

MONITOREO GLOBAL DE LAS VARIACIONES DE LAS RESERVAS DE AGUAS SUBTERRÁNEAS  
MEDIANTE DATOS SATELITALES

Guarracino L.<sup>1</sup>, Tocho C.<sup>2</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. Tel.: 4326593 - [lguarracino@fcaglp.unlp.edu.ar](mailto:lguarracino@fcaglp.unlp.edu.ar)

<sup>2</sup> Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, Universidad Nacional de La Plata, Paseo del Bosque S/N, (1900) La Plata, Argentina, Tel.: 4326593 - [ctocho@fcaglp.unlp.edu.ar](mailto:ctocho@fcaglp.unlp.edu.ar)

Una de las consecuencias de un eventual cambio climático es la modificación del patrón de distribución de las reservas de aguas subterráneas. Las aguas subterráneas forman parte del ciclo hidrológico y un cambio en la distribución de la precipitación o un aumento de la evapotranspiración modificaría su distribución espacio-temporal. En este contexto, el monitoreo de las reservas de aguas subterráneas adquiere una particular relevancia ya que podría brindar evidencias sobre el cambio climático y evaluar sus posibles consecuencias sobre la agricultura y fuentes de abastecimiento. El monitoreo de las aguas subterráneas a escala global resulta dificultoso ya que para realizarlo debería contarse con una red de pozos extensa y uniformemente distribuida sobre la superficie terrestre. El objetivo de este trabajo es presentar la única técnica satelital aplicable al monitoreo de aguas subterráneas. Desde el año 2002 la misión satelital GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) provee datos de las variaciones temporales del campo de gravedad terrestre. A partir de estas variaciones es posible estimar los cambios en las reservas de aguas y las fluctuaciones de los niveles freáticos. Presentaremos las bases teóricas de la metodología e ilustraremos su potencialidad analizando las variaciones de las reservas de agua durante la sequía del año 2009 en la región pampeana.

### Introducción

La forma más directa de monitorear las variaciones de las reservas de aguas subterráneas es mediante la medición sistemática de los niveles freáticos en pozos. Esta técnica es de gran utilidad para evaluar las variaciones de las reservas a escala local, sin embargo su aplicación a escalas regional y global trae aparejada numerosos inconvenientes. Para realizar un análisis a estas escalas espaciales debería contarse con una red de pozos suficientemente densa y uniformemente distribuida sobre la superficie terrestre. Tales redes solamente existen en algunos países desarrollados, en la mayoría de los casos la cantidad de pozos es insuficiente y como agravante las series de mediciones de niveles freáticos suelen ser discontinuas.

Las mediciones satelitales resultan de gran utilidad en el análisis de numerosos problemas que se plantean a escalas regional y global. Las técnicas satelitales tradicionales se basan en mediciones de radiaciones electromagnéticas en distintas bandas de frecuencias que permiten estudiar propiedades específicas de la atmósfera y la superficie terrestre. Desafortunadamente, la penetración de estas técnicas en el subsuelo es de pocos centímetros y sólo han sido empleadas para analizar la humedad del suelo cercana a la superficie. Las variaciones de las aguas subterráneas tienen lugar a profundidades mayores (del orden de metros) por lo que su estudio no puede realizarse con las técnicas satelitales convencionales (Becker, 2006).

La misión espacial GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) es considerada la primer misión satelital directamente aplicable al monitoreo de aguas subterráneas a escala global. A diferencia de otras misiones satelitales, GRACE detecta variaciones temporales de gravedad que pueden emplearse para estimar los cambios en los niveles freáticos y de este modo analizar las variaciones de agua almacenada en el subsuelo. Esta técnica ha sido empleada con éxito para calcular el almacenamiento de agua en distintas regiones como la cuenca del río Mississippi (Rodell et al., 2007) y el continente sudamericano (Guarracino y Tocho, 2010; Tocho et al., 2011).

En este trabajo presentaremos aspectos generales de la misión GRACE junto con la técnica que permite calcular las variaciones de niveles freáticos a partir de los datos provistos por esta misión satelital. Para ilustrar la potencialidad de la técnica de monitoreo analizaremos las variaciones de las reservas de agua durante la sequía que tuvo lugar en la región pampeana durante el año 2009. Esta sequía es considerada como la más severa de los últimos 50 años y su estudio permitirá evaluar la utilidad de esta herramienta en eventos que pueden estar asociados al cambio climático global.

### Misión satelital GRACE

La misión espacial GRACE (Tapley et al. 2004) es un proyecto conjunto de la NASA y el Centro Aeroespacial Alemán (DLR) que fue lanzada el 17 de marzo de 2002 con el objeto de realizar mediciones precisas del campo de gravedad terrestre. La misión consiste en dos satélites idénticos que orbitan uno detrás de otro separados por una distancia de aproximadamente 220 km en una órbita cuasi polar (inclinación de 89°) a 500 km de altitud con un período de 95 minutos. La distancia que separa ambos satélites sufre continuas

variaciones debido a las perturbaciones producidas por el campo de gravedad terrestre. De este modo, midiendo con gran precisión la distancia que separa los satélites es posible detectar fluctuaciones muy pequeñas del campo gravedad.

El campo de gravedad terrestre se expresa mediante un desarrollo en armónicos esféricos cuyos coeficientes se determinan a partir de las perturbaciones observadas en las trayectorias de los satélites. El campo de gravedad suele determinarse para períodos de 10 y 30 días lo que permite estudiar sus variaciones temporales. La resolución espacial se estima entre los 300 y 500 km lo que limita la aplicabilidad de esta técnica a estudios regionales o globales (Swenson y Whar, 2006).

El campo de gravedad a estas escalas temporales está afectado básicamente por las mareas terrestres, la circulación oceánica, las perturbaciones atmosféricas y el movimiento del agua dentro del ciclo hidrológico. Los datos de nivel 2 provistos por la misión GRACE contienen solamente las contribuciones de origen hidrológico ya que las contribuciones atmosféricas, oceánicas y de mareas terrestres son removidas de los datos utilizando distintos modelos numéricos (Chen et al., 2005). Luego, las variaciones de gravedad de los datos de nivel 2 pueden asociarse a cambios en las reservas de agua continental.

La masa de agua equivalente que se redistribuye sobre la superficie y el subsuelo terrestre puede calcularse empleando relaciones directas entre gravedad y masa. Los detalles de la metodología de cálculo se encuentran descriptos en el trabajo de Whar y Molenaar (1998). En este trabajo se utilizarán mapas globales de altura equivalente de agua en grillas de 1° por 1° para períodos de 10 días determinados por el Centro Nacional de Estudios Espaciales/Grupo de Investigación de Geodesia Espacial (CNES/GRGS) de Toulouse (Francia) (Biancale et al., 2010).

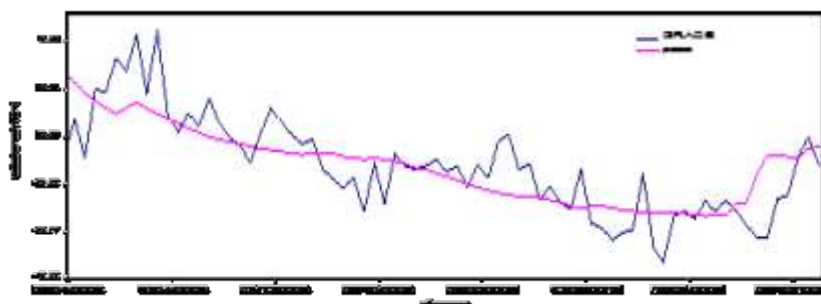
**Monitoreo satelital de aguas subterráneas**

Los mapas de altura equivalente obtenidos a partir de los datos de GRACE incluyen los aportes de las aguas superficiales, las aguas subterráneas, la humedad del suelo y la nieve o hielo (Rodell et al., 2007). La técnica de monitoreo de aguas subterráneas se basa en las siguientes hipótesis generales: 1) no existen grandes superficies inundables; 2) la acumulación de hielo o nieve es nula o poco significativa; 3) la masa de agua asociada a las variaciones de humedad del suelo es mucho menor a la masa asociada a las variaciones de los niveles freáticos. Bajo estas hipótesis es posible establecer la siguiente relación (Yeh et al., 2006):

$$\Delta h_{NF} = \Delta H/S_y \quad (1)$$

donde  $\Delta h_{NF}$  es la variación del nivel freático,  $\Delta H$  la variación de altura de agua equivalente y  $S_y$  el coeficiente de almacenamiento (o porosidad drenable). Luego si se dispone de una serie de datos de alturas equivalentes y un valor de  $S_y$  para la región de estudio, es posible estimar las variaciones de los niveles freáticos mediante esta técnica satelital.

Para validar esta metodología se calcularon las variaciones de niveles freáticos utilizando los datos de altura equivalente de GRACE (ecuación 1) y se compararon con las variaciones observadas en un pozo de monitoreo siguiendo la técnica tradicional. Este análisis se realizó para una serie de datos de 2 años en una estación ubicada en la localidad de Azul (Provincia de Buenos Aires). El valor del almacenamiento específico  $S_y$  para la zona es de 0.09 (Varni et al., 2010). En la Figura 1 se ilustran los valores obtenidos cada 10 días con ambas metodologías. Las variaciones de nivel freático estimadas con los datos de GRACE logran capturar la tendencia general de las mediciones realizadas en pozo pero presentan una componente de alta frecuencia. Esta componente de alta frecuencia probablemente tenga su origen en el agua que se encuentra en tránsito por la zona no saturada del suelo. Esta agua es detectada inmediatamente por GRACE pero no por el freatógrafo que la registrará recién cuando el agua alcance la zona saturada y produzca un ascenso del nivel freático.



**Figura 1: Variaciones del nivel freático observadas en un pozo de monitoreo y estimadas a partir de los datos de GRACE para la localidad de Azul durante el período 2008-2009.**

Esta técnica satelital puede emplearse para estudiar los patrones de variación de los niveles freáticos a escalas regional y global. En particular ha sido empleada para analizar la redistribución de las reservas de

### III CONGRESO INTERNACIONAL SOBRE CAMBIO CLIMATICO Y DESARROLLO SUSTENTABLE

agua durante la sequía del año 2009 en la provincia de Buenos Aires. Este evento climático produjo un descenso generalizado de los niveles freáticos en toda la región y significativas pérdidas económicas ya que tuvo su impacto en la principal región agrícola ganadera del país (Montenegro, 2010).

En la Figura 2 se ilustran las variaciones de altura equivalente determinadas por GRACE durante los meses de agosto y septiembre de 2009 tomando como referencia los valores correspondientes al año 2008. Estos meses corresponden aproximadamente a la finalización de la sequía que afectó la región. En los gráficos puede observarse claramente la recuperación de las reservas de aguas como consecuencia del incremento de la precipitación. A principios del mes de agosto los niveles freáticos en el centro de la provincia estaban aproximadamente 1,5 metros por debajo de los valores correspondientes a igual período del año anterior.

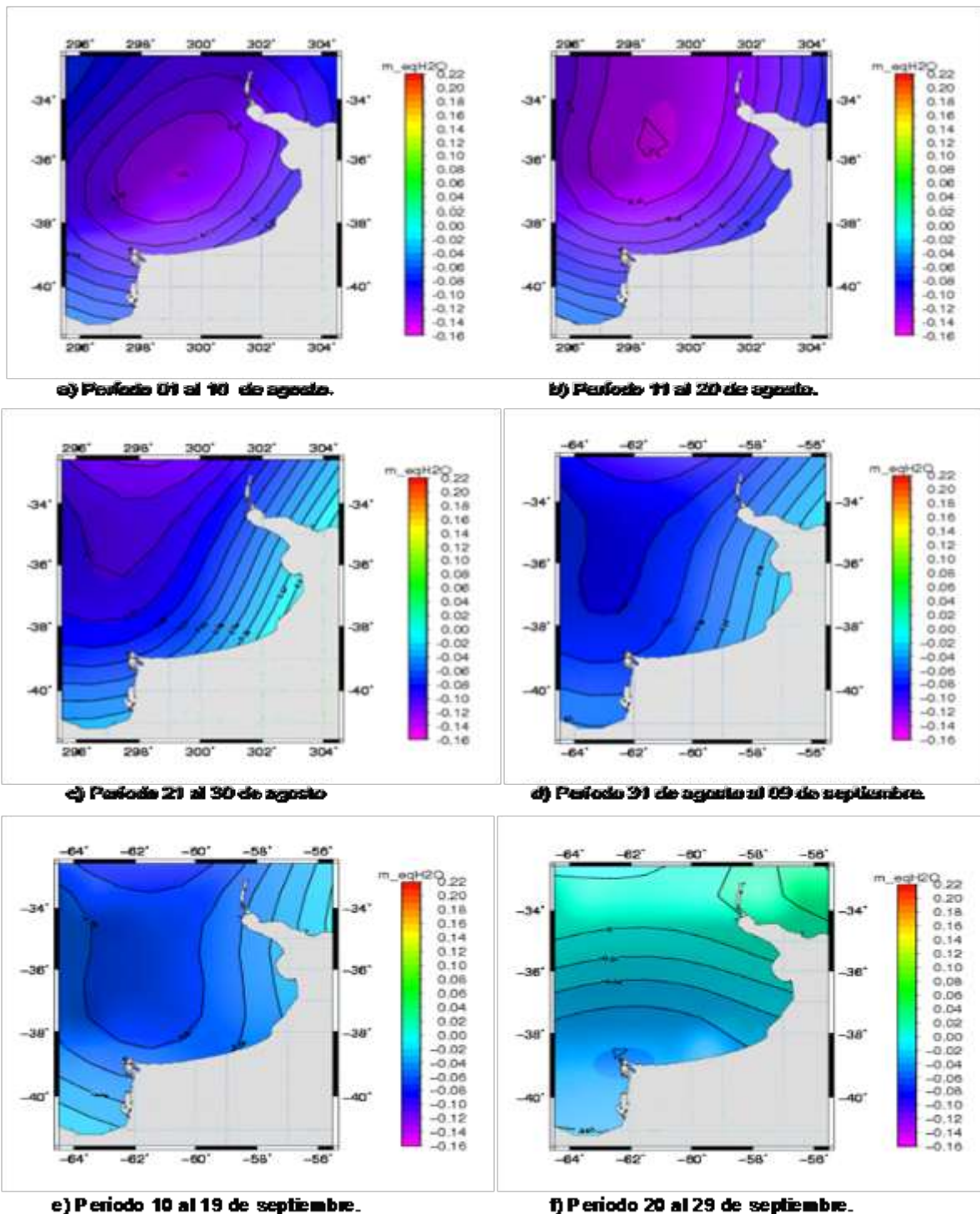


Figura 2: Variaciones de altura de agua equivalente para los meses de agosto y septiembre de 2009 (referidos a valores del año 2008).

En los períodos siguientes se observa la paulatina recuperación de las reservas de aguas subterráneas hasta obtenerse, a fines de septiembre, prácticamente los mismos valores del año 2008.

El patrón de los descensos de las reservas de agua que se observa en la Figura 2 se corresponde con las observaciones realizadas en distintas localidades de la provincia de Buenos Aires y que han sido reflejadas en innumerables artículos periodísticos. La técnica presentada permite cuantificar los descensos y analizar el fenómeno en un marco más general. Esta visión integradora del fenómeno puede ser utilizada para mejorar el modelo conceptual de la dinámica del flujo de aguas subterráneas en la región y optimizar la explotación de este valioso y vital recurso.

#### Conclusiones

Frente a un eventual escenario de cambio climático global, el patrón de distribución de las reservas de aguas subterráneas sufrirá cambios que tendrán impacto directo sobre las economías regionales y la población en general. En este contexto la técnica de monitoreo propuesta constituye una herramienta de incalculable valor ya que es la única técnica satelital que permite un monitoreo a escala global. Los datos de la misión GRACE cubren la totalidad de la superficie terrestre por lo que permite realizar estudios en regiones del planeta donde no se dispone de datos de campo o su acceso está restringido por cuestiones geográficas o políticas. A modo de ejemplo se ha presentado una aplicación al análisis de las reservas de agua durante la severa sequía que afectó la región pampeana en el año 2009. Los resultados obtenidos muestran claramente la validez de la herramienta para realizar este tipo de estudios y abren una nueva línea de investigación en el área de la hidrología subterránea.

#### Referencias

- Becker M. W. (2006). Potential for satellite remote sensing of ground water. *Ground water* 44:306-318.
- 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.
- Chen, J.L., Wilson, C.R., Famiglietti, J.S., Rodell, M. (2005). Spatial sensitivity of GRACE time-variable gravity observations. *J. Geophys. Res.* 110, B08408.
- Guarracino L. y Tocho C., (2010). Estimation of water storage from temporal variations of the geoid. *Lectures Notes Second La Plata International School on Astronomy and Geophysics & Ninth International IGeS Geoid School: Determination and Use of the Geoid* (ISBN 987-950-43-0643-4) Chapter 8, pp. 309-322, UNLP, Argentina.
- Montenegro M. S. (2010) Variaciones de las reservas de agua durante la sequía del año 2009 en la provincia de Buenos Aires a partir de datos satelitales de la misión GRACE. Tesis de Grado. Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, UNLP.
- Rodell M., Chen J., Kato H., Famiglietti J.S., Nigro J., Wilson C.R. (2007) Estimating groundwater storage changes in the Mississippi River basin (USA) using GRACE. *Hydrogeology Journal* 15:159–166.
- Tapley, B. D., S. Bettadpur, M. M. Watkins, and C. Reigber (2004). The Gravity Recovery and Climate Experiment: Mission overview and early results, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L09607, doi:10.1029/2004GL019920.
- Tocho C., Guarracino L., Monachesi L., Cesanelli A., Antico P. (2011). Seasonal variability of land water storage in South America using GRACE data aceptado en *Series: International Association of Geodesy Symposia*, Vol.136, ISBN 978-3-642-20337-4, Springer.
- Swenson S, Wahr J (2006) Post-processing removal of correlated errors in GRACE data. *Geophys Res Lett* 33:L08402. doi:10.1029/2005GL025285.
- Varni M., Comas R., Weinzettel P., 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., M. Molenaar, y F. Bryan (1998). Time variability of the Earth's gravity field: Hydrological and oceanic effects and their possible detection using GRACE, *J. Geophys. Res.*, 103, 30, 205-30, 230, doi:10.1029/98JB02844.