

Determinación del coeficiente de almacenamiento o porosidad drenable mediante mediciones de gravedad *in situ*

Luis Guarracino¹ y Claudia N. Tocho²

¹ Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, Universidad Nacional de La Plata, Paseo del Bosque s/n, (1900) La Plata, Buenos Aires, Argentina.

² Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas.

Mail de contacto: luisg@fcaglp.unlp.edu.ar

RESUMEN

El coeficiente del almacenamiento o porosidad drenable se suele definir como la cantidad de agua por unidad de volumen de suelo que se drena durante un descenso unitario del nivel freático. En el presente trabajo se propone una metodología para su determinación que combina mediciones de gravedad *in situ* con variaciones de niveles freáticos. Los ascensos y descensos de los niveles freáticos producen variaciones locales de gravedad que pueden ser medidas utilizando gravímetros de alta precisión. Para estimar el coeficiente de almacenamiento se deriva una fórmula teórica que se basa en la medición relativa de la gravedad entre dos estaciones que se encuentran sobre la misma formación geológica. Estas mediciones deben realizarse en dos épocas distintas donde se haya producido una variación significativa del nivel freático. Para ilustrar la aplicación de la metodología se calcula el coeficiente de almacenamiento del acuífero Pampeano.

Palabras clave: coeficiente de almacenamiento, métodos geofísicos, gravimetría.

ABSTRACT

The specific yield or drainable porosity is usually defined as the amount of water per unit of soil volume released during a unit decline in water table level. In this study we present a new methodology to estimate specific yield using *in situ* measurements of gravity field and water table levels. The fluctuations of water table produce local gravity variations than can be measured with high-precision gravimeters. In order to estimate the specific yield we derive a theoretical formula based on relative measurements of gravity between two test sites situated on the same geological unit. The gravity measurements must be made at two different times, when a significant change in water levels is observed. Finally, the proposed methodology is used to estimate the specific yield of the Pampeano loessial aquifer.

Keywords: specific yield, geophysical methods, gravity.

Introducción

El coeficiente de almacenamiento de un acuífero libre se suele definir como el volumen de agua por unidad de volumen de suelo liberado durante un descenso unitario del nivel freático (Freeze y Cherry, 1979). Durante el descenso del nivel freático el agua es desplazada por la fuerza de gravedad y sustituida por aire. Debido a la acción conjunta de fuerzas moleculares y la tensión superficial, una cierta fracción de agua permanece en los intersticios de los granos que conforman el suelo. Como consecuencia, el coeficiente de almacenamiento resulta menor a la porosidad del medio y es por ello que también se lo denomina "porosidad drenable" o "porosidad eficaz" (Bear, 1988). Cuando se asume que el acuífero es homogéneo y el nivel freático se encuentra muy profundo, el coeficiente de almacenamiento se puede estimar como la

diferencia entre la porosidad y la capacidad de campo.

La cuantificación de este parámetro resulta de importancia en numerosos problemas hidrogeológicos ya que afecta el caudal de los pozos de abastecimiento, el transporte de solutos y las fluctuaciones del nivel freático (Saha y Agrawal, 2006; Song y Chen, 2010). Los métodos más utilizados para la estimación del coeficiente de almacenamiento se basan en ensayos de bombeo, experimentos de drenaje, balances de agua y mediciones de gravedad (Johnson, 1967; Walton, 1970; Neuman, 1987; Pool y Eychaner, 1995). Más recientemente se ha propuesto una metodología de cálculo basada en mediciones satelitales de gravedad provistas por la misión espacial GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) (Guarracino et al., 2011).

En el presente trabajo se propone una metodología de cálculo que se basa en

mediciones relativas de gravedad en pozos de monitoreos ubicados sobre la misma formación geológica. Las variaciones de gravedad permiten estimar la masa de agua liberada por el descenso de nivel freático y a partir de ella calcular el coeficiente de almacenamiento. Con este fin se derivará una fórmula teórica sencilla que será utilizada para estimar el valor del coeficiente de almacenamiento del acuífero Pampeano en la región de La Plata-Ensenada.

Metodología

Supongamos que se dispone de dos pozos de observación ubicados sobre el mismo acuífero libre cuyas posiciones son x_1 y x_2 . Consideremos que en cada uno de los pozos se observa una variación del nivel freático entre los tiempos t_1 y t_2 , como se ilustra en la Fig. 1. Estas variaciones de nivel freático evidencian un cambio de la masa de agua almacenada en el subsuelo que producirá un leve cambio de la gravedad local. El método de cálculo propone estimar el coeficiente de almacenamiento relacionando las variaciones relativas de gravedad entre los dos pozos de observación con las variaciones de los niveles freáticos.

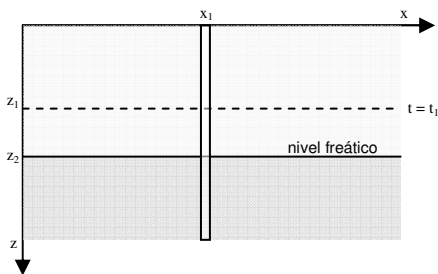


Figura 1. Esquema de la variación del nivel freático en un pozo de observación y sistema de coordenadas utilizado.

La variación del nivel freático en el pozo ubicado en la posición x_1 (Pozo 1) se expresa del siguiente modo:

$$\Delta z(x_1) = z(x_1, t_2) - z(x_1, t_1) \quad (1)$$

siendo z la profundidad del nivel freático medida desde la superficie del terreno. La gravedad al tiempo t_2 puede estimarse con la siguiente fórmula:

$$g(x_1, t_2) = g(x_1, t_1) + 2\pi G \Delta \rho \Delta z(x_1) \quad (2)$$

donde el último término de la ecuación representa el cambio en la gravedad local producida por el desplazamiento de la masa de

agua entre los tiempos t_1 y t_2 , siendo G la constante de gravitación universal y $\Delta \rho$ el cambio en la densidad de la roca producida por el cambio en la saturación de agua. Este término se obtiene calculando la atracción gravitatoria de una placa infinita de espesor constante denominada placa de Bouguer.

Cuando la roca se encuentra completamente saturada por agua su densidad puede expresarse como:

$$\rho_{zs} = \rho_m (1 - \varphi) + \varphi \rho_w \quad (3)$$

siendo ρ_m y ρ_w las densidades de la matriz sólida y del agua, respectivamente; y φ la porosidad. Al producirse el descenso del nivel freático cierta fracción del agua contenida en los poros de la roca es reemplazada por aire. En este caso la densidad de la roca parcialmente saturada por agua se expresa:

$$\rho_{zs} = \rho_m (1 - \varphi) + (\varphi - S_y) \rho_w + S_y \rho_a \quad (4)$$

donde S_y es el coeficiente de almacenamiento o porosidad drenable y ρ_a la densidad del aire.

La variación de densidad que sufre la roca por el descenso del nivel freático se puede calcular restando las ecuaciones (4) y (3):

$$\Delta \rho = \rho_{zs} - \rho_{zns} = S_y (\rho_w - \rho_a) \quad (5)$$

Luego, reemplazando esta última ecuación en (2) se tiene

$$g(x_1, t_2) = g(x_1, t_1) + 2\pi G S_y (\rho_w - \rho_a) \Delta z(x_1) \quad (6)$$

Notar que la ecuación (6) relaciona las variaciones de gravedad en un mismo punto de observación con las variaciones del nivel freático. Si se dispusiera de un gravímetro absoluto con suficiente precisión, entonces podríamos calcular el coeficiente de almacenamiento S_y despejándolo de la ecuación (6). Lamentablemente, las mediciones absolutas de gravedad son difíciles de realizar ya requieren instrumental sofisticado de muy difícil acceso. Es por ello que la metodología de cálculo se basará en mediciones relativas de gravedad que son factibles de realizar con gravímetros de alta precisión. Estos instrumentos permiten cuantificar las diferencias de gravedad entre dos puntos de medición sin la necesidad de determinar los correspondientes valores de gravedad absoluta.

Luego, si se dispone de un segundo pozo sobre la misma formación se tendrá una expresión análoga a la (6):

$$g(x_2, t_2) = g(x_2, t_1) + 2\pi G S_y (\rho_w - \rho_a) \Delta z(x_2) \quad (7)$$

siendo x_2 la posición del Pozo 2.

Finalmente, restando las ecuaciones (7) y (6) se obtiene la siguiente fórmula que nos permite estimar el coeficiente de almacenamiento:

$$S_y = \frac{\Delta g(t_2) - \Delta g(t_1)}{2\pi G(\rho_{agua} - \rho_{aire})(\Delta z(x_1) - \Delta z(x_2))} \quad (8)$$

donde $\Delta g(t) = g(x_2, t) - g(x_1, t)$ es la variación relativa de la gravedad entre los dos pozos medida con el gravímetro. En la siguiente sección se ilustrará la aplicación de la fórmula (8) para estimar el coeficiente de almacenamiento del acuífero Pampeano.

Resultados

Con el fin calcular el coeficiente de almacenamiento en acuífero Pampeano se realizaron dos campañas gravimétricas, una en diciembre del 2007 y otra en abril de 2008. El gravímetro utilizado fue un Lacoste & Romberg Modelo D, perteneciente al Departamento de Gravimetría de la Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas (UNLP). Este instrumento es un dispositivo de lectura a cero que utiliza una masa de prueba adosada a un resorte de alta sensibilidad para medir el campo gravitatorio terrestre. Las mediciones se realizan ajustando la longitud del resorte para equilibrar su tensión con la fuerza gravitacional terrestre actuando sobre la masa de prueba. La lectura se obtiene con una precisión estimada en 0,001 mGal (10^{-8} m/s^2). Cada relevamiento consistió en un recorrido cerrado, partiendo de una estación de referencia. Luego se tomaron medidas de gravedad relativa y de la profundidad del nivel freático en los pozos de monitoreo, para finalmente volver a la estación de referencia y así determinar el error de cierre del instrumento. Este relevamiento se repitió luego de algunos meses para determinar variaciones en los valores relativos de gravedad medidos. En los dos relevamientos se tomó como estación de referencia un pozo de monitoreo ubicado en la estación meteorológica de la Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas (Mason, 2009).

A los valores medidos de gravedad se los corrigió por el efecto de drift instrumental y mareas terrestres. Para realizar las correcciones del efecto de mareas se utilizó un programa que calcula la fuerza de marea causada por la Luna y el Sol en un punto sobre la superficie terrestre. El algoritmo de cálculo del efecto de mareas se basa en las expresiones de Longman (1959). De acuerdo con el trabajo de Pool y Eychaner (1995) las variaciones de gravedad originadas

por efectos atmosféricos se consideran lineales y se eliminan junto con el drift instrumental.

Las estaciones de medición utilizadas para calcular el coeficiente de almacenamiento del acuífero Pampeano corresponden a un pozo de monitoreo ubicado en el predio de la Facultad de Cs. Astronómicas y Geofísicas ($-34^\circ 54' 25,2''$, $-57^\circ 55' 57,6''$) y otro pozo situado a pocos kilómetros de distancia en la localidad de Ensenada ($-34^\circ 52' 22,0''$, $-57^\circ 55' 45,7''$). En ambas estaciones se realizaron mediciones de gravedad y del nivel freático los días 18 de diciembre de 2007 (t_1) y 11 de abril del 2008 (t_2). En la Tabla 1 se presentan las mediciones de las variaciones de gravedad (Δg) corregidas por el efecto de mareas y drift instrumental junto con las mediciones de los niveles freáticos (z). El Pozo 1 corresponde a la estación de medición ubicada en el predio de la Facultad y el Pozo 2 a la estación situada en la localidad de Ensenada.

Tabla 1. Mediciones relativas de la gravedad y profundidades de los niveles freáticos

	$\Delta g(t_1)$ (mGal)	$\Delta g(t_2)$ (mGal)	$z(t_1)$ (m)	$z(t_2)$ (m)
Pozo 1	0	0	9.55	9.48
Pozo 2	1.783	1.786	2.23	1.77

Sustituyendo en la ecuación (8) el valor de la constante de gravitación universal ($G=6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$) y considerando valores típicos para las densidades del aire y agua ($\rho_a=0.0012 \text{ gr/cm}^3$, $\rho_w=1 \text{ gr/cm}^3$) se tiene:

$$S_y = 23,895 \frac{\Delta g(t_2) - \Delta g(t_1) \text{ mGal}}{\Delta z(x_1) - \Delta z(x_2) \text{ m}} \quad (9)$$

Reemplazando los valores de la Tabla 1 en la fórmula anterior se obtiene un valor del coeficiente de almacenamiento de 0,18. Como era de esperar, este valor resulta menor a la porosidad de los sedimentos Pampeano que ha sido estimada entre 0.35 y 0.39 (Mascioli et al., 2005)

El valor obtenido con la metodología propuesta es el doble del valor estimado en la localidad de Azul para la misma formación utilizando dos técnicas de cálculo distintas. Mediante el análisis de eventos individuales de recarga, Varni y colaboradores (2010) obtuvieron un valor del coeficiente de almacenamiento de 0.09 para el acuífero Pampeano de la región. Similares resultados fueron obtenidos con una técnica basada en

mediciones satelitales de gravedad provistas por la misión espacial GRACE (Guarracino et al., 2011). Estos antecedentes indican una posible sobrestimación del coeficiente de almacenamiento obtenido con la técnica propuesta. Sin embargo debe tenerse en cuenta que el acuífero no es completamente homogéneo y que las características texturales de los sedimentos en la región de La Plata-Ensenada pueden diferir de las correspondiente a la localidad de Azul. Por otra parte resulta importante remarcar que la variación relativa de los niveles freáticos en el período considerado es de aproximadamente 40 cm, es decir poco significativa. En consecuencia las variaciones de gravedad son muy pequeñas y su medición resulta cercana al límite de precisión del gravímetro.

Conclusiones

En el presente trabajo se ha presentado una técnica geofísica para estimar el coeficiente de almacenamiento o porosidad dreenble mediante mediciones relativas de gravedad *in situ*. Con este fin se derivó una fórmula teórica sencilla que se basa en la medición de la gravedad y los niveles freáticos en dos estaciones ubicadas sobre el mismo acuífero libre. La aplicación de la técnica propuesta al acuífero Pampeano en la región de La Plata-Ensenada ha permitido estimar un valor del coeficiente de almacenamiento de 0,18. El resultado obtenido se encuentra en el rango de valores esperables para este coeficiente pero debe ser validado mediante nuevas mediciones en las que se registren variaciones de los niveles freáticos de mayor amplitud.

Referencias

- Bear, J. 1988. *Dynamics of fluids in porous media*. Dover Publications, Inc., New York.
- Freeze, R. A. y Cherry, J. A. 1979. *Groundwater*, Prentice-Hall, Upper Saddle River, N. J.
- Guarracino, L., Tocho, C. y Varni, M. 2011. Estimación del coeficiente de almacenamiento en un acuífero libre a partir de datos gravimétricos satelitales. Estudios en la Zona no Saturada del Suelo, Vol. X, 327-330. Salamanca, España.
- Johnson, A. I. 1967. Specific yield-compilation of specific yields for various materials. *Hydrologic Properties of Earth Materials, U.S Geological Survey Water-supply Paper*, 1662-D.
- Longman, I. M. 1959. Formulae for Computing the Tidal Accelerations due to the Moon and the Sun. *Journal of Geophysical Research* 64 (12): 2351-2355.
- Mascioli, S., Benavente, M. y Martínez D. 2005. Estimation of transport hydraulic parameters in loessic sediment, Argentina: Application of column tests. *Hydrogeology Journal* 13: 849–857.
- Mason M. V. 2009. Correlación de mediciones de niveles freáticos con variaciones temporales de gravedad. *Tesis de Grado*, Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, UNLP.
- Neuman, S. P. 1987. On methods of determining specific yield. *Ground Water* 25: 679–684.
- Pool, D. R. y Eychanner, J. H. 1995. Measurement of aquifer-storage change and specific yield using gravity surveys. *Ground Water* 33: 425–432.
- Saha, D. y Agrawal, A. K. 2006. Determination of specific yield using a water balance approach-case study of Torla Odha watershed in the Deccan Trap province, Maharastra State, India. *Hydrogeology Journal* 14: 625–635.
- Song, J. y Chen, X. 2010. Variation of specific yield with depth in an alluvial aquifer of the Platte River valley, USA. *International Journal of Sediment Research* 25: 185-193.
- Varni, M., Comas, R., Weinzettel, P. y Dietrich S. 2010. Análisis de 18 años de registros diarios de nivel freático en la zona central de la cuenca del arroyo Azul, Buenos Aires, Argentina. *I Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras*, Tomo I: 209-215. Azul.
- Walton, W.C. 1970. *Groundwater resource evaluation*. Mc Graw Hill, New York.