

Interacción mecánica entre acuíferos costeros y el Río de La Plata

Julián E Cuello¹, Luis Guarracino^{1,2}

Resumen Las soluciones analíticas brindan herramientas valiosas para el estudio de la interacción entre el agua superficial y el agua subterránea. En este trabajo se aplica una solución analítica innovadora para el fenómeno de marea inducida en un sistema acuífero compuesto por dos unidades confinadas superpuestas. La singularidad de este modelo conceptual radica en la consideración del efecto mecánico de las variaciones piezométricas en el acuífero superior sobre el inferior, lo que se denomina acoplamiento mecánico. Esta novedosa solución se aplica a un conjunto de datos piezométricos recopilados en los acuíferos Puelche y Paraná en el noreste de la Provincia de Buenos Aires, específicamente en la localidad de Avellaneda. Los resultados revelan un menor margen de error en la estimación de la difusividad hidráulica cuando se tiene en cuenta el acoplamiento mecánico en comparación con la clásica solución de interacción mecánica de van der Kamp que no considera este fenómeno. Este estudio no solo contribuye a una comprensión más profunda de la interacción entre los acuíferos superiores e inferiores en regiones costeras, sino que también demuestra la utilidad de las soluciones analíticas en la evaluación de los parámetros hidráulicos subterráneos, lo que es fundamental para la gestión y conservación de estos recursos hídricos vitales.

Palabras clave Marea inducida, acoplamiento mecánico, solución analítica.

INTRODUCCIÓN

La hidrogeofísica es un campo de estudio multidisciplinario relativamente nuevo que combina conceptos y técnicas de la geofísica con la hidrología para estudiar y caracterizar los sistemas acuíferos subterráneos, así como el movimiento y la distribución del agua en el subsuelo. Esta rama de la ciencia se centra en el uso de métodos geofísicos para obtener información sobre las propiedades del agua subterránea, como la profundidad del acuífero, la permeabilidad del subsuelo y la calidad del agua. La hidrogeofísica desempeña un papel esencial en la gestión de los recursos hídricos subterráneos y la toma de decisiones relacionadas con la explotación sostenible de los acuíferos.

Los acuíferos costeros actúan como reservas estratégicas de agua dulce y su preservación es esencial para la supervivencia de las comunidades locales. En estas regiones, la intrusión salina causada por la sobreexplotación de los acuíferos o el aumento del nivel del mar representa una amenaza significativa. Bajo estas condiciones, los ensayos de bombeo como método para determinación de parámetros hidráulicos resultan desaconsejables. Una alternativa interesante es la utilización de una señal natural como lo es la marea que da origen a un método no invasivo: el método de marea inducida. Las variaciones de nivel de agua debido al efecto gravitatorio lunisolar en un cuerpo de agua superficial se propagan tierra adentro y pueden ser detectadas en pozos cercanos a la costa. La señal piezométrica presenta una disminución en amplitud y un desfase temporal respecto a la señal que la origina. La atenuación y el desfase de la marea inducida dependen de las propiedades hidráulicas del acuífero por el que se propaga la señal. Una forma de modelar este fenómeno es mediante soluciones analíticas, las cuales se destacan por su utilidad y aplicabilidad práctica. A partir de un modelo conceptual que describe la relación entre el río y el acuífero, se plantea el problema físico-matemático a resolver para obtener la solución analítica correspondiente. Posteriormente, mediante la resolución del problema inverso, se logra determinar las propiedades hidráulicas que mejor se ajustan a los datos medidos, lo que resulta esencial para una comprensión más precisa de este sistema.

El estudio del fenómeno de marea inducida en acuíferos tuvo sus inicios en la segunda mitad del siglo

¹Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, Universidad Nacional de La Plata, La Plata, Argentina. Email: julianecuello@gmail.com

²Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Buenos Aires, Argentina.

XX. Pioneros en este campo como [Jacob \(1950\)](#) y [Ferris \(1951\)](#) fueron los primeros en desarrollar una solución analítica para describir la marea inducida considerando un acuífero homogéneo e infinito en contacto hidráulico con el mar. Esta solución de aplicación sencilla se ha empleado ampliamente en la estimación de parámetros hidráulicos en acuíferos costeros ([Carr & van der Kamp, 1969](#); [Rotzoll et al., 2008, 2013](#); [Zhou et al., 2015](#)). La interacción entre los acuíferos costeros y los cuerpos de agua superficial puede manifestarse de dos maneras: hidráulica o mecánica. La interacción hidráulica se refiere a la región de conexión directa entre el acuífero y el cuerpo de agua superficial. Sin embargo, cuando el acuífero es confinado o semiconfinado y se extiende por debajo del cuerpo de agua superficial, la interacción entre aguas subterráneas y superficiales adquiere una componente mecánica. En este escenario, la marea genera un diferencial de presión en las formaciones subyacentes, deformando el medio poroso y desplazando el agua presente en los poros. Esta variación de presión origina una señal de carácter mecánico que se propaga tierra adentro y puede ser detectada en pozos cercanos a la costa.

Este tipo específico de interacción entre el agua superficial y subterránea ha sido objeto de un estudio limitado hasta la fecha. El análisis de la marea inducida de tipo mecánico proporciona valiosa información sobre la estructura del sistema acuífero. Por ejemplo, permite una inferencia sencilla sobre si el acuífero se extiende o no por debajo del río u océano. [van der Kamp \(1972\)](#) sentó las bases del estudio de marea inducida de origen mecánico estudiando la interacción entre el agua superficial y el agua subterránea considerando un acuífero confinado que se extiende infinitamente por debajo del mar. La solución analítica derivada por van der Kamp muestra que la marea inducida presenta una disminución en amplitud y un desfase temporal con respecto a la señal que la origina. Desde el trabajo de [van der Kamp \(1972\)](#) se han derivado muchas otras soluciones analíticas que consideran el efecto de carga del mar, incluyendo diferentes grados de complejidad que mejoran distintos aspectos del problema; pero en ningún caso se ha considerado el efecto de carga que el acuífero suprayacente genera sobre el acuífero subyacente. [Cuello & Guarracino \(2024\)](#) presentaron la derivación de una solución analítica para un sistema acuífero conformado por dos unidades confinadas superpuestas cuyo aporte consiste en considerar el efecto de carga que el acuífero superior genera sobre el acuífero inferior. Del análisis de esta solución se desprende que las variaciones piezométricas en el acuífero más profundo dependen de las propiedades hidráulicas de las dos unidades confinadas que comprenden el sistema acuífero. En la Figura 1 se visualiza un esquema que representa el modelo conceptual utilizado de un sistema de dos acuíferos confinados. Los parámetros S_s (m^{-1}) y K_s (m/d) representan el almacenamiento específico y la conductividad hidráulica respectivamente.

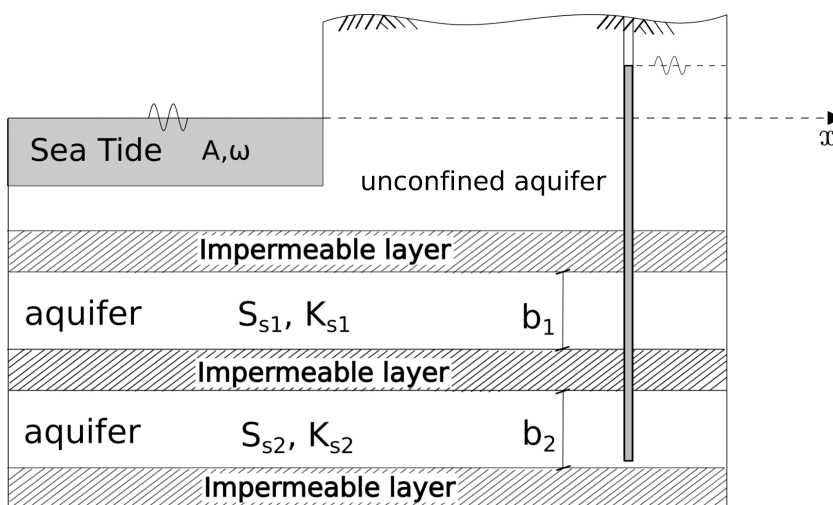


Figura 1. Esquema representativo de un sistema acuífero compuesto por dos unidades confinadas de espesores b_1 y b_2 que se extienden infinitamente debajo del mar. A es la amplitud de la marea y ω su frecuencia.

En este trabajo se utilizarán señales piezométricas de un sistema acuífero confinado compuesto por dos unidades superpuestas con el objetivo de estimar sus propiedades hidráulicas utilizando la solución clásica de [van der Kamp \(1972\)](#) y la novedosa solución derivada por los autores de este trabajo. Posteriormente se compararán dichos resultados con el objetivo de analizar cuán significativo es el efecto de carga.

ZONA DE ESTUDIO

En una estación de monitoreo situada en Avellaneda, al noreste de la Cuenca Matanza Riachuelo en la Planicie Costera del Río de La Plata, se registraron mediciones de la altura piezométrica de los acuíferos Puelche y Paraná, así como de las señales mareográficas.

Las arenas Puelches constituyen una secuencia de arenas cuarzosas sueltas, medianas y finas, algo arcillosas de origen fluvial. Poseen estratificación gradada y representan el acuífero más importante de la región por su calidad y productividad. El acuífero Puelche ocupa en forma continua aproximadamente 92000 km² en el subsuelo del noreste de la Provincia de Buenos Aires y se encuentra a profundidades de entre 20 y 50 m, con espesores que varían entre 20 y 30 m. Por debajo del acuífero Puelche se encuentra la formación Paraná que está constituida por arcillas y arenas de origen marino. La sección inferior de la formación constituye el acuífero Paraná que está separada del acuífero Puelche por una formación arcillosa poco permeable comprendida en la sección superior de la formación Paraná (Auge et al., 2002). El acuífero Paraná ha sido poco estudiado y presenta escasos estudios hidrogeológicos realizados principalmente por organismos privados.

En la zona de estudio, los acuíferos semiconfinados Puelche y Paraná se extienden por debajo del Río de La Plata (Rinaldi & Abril, 2006; Parker, 1990). La conexión existente entre el río y los acuíferos mencionados es de origen mecánico. El acuífero Puelche ha sido muy estudiado en distintos sectores y es intensamente explotado debido a la calidad de sus aguas. El acuífero Paraná, que se encuentra a mayor profundidad, ha sido poco estudiado y explotado, siendo los valores de sus parámetros hidráulicos virtualmente inexistentes en la literatura.

ADQUISICIÓN Y ANÁLISIS DE LOS DATOS

Los registros piezométricos fueron medidos entre el 11 de marzo y el 23 de junio del año 2015 con un intervalo de muestreo de 10 minutos. La adquisición de datos se realizó utilizando sensores marca Schlumberger denominados mini-divers. Estos sensores, que se ubican dentro de los pozos, miden la variación de presión y, mediante un factor de conversión, la presión se convierte en centímetros de agua. Son capaces de almacenar 24000 registros y tienen una precisión de 0.5 cm/10 m. Utilizando un sensor superficial se corrige en los registros el aporte de la variación de presión atmosférica. El registro mareográfico, que tiene un intervalo de muestreo horario, fue provisto por el Servicio de Hidrografía Naval del Ministerio de Defensa de la Nación Argentina.

A partir de un análisis espectral mediante la transformada de Fourier, pueden identificarse las principales componentes de las señales. Teniendo en cuenta trabajos previos donde se estudian las componentes más importantes de la marea en el Río de La Plata (D'Onofrio et al., 2012), se han identificado en los espectros de Fourier cinco componentes características tanto en el registro mareográfico como en las señales piezométricas: M2, S2, S1, O1, y M4. La componente M4 es la de mayor frecuencia, asociada a un período de 6.21 horas. Las componentes M2 y S2 son de carácter semidiurno con períodos en torno a las 12 horas. Las componentes S1 y O1 son de naturaleza diurna y las de menor frecuencia.

METODOLOGÍA Y RESULTADOS

Debido a que las soluciones analíticas son válidas para señales monocromáticas, es necesaria la descomposición espectral de los datos temporales con el objetivo de aislar la amplitud correspondiente a cada una de las componentes principales. A partir de esta descomposición espectral se determinan los parámetros hidráulicos de los acuíferos a estudiar utilizando cada una de las componentes obtenidas. El paso a paso del procedimiento se detalla a continuación. En primera instancia, se caracteriza hidráulicamente el acuífero Puelche utilizando la solución clásica de van der Kamp (1972).

Resolviendo el problema inverso se estima un valor de difusividad hidráulica que minimiza la diferencia entre el dato medido y la solución analítica. Luego se estima la conductividad hidráulica al multiplicar la difusividad hidráulica obtenida anteriormente y el almacenamiento específico correspondiente a las arenas Puelches que puede obtenerse a partir de sus propiedades texturales. Posteriormente, con el objetivo de estudiar el efecto del acoplamiento mecánico entre los acuíferos costeros Puelche y Paraná, se comparan las estimaciones de las conductividades hidráulicas del acuífero inferior considerando tanto la solución de [van der Kamp \(1972\)](#) como la derivada por los autores de este trabajo utilizando la conductividad hidráulica y el almacenamiento específico del acuífero Puelche.

En la Tabla 1 se visualizan los resultados obtenidos en la estimación de conductividad hidráulica del acuífero Paraná utilizando la solución clásica de [van der Kamp \(1972\)](#) y la nueva solución derivada por los autores de este trabajo que considera el efecto mecánico. Cada estimación de conductividad hidráulica fue calculada como el producto entre la difusividad hidráulica estimada y el valor de almacenamiento específico correspondiente a cada acuífero. El error cometido se calculó como la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de las diferencias entre el dato observado y la solución analítica correspondiente.

Tabla 1. Estimaciones de conductividad hidráulica para el acuífero Paraná utilizando la solución clásica de van der Kamp y la solución derivada por los autores de este trabajo que contempla el acoplamiento mecánico.

| Componente | van der Kamp (1972) | | Cuello & Guarracino (2024) | |
|---------------|---------------------------|---------------------|----------------------------|---------------------|
| | Conduc. H. estimada (m/d) | Error cometido (cm) | Conduc. H. estimada (m/d) | Error cometido (cm) |
| O1 (25.82 hs) | 25.5 | 2.42 | 25.3 | 2.39 |
| S1 (24 hs) | 20.6 | 7.07 | 20.5 | 7.02 |
| M2 (12.42 hs) | 13.6 | 11.62 | 13.6 | 11.56 |
| S2 (12 hs) | 23.2 | 5.71 | 22.9 | 5.73 |
| M4 (6.21 hs) | 14.1 | 2.26 | 14.0 | 2.25 |

Como puede observarse, las estimaciones de conductividad hidráulica arrojan valores más pequeños al considerar el efecto mecánico. También puede observarse que el error cometido en la estimación de la conductividad hidráulica es ligeramente mayor si no se considera el acoplamiento mecánico. Podemos concluir que no considerar el efecto de acoplamiento mecánico sobreestima ligeramente la conductividad hidráulica y reconstruye la señal con un error mayor al obtenido si consideramos dicho efecto. Finalmente, cabe mencionar que podría estimarse un único valor de conductividad hidráulica representativo de toda la señal promediando los valores estimados para cada componente, pero este trabajo tuvo como objetivo aislar las frecuencias predominantes para estudiar por separado el impacto del acoplamiento mecánico para cada período.

CONCLUSIONES

En el presente trabajo se analizó el efecto de carga entre el acuífero Puelche y Paraná utilizando señales medidas en una estación de monitoreo ubicada en la Planicie costera del Río de La Plata, más precisamente en la localidad de Avellaneda. Para llevar a cabo este análisis se compararon las conductividades hidráulicas estimadas a partir de la solución analítica clásica de [van der Kamp \(1972\)](#) para la marea inducida de origen mecánico y la solución obtenida por los autores de este trabajo. El estudio arrojó resultados interesantes: al considerar el acoplamiento mecánico se logró reconstruir la señal observada con un error menor en comparación con la solución clásica. Además, se encontró que la omisión del efecto del acoplamiento mecánico lleva a una sobreestimación del valor de la conductividad hidráulica obtenida mediante la técnica utilizada.

REFERENCIAS

- Auge, M. P., Hernández, M., & Hernández, L.** (2002). Actualización del conocimiento del acuífero semiconfinado Puelche en la Provincia de Buenos Aires, Argentina. *XXXII International Hydrogeology Congress*, 624–633.
- Carr, P. A. & van der Kamp, G.** (1969). Determining aquifer characteristics by the tidal methods. *Water Resources Research*, 5(5), 1023–1031.
- Cuello, J. E. & Guarracino, L.** (2024). Mechanical coupling effect on tide induced fluctuations in a multilayer aquifer system. *Hydrological Processes*. IN PRESS.
- D'Onofrio, E., Oreiro, F., & Fiore, M.** (2012). Simplified empirical astronomical tide model: An application for the Río de La Plata estuary. *Computers & Geosciences*, 44, 196–202.
- 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. *Engineering hydraulics*, 321–386. Wiley.
- Parker, G.** (1990). Estratigrafía del Río de La Plata. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 45(3-4), 193–204.
- Rinaldi, V. A. & Abril, E. G.** (2006). Aspectos geotécnicos fundamentales de las formaciones del delta del Río Paraná y del estuario del Río de la Plata. *Revista internacional de desastres naturales accidentes e infraestructura civil*, 6(2).
- Rotzoll, K., El-Kadi, A. I., & Gingerich, S. B.** (2008). Analysis of an unconfined aquifer subject to asynchronous dual-tide propagation. *Ground Water*, 46, 239–250.
- Rotzoll, K., Gingerich, S. B., & El-Kadi, A. I.** (2013). Estimating hydraulic properties from tidal attenuation in the northern Guam Lens Aquifer, territory of Guam, USA. *Hydrogeology Journal*, 21, 643–654.
- van der Kamp, G.** (1972). Tidal fluctuations in a confined aquifer extending under the sea. *International Geological Congress*, volumen 24, 101–106.
- Zhou, X., Song, C., Li, T., Chen, R., Zhang, H., Zhao, J., & Cao, Q.** (2015). Estimation of aquifer parameters using tide-induced groundwater level measurements in a coastal confined aquifer. *Environ Earth Sci*, 73, 2197–2204.