

VARIACIONES MULTITEMPORALES DEL ALMACENAMIENTO DE AGUA CONTINENTAL EN LA CUENCA DEL PLATA A PARTIR DE GRAVIMETRÍA SATELITAL

Ayelen Pereira¹, Cecilia Cornero¹, Ana. C. O. C. Matos², Denizar Blitzkow², María C. Pacino¹

¹ Área de Geodinámica y Geofísica, Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario y CONICET. Av. Pellegrini 250, 3° - (S2000BTP), Rosario, Argentina. {[apereira](mailto:apereira@fceia.unr.edu.ar), [ccornero](mailto:ccornero@fceia.unr.edu.ar), [mpacino](mailto:mpacino@fceia.unr.edu.ar)}@fceia.unr.edu.ar

² Laboratório de Topografia e Geodesia, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo (USP), Av. Prof. Almeida Prado, Travessa 2, n:83, sala1 São Paulo, São Paulo, Brasil. (accmatos@alumni.usp.br, dblitzko@usp.br)

RESUMEN

Las regiones fluviales desarrollan funciones indispensables para el medio ambiente, y resulta necesario realizar un estudio de éstas para contribuir a su mejor uso y manejo.

La misión gravimétrica satelital GRACE (*Gravity Recovery And Climate Experiment*) provee las variaciones temporales del campo gravitatorio terrestre, las que son debidas principalmente a procesos de transporte de masas, como los cambios en el almacenamiento de agua continental.

El objetivo de este trabajo es analizar el almacenamiento total de agua (TWS) para el período 2002-2016 obtenido a partir de los datos GRACE en la cuenca del Plata, identificando patrones de variación temporal del agua continental a escalas regionales. Se realizó además la comparación entre las series de TWS con datos de precipitación de la misión satelital TRMM.

Se detectaron dos eventos de gran magnitud, ambos vinculados con episodios de La Niña y El Niño: la sequía del 2009, e inundación del 2016 respectivamente.

Palabras clave: agua continental, gravimetría satelital, cuenca del Plata, GRACE, sequía, inundación.

ABSTRACT

River regions perform essential functions in environments, and it is necessary to study them to contribute to their better use and management.

The satellite gravity mission GRACE (Gravity Recovery And Climate Experiment) provides time-variable variations of the Earth's gravity field, which are mainly due to mass transport processes, like terrestrial water storage changes.

The aim of this work is to analyze the Total Water Storage (TWS) in the 2002-2016 period obtained from GRACE data for the La Plata basin, to identify patterns of terrestrial water temporal variations at regional scales. The comparison between TWS series with precipitation data from the TRMM satellite mission was also carried out.

Two large-scale events, both linked with La Niña and El Niño episodes, were detected: the drought of 2009, and the 2016' flood respectively.

Key words: *terrestrial water, satellite gravimetry, La Plata basin, GRACE, drought, flood.*

1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, el 90% de los desastres naturales ocurridos en el mundo estuvieron relacionados con el agua.

El cambio climático es una preocupación a nivel global y Sudamérica no está exento a ello. Las variaciones en la circulación de aguas superficiales y subterráneas pueden afectar en gran medida a regiones ecológicamente sensibles. Por otro lado, las llanuras son un escenario de suma fragilidad ante eventos hidrológicos extremos, de déficit o excedentes hídricos.

La Cuenca del Plata es una de las más importantes del mundo en cuanto a su extensión geográfica y el caudal de sus ríos. Con una superficie de 3,1 millones de km² ocupa la quinta parte de Sudamérica, abarcando los territorios de Argentina, Bolivia, Brasil, Paraguay y Uruguay. Los principales ríos que conforman este sistema hidrográfico son el Paraná, Uruguay y Paraguay, entre otros.

Por otro lado, es necesario mencionar que la gravedad no permanece constante, sino que varía con el tiempo dependiendo principalmente de la redistribución de las masas. Estos cambios pueden asociarse con las variaciones temporales en el almacenamiento del agua continental [1], [2], [3], [4], [5], [6].

Las observaciones espaciales tienen el potencial de mejorar significativamente nuestra comprensión de los procesos hidrológicos en cuencas hidrográficas y su influencia en la variabilidad climática, geodinámica y socio-económica. Se puede obtener información sin precedentes a través de la combinación de observaciones superficiales con observaciones desde el espacio, las cuales ofrecen una cobertura geográfica global, un buen muestreo espacio-temporal y un monitoreo continuo en el tiempo.

En particular, la misión gravimétrica satelital GRACE (*Gravity Recovery And Climate Experiment*) observa el ciclo hidrológico y permite monitorear cambios en el almacenamiento de agua continental. Asimismo, mediante esta misión es posible analizar desde 2002 al 2017 los procesos hidrológicos en grandes cuencas hidrográficas y su influencia en la variabilidad climática, geodinámica y socio-económica, complementando las observaciones *in situ* y el modelado hidrológico. Entre los estudios previos realizados en la Cuenca del Plata mediante el satélite

GRACE pueden mencionarse los de [3], [7], [8] y [9].

Esta propuesta plantea el análisis multitemporal de las variaciones de la masa de agua continental -TWS- (*Total Water Storage*) en la cuenca del Plata (Fig.1), para el período 2002-2016, a partir de datos gravimétricos satelitales provenientes de la misión GRACE.

Los mapas de variación del TWS con valores extremos son comparados con datos de precipitaciones de la misión satelital TRMM.

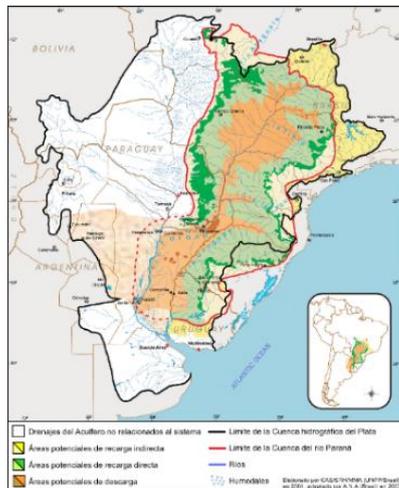


Fig. 1. Límites de la Cuenca del Plata (CIC)

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Las variaciones mensuales de gravedad observadas son causadas por cambios mensuales de masas. Las variaciones de masas pueden pensarse como concentradas en una capa muy delgada de agua en la superficie, cuyo espesor cambia. En realidad, la mayoría de los cambios mensuales de la gravedad son causados en efecto por cambios en el almacenamiento de agua en reservorios hidrológicos, por el movimiento de masa en los océanos, la atmósfera y la criósfera; y por intercambios entre éstos.

Las variaciones de almacenamiento de agua continental (TWS) utilizadas en este trabajo se estimaron a partir de las soluciones de alta resolución de la misión GRACE (*Mascons*). El enfoque de obtención de estas soluciones se basa en la estimación de anomalías de masas de agua en grillas o en concentraciones de masas específicas. En este estudio, se utilizaron los datos GRACE CSR RL05 [10], los que proveen variaciones mensuales del TWS con una resolución espacial de 1°.

Los datos de precipitación utilizados para validar los resultados de TWS de GRACE se obtuvieron a partir de la misión satelital TRMM (*Tropical Rainfall Measuring Mission*). En particular, se trabajó con el producto TRMM-3B43-v7, el cual consiste en una combinación de observaciones satelitales mensuales de lluvia con una resolución espacial de 0.25° [11].

Los mapas fueron elaborados con el software GMT (*Generic Mapping Tools*) de código abierto, que permite elaborar cartografía temática mediante “scripts” de manera de realizar los procesos cartográficos en una sola aplicación [12].

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Análisis del evento Inundación

Del análisis estadístico de los datos TWS y de los mapas de variación del almacenamiento de agua, surge que el período 12/2015 a 08/2016 fue el que presentó las variaciones máximas positivas. Es así que, en el mes de febrero de 2016 se alcanzó el mayor valor de almacenamiento de agua en la cuenca, resultando aproximadamente de 750 mm.

El año 2015 ha sido, en promedio, el de mayor precipitación en toda la cuenca según los datos TRMM. Esto se ve reflejado unos meses más tarde en el almacenamiento de agua total en la cuenca.

El aumento del TWS se extendió hasta mediados de 2017, con un valor significativo en junio de 2017 (658 mm), mes en que finaliza la misión GRACE.

La Figura 2 muestra la variación del TWS para el fenómeno extremo de inundación ocurrido en 2016, y parte del 2017, donde se observa el aumento progresivo de dicho evento afectando casi la totalidad de la cuenca en el 2016, y su continuidad al año siguiente.

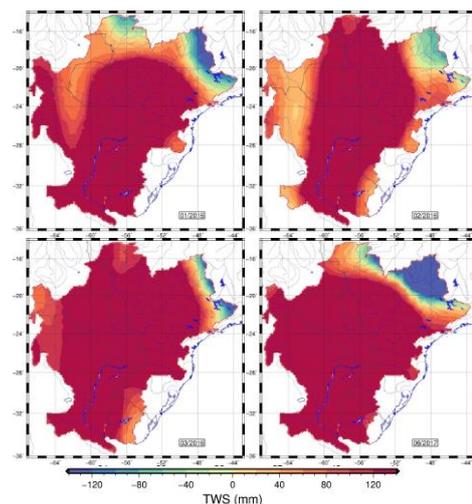


Fig. 2. Almacenamiento de agua total (TWS) en la cuenca del Plata para enero-febrero-marzo del año 2016, y junio de 2017.

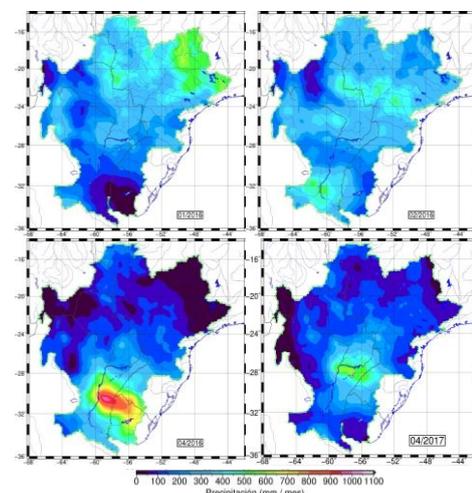


Fig. 3. Precipitación (TRMM) en la cuenca del Plata para enero-febrero-abril del año 2016, y abril de 2017.

Otro episodio de inundación tuvo lugar en abril de 2011 en la mitad de la cuenca hacia el norte, con valores del orden de los 420 mm.

En la Figura 3, se muestran los mapas de precipitación mensual obtenidos a partir de la misión TRMM para el año 2016 y parte del 2017, en los que se puede observar el aumento progresivo de la lluvia en concordancia con el aumento del TWS detectado por GRACE. De acuerdo a los resultados, valores máximos superiores a 1,000 mm fueron hallados en el mes de abril de 2016, particularmente en la subcuenca media del río Paraná.

3.2. Análisis del evento Sequía

La sequía de 2009 afectó fundamentalmente a Argentina (centro-sur de la cuenca del Plata). Sin embargo, ésta no fue la mayor en términos de los valores de almacenamiento total de agua, pero sí en cuánto a su extensión geográfica. El valor mínimo de TWS fue aproximadamente de -220 mm y ocurrió en mayo del 2009.

El año 2008 resultó ser, en promedio, el año de menor precipitación en la cuenca según los datos de precipitación TRMM. Esto se ve reflejado meses más tarde en 2009 en los mapas de TWS, con valores de almacenamiento de agua negativos (Figura 4).

De acuerdo a los resultados, la sequía más intensa del período ocurrió en la zona noreste de la cuenca del Plata en el año 2014, con valores mínimos de TWS de aproximadamente 550 mm/mes en noviembre del 2014. Esta situación se reiteró con menor intensidad en agosto-septiembre del 2015.

3.3. Análisis para el período 2002-2017

En la Figura 6 se muestran las series temporales de TWS y precipitación acumulada en la cuenca del Plata para el período 2002-2017, en la que se aprecia el comportamiento similar en el ciclo anual de ambas señales, pero con un desfase de 2 meses aproximadamente.

En cuanto al aumento del TWS en el período 2016, éste se relaciona con un evento intenso de El Niño (Figura 7), ubicado entre los 4 más fuertes de los últimos 50 años (Servicio Meteorológico Nacional Argentina, SMN). En dicho período, precipitaciones intensas tuvieron lugar en Argentina, Paraguay, sur de Brasil y Uruguay, y se registraron importantes valores de lluvia acumulada, que provocaron desbordes de ríos, anegamientos, inundaciones y gran número de evacuados.

Por otro lado, el déficit de lluvias en Argentina comenzó en el año 2008 y tuvo su pico máximo en otoño de 2009, y en algunas localidades los totales anuales de precipitaciones fueron los más bajos de los últimos 47 años, con déficits mayores al 60% de la subcuenca media del río Paraná (SMN).

La escasez de precipitaciones en el mencionado período, estuvo asociado a la presencia de La Niña (Figura 7), y la parte baja de la cuenca del Plata resultó ser la zona principalmente afectada.

Por último, la relación mensual entre la precipitación y el TWS para todo el período se presenta en

la Figura 8, donde se puede observar que las mayores lluvias, con el consecuente aumento del almacenamiento de agua, ocurren durante los meses de verano (tonos azules); posteriormente ambas variables disminuyen hacia el invierno, manteniéndose luego el TWS casi constante durante la primavera a pesar del aumento de la precipitación en dicho período.

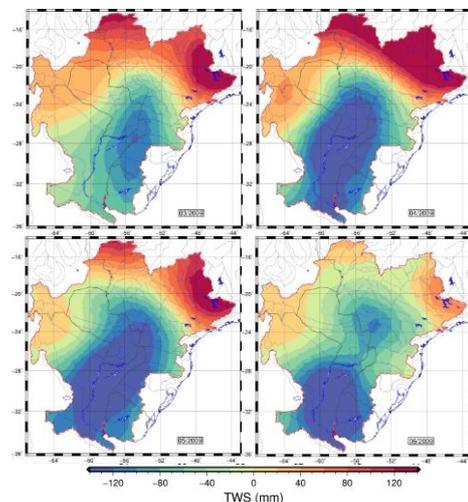


Fig. 4. Almacenamiento de agua total (TWS) en la cuenca del Plata para los meses marzo-abril-mayo-junio del año 2009.

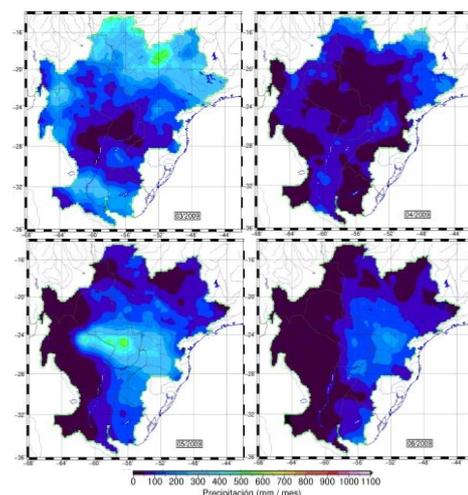


Fig. 5. Precipitación (TRMM) en la cuenca del Plata para los meses marzo-abril-mayo-junio del año 2009.

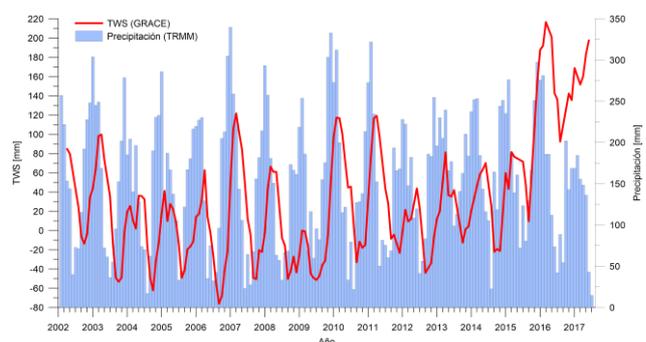


Fig. 6. TWS versus Precipitación acumulada en la cuenca del Plata para el período 2002-2017.

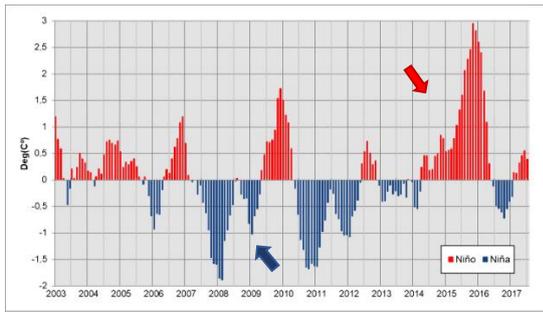


Fig. 7. Anomalia de la temperatura de la superficie de mar (SST 3.4).

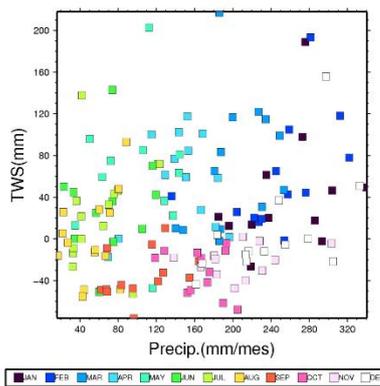


Fig. 8. Comportamiento mensual de la precipitación en relación al TWS.

4. CONCLUSIONES

La implementación de tecnologías modernas, como datos provenientes de sensores remotos permitieron obtener información de gran relevancia para el monitoreo del agua continental en grandes cuencas, como ser en particular la cuenca del Plata.

De acuerdo a los resultados, se puede concluir que GRACE detectó las significativas variaciones del almacenamiento de agua en el período bajo estudio para la cuenca del Plata.

Las estimaciones de TWS provenientes de la misión GRACE resultaron consistentes con los datos satelitales de precipitación TRMM. En el período analizado, GRACE detectó las inundaciones ocurridas en el 2016 y también la intensa sequía, que tuvo su pico máximo en otoño de 2009. Estos acontecimientos extremos, parecen estar conectados con eventos como El Niño y La Niña (Figura 7).

5. REFERENCIAS

[1] Andersen, O., Berry P., Freeman J., Lemoine F.G., Lutsckhe S., Jakobsen F., Butts M. (2008). "Satellite altimetry and GRACE gravimetry for studies of the annual water storage variations". In *Bangladesh. Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, 19 (1-2): 47-52.
[2] Chen, J.L., Wilson C.R., Tapley B.D., Blankenship D.D., Ivins E.R. (2007). "Patagonia Icefield melting

observed by GRACE". *Geophys. Res. Lett.*, 34, L22501, doi: 10.1029/2007GL031871.

[3] Chen, J.L., Wilson C.R., Tapley B.D., Longuevergne L., Yang Z.L., Scanlon B.R. (2010). "Recent La Plata basin drought conditions observed by satellite gravimetry". *J. Geophys. Res.*, 115, D22108, doi:10.1029/2010JD014689.

[4] Klees, R., Liu X., Wittwer T., Gunter B. C., Revtova E. A., Tenzer R., Ditmar P., Winsemius H. C., Savenije H. H. G. (2008). "A Comparison of Global and Regional GRACE Models for Land Hydrology". *Survey Geophysics* 29: 335-359, doi: 10.1007/s10712-008-9049- 8.

[5] 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* (2007) 15: 159- 166.

[6] Wahr, J., S. Swenson, V. Zlotnicki, and Velicogna I. (2004). "Time- variable gravity from GRACE: First results". *Geophys. Res. Lett.*, 31, L11501, doi:10.1029/2004GL019779.

[7] Pereira, A., Pacino M.C. (2012). Annual and seasonal water storage changes detected from GRACE data in the La Plata Basin. *Phys. Earth Planet. Inter.* 212–213, 88–99.

[8] Frappart, F., Seoane L., Ramillien G. (2013). "Validation of GRACE-derived terrestrial water storage from a regional approach over South America". *Remote Sensing of Environment* 137: 69–83.

[9] Abelen, S., Seitz F., Abarca del Rio R., Güntner A. (2015). Droughts and Floods in the La Plata Basin in Soil Moisture Data and GRACE. *Remote Sens.* 2015, 7, 7324-7349.

[10] Save H., Bettadpur S., and Tapley B. D., (2016). High resolution CSR GRACE RL05 mascons, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 121, 7547–7569, doi: 10.1002/2016JB013007.

[11] Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) (2011), TRMM (TMPA/3B43) Rainfall Estimate L3 1 month 0.25 degree x 0.25 degree V7, Greenbelt, MD, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC), 10.5067/TRMM/TMPA/MONTH/7.

[12] Wessel, P., W. H. F. Smith, R. Scharroo, J. F. Luis, and F. Wobbe (2013), Generic Mapping Tools: Improved version released, *EOS Trans. AGU*, 94, 409-410, 2013.