

## ESTIMACIÓN DEL COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO EN UN ACUÍFERO LIBRE A PARTIR DE DATOS GRAVIMÉTRICOS SATELITALES

L. Guarracino<sup>1</sup>, C. Tocho<sup>2</sup>, M. Varni<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Facultad de Cs. Astronómicas y Geofísicas, Universidad Nacional de La Plata, Paseo del Bosque S/N, (1900) La Plata, Argentina, lguarracino@fcaglp.unlp.edu.ar.

<sup>2</sup> Facultad de Cs. Astronómicas y Geofísicas, Universidad Nacional de La Plata, Paseo del Bosque S/N, (1900) La Plata, Argentina, ctocho@fcaglp.unlp.edu.ar.

<sup>3</sup> Instituto de Hidrología de Llanuras “Dr. Eduardo Usunoff”, República de Italia 780 (B7300), Azul, Buenos Aires, Argentina, varni@faa.unicen.edu.ar.

**RESUMEN.** En el presente trabajo se propone una nueva técnica para estimar el coeficiente de almacenamiento en un acuífero libre basada en la correlación de mediciones satelitales de la misión espacial GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) con variaciones de niveles freáticos. Los datos satelitales consisten en mapas de variaciones temporales de las reservas de agua estimadas a partir de las mediciones de gravedad terrestre realizadas por GRACE. Para poder estimar el coeficiente de almacenamiento se establece una relación lineal teórica entre los datos satelitales y las variaciones del nivel freático. Esta dependencia lineal se verifica en los datos disponibles lo que permite estimar este parámetro mediante una simple regresión lineal. La técnica propuesta es aplicada a una serie de datos de aproximadamente 2 años de extensión en la localidad de Azul (provincia de Buenos Aires, Argentina). El valor obtenido para el coeficiente de almacenamiento es cercano al 9% y resulta consistente con el valor estimado mediante una técnica de campo que correlaciona los ascensos de los niveles freáticos con las precipitaciones asociados a eventos de recarga individuales.

**ABSTRACT.** In this study a new technique for estimating specific yield is proposed. The technique is based on the correlation between satellite measurements from GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) mission and water table variations. The satellite data consist of maps of temporal variations of water storage computed from GRACE gravity measurements. In order to estimate the specific yield a theoretical linear relation between satellite data and water table fluctuation is stated. The available data verify this relation and thus the specific yield can be estimated by a simple linear regression model. The proposed technique is tested in Azul (Buenos Aires Province, Argentina) using 2-year long series of data. The estimated value of specific yield is approximately 9% and it is consistent with the value obtained with a field technique that correlates water table rise with rainfall during individual recharge events.

parámetro de gran importancia en numerosos problemas hidrogeológicos como la estimación de la recarga y el diseño de planes eficientes de explotación de aguas subterráneas. En términos generales el coeficiente de almacenamiento suele definirse como el volumen de agua por unidad de área liberado durante un descenso unitario del nivel piezométrico (Freeze y Cherry, 1979). En un acuífero confinado el volumen de agua liberado está determinado básicamente por la porosidad y las compresibilidades del agua y del esqueleto granular. En un acuífero libre la definición de coeficiente de almacenamiento es idéntica, salvo que el descenso está usualmente referido al nivel freático. Sin embargo, el mecanismo que causa la variación del volumen de agua almacenada es diferente. En este caso, el agua es desplazada por la fuerza de gravedad y sustituida por aire. Durante este proceso cierta fracción de agua permanece en los intersticios entre los granos debido a la acción conjunta de las fuerzas moleculares y la tensión superficial. Como consecuencia, el coeficiente de almacenamiento resulta menor que la porosidad del medio y es por ello que también se lo suele denominar “porosidad eficaz” o “porosidad drenable” (Bear, 1988). Bajo las hipótesis de que el acuífero es homogéneo y el nivel freático se encuentra suficientemente profundo, el coeficiente de almacenamiento puede calcularse como la diferencia entre la porosidad y la capacidad de campo.

La magnitud del coeficiente de almacenamiento afecta el caudal de los pozos de abastecimiento, el transporte de solutos y la amplitud de las fluctuaciones del nivel freático (Saha y Agrawal, 2006; Song y Chen, 2010). Desde principios del siglo pasado se han propuesto diferentes métodos de campo y laboratorio para determinar este parámetro. Los métodos más utilizados se basan en ensayos de bombeo, experimentos de drenaje y balances de agua (Johnson, 1967; Walton, 1970; Neuman, 1987).

Recientemente se han propuesto métodos de determinación del coeficiente de almacenamiento para un acuífero libre que correlacionan variaciones de niveles freáticos con mediciones temporales de gravedad terrestre (Pool y Eychaner, 1995; Howle et al., 2003; Gehman et al., 2009). En líneas generales las variaciones de gravedad permiten calcular la masa de agua liberada por el descenso de agua que se observa en el pozo permitiendo una determinación *in situ* del rendimiento específico. En los trabajos citados

### 1.- Introducción

El coeficiente de almacenamiento de un acuífero es un

las medidas de gravedad se realizan sobre la superficie del terreno empleando gravímetros de alta precisión. En este trabajo se propone extender esta idea a mediciones satelitales de gravedad realizadas por la misión GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment).

La misión GRACE ha sido lanzada en el año 2002 en forma conjunta por la NASA y la Agencia Aeroespacial Alemana (DLR) (Wahr y Molenaar, 1998, Tapley et al., 2004). El objetivo de esta misión es proveer mapas de variaciones de gravedad terrestre con frecuencias de 10 y 30 días con una resolución espacial que oscila entre 300 y 500 km. Las variaciones de gravedad observadas por GRACE tienen distinto origen como las perturbaciones atmosféricas, la circulación oceánica, las mareas de tierra sólida y el movimiento del agua en el ciclo hidrológico. Los componentes no hidrológicos son removidas de los datos utilizando distintos modelos numéricos. Luego, las variaciones de gravedad resultantes son convertidas en alturas equivalentes de agua empleando una relación directa entre gravedad y masa. Los mapas de altura equivalente de agua son provistos por distintas agencias internacionales como el Centro Nacional de Estudios Espaciales/Grupo de Investigación de Geodesia Espacial (CNES/GRGS) de Toulouse (Francia).

Bajo ciertas condiciones, la altura equivalente de agua obtenida a partir de los datos de GRACE depende linealmente de las variaciones de nivel freático. La pendiente de esta relación es precisamente el coeficiente de almacenamiento, lo que permite establecer una técnica sencilla basada en una regresión lineal de los datos. Para poder aplicar la técnica deben realizarse promedios de las mediciones de los niveles freáticos coincidentes con los períodos de 10 días de los datos satelitales. La técnica propuesta es empleada para estimar el coeficiente de almacenamiento en Azul (Provincia de Buenos Aires, Argentina) a partir de una serie de aproximadamente 2 años de extensión. El valor del coeficiente de almacenamiento obtenido resulta coincidente con el estimado a partir de una técnica de campo que correlaciona el ascenso del nivel freático con la precipitación durante eventos de recarga individual (Olin y Svensson, 1992).

## 2.- Metodología

Las variaciones del almacenamiento de agua determinadas con los datos de GRACE se obtienen a partir de un valor estacionario de referencia (Wahr y Molenaar, 1998). En este trabajo el valor de referencia será el promedio de todos los valores disponibles para el período de análisis. En términos generales, las variaciones del almacenamiento de agua incluirán los aportes de las aguas subterráneas, la humedad del suelo y la nieve o hielo. Luego, las variaciones relativas de las reservas de agua brindadas por la misión satelital GRACE ( $\Delta h_{GRACE}$ ) se pueden expresar como (Rodell et al., 2007):

$$\Delta h_{GRACE} = \Delta ZS + \Delta ZNS + \Delta NH \quad (1)$$

donde  $\Delta ZS$ ,  $\Delta ZNS$  y  $\Delta NH$  son las variaciones del almacenamiento de agua correspondientes a la zona saturada, la zona no saturada y en la superficie en forma de nieve o hielo. Los términos de la Ec. (1) serán expresados en altura equivalente de agua (m) y corresponderán a valores medios calculados cada 10 días. El término  $\Delta NH$  será considerado nulo ya que en la zona de estudio las precipitaciones en forma de nieve son nulas.

La variación del almacenamiento en la zona saturada puede calcularse a partir de las variaciones del nivel freático mediante la siguiente relación (Yeh et al., 2006):

$$\Delta ZS = S_y \Delta h_{NF} \quad (2)$$

donde  $S_y$  es el coeficiente de almacenamiento del acuífero libre y  $\Delta h_{NF}$  la variación del nivel freático con respecto a un nivel de referencia (valor medio de las fluctuaciones durante el período). Finalmente, reemplazando (2) en (1) las variaciones relativas de las reservas de agua pueden expresarse del siguiente modo:

$$\Delta h_{GRACE} = S_y \Delta h_{NF} + \Delta ZNS \quad (3)$$

La Ec. (3) expresa una dependencia lineal entre las variables  $\Delta h_{GRACE}$  y  $\Delta h_{NF}$ . El término  $\Delta ZNS$  representa la variación de la humedad del suelo promediada cada 10 días en relación a un valor medio de humedad del perfil. Dado que el espesor de la zona no saturada en la región es poco significativo cabe esperar que este término sea pequeño y a fines prácticos se lo considerará constante. Luego si se dispone de una serie de datos de alturas equivalentes de agua determinadas por GRACE y variaciones de niveles freáticos, es posible estimar el coeficiente de almacenamiento  $S_y$  a partir de la pendiente de la recta de la Ec. (3) y el término  $\Delta ZNS$  a partir de su ordenada al origen.

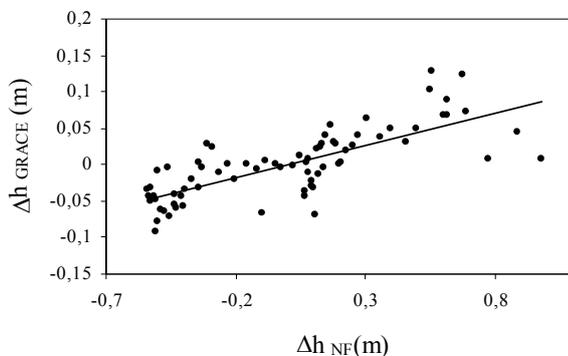
## 3.- Aplicación

Las alturas de agua equivalente utilizadas en el presente trabajo corresponden a grillas globales de  $1^\circ \times 1^\circ$  determinadas cada 10 días por el Centro Nacional de Estudios Espaciales/Grupo de Investigación de Geodesia Espacial (CNES/GRGS) (Bruinsma et al., 2010). Estos mapas se obtienen a partir del desarrollo en armónicos esféricos del modelo de campo de gravedad brindado por la misión GRACE y técnicas de filtrado que permiten convertir las variaciones de gravedad en variaciones de la masa de agua equivalente (Wahr y Molenaar, 1998). Todas las señales no hidrológicas han sido removidas de los datos mediante modelos numéricos que tienen en cuenta la atracción de la luna, el sol y los planetas; las mareas terrestres, oceánicas y atmosféricas; la influencia de la presión atmosférica en las órbitas satelitales; y la respuesta del dominio oceánico a la fuerza atmosférica (presión y viento). Los datos de altura de agua equivalente

representan valores medios cada 10 días referidos a un valor estacionario de referencia.

Los datos de niveles freáticos disponibles corresponden a mediciones diarias realizadas en un pozo de observación situado en la localidad de Azul en el centro de la Provincia de Buenos Aires (Argentina). El comportamiento global de la región es el de un ambiente de llanura (Sala et al., 1987). La base del sistema acuífero es un basamento cristalino constituido por rocas ígneas y metamórficas. Por encima de este basamento se ubican los sedimentos pampeanos, de gran extensión areal, que están integrados por limos arenosos y algo arcillosos que conforman el denominado acuífero Pampeano de características freáticas.

Para determinar el coeficiente de almacenamiento se utiliza una serie de datos que abarca un período de aproximadamente dos años que se inicia el 30 de diciembre de 2007 y finaliza el 7 de enero de 2010. En este período el CNES/GRG calculó 74 mapas de altura equivalente de agua, que fueron interpolados para obtener datos puntuales correspondientes a las coordenadas geográficas del pozo de Azul (latitud  $-36^{\circ}46'01''$  y longitud  $-59^{\circ}52'52''$ ). Por otra parte los datos diarios de niveles freáticos fueron promediados cada 10 días, en coincidencia con las determinaciones de los datos satelitales. Luego a la serie de 74 datos resultante se le restó el promedio de los valores de niveles freáticos observados durante todo el período. De este modo las variaciones relativas del nivel freático corresponderán a las variaciones de altura de agua equivalente determinadas a partir de GRACE y podrá emplearse la Ec. (3).



**Fig. 1.** Variaciones relativas de altura equivalente ( $\Delta h_{GRACE}$ ) versus las variaciones relativas de los niveles freáticos ( $\Delta h_{NF}$ ).

En la Fig. 1 se ilustran las variaciones relativas de altura equivalente ( $\Delta h_{GRACE}$ ) versus las variaciones relativas de los niveles freáticos ( $\Delta h_{NF}$ ). Los datos de la gráfica presentan cierta dispersión con una tendencia aproximadamente lineal de pendiente positiva que evidencia una clara correlación entre ambas series. Una forma de caracterizar el comportamiento de esta relación es ajustar la ecuación de una recta a los datos observados. La pendiente de la recta de ajuste es 0.089 y la ordenada al origen de  $-710^{-16}$  m, siendo el coeficiente de ajuste lineal  $R^2=0.57$ . Comparando estos valores con la Ec. (3) podemos inferir los siguientes valores para el coeficiente de almacenamiento  $S_y = 0.089$  (8.9%) y

la variación relativa del almacenamiento en la ZNS  $\Delta ZNS = -710^{-16}$  m. El valor estimado de  $S_y$  se encuentra en el rango de valores esperables para un acuífero cuya fracción granulométrica está compuesta por 15-30% de arena ( $>50\mu$ ), 58-69% de limo ( $5-50\mu$ ) y 15-25% de arcilla ( $<5\mu$ ) (Quintana Crespo, 2005). Esta forma de estimar  $S_y$  resulta novedosa ya que ha sido determinada *in situ* mediante mediciones satelitales. Por otra parte, si se dispone de un valor de la capacidad de campo para la zona de estudio es posible estimar la porosidad como la suma de este valor más el  $S_y$  estimado.

El coeficiente de almacenamiento en la localidad de Azul fue determinado por Varni et al. (2010) analizando los ascensos de los niveles freáticos y las precipitaciones durante eventos individuales de recarga. Para obtener un valor del coeficiente de almacenamiento con esta metodología se vuelcan en un gráfico los ascensos de nivel debidos a precipitaciones individuales o a un conjunto de precipitaciones que produzcan un único ascenso de nivel. Estas precipitaciones contribuirán al escurrimiento superficial, a la reposición de humedad de la zona no saturada y, finalmente, a la recarga al acuífero. En algunas precipitaciones no se producirá recarga alguna del acuífero o será muy pequeña. Pero, en la situación opuesta, algunas precipitaciones encontrarán al suelo en capacidad de campo debido a lluvias recientes por lo que, si se desprecia el escurrimiento superficial (poco significativo en zonas llanas) toda el agua contribuirá a la recarga. Luego, si en un gráfico de precipitaciones-ascensos se traza una recta por el origen que contenga a todos los puntos medidos, el valor inverso de la pendiente de esta recta proveerá una estimación del coeficiente de almacenamiento. El valor obtenido utilizando esta técnica para eventos individuales de recarga identificados durante un período de 18 años (1992-2009) es  $S_y = 0.09$ , resultando coincidente con el valor estimado mediante la técnica propuesta.

#### 4.- Conclusiones

En el presente estudio se ha presentado una técnica de cálculo del coeficiente de almacenamiento de un acuífero libre basado en la correlación de datos de la misión espacial GRACE y mediciones de niveles freáticos en pozos. La técnica propuesta fue empleada en la localidad de Azul (Buenos Aires, Argentina) obteniéndose un valor del coeficiente de almacenamiento de aproximadamente un 9%. Esta estimación resulta consistente con la determinación realizada en la misma zona de estudio empleando una técnica que relaciona ascensos de niveles freáticos con precipitaciones. En el presente trabajo la variación del almacenamiento de agua en la zona no saturada se ha supuesto constante durante todo el período analizado. Los resultados obtenidos podrían mejorarse calculando el término  $\Delta ZNS$  de la Ec. (3) con modelos globales de alta resolución como el GLDAS (Global Land Data Assimilation System) (Rodel et al., 2004).

Finalmente resulta importante destacar que los datos de GRACE son de dominio público y cubren la totalidad de la superficie del planeta por lo que pueden ser utilizados para estimar el coeficiente de almacenamiento de cualquier acuífero libre de gran extensión donde se disponga de mediciones de niveles freáticos. Esta particularidad de la técnica propuesta puede resultar de gran utilidad en la evaluación y análisis de las reservas de agua a escala global.

## 5.- Referencias

- Bear, J. 1988. Dynamics of fluids in porous media. Dover Publications, Inc., New York.
- Bruinsma S., Lemoine, J.-M., Biancale, R., y Valès N. 2010. CNES/GRGS 10-day gravity field models (release 2) and their evaluation. *Advances in Space Research* 45: 587–601.
- Freeze, R. A., y Cherry, J. A. 1979. Groundwater, Prentice-Hall, Upper Saddle River, N. J.
- Gehman, C. L., Harry, D. L., Sanford, W. E., Stednick J. D., y Beckman, N. A. 2009. Estimating specific yield and storage change in an unconfined aquifer using temporal gravity surveys. *Water Resource Research* 45, W00D21, doi:10.1029/2007WR006096.
- Howle, J. F., Phillips, S. P., Denlinger R. P., y Metzger, L. F. 2003. Determination of specific yield and water-table changes using temporal microgravity surveys collected during the second injection, storage, and recovery test at Lancaster, Antelope Valley, California, November 1996 through April 1997, *U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 03-4019*, 1–28.
- 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.
- Neuman, S. P. 1987. On methods of determining specific yield. *Ground Water* 25: 679–684.
- Olin, M.H.E. y Svensson, Ch. 1992. Evaluation of geological and recharge parameters for an aquifer in Southern Sweden. *Nordic Hydrology* 23(5): 305-314.
- Pool, D. R., y Eychanner, J. H. 1995. Measurement of aquifer-storage change and specific yield using gravity surveys. *Ground Water* 33: 425–432.
- Quintana Crespo, E. 2005. Relación entre las propiedades geotécnicas y los componentes puzolánicos de los sedimentos pampeanos. Tesis Doctoral. Universidad de Córdoba, Argentina.
- Rodell, M., Chen, J., Kato, H., Famiglietti, J.S., Nigro J., y Wilson C.R., 2007. Estimating groundwater storage changes in the Mississippi River basin (USA) using GRACE. *Hydrogeology Journal* 15: 159-166.
- Rodell, M., Houser, P. R., Jambor, U., Gottschalck, J., Mitchell, K., Meng, C.-J., Arsenault, K., Cosgrove, B., Radakovich, J., Bosilovich, M., Entin, J. K., Walker, J. P., Lohmann D. and Toll, D. 2004. The Global Land Data Assimilation System. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 85:381-394.
- 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.
- Sala, J. M., Kruse, E., y Aguglino, R. 1987. Investigación hidrológica de la cuenca del arroyo Azul, Provincia de Buenos Aires. *Informe 37 CIC*.
- 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.
- Tapley, B. D., Bettadpur, S., Ries, J. C., Thompson, P. F., y Watkins, M. M., 2004. GRACE measurements of mass variability in the Earth system. *Science* 305: 503-505.
- 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. *Actas del I Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras, Azul Argentina*, Tomo I: 209-215.
- Wahr, J., y Molenaar, M., 1998. Time variability of the Earth's gravity field: hydrological and oceanic effects and their possible detection using GRACE. *J. Geophys. Res.* 103 (B12) 30205– 30229.
- Walton, W.C., 1970. Groundwater resource evaluation. Mc Graw Hill, New York.
- Yeh, P., Swenson, S.C., Famigliatti, J.S, y Rodell, M., 2006. Remote sensing of groundwater storage changes in Illinois using the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE). *Water Resources Research* 42, W12203, doi: 10.1029/2006WR005374.