

USO DE GEOTECNOLOGIAS PARA EL MAPEO DE LA VARIACIÓN DEL ALMACENAMIENTO DE AGUA EN LA REGION PAMPEANA A PARTIR DE DATOS GRACE

USING GEOTECHNOLOGIES FOR MAPPING WATER STORAGE CHANGES IN THE PAMPEANA REGION FROM GRACE DATA

Ayelén Pereira¹, Cecilia Cornero¹, Ma. Cristina Pacino¹, Ana C. Oliveira Cancoro de Matos²

¹ Área de Geodinámica- Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura- Universidad Nacional de Rosario- CONICET. Rosario, Argentina.

² Escuela Politécnica - Universidad de San Pablo- EPUSP-PTR - Laboratorio de Topografía y Geodesia, San Pablo, Brasil.

E-mail: apereira@fceia.unr.edu.ar

RESUMEN

El campo gravitatorio terrestre no permanece constante, sino que varía en el tiempo debido a diversos factores como la redistribución de masas durante el ciclo hidrológico. La misión satelital GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment), provee datos acerca de la variación temporal del campo gravitatorio terrestre con una resolución espacial de aproximadamente 400 km. Debido a la relación directa entre gravedad y masa, es posible obtener las variaciones del almacenamiento de agua a partir del espesor equivalente de agua (EWH por sus siglas en inglés: Equivalent Water Height). El objetivo de este trabajo es el análisis regional de la variación del almacenamiento de agua a partir de la representación de los cambios espaciales y temporales del EWH derivados de GRACE, para el período 2003-2010 en la cuenca del río Salado, ubicada en la Región Pampeana. Para esta representación se utilizó el software GMT (Generic Mapping Tools) de código abierto, el cual permitió simplificar y automatizar el proceso cartográfico mediante *scripts*, creando todos los mapas en una sola aplicación. Los resultados de GRACE fueron validados con datos de precipitaciones del GPCP (Global Precipitation Climatology Project), humedad del suelo del GLDAS (Global Land Data Assimilation System) y mediciones de la cota hidrométrica en la Laguna La Picasa, ubicada en la cuenca del río Salado. GRACE detectó significativas variaciones del espesor equivalente de agua en el período bajo estudio, las que pueden asociarse a precipitaciones máximas y mínimas ocurridas en la región. Las señales de EWH y cota hidrométrica presentaron un comportamiento similar y una tendencia negativa en el período 2002-2009. La correlación entre ambas señales resultó ser mayor al 75%, indicando un buen ajuste entre variables geofísicas diferentes.

Palabras clave: variaciones temporales de la gravedad a partir de GRACE, espesor equivalente de agua, cuenca del Río Salado, Laguna La Picasa.

ABSTRACT

The Earth's gravity field does not remain constant but changes over time depending on several factors such as redistribution of the masses due to hydrological cycles. The GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) satellite mission provides time-variable readings of variations in the Earth's gravity field at a spatial resolution of ~400 km. Because of the direct relationship between mass and gravity, it is possible to obtain the related changes in water storage from the Equivalent Water Height (EWH). The aim of this work is to analyze the regional changes in water storage from a representation of the spatio-temporal EWH variations obtained from GRACE solutions for the period 2003-2010 in the Salado river basin, located in the Pampeana Region of Argentina. The GMT (Generic Mapping Tools) open-source software was used for this representation, as it allows for simplification and automation of the mapping process using *scripts* to create maps all within a single application. Afterwards, GRACE results were validated by comparison with GPCP (Global Precipitation Climatology Project) rainfall data as well as GLDAS (Global Land Data Assimilation System) soil moisture and hydrometric heights of the Picasa Lagoon in the Salado River basin. This mission detected significant EWH variations in the period under study, which could be associated with maximum and minimum precipitations that occurred in the region. The EWH and hydrometric

height signals both showed a similar behavior and a negative trend within the period 2002-2009. The correlation between both signals was greater than 75%, showing a good adjustment between different geophysical variables.

Keywords: time-variable gravity from GRACE mission, equivalent water height, Salado River basin, La Picasa Lagoon

INTRODUCCIÓN

El conocimiento del ciclo hidrológico constituye una herramienta fundamental para el monitoreo de inundaciones, humedad de suelo y almacenamiento de agua subterránea, entre otros. En los últimos años, los datos provenientes de sensores remotos (tales como el nivel de agua superficial a partir de altimetría satelital y el almacenamiento de agua total a partir de misiones gravimétricas espaciales), han demostrado ser muy útiles para el estudio del balance de agua a escalas de cuencas y subcuencas (Xavier et al., 2010).

En particular, la misión satelital GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) fue diseñada para mapear las variaciones temporales del campo de gravedad terrestre global con una alta precisión. A partir de sus resultados, es posible detectar cambios de masas de agua en la superficie terrestre en períodos de 30 días. Por más de 7 años, la misión GRACE contribuyó a comprender las variaciones espacio-temporales del almacenamiento de agua en el continente y, en general, contribuyó a varios estudios de geociencias (Costa et al., 2011).

De acuerdo a Tapley et al. (2004), poco después del lanzamiento de GRACE, se produjeron importantes resultados científicos acerca de la dinámica del agua.

La República Argentina, debido a su distribución geográfica (se extiende aproximadamente 3700 km de norte a sur) se caracteriza por un relieve conformado por una gran variedad de paisajes y una complejidad geológica dando lugar a una diversidad única de los sistemas fluviales (Latrubesse & Brea, 2009).

Los sistemas fluviales de Argentina se pueden clasificar en tres grandes grupos: grandes ríos tropicales, ríos torrentosos con cabeceras en zonas de montaña, y ríos de llanura con drenaje insuficiente. Este último se corresponde con áreas muy llanas con escasas pendientes, en las cuales predominan las variables verticales (infiltración, evapotranspiración) frente al escurrimiento superficial, produciéndose áreas con almacenamiento de agua superficial.

Una de las principales regiones que conforma este grupo es la Región Pampeana, localizada en el sur de las provincias de San Luis, Córdoba y Santa Fe, y la parte norte de La Pampa y noroeste de Buenos Aires. Las lagunas más importantes de esta región son: La Picasa, La Salada, del Siete y el Complejo Hinojo-Las Tunas, las cuales se localizan en la cabecera de la cuenca del río Salado de Buenos Aires (Latrubesse y Brea, 2009).

En este trabajo se realizó un análisis regional de la variación del almacenamiento de agua a partir de la representación de los cambios espaciales y temporales del espesor equivalente de agua (EWH) derivados de GRACE para el período 2003- 2010 en la cuenca del río Salado, ubicada en la Región Pampeana. Esta región hidrográfica está conformada por tres cuencas, alcanzando una extensión de aproximadamente 230000 km².

Para validar los resultados de EWH obtenidos mediante GRACE se utilizaron datos mensuales de precipitaciones del GPCP (Global Precipitation Climatology Project) y de humedad del suelo de GLDAS (Global Land Data Assimilation System), y además se compararon las series temporales de EWH y de altura hidrométrica en la Laguna La Picasa, ubicada en la región bajo estudio.

Para la generación de los mapas temáticos se empleó el software GMT (Generic Mapping Tools) de código abierto, el cual permitió simplificar y automatizar el proceso cartográfico mediante *scripts* que permiten crear todos los mapas en una sola aplicación (Wessel y Smith, 1991, 1998).

Las capacidades brindadas por el satélite GRACE complementadas con las tecnologías informáticas para la producción de mapas han permitido abordar el estudio del almacenamiento de agua en un sector de la Región Pampeana que pueden servir de base para alertar o monitorear eventos hidrológicos extremos, como así también cambios que pueden producirse en los acuíferos o aguas subterráneas.

ÁREA DE ESTUDIO

El estudio se centró en la cuenca extendida del río Salado, ubicada entre los 33° y 38° de latitud Sur, y 57° y 66° de longitud Oeste aproximadamente. El área delimitada por esta región está conformada por las siguientes cuencas hidrográficas: Cuenca del río Quinto y arroyos menores de San Luis, Cuenca del río Salado de Buenos Aires, y Región sin drenaje superficial de San Luis, Córdoba, La Pampa y Buenos Aires (Figura 1).

Los límites de las tres subcuencas fueron extraídos del Atlas Digital de la Sub-Secretaría de Recursos Hídricos de la Nación (SRHN e INA 2002). La laguna La Picasa está ubicada en la región sur de la provincia de Santa Fe, abarcando también parte de las provincias de Córdoba y Buenos Aires (Figura 2, izquierda). Su cuenca endorreica comprende 5.500 km². Durante gran parte de la última década, las precipitaciones en algunos lugares de la cuenca superaron los 1.000 mm, en una zona con un régimen que oscilaba entre los 600 y 700 mm anuales. Por

otra parte, los cambios en el uso del suelo debidos al proceso de intensificación agrícola han contribuido a agravar el problema de las inundaciones (Rosenstein et al., 2009).

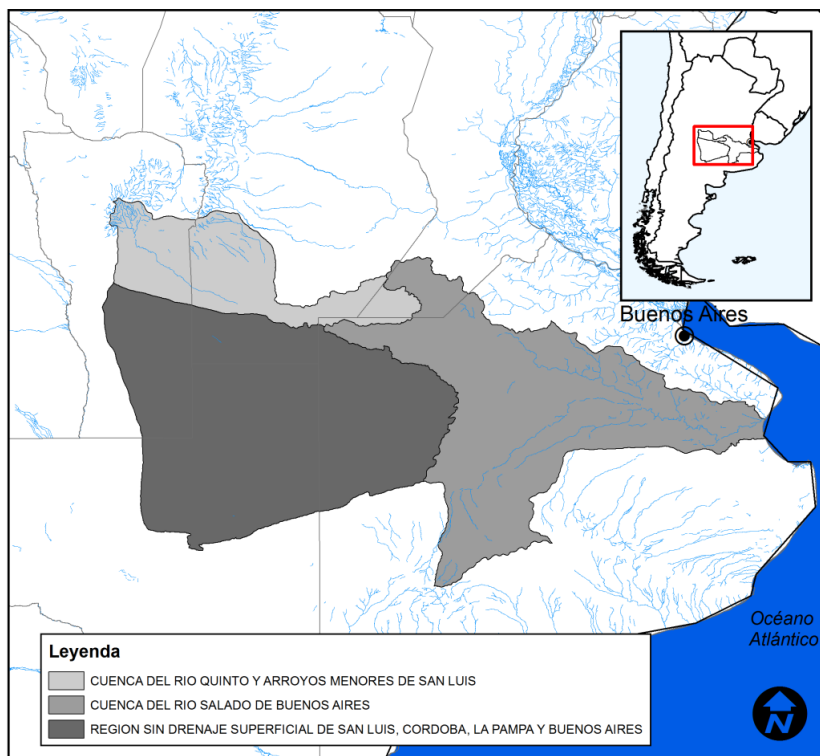


Figura 1. Ubicación geográfica de la región hidrográfica en estudio.
Figure 1. Geographical location of the hydrographic region under study.

De acuerdo a las características morfológicas de la cuenca, la variación de la superficie de la laguna La Picasa se debe principalmente a los montos precipitados y a la capacidad de contención de la laguna antes de su rebalse.

Entre los años 1997 y 2002 el nivel de la laguna ascendió notablemente, asociado a un ciclo de precipitaciones extraordinarias, comprometiendo en diverso grado las estructuras socio-económicas locales (Carballo et al., 2000). La variación a lo largo de los años del área anegada puede observarse en las imágenes LANDSAT 5 TM de la CONAE –Comisión Nacional de Actividades Espaciales-, Figura 2 (derecha).

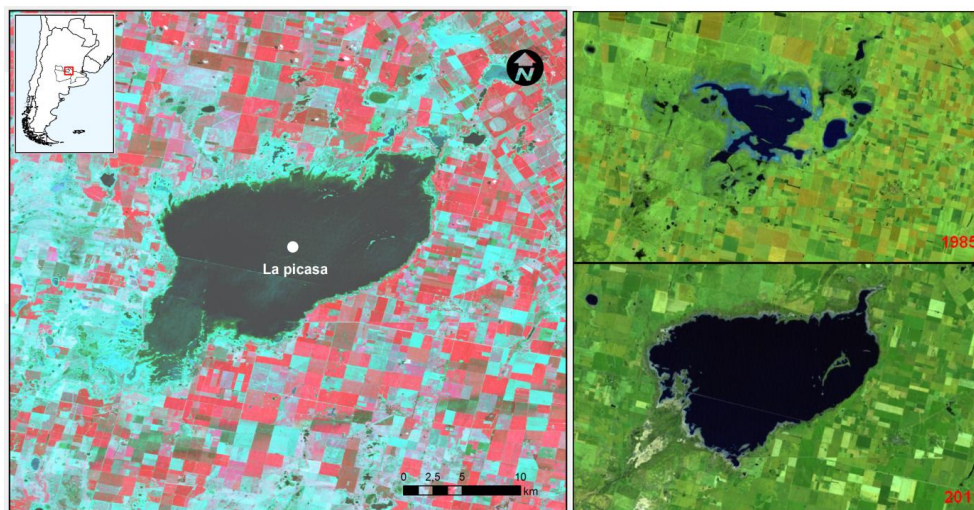


Figura 2. Izquierda: ubicación de la Laguna La Picasa. Derecha: área anegada, años 1985 y 2011 (CONAE).
Figure 2. Left: location of La Picasa Lagoon. Right: flooded area, years 1985 and 2011 (CONAE).

INFORMACIÓN DISPONIBLE

Datos GRACE

La misión satelital GRACE fue desarrollada conjuntamente por la National Aeronautics and Space Administration (NASA) y el Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt (DLR). Fue lanzada en marzo del 2002, y planificada con una duración de al menos cinco años, sin embargo, a la fecha el satélite continúa en operación.

El objetivo principal de la misma, es medir en forma precisa las variaciones temporales del campo de gravedad terrestre con un intervalo mensual. Las mayores variaciones temporales- anuales e interanuales del campo de gravedad terrestre se deben al movimiento del agua almacenada durante el ciclo hidrológico.

Debido a la relación única entre cambios en el campo de gravedad y cambios de masa en la superficie terrestre, es posible estimar el almacenamiento de agua terrestre a partir de las variaciones gravitatorias mensuales obtenidas por GRACE.

El espesor equivalente de agua o altura equivalente de agua -EWH- es una representación idealizada de las densidades de masa superficiales en términos de una capa delgada de agua. Asociando las variaciones del campo de gravedad derivado de GRACE, con cambios del espesor de la capa de agua, se asume implícitamente que la señal de gravedad observada es causada por variaciones del almacenamiento de agua (Costa et al., 2011; Matos et al., 2012; Morishita y Heki, 2008; Pacino et al., 2011; Pereira et al., 2012a; 2012b). Varios trabajos también han desarrollado la variabilidad de almacenamiento de agua, específicamente en lo que respecta a hidrología continental (Ramillien et al., 2007; Chen et al., 2005; Chambers et al., 2006; Tapley et al., 2004b; Wahr et al., 2004).

Existen varios centros de procesamiento que proporcionan las soluciones GRACE con un intervalo de 30 días: University of Texas, Centre for Space Research -CSR-, Jet Propulsion Laboratory -JPL- y GeoForschungsZentrum -GFZ-. Existe otro grupo, el Centre National d'Etudes Spatiales/Groupe de Recherches de Géodésie Spatiale -CNES/GRGS- que proporciona los datos de GRACE cada 10 días.

De acuerdo a Bruinsma et al. (2010), la máxima resolución espacial de los modelos GRACE (grado y orden 50) es de 400 km en el Ecuador; pero el error de éstos aumenta a medida que la escala espacial disminuye. Por lo tanto, para estimaciones precisas del EWH, el área bajo estudio deberá ser lo más extensa posible y como mínimo de 500 x 500 km.

En este trabajo se utilizaron las grillas de EWH procesadas CNES/GRGS, las cuales son globales, provistas con un espaciado de 1° x 1° y cada 10 días. Éstas representan la variación del almacenamiento de agua con una precisión de 20 mm aproximadamente, dependiendo del tamaño del área analizada y del método de interpolación utilizado.

Las mismas se obtuvieron del sitio web (<http://grgs.obs-mip.fr/grace/variable-models-grace-lageos/grace-solutions-release-02> para el período 2003 – 2010).

Datos de Precipitaciones Mensuales

Uno de los principales objetivos del GPCP es proporcionar datos que permitan el análisis de los patrones espaciales y temporales de la precipitación global. Para estimar las precipitaciones mensuales se utilizó una combinación de datos de estaciones pluviométricas, satélites geoestacionarios infrarrojo de órbita baja, microondas pasivas y observaciones de sondeo.

Los datos utilizados en este trabajo corresponden al modelo *Global Precipitation version 2.2*, que consta de grillas de precipitación mensual de 2.5° x 2.5°. Los mismos fueron obtenidos de la página web (<http://disc2.nascom.nasa.gov/Giovanni/tovas/rain.GPCP.2.shtml>).

Humedad del Suelo

Se utilizaron datos de humedad del suelo obtenidos a partir del visualizador Giovanni desarrollado por la NASA, el cual puede ingresarse a través del sitio web (http://gdata1.sci.gsfc.nasa.gov/daac-bin/G3/gui.cgi?instance_id=GLDAS025_M&gsid=GLDAS025_M_190.30.141.148_1385561913&selectedWSID=138556217215518&app=timeseries&selectedMap=OpenLayers_Layer_WMS_4&hiddenResults=138556217215518).

Dicha información forma parte del Sistema Integrado de Datos Terrestres Globales (GLDAS), el cual ofrece series de datos como precipitación, humedad del suelo, temperatura, etc., simuladas a través de modelos terrestres.

En este trabajo se utilizó la Versión 1 del set de datos mensuales de humedad del suelo (capa 3.40-100 cm) de 0.25° x 0.25° de resolución espacial. El mismo está definido como la cantidad de agua promedio de una capa de suelo específica debajo de la superficie para una determinada profundidad, en este caso, entre 40 y 100 cm.

Cotas Hidrométricas de la Laguna La Picasa

La serie temporal de cotas hidrométricas en la Laguna La Picasa (Figura 3) fue provista por el Ministerio de Aguas, Servicios Públicos y Medio Ambiente de la Provincia de Santa Fe.

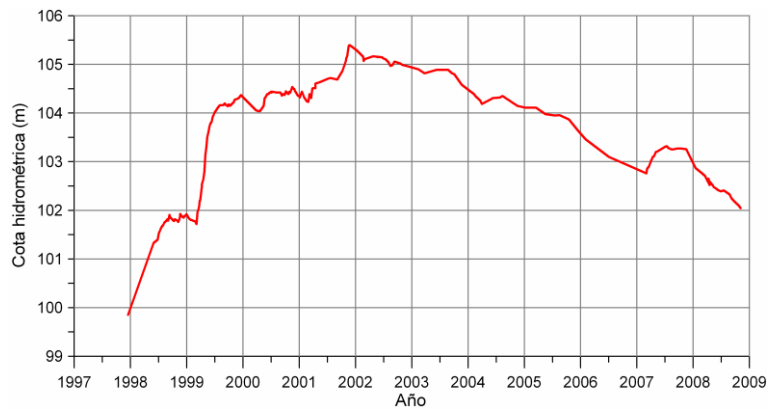


Figura 3. Cota hidrométrica en la laguna La Picasa, período 1998- 2009.
Figure 3. Hydrometric height of La Picasa lagoon, 1998- 2009 period.

RESULTADOS

EWH vs Precipitación

Para obtener las variaciones más significativas del almacenamiento de agua en la región de estudio, se utilizaron las grillas de $1^\circ \times 1^\circ$ de EWH procesadas por el centro GRGS. Luego, se obtuvieron los promedios estacionales para cada año. De acuerdo al hemisferio sur las estaciones son: Verano (Enero, Febrero, Marzo), Otoño (Abril, Mayo, Junio), Invierno (Julio, Agosto, Septiembre) y Primavera (Octubre, Noviembre y Diciembre).

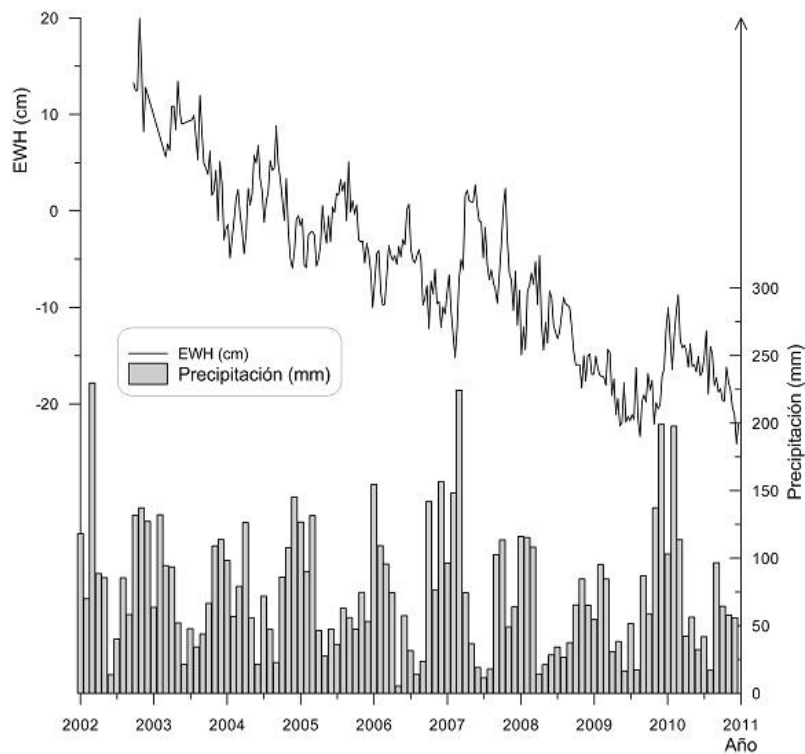


Figura 4. Serie temporal EWH (GRGS) y precipitación (GPCC), período 2002- 2010.
Figure 4. EWH time series (GRGS) and rainfall (GPCC), 2002- 2010 period.

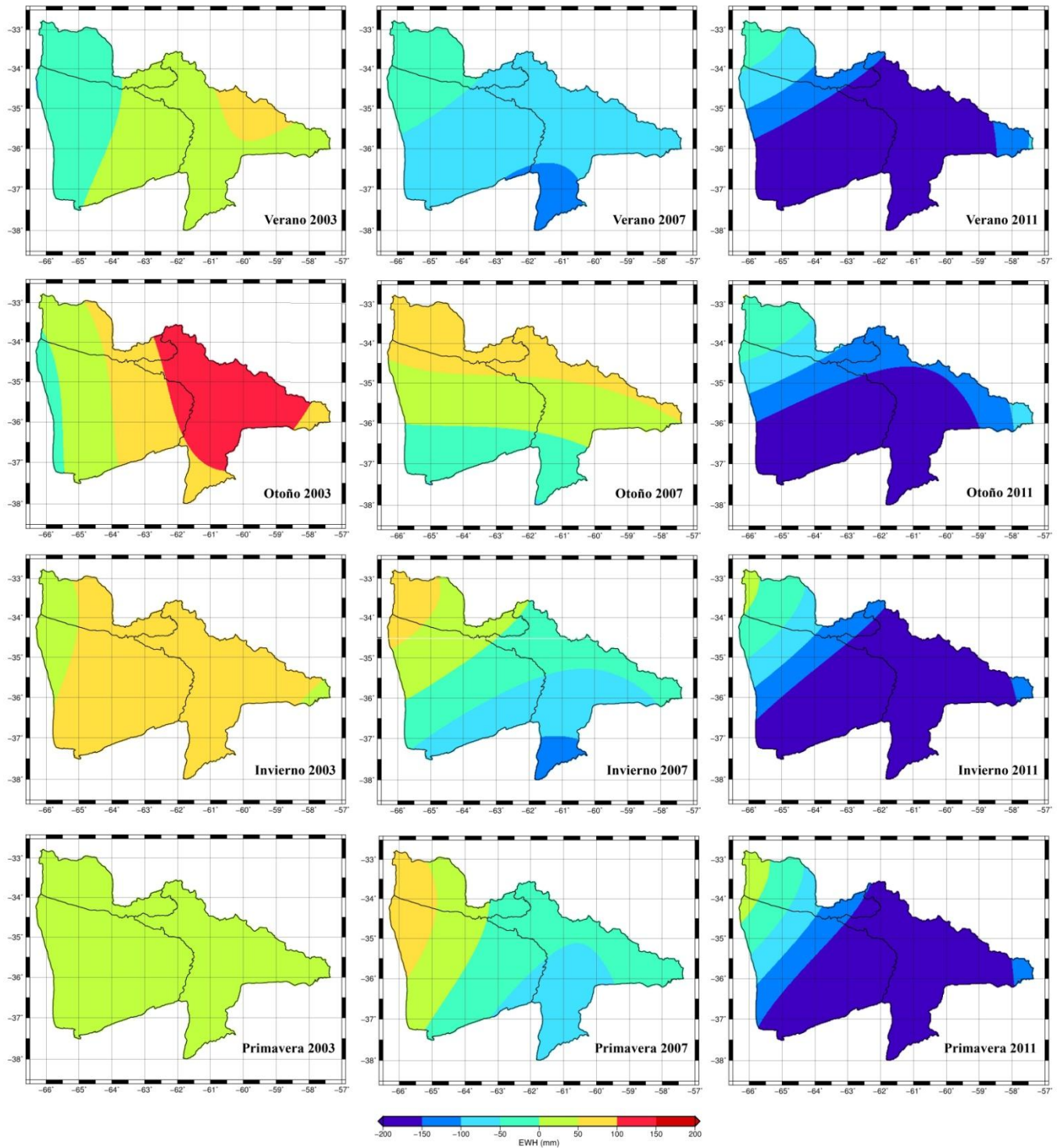


Figura 5. Espesor equivalente de agua (mm) en la región de estudio para Verano, Otoño, Invierno y Primavera, años 2003, 2007 y 2010.
Figure 5. Equivalent water height (mm) in the region under study for Summer, Autumn, Winter and Spring of 2003, 2007 and 2011 years.

Para generar los mapas de variación estacional del EWH se utilizó el programa GMT. En la Figura 5 se presentan los mapas de EWH sólo para los años 2003, 2007 y 2010. En el gráfico de la Figura 4 puede observarse el comportamiento cíclico anual e interanual del almacenamiento de agua en la región. Para el período 2003- 2010, se detecta que el EWH tiene una tendencia negativa y que los incrementos ocurren generalmente

durante el otoño para cada año; mientras que a partir de la primavera los valores de EWH comienzan a descender.

De acuerdo a los datos de lluvias del GPCP para la región, el máximo de precipitaciones se presenta en el año 2002 (1186 mm), y le sigue el año 2007 (958 mm). Los valores mínimos se presentan en el 2008 (717 mm).

Debido a que GRACE comienza a aportar datos recién a fines del 2002, no es posible analizar este año completo. Sin embargo, en el año 2007 hubo un incremento importante del EWH, el cual puede asociarse a un año lluvioso. En cambio, los años 2008 y 2009 presentan una disminución del EWH que también pueden asociarse a dos años de menores precipitaciones.

EWH vs Cota hidrométrica en La Picasa

Para estimar la serie temporal de la variación del almacenamiento de agua en la estación de la laguna para el período 2002-2009, se interpolaron las grillas de EWH del centro GRGS.

En la Figura 6 se comparan las series temporales de EWH y cota hidrométrica. Además, se obtuvo el coeficiente de correlación de Pearson R entre dichas series -calculado en función de la covarianza entre las variables independientes EWH y cota hidrométrica-, resultando un valor superior al 75%.

Cabe destacar que los datos de EWH y las cotas hidrométricas representan diferentes magnitudes. Mientras GRACE ve el almacenamiento de agua como una columna vertical compuesta por agua superficial, subterránea y humedad del suelo integrada en un período de tiempo (mensual o cada 10 días), la cota hidrométrica representa el nivel de agua alcanzado en la laguna y puede ser medido en forma diaria. Además, es necesario remarcar que las resoluciones con que son obtenidas ambas señales no son iguales, una es medida *in situ* y otra es una medida derivada de un sensor remoto. Por lo tanto, la correlación no se refiere a las magnitudes, sino al comportamiento de las curvas que representan ambas series.

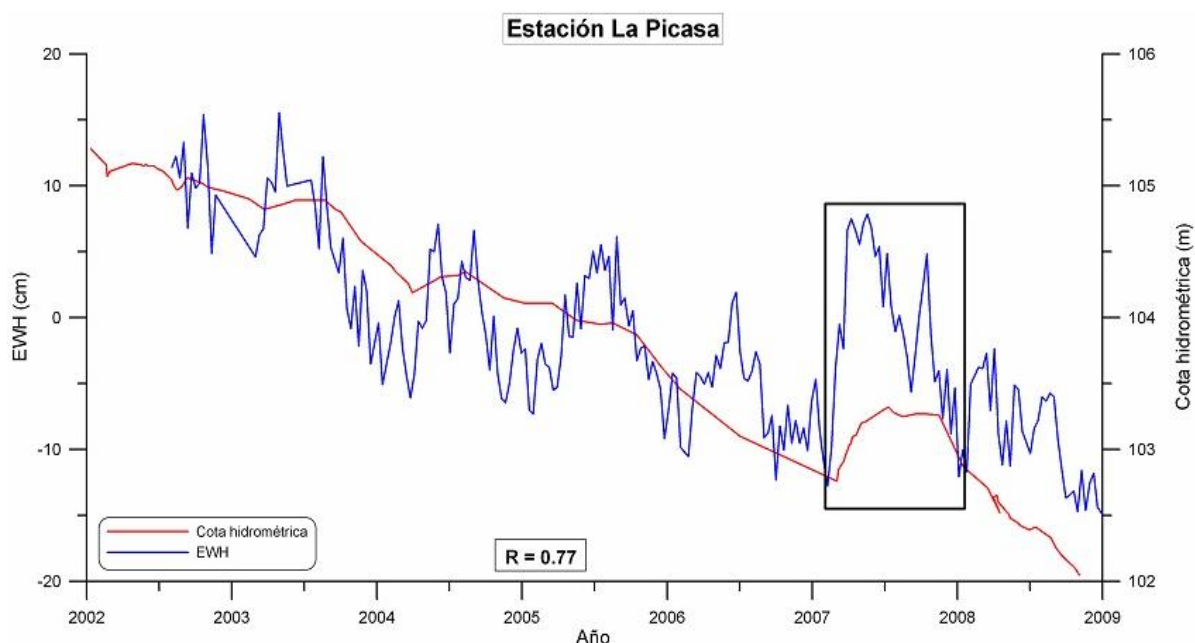


Figura 6. Serie temporal de EWH vs. altura hidrométrica en la laguna La Picasa.

Figure 6. EWH time series vs. hydrometric height in La Picasa lagoon.

EWH vs Humedad del suelo

En la Figura 7 se muestran las series temporales de EWH (GRACE) y de humedad del suelo (GLDAS) para el área correspondiente a la laguna La Picasa para el período 2002- 2011. Realizando un análisis cualitativo de dicha figura, se puede apreciar en general un comportamiento similar entre ambas señales, con picos coincidentes de valores máximos (invierno 2003, invierno 2004, otoño 2007, verano 2009, verano 2010) y mínimos (verano 2003, otoño 2004, verano 2006, verano 2007, verano 2008, primavera 2010).

Ambas series temporales presentan una tendencia negativa para el período analizado, siendo la de EWH la que muestra una pendiente más pronunciada respecto a la de humedad del suelo.

Es necesario volver a destacar que los datos de EWH y de humedad del suelo representan diferentes magnitudes geofísicas, con lo cual el análisis se refiere sólo al comportamiento de ambas señales.

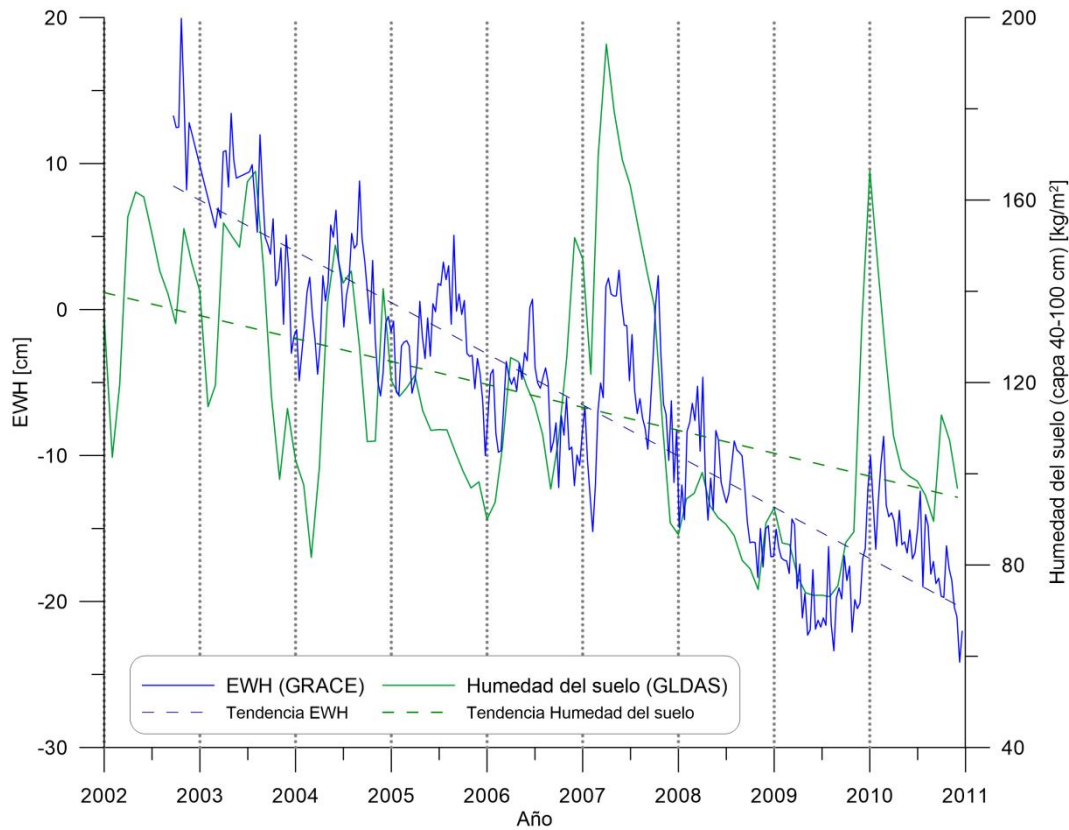


Figura 7. Serie temporal de EWH vs. humedad del suelo de GLDAS en el área de la laguna La Picasa.
Figure 7. EWH time series vs. soil moisture from GLDAS in La Picasa lagoon region.

CONCLUSIONES

Las nuevas tecnologías aplicadas a la Geomática posibilitaron el estudio de la variación temporal del almacenamiento de agua asociado al comportamiento hídrico de la región de la laguna La Picasa.

De acuerdo a los mapas de EWH, se puede concluir que GRACE detectó las significativas variaciones del espesor equivalente de agua en el período bajo estudio para la Región Pampeana (Figura 4).

Las mayores variaciones del EWH pueden asociarse a precipitaciones máximas y mínimas ocurridas en la región en el año 2007 y los años 2008 y 2009 respectivamente (Figura 5). La disminución progresiva del EWH detectada en dicha zona puede relacionarse con una significativa reducción de la cantidad de precipitación en los últimos años, con un largo período de sequía y además con una disminución en la evapotranspiración y recarga de agua subterránea (esto último estrechamente conectado a la topografía plana de la región).

Las señales de EWH y cota hidrométrica para la laguna La Picasa presentaron un comportamiento similar y una tendencia negativa en el período 2002- 2009 (Figura 6). La correlación entre ambas señales resultó mayor al 75%, indicando un buen ajuste entre variables geofísicas diferentes.

De acuerdo al análisis de las series temporales de EWH y humedad del suelo para el área de la Laguna La Picasa (Figura 7) surge también la mencionada tendencia negativa, pero en este caso desde el 2002 al 2010 inclusive. Asimismo, ambas señales presentaron picos de valores máximos y mínimos coincidentes en dicho período, con lo cual se puede concluir que la humedad del suelo provista por el modelo GLDAS se aproxima a la variación del EWH derivado de GRACE.

Finalmente, los resultados obtenidos en este estudio pretenden contribuir a un mejor monitoreo y comprensión del ciclo del agua de la región de la laguna La Picasa, y demostrar la importancia de la utilización de datos de misiones satelitales actuales, como GRACE.

Agradecimientos. Los autores desean expresar sus agradecimientos al Sr. Daniel Alonso Bouhid del Ministerio de Aguas, S.P. y M.A. de la Provincia de Santa Fe por la información brindada sobre la Laguna La Picasa. Este trabajo fue parcialmente financiado por CONICET.

REFERENCIAS

- Bruinsma, S., Lemoine, J.M., Biancale, R., Valès N., (2010). CNES/GRGS 10-day gravity field models (release 2) and their evaluation. *Advances in Space Research*, 45 (4): 587-601. doi: 10.1016/j.asr.2009.10.012.
- Carballo, S., Rebella, C., Hartmann, T., (2000). Evolución de los procesos de anegamiento en el área de la laguna "La Picasa" para el periodo 1970-2000. Instituto de Clima y Agua - INTA, Enero 2000.
- Chambers, D.P., (2006). Evaluation of new GRACE time-variable gravity data over the ocean. *Geophysical Research Letters*, 33, L17603. doi:10.1029/2006GL027296.
- Chen, J.L., Wilson C.R., Famiglietti J.S., Rodell M., (2005). Spatial sensitivity of GRACE time-variable gravity observations. *Journal of Geophysical Research*, 110, B08408. doi:10.1029/2004JB003536.
- Costa, S.M.A., Matos, A.C.O.C., Blitzkow, D., (2011). Validation of the land water storage from gravity recovery and climate experiment (GRACE) with gauge data in the amazon basin. *Boletim de Ciências Geodésicas*, 18 (2): 262-281. doi:10.1590/S1982-21702012000200006.
- Latrubesse, E., y Brea, D., (2009). Floods in Argentina. *Developments in Earth Surface Processes*, 13 (1900): 333-349. doi:10.1016/S0928-2025(08)10016-5.
- Matos, A.C.O.C., Blitzkow, D., Almeida, F.G.V., Costa, S.M.A., Campos, I.O., Barbosa, A.C., (2012). Analysis of water level variations in Brazilian basins using GRACE. *Journal of Geodetic Science*, 2: 76 - 87. doi: 10.2478/v10156-011-0034-7.
- Morishita, Y., y Heki, K., (2008). Characteristic precipitation patterns of El Niño/La Niña in time-variable gravity fields by GRACE. *Earth and Planetary Science Letters*, 272 (3-4): 677-682. Elsevier B.V. doi:10.1016/j.epsl.2008.06.003.
- Pacino, M.C., Pereira, A., Cotlier, C., (2011). Utilización de datos gravimétricos GRACE e imágenes NOAA en un análisis multitemporal de la masa hídrica de la cuenca del río Paraná (Argentina). *Revista Geoacta de la Asociación Argentina de Geofísicos y Geodestas*, 36: 211-228. ISSN 1852-7744.
- Pereira, A., Miranda, S., Pacino, M.C., Forsberg, R., (2012a). Water storage changes from GRACE data in the La Plata Basin. *IAG Series: Geodesy for Planet Earth*, 136 (3): 613-618. ISBN 978-3-642-20338-1, doi: 10.1007/978-3-642-20338-1_75, ISSN 0939-9585, Springer-Verlag Berlin Heidelberg Ed.
- Pereira, A., Pacino, M.C., (2012b). Annual and seasonal water storage changes detected from GRACE data in the La Plata Basin. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 212-213: 88-99. ISSN 0031-9201, Ed. Elsevier.
- Ramillien, G., Frappart F., Cazenave A, Güntner A., (2007). Time variations of land water storage from an inversion of 2 years of GRACE geoids. *Earth and Planetary Science Letters*, 235, 283-301.
- Rosenstein, S., Montico, S., Bonel, B., Rosenstein, C., (2009). El caso de las inundaciones en la laguna La Picasa: ¿Una oportunidad para la construcción de una representación colectiva del "desastre ambiental"? *Revista de investigaciones de la Facultad de Ciencias Agrarias*. N°VX. <http://www.fcagr.unr.edu.ar/Investigacion/revista/rev15/1.htm>
- Servicio Meteorológico Nacional (SMN), 2012. Servicios climáticos. Disponible en <<http://www.smn.gov.ar/serviciosclimaticos/?mod=hidro&id=5>> (último acceso Noviembre 2012).
- Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación (SRHN) e Instituto Nacional del Agua (INA) (2002). Atlas digital de los Recursos Hídricos Superficiales de la República Argentina [Digital Atlas of the Hydrologic Surface Resources of Argentina]. SRHN and INA, Buenos Aires, Argentina, disponible en CD-Rom.
- Tapley, B.D., Bettadpur, S., Ries, J.C., Thompson, P.F., Watkins, M.M., (2004). GRACE measurements of mass variability in the Earth system. *Science (New York, N.Y.)*, 305 (5683): 503-5. doi:10.1126/science.1099192.
- Tapley B., Bettadpur S., Watkins M., Reigber C., (2004b). The gravity recovery and climate experiment: mission overview and early results. *Geophysical Research Letters*, 31: L09607. doi:10.1029/2004GL019920.
- Wahr, J., Swenson S., Zlotnicki V., Velicogna I., (2004). Time-variable gravity from GRACE: First results. *Geophysical Research Letter*, 31: L11501. doi:10.1029/2004GL019779.
- Wessel, P. y Smith W.H.F., (1991). Free software helps map and display data, *EOS Trans. AGU*, 72, 441p.
- Wessel, P. y Smith W.H.F., (1998). New, improved version of the Generic Mapping Tools released, *EOS Trans. AGU*, 79, 579p.
- Xavier, L., Becker, M., Cazenave, A., Longuevergne, L., Llovel, W., Filho, O.C.R., (2010). Interannual variability in water storage over 2003–2008 in the Amazon Basin from GRACE space gravimetry, in situ river level and precipitation data. *Remote Sensing of Environment*, 114 (8): 1629-1637. Elsevier Inc. doi:10.1016/j.rse.2010.02.005

Recibido: 15-6-2013
Aceptado: 3-1-2014