtenido por Auge (2001) para este acuífero es de 30 m/d. Dicho valor surge de 26 ensayos de bombeo que arrojaron valores extremos de 9 y 57 m/d. Considerando como valor representativo  $k=30 \text{ m/d}$  obtenemos un valor de almacenamiento específico  $S_s=1.3 \times 10^{-5} \text{ m}^{-1}$ . Este valor resulta consistente con las características texturales y granulométricas del acuífero.

Utilizando los valores de parámetros hidráulicos obtenidos mediante la solución analítica se realizó una simulación numérica usando la señal de marea con todo su contenido de frecuencia. La figura 5 muestra los resultados obtenidos.

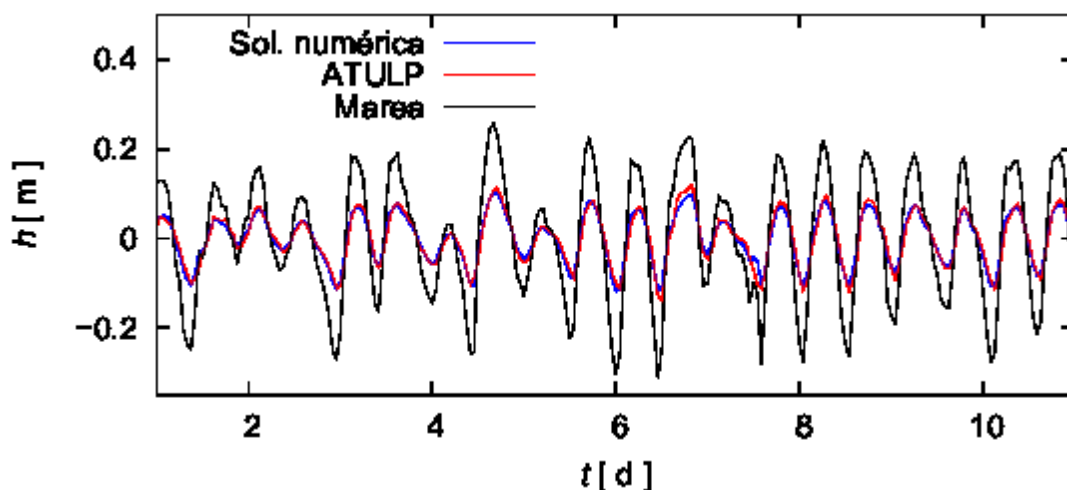


Figura 5. Simulación numérica de la variación de altura piezométrica en el pozo ATULP y el dato correspondiente a dicho pozo. En el gráfico se incluye la señal de marea.

Como puede observarse, los valores de altura piezométrica simulados logran representar muy satisfactoriamente la señal observada en el pozo. Esto permite concluir que la estimación de difusividad hidráulica mediante el método analítico es correcta y que el modelo conceptual adoptado es representativo del comportamiento hidráulico del sistema.

El análisis de marea inducida en el pozo Astillero es más complejo, ya que la marea observada se debe a una superposición de efectos mecánicos de tres cursos de agua localizados a distintas distancias. Con los mismos parámetros hidráulicos obtenidos anteriormente es posible realizar una simulación numérica de la marea inducida para las distancias correspondientes a cada curso. En la figura 6 se observa el resultado de la simulación para una distancia a la costa de 600 metros (distancia al Canal Santiago).

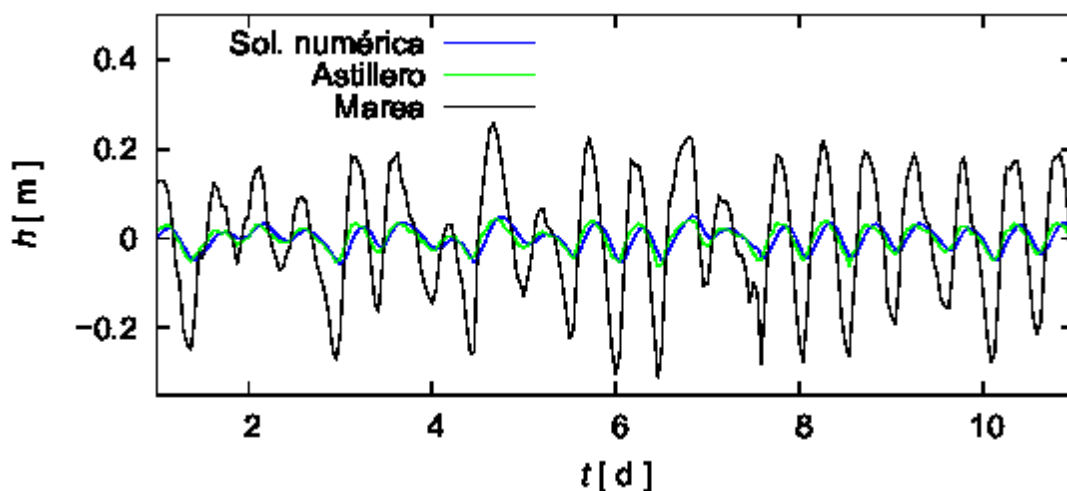


Figura 6. Ajuste de la solución numérica a la señal correspondiente al pozo Astillero. En el gráfico se incluye la señal de marea.

Como se visualiza en la figura, el resultado de la simulación representa muy satisfactoriamente el dato de marea inducida observado. Por el contrario, cuando se utilizan las distancias correspondientes a los dos cursos restantes (60 y 2500 m), la señal simulada difiere notablemente de la señal registrada. Esto permite concluir que en la señal del pozo Astillero predomina el efecto de carga generado por el cuerpo principal del Canal Santiago por sobre el efecto del canal interno, de menor volumen, y por sobre el Río de La Plata, que se sitúa a una distancia mucho mayor del pozo.

## **CONCLUSIONES**

En el presente trabajo se ha estudiado el efecto mecánico inducido por mareas en el acuífero Puelche en la planicie costera del Río de La Plata. En primer lugar se realizó una estimación de difusividad hidráulica mediante un método analítico, utilizando las amplitudes de las componentes semidiurnas de la señal de marea del río y de la variación de altura piezométrica en un pozo cercano a la costa (ATULP). Luego, se simuló numéricamente la marea inducida considerando todo el contenido espectral de la señal y utilizando la difusividad hidráulica estimada mediante el método analítico. Los resultados de esta simulación fueron muy satisfactorios y permitieron validar tanto el valor de difusividad hidráulica estimado mediante la solución analítica como el modelo conceptual propuesto. Finalmente, mediante la utilización del modelo numérico, fue posible determinar que en la señal de marea inducida en el pozo Astillero predomina el efecto mecánico debido al cuerpo principal del Canal Santiago. Este trabajo ilustra la utilidad del método de marea inducida para el análisis de acuíferos costeros y sienta las bases para trabajos futuros en la zona de estudio.

## **REFERENCIAS**

- Auge, M.P.**, 2001. Hidrogeología de La Plata – Argentina. Revista Latinoamericana de Hidrogeología, 1:27-40.
- Cuello, J.E.**, 2014. Simulación numérica de fluctuaciones de altura piezométrica inducidas por marea en acuíferos costeros heterogéneos. Tesis de Grado, FCAG-UNLP, 47 páginas.
- Cuello, J.E., Monachesi L.B., Guarracino, L.**, 2014. Simulación numérica de fluctuaciones de altura piezométrica inducidas por marea en acuíferos costeros heterogéneos. Actas del II Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras, 10 páginas.
- Ferris, J.G.**, 1951. Cyclic fluctuations of water level as a basis for determining aquifer transmissibility. Int. Assoc. Sci. Hydrol. Pub, 33: 148-155.
- Jacob, C.E.**, 1950. Flow of groundwater. In: Rouse H de Engineering. Wiley, New York, 764 páginas.
- Parker, G.**, 1990. Estratigrafía del Río de La Plata. Rev. Asoc. Geol. Arg., 45(3-4):193-204.
- Rinaldi, V.A., Abril, E.G., Clariá J.J.**, 2006. Aspectos geotécnicos fundamentales de las formaciones del delta del Río Paraná y del estuario del Río de La Plata. Rev. Int. de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil, 6(2):131-148.
- van der Kamp, G.**, 1972. Tidal fluctuations in a confined aquifer extending under the sea. Proc. Intl. Geol. Congr, 24:101-106.