

Modelado y análisis del efecto de las Sudestadas en acuíferos costeros

M. Gabriela Goñi¹, Leonardo B. Monachesi^{1,2} y Luis Guarracino^{1,2}

¹ Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, Paseo del Bosque s/n, 1900, La Plata, Tel: 0221-4236593.

² Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Av. Rivadavia 1917, C1033AAJ, Ciudad de Buenos Aires, Tel: 011-5983-1420.

Mail de contacto: gabygoni@carina.fcaglp.unlp.edu.ar

RESUMEN

Las Sudestadas son un tipo de marea meteorológica que produce periódicamente un aumento del nivel del Río de La Plata cuya consecuencia más visible son los anegamientos en las zonas costeras. Sin embargo, este fenómeno también afecta a los acuíferos costeros, constituyendo un caso particular de interacción entre aguas superficiales y aguas subterráneas. En este trabajo se presenta un modelo teórico sencillo que permite analizar y cuantificar el efecto de una Sudestada en un acuífero costero. En primer lugar, la señal mareográfica correspondiente a un evento de Sudestada se descompone mediante una serie de Fourier. Luego, asumiendo un modelo simplificado de acuífero costero y utilizando la señal mareográfica como condición de borde en las ecuaciones de flujo, se estima la marea meteorológica inducida en el acuífero. Mediante el método propuesto es posible cuantificar el efecto de una Sudestada y delimitar la zona afectada durante este tipo de eventos.

Palabras clave: Sudestadas, marea inducida, acuíferos costeros.

ABSTRACT

Southeasterns are a type of meteorological tides which periodically produces an increase of water level in La Plata River, whose most visible consequence is flooding in coastal areas. However, this event also affects coastal aquifers and can be considered a particular case of interaction between surface water and groundwater. In this work we present a simple theoretical model that allows to analyze the temporal pattern of a Southeastern and quantify its effect on coastal aquifers. First the time series of the water level registered during of a Southeastern event is decomposed using a Fourier series. Then, assuming a simplified model of a coastal aquifer and using the time series as a boundary condition in the flow equations, the induced meteorological tide in the aquifer is estimated as a function of the distance to the coast. The proposed method can be used to quantify the Southeastern effect and delimitate the zone affected by this type of events.

Keywords: Southeasterns, induced tide, coastal aquifer.

Introducción y objetivos

Las Sudestadas son causadas por sistemas de vientos frontales fuertes de dirección sudeste-noroeste que pueden alcanzar velocidades de hasta 100 Km/h. Usualmente las Sudestadas están asociadas a tormentas que pueden afectar el área por varios días produciendo anegamientos en las zonas costeras (Rodríguez y Lanfredi, 1996; Piedra-Cueva y Borelli, 2003).

El efecto que produce un evento de Sudestada sobre las variaciones del nivel del Río de La Plata ha sido estudiado por varios autores. Piedra-Cueva y Borelli (2003) desarrollan un modelo numérico bidimensional para estimar las variaciones del nivel del río

originadas por mareas astronómicas y mareas meteorológicas. Escobar et al., (2004) realizan una clasificación de las Sudestadas a partir de su efecto sobre el nivel del Río de la Plata. En un trabajo reciente, Santoro et al., (2013) llevan a cabo un estudio integral del efecto de una Sudestada sobre el patrón de flujo regional del Río de La Plata mediante simulación numérica, utilizando un gran número de registros de estaciones mareográficas.

Además de producir variaciones en el nivel del río, y por lo tanto en el patrón de flujo superficial, las Sudestadas pueden tener un efecto significativo sobre el flujo subterráneo en los acuíferos costeros. Durante la ocurrencia de una marea meteorológica se produce una inversión del sentido del flujo de agua del río a los acuíferos, lo que constituye un caso

particular de interacción entre aguas superficiales y aguas subterráneas. A pesar de su importancia este fenómeno en particular no ha sido lo suficientemente estudiado desde el punto de vista hidrogeológico.

El objetivo del presente trabajo es desarrollar un método de análisis basado en modelos teóricos simples que permitan caracterizar en términos matemáticos el patrón temporal de una Sudestada y cuantificar su efecto en los acuíferos costeros. En primer lugar se analizará una serie temporal del nivel observado en una estación mareográfica del Río de la Plata durante un evento de Sudestada con el fin de establecer su amplitud máxima y duración aproximada. La serie ha sido provista por el Grupo Mareas del Servicio de Hidrología Naval.

En segundo lugar se planteará un problema de valores de contorno basado en ecuaciones clásicas de flujo, utilizando la señal mareográfica como condición de borde. La solución del problema será obtenida tanto para el caso de un acuífero homogéneo como para uno heterogéneo. Para ello se utilizarán dos soluciones analíticas que han sido derivadas para una única componente armónica: la solución clásica de Jacob (1950) válida para un acuífero homogéneo y otra solución recientemente publicada para un acuífero heterogéneo (Monachesi y Guarracino, 2011). Por último, las soluciones obtenidas en ambos casos serán analizadas contemplando distintos escenarios hipotéticos.

Metodología

Análisis de la serie temporal

La serie temporal considerada corresponde al nivel del Río de La Plata medido en la estación mareográfica Puerto Buenos Aires (Palermo) ubicada en el muelle del Club de Pescadores de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina (34° 33' 41,29" S; 58° 23' 59,47" W). La serie fue registrada durante el mes de mayo del año 2000, con un intervalo de muestreo de una hora. Los valores del nivel del río están expresados en centímetros respecto del cero del mareógrafo siendo el nivel medio del mes 107,5 cm. Como puede observarse en la Figura 1 el evento de Sudestada tuvo lugar entre los días 16 y 20 de mayo, aproximadamente. El evento se manifiesta como un rápido aumento del nivel del río, alcanzando su valor máximo de 357 cm (249,5

cm por encima del nivel medio) a las 21 horas del día 16 de Mayo. Luego el nivel registra una disminución progresiva recuperando el valor medio mensual 3 días después de la ocurrencia del máximo.

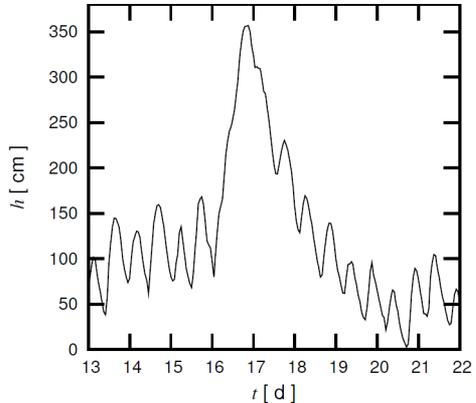


Figura 1. Señal registrada en la estación mareográfica de Palermo.

También puede observarse que la señal mareográfica registrada posee una fuerte componente de período principalmente semidiurno atribuible a la marea astronómica.

Con el objeto de facilitar el análisis y el cálculo de la marea inducida se realiza un desarrollo en serie de Fourier en cosenos de la serie temporal. Luego, el nivel de altura mareográfica $f(t)$ puede expresarse del siguiente modo:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{N-1} a_n \cos(\omega_n t), \quad (1)$$

siendo a_0 y a_n los coeficientes de Fourier calculados a partir de la serie que observada y ω_n las frecuencias angulares correspondientes.

Marea inducida en un acuífero costero

Para estimar la marea inducida se considera un modelo simplificado de acuífero costero, como el que se ilustra en la Figura 2. El acuífero es horizontal, semi-infinito, confinado y se encuentra en contacto hidráulico con el río. El eje x es horizontal, con origen en la línea de costa y positivo en dirección tierra adentro. Se asume que el flujo en el acuífero es horizontal y

obedece la ley de Darcy. El almacenamiento específico S_s , $[L^{-1}]$ se asume constante y se desprecian las variaciones en la densidad del agua.

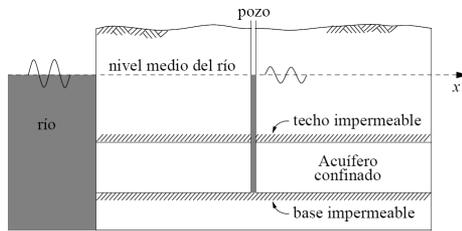


Figura 2. Representación esquemática de un acuífero costero confinado.

Bajo las mencionadas hipótesis, la ecuación que gobierna el flujo de agua en el acuífero es (Bear, 1988):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K(x) \frac{\partial h(x,t)}{\partial x} \right) = S_s \frac{\partial h(x,t)}{\partial t}, \quad (2)$$

donde $h(x,t)$ es la altura piezométrica en el acuífero $[L]$; $K(x)$ la conductividad hidráulica $[LT^{-1}]$; x la distancia a la costa $[L]$ y t el tiempo $[T]$. La ecuación (2) se obtiene combinando la ley de Darcy con la ecuación de continuidad. Aunque es estrictamente válida para acuíferos confinados puede ser aplicada a acuíferos libres si las fluctuaciones en h son pequeñas en comparación con el espesor del acuífero (Bear, 1988).

Para resolver la ecuación (2) es necesario imponer condiciones de borde en los límites del acuífero. En la interfase río-acuífero ($x=0$) la altura piezométrica coincide con el nivel del río, por lo tanto:

$$h(0,t) = f(t). \quad (3)$$

En el infinito la condición de borde impuesta es:

$$\lim_{x \rightarrow \infty} K(x) \frac{\partial h(x,t)}{\partial x} = 0, \quad (4)$$

la cual establece que el flujo tiende a cero con el aumento de la distancia a la costa.

A continuación se presentan dos soluciones analíticas del problema (2)-(4). En primer lugar se considera un modelo de acuífero homogéneo

y en segundo lugar un modelo heterogéneo en que la conductividad hidráulica aumenta linealmente con la distancia a la costa.

Modelo homogéneo

El problema (2)-(4) fue resuelto por Jacob (1950) asumiendo un acuífero homogéneo e imponiendo como condición de borde en la interfase río-acuífero una función armónica de tipo cosenoidal. Siguiendo las ideas de Jacob y utilizando el desarrollo en serie de Fourier (1) puede demostrarse que la solución del problema (2)-(4) es:

$$h(x,t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{N-1} a_n e^{-\alpha_n x} \cos(\omega_n t - \alpha_n x), \quad (5)$$

siendo

$$\alpha_n = \sqrt{\frac{\omega_n S_s}{2K}}. \quad (6)$$

Como puede observarse la solución es una superposición de funciones armónicas. Si se compara la solución (5) con la señal mareográfica dada por (1) puede observarse que la amplitud de cada componente armónica decae según un factor exponencial $\exp(-\alpha_n x)$, registrando además un retraso temporal dado por el término $\alpha_n x / \omega_n$ en el argumento de la función cosenoidal. Notar además que ambas señales poseen el mismo valor medio, dado por $a_0/2$.

Modelo heterogéneo

La hipótesis de homogeneidad en la conductividad hidráulica no siempre resulta adecuada, en particular si se trata de acuíferos costeros de origen aluvial. En estos acuíferos los sedimentos más finos se acumulan aguas abajo en la zona deposicional (cerca de la costa) dando como resultado un aumento progresivo de la conductividad hidráulica con la distancia a la línea de costa. Un primer intento por modelar estas variaciones consiste en asumir que la conductividad hidráulica aumenta linealmente con x de la siguiente manera:

$$K(x) = K_0(1 + bx), \quad (7)$$

siendo K_0 $[LT^{-1}]$ la conductividad hidráulica en $x=0$ y b $[L^{-1}]$ la tasa de aumento de la

conductividad hidráulica. Monachesi y Guarracino (2011) proponen una solución aproximada del problema (2)-(4) asumiendo una condición de borde tipo armónica y considerando el modelo de variación lineal de K dado por (7). Utilizando esta solución y procediendo del mismo modo que en el caso homogéneo se puede demostrar que la altura piezométrica en el caso heterogéneo tiene la forma:

$$h(x,t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{N-1} a_n \frac{e^{-L_n(x)}}{(1+bx)^{1/4}} \cos[-L_n(x) + \omega_n t], \quad (8)$$

siendo

$$L_n(x) = 2 \frac{\alpha_n}{b} (\sqrt{1+bx} - 1). \quad (9)$$

La solución (8) es válida para valores de b que cumplan con la siguiente relación:

$$b \square 2^{7/2} \alpha_n \approx 10 \alpha_n. \quad (10)$$

Las soluciones (6) y (8) permiten predecir la marea inducida como función de la distancia a la costa y de los parámetros hidráulicos del acuífero. En la sección siguiente se presentan ejemplos hipotéticos que permiten analizar el efecto de la Sudestada en función de la distancia a la línea de costa.

Ejemplos

Caso homogéneo

Para el estudio del caso homogéneo se consideraron los parámetros hidráulicos correspondientes a los sedimentos postpampeanos. La conductividad hidráulica utilizada fue $K(x)=K=0,22$ m/día, que resulta de promediar los valores propuestos por Auge (2004). El almacenamiento específico utilizado fue $S_s=5,3 \times 10^{-5}$, valor estimado por Lissa (2010).

A modo de ilustración, la Figura 3 muestra el nivel registrado en la estación mareográfica junto con las curvas de altura piezométrica en tres puntos de observación ubicados a 20, 60 y 120 metros de la costa, respectivamente. Como puede observarse, a medida que aumenta la

distancia a la costa la amplitud de la señal decae, produciéndose además un retraso temporal. Notar que las altas frecuencias (debidas a la marea astronómica) se atenúan fuertemente con el aumento de la distancia. En particular la amplitud de la componente semidiurna es muy pequeña para $x=60$ m y prácticamente nula para $x=120$ m.

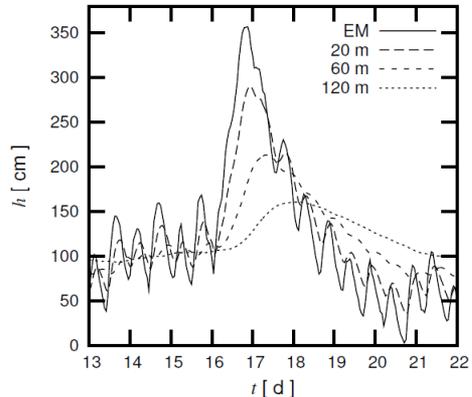


Figura 3. Nivel registrado en la estación mareográfica (EM) y altura estimada en pozos ubicados a 20, 60 y 120 metros de la costa para un acuífero homogéneo.

Para simplificar el análisis de la respuesta del acuífero se calculó el nivel máximo alcanzado durante la Sudestada en función de la distancia a la costa. En la Figura 4 se muestran las curvas de amplitud máxima de la altura piezométrica para el evento considerado y para la componente armónica semidiurna. Las amplitudes están normalizadas por sus correspondientes valores en $x=0$.

A partir del análisis de la Figura 4 se observa que la caída de amplitud de la Sudestada es mucho menor que la de la marea astronómica semidiurna. Esto se debe a que el espectro de la señal de la Sudestada está principalmente constituido por componentes de baja frecuencia cuya caída de amplitud es menor que la caída correspondiente a las altas frecuencias (ver ecuaciones (5) y (6)). Este hecho permite concluir que la señal de Sudestada puede penetrar a mayores distancias que la marea astronómica, pudiendo ser registrada en pozos más alejados de la línea de costa.

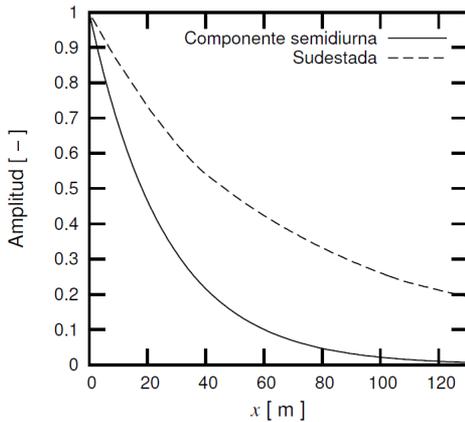


Figura 4. Curvas de amplitud máxima de la señal de Sudestada y de la componente semidiurna de la marea astronómica.

Caso heterogéneo

En el caso del acuífero heterogéneo se utilizó el mismo valor de almacenamiento específico que para el caso homogéneo. Para modelar la conductividad hidráulica se tomó como valor de conductividad K_0 el valor medio de Auge (2004) y para la tasa de conductividad hidráulica se asumió $b=0,1 \text{ m}^{-1}$.

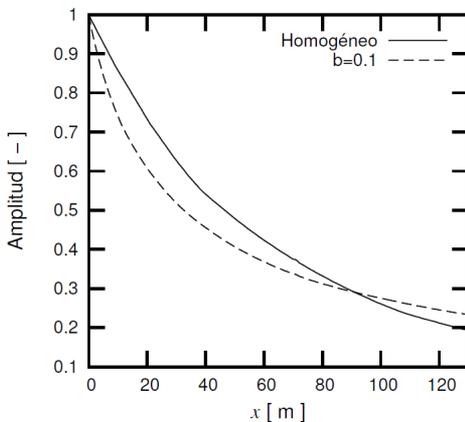


Figura 5. Curvas de amplitud máxima de la señal de Sudestada para los acuíferos homogéneo y heterogéneo.

Del mismo modo que para el caso homogéneo se efectuó el cálculo de la curva de amplitud máxima en función de x . Esta curva se muestra en la Figura 5, junto con la curva de

amplitud correspondiente al caso homogéneo. Como puede observarse, para distancias cercanas a la costa la amplitud de la señal es menor para el caso heterogéneo. Sin embargo lejos de la línea de la costa esta situación se invierte, resultando mayor la amplitud para el caso heterogéneo.

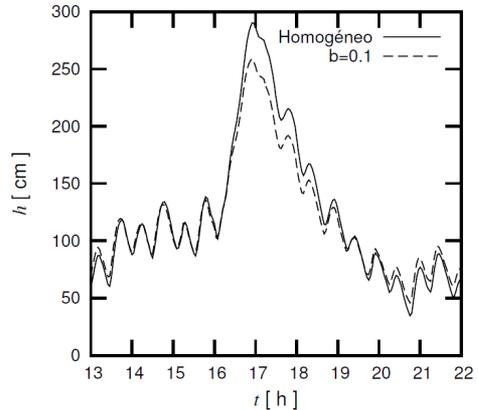


Figura 6. Altura piezométrica en un pozo ubicado a 20 metros de la costa.

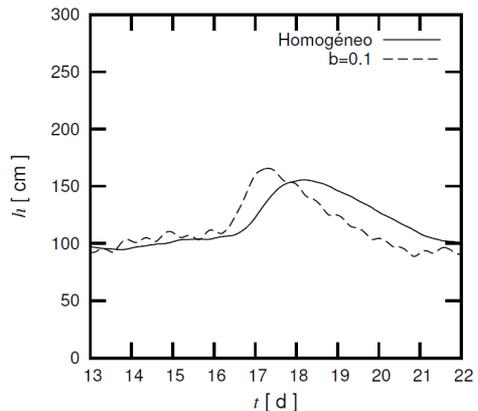


Figura 7. Altura piezométrica en un pozo ubicado a 130 metros de la costa.

En las Figuras 6 y 7 se muestran las alturas piezométricas en pozos ubicado a 20 metros y 130 metros de la costa respectivamente. Al comparar las figuras es posible verificar la inversión de las amplitudes correspondientes a los acuíferos homogéneo y heterogéneo que

predice la Figura 5. Puede observarse además que en el pozo más alejado (Figura 7) las altas frecuencias se encuentran más atenuadas en el caso homogéneo y que existe un pequeño desfase temporal entre ambas señales.

Conclusiones

En este trabajo se ha presentado una metodología para estimar las mareas inducidas durante una Sudestada en acuíferos costeros. Para realizar el análisis se utilizaron soluciones analíticas desarrolladas para el caso particular de mareas astronómicas inducidas tanto en acuíferos homogéneos como en acuíferos que presentan un aumento lineal de la conductividad hidráulica. La metodología propuesta fue utilizada para analizar la marea inducida en los sedimentos de la formación Postpampeano durante un evento típico de Sudestada en el Río de La Plata. Los resultados muestran claramente que las mareas astronómicas se atenúan más rápidamente que la Sudestada. Esta última puede ser detectada en pozos más alejados de la costa y su análisis puede ser de utilidad para determinar la zona afectada por este fenómeno. Por otra parte, se ha analizado el efecto que produce un aumento de la conductividad hidráulica con la distancia a la línea de costa. En términos generales la inclusión de esta heterogeneidad produce una moderada disminución de la amplitud de la marea inducida cerca de la costa y un menor retraso temporal que se evidencia a distancias mayores de la costa. Los resultados obtenidos contribuyen a un mejor entendimiento del efecto de las Sudestadas en los acuíferos costeros y sientan las bases para trabajos futuros en los que se contrastarán las estimaciones de los modelos con mediciones de los niveles freáticos.

Agradecimientos

Deseamos expresar nuestro agradecimiento al Grupo Mareas del Servicio de Hidrología Naval por brindarnos los datos utilizados en el presente trabajo.

Referencias

Auge, M., 2004. Hidrogeología Ambiental II. Asociación Latinoamericana de Hidrología

Subterránea para el Desarrollo. www.alhsud.com/public/ebooks/hidro2.pdf

Escobar, G., Vargas W. and Bischoff S. 2004. Wind tides in the Río de La Plata estuary: Meteorological conditions. *International Journal of Climatology*, 24: 1159-1169.

Jacob, C.E. 1950. Flow of groundwater, in Rouse H (ed) Engineering hydraulics. Wiley Press- New York.

Lissa, Simón 2010. Correlación de fluctuaciones de niveles freáticos con variaciones del nivel del Río de la Plata. Tesis de grado en Geofísica, Universidad Nacional de La Plata.

Monachesi, L.B. and Guarracino L. 2011. Exact and approximate analytical solutions of groundwater response to tidal fluctuations in a theoretical inhomogeneous coastal confined aquifer. *Hydrogeology Journal*, 19:1443-1449.

Piedra-Cueva, I. and Rodríguez Borelli H. 2003. Finite element modeling of the Río de La Plata. *International Conference on Estuaries and Coasts*: 872-878. Hangzhou China.

Rodrigues Vieira, J. and Lanfredi N.W. 1996. A hydrodynamic model for the Río de La Plata, Argentina. *J. Coastal Res.*, 12:430-446.

Santoro, P.E., Fossati, M. and Piedra-Cueva, I. 2013. Study of the meteorological tide in the Río de La Plata. *Continental Shelf Research* (in press).