

Monitoreo de la variación del almacenamiento de agua en la cuenca del Medio y Bajo Paraná a partir de datos GRACE, GRACE FO, TRMM y GLDAS

Cecilia Cornero*¹, Ayelen Pereira^{1,2}, Ana C.O.C. Matos³, M. Cristina Pacino^{1,2}, Denizar Blitzkow^{3,4}

¹ Área de Geodinámica y Geofísica (AGG), Fac. de Cs. Exactas, Ing. y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario, Av. Pellegrini 250, 3º piso- 2000 Rosario, Argentina.

² CONICET (Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas), Argentina.

³ Centro de Estudos de Geodesia (CENEGEO), São Paulo /SP, Brazil.

⁴ Laboratório de Topografia e Geodesia, Escola Politécnica, Universida de São Paulo (USP) and Centro de Estudos de Geodesia (CENEGEO), São Paulo /SP, Brazil.

Resumen: GRACE (*Gravity Recovery and Climate Experiment*) es una misión satelital que permite monitorear el transporte de masa en el sistema terrestre, el cual está íntimamente relacionado con las consecuencias del cambio climático. Este satélite gravimétrico permite obtener las variaciones mensuales del campo de gravedad terrestre, las cuales pueden asociarse a variaciones de masa hídrica luego de remover los efectos de mareas oceánicas y de la Tierra sólida, así como las contribuciones atmosféricas y oceánicas no relacionadas a mareas. En este trabajo, se utilizaron los datos de la misión GRACE (2002-2017), y su sucesora GRACE FO (desde 2018) para analizar los cambios de masa hídrica en la cuenca del Medio y Bajo Paraná. La interpretación de los resultados se llevó a cabo a partir de la vinculación de las anomalías de masa derivadas a partir de datos GRACE, con información de precipitación de la misión TRMM. Para ello, se elaboraron los mapas mensuales de las variaciones de masa hídrica de GRACE y de las precipitaciones, lo que permitió un análisis exhaustivo a nivel regional de la redistribución de masas en la cuenca y su relación con los eventos de El Niño y La Niña que tuvieron lugar en el periodo en estudio. Es así, que los déficits hídricos mostrados en los mapas de GRACE en el año 2009 se relacionan al episodio de gran intensidad de La Niña que tuvo lugar en el periodo 2008-2009, en tanto que, los excesos hídricos que evidencian los mapas en los años 2016 y 2019, están vinculados al fenómeno de El Niño. Asimismo, GRACE también ha detectado eventos sectorizados de sequías en 2011-2012, e inundaciones en los años 2007 y 2010. Los cambios de almacenamiento de agua derivados de GRACE fueron comparados con las componentes independientes del balance hídrico en la región utilizando estimaciones de diferentes modelos hidrológicos. Por último, se analizaron las variaciones temporales del agua subterránea y de la parte de suelo (agua superficial, humedad de suelo), mediante el modelo de asimilación de datos terrestres GLDAS. Las variables presentaron una buena correlación entre sí, alcanzando valores de $\sim r=0,80$.

Palabras clave: cuenca del Medio y Bajo Paraná, GRACE, almacenamiento de agua, TRMM, El Niño y La Niña.

To cite this article: Cornero, C., Pereira, A., Matos, A.C.O.C., Pacino, M.C., Blitzkow, D. 2021. Monitoring water storage changes in Middle and Low Paraná river basin using GRACE, GRACE FO, TRMM and GLDAS data. *Revista de Teledetección*, 58, 53-70. <https://doi.org/10.4995/raet.2021.15211>

* Corresponding author: ccornero@fceia.unr.edu.ar

Monitoring water storage changes in Middle and Low Paraná river basin using GRACE, GRACE FO, TRMM and GLDAS data

Abstract: GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) is a satellite mission that can monitor mass distributions in the Earth system, which is closely related to the consequences of climate change. This gravimetric satellite allows to obtain monthly variations of the Earth's gravity field, which can be associated with water mass variations, after removing the effects of oceanic tides and solid Earth, as well as non-tidal oceanic and atmospheric contributions. In this work, data from GRACE (2002-2017) and GRACE FO (since 2018) were used to analyze the variation of the water mass in the Middle and Low Paraná river basin. The interpretation of the results was carried out by associating the mass anomalies derived from GRACE data with information from the TRMM global rainfall mission. Monthly maps of GRACE water mass variations and TRMM precipitation were produced, which made possible a thorough analysis at a regional level of this mass redistribution in the basin, and its connection to the El Niño and La Niña events that took place in the period under study. The water deficits shown in the 2009 GRACE maps are, in fact, related to the intense episode of La Niña that occurred in the period 2008-2009; while the excess of water storage depicted on the 2016 and 2019 maps is connected to the El Niño phenomenon. Moreover, GRACE has also detected drought events in different sectors between 2011-2012, together with floods in the years 2007 and 2010. Monthly GRACE-derived water storage changes were compared with the independent components of the water balance in the region using different hydrological models estimates. Finally, the temporal variations of the groundwater and the soil part (surface water, soil moisture) were analyzed using the Global Land Data Assimilation System GLDAS. The variables showed a good correlation between them, reaching values of $\sim r=0.80$.

Key words: Middle and Low Paraná sub-basin, GRACE, water storage, TRMM, El Niño, La Niña.

1. Introducción

En la actualidad se percibe una gran preocupación por el uso y manejo de los recursos hídricos debido a la mayor ocurrencia de eventos extremos de inundaciones y sequías en las últimas décadas, y a las consecuencias catastróficas que estos generan en el orden económico, social y ambiental (Seneviratne et al., 2012).

Argentina ha soportado periódicamente fenómenos extremos de inundaciones y sequías en distintas regiones del país, los que se han intensificado y ocurrido con mayor frecuencia en los últimos tiempos. Las llanuras son un escenario de suma fragilidad ante eventos hidrológicos extremos, de déficit o excedentes hídricos.

El desarrollo de eventos de El Niño y La Niña, fenómenos relacionados con la temperatura superficial del Océano Pacífico Tropical, tiene efectos marcados en el clima de gran parte de la cuenca del Plata, especialmente en la escala de tiempo inter-anual, afectando la variabilidad de la lluvia (CIC, 2017).

El monitoreo de la variación hídrica en la planicie de inundación del Paraná Medio y otros humedales

localizados en la región, es de importancia crítica ya que proveen funciones hidrológicas y ecológicas irremplazables, como la mitigación de sequías e inundaciones, recarga de acuíferos y provisión de agua dulce de alta calidad (Kandus et al., 2006). Dado que estos ecosistemas se extienden a lo largo del corredor fluvial y presentan una alta dinámica con variaciones estacionales e interanuales, se requieren para su estudio sensores remotos de distintas características.

El agua subterránea representa un recurso fundamental para el desarrollo socioeconómico y el funcionamiento de los ecosistemas asociados, lo cual exige un gran desafío en cuanto a la investigación científica sobre la complejidad intrínseca de los sistemas de acuíferos; la integración de la información; los métodos para la evaluación de la calidad y cantidad de la reserva; los impactos del cambio climático y su interrelación con los otros componentes del ciclo hidrológico.

Las observaciones espaciales tienen el potencial de mejorar significativamente la 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.

La misión gravimétrica satelital GRACE (*Gravity Recovery And Climate Experiment*) es capaz de monitorear cambios en el espesor equivalente de agua continental con una elevada precisión, es así que, a partir de ella, es posible mapear cambios en el almacenamiento de agua con un resolución espacial de cuadrículas de 300-400 km (~150.000 km²) (Landerer and Swenson, 2012).

Esta columna vertical de agua se denomina TWS (*Total Water Storage*). Es también conocida como almacenamiento total de agua. GRACE observa el cambio de gravedad temporal de todas las fuentes de transporte de masas, siendo el TWS una sumatoria entre el agua superficial, la humedad del suelo y el agua subterránea. El TWS representa un valioso indicador de los cambios que ocurren en las condiciones hidrológicas a escala global y a menores escalas, como cuencas y subcuencas (Frappart et al., 2013).

Existen numerosos trabajos en los que se evalúa la capacidad de GRACE para detectar las variaciones en el almacenamiento de agua en diversas cuencas hidrológicas y su validación mediante datos satelitales y mediciones *in situ*, (Ramillien et al., 2005; Andersen et al., 2008; Vaz de Almeida et al., 2009, 2012; Chen et al., 2010; Xavier et al., 2010; Matos et al., 2012; Singh et al. 2012; Cornero et al., 2017; Pereira et al. 2019; Frappart et al., 2014, 2019; Carabajal y Boy, 2020).

Paralelamente, se han empleado técnicas para asimilar los datos de GRACE en los modelos hidrológicos a escalas globales con el objetivo de generar series de tiempo de almacenamiento de agua subterránea, lo cual resulta de gran aplicación para el monitoreo de sequías y otras aplicaciones (Li et al., 2019).

GLDAS (*Global Land Data Assimilation System*) es un modelo basado en el re-análisis de observaciones satelitales y terrestres, utilizando para ello técnicas de asimilación de datos y modelos hidrológicos (Rodell et al., 2004). En particular, el producto GLDAS-2.2 incorpora datos de GRACE y está disponible desde febrero del 2003 al presente con una resolución diaria.

En este trabajo se analizaron las variaciones del almacenamiento de agua basadas en observaciones provistas por los satélites GRACE y GRACE FO (*Follow On*) a escala mensual, comparándolas luego con datos globales de precipitación de la misión satelital TRMM (*Tropical Rainfall Measuring Mission*).

Se hizo hincapié en las variaciones interanuales máximas y mínimas del TWS y sus respectivas relaciones con eventos de inundaciones y sequías que tuvieron lugar en la cuenca del Medio y Bajo Paraná durante el periodo 2003-2019.

Finalmente, se obtuvieron las series temporales promedio de almacenamiento total de agua, almacenamiento de agua subterránea y humedad de suelo, del sistema GLDAS (denominadas por sus siglas en inglés TWS, GWS, y SM, respectivamente) y se analizó la matriz de correlación entre dichas variables.

2. Área de estudio

La cuenca del Medio y Bajo Paraná (MyBP), perteneciente al sistema hidrográfico de la cuenca del Plata (Figura 1), comprende el área territorial más dinámica de la República Argentina en términos de economía. Además, es una región de suma importancia hidrológica y sensible a eventos extremos de inundaciones y sequías, dentro de la cual se ubican ambientes muy vulnerables como son, por ejemplo: los sitios RAMSAR Jaaukanigás, Lagunas y Esteros del Iberá, Humadales Chaco, como así también los Bajos Submeridionales, la laguna Melincué y el valle del río Paraná; y comprende parte de los acuíferos transfronterizos Guaraní y Yendra, Toba y Tarijeño.

En las márgenes del Paraná se localizan importantes ciudades, periódicamente afectadas por las crecidas del río, lo que ha dado lugar a la implantación de sistemas de alerta, particularmente en la Argentina (CIC, 2017).

La parte tropical y subtropical de América del Sur está caracterizada por el Monzón Sudamericano, el cual tiene una marcada influencia en el régimen hidroclimático de la cuenca del Plata, siendo una de sus principales características el ciclo anual de precipitación bien definido en la mayor parte de la cuenca, con máximos en verano y mínimos en invierno. La precipitación total anual



Figura 1. Ubicación de la cuenca Medio y Bajo Paraná.

es muy variable en la cuenca. Entre el otoño y la primavera, es frecuente la incursión de ciclones extratropicales, los cuales son responsables de gran parte de la precipitación (CIC, 2016).

El régimen de inundación del río Paraná es más irregular que el de los grandes ríos de América del Sur, como el Amazonas o el Orinoco (Carignan y Neiff, 1992). El gran humedal del Pantanal juega un papel clave en el almacenamiento de las escorrentías causadas por las lluvias en el Alto Paraguay, retrasando en casi seis meses sus aportes mayores al Paraná.

El río Paraná, antes de la confluencia con el Paraguay, tiene su pico de crecida en verano-otoño y un decrecimiento de los caudales en invierno y parte de la primavera, distribución que se mantiene luego de la confluencia, pero de forma menos marcada. En el río Paraguay, el régimen es más uniforme en cuanto a la distribución de los caudales en el año, con un máximo relativo a principios del invierno, lo que muestra la influencia del Pantanal como regulador y retardador de las crecidas (CIC, 2016).

De acuerdo a una investigación realizada por Gulizia et al. (2018) basada en el análisis de los ciclos anuales de caudales medios para el período

1931-2010, para la subcuenca del Paraná inferior, existe un retardo en la respuesta a la precipitación de unos pocos meses. Es así que en el mes de enero, la precipitación es máxima, y para los meses julio/agosto es mínima; el máximo caudal ocurre entre febrero y marzo, mientras que el mínimo entre agosto y septiembre.

3. Metodología

La misión satelital GRACE ha suministrado datos del campo gravitacional terrestre desde el año 2002 hasta el 2017, y GRACE-FO, ofrece tales resultados desde el año 2018.

GRACE FO, mantiene el mismo concepto que la misión original GRACE y mejora el diseño de los instrumentos con el objetivo de minimizar costos y riesgos, y aumentar el rendimiento. La evaluación de los cambios de masa global hasta diciembre de 2019, ha demostrado una precisión y una resolución espacio-temporal equivalente a su antecesor GRACE (Landerer et al., 2020).

Los efectos de mareas, incluyendo los de los océanos, la Tierra sólida y las mareas polares de Tierra sólida (deformación rotacional), han sido removidos en el procesamiento de datos GRACE/

GRACE-FO Nivel 2, al igual que las contribuciones atmosféricas y oceánicas no relacionadas a mareas (*non-tidal*). Esto significa que los datos GRACE/GRACE-FO Nivel 2 representan cambios causados por variaciones de masas no-atmosféricas y no-oceánicas, principalmente cambios en los reservorios de agua continental, así como efectos oceánicos y atmosféricos no modelados (Bettadpur, 2018).

Las anomalías del almacenamiento total de agua (TWS) pueden ser derivadas de los productos GRACE, y son provistas por diferentes Centros de procesamiento: CSR (*Center for Space Research*), GFZ (*GeoForschungs Zentrum*) y JPL (*Jet Propulsion Laboratory*) (Wang et al., 2020).

En este trabajo se utilizaron las mallas mensuales de TWS JPL RL06-V02 Mascons derivadas a partir de las soluciones GRACE y GRACE FO (Watkins et al., 2015; NASA/JPL, 2019), provistas por el JPL de la NASA. El enfoque de obtención de estas soluciones se basa en la estimación de anomalías de masas de agua mediante la técnica de concentraciones de masas específicas (Mascons). En su procesamiento, éstas presentan ajustes adicionales, como ser estimaciones de coeficientes de grado 1 a partir de métodos desarrollados por Sun et al. (2016), Swenson et al. (2008); el reemplazo del coeficiente C20 con soluciones derivadas de SLR *-Satellite Laser Ranging-* (Cheng et al., 2011); un ajuste glacial isostático aplicado a partir de un modelo (Peltier et al., 2018); y un filtro CRI (*Coastal Resolution Improvement*) que reduce los errores de borde de la señal en las zonas costeras.

Estas mallas, de $0,5^{\circ} \times 0,5^{\circ}$, se evaluaron en el área de estudio durante el período enero de 2003

a junio de 2017 de la misión GRACE, y desde junio 2018 a diciembre 2019 de la misión GRACE FO. Los datos de precipitación (P) utilizados para validar los resultados del TWS se obtuvieron a partir de la misión satelital TRMM. En particular, se trabajó con el producto TRMM3B43-v7, el cual consiste en una combinación de observaciones satelitales mensuales de lluvia con una resolución espacial de $0,25^{\circ}$. Además, se utilizaron datos de evapotranspiración (ET) del modelo GLDAS-NOAH y datos de escorrentía superficial (R) del modelo ERA5. En la Tabla 1 se describen los productos utilizados, así como también las referencias.

Luego, se elaboraron los mapas mensuales de anomalías de masa hídrica y de precipitación mediante el software GMT (*Generic Mapping Tools*) de código abierto, que permite elaborar cartografía temática mediante scripts (Wessel et al., 2013).

En una región determinada, los cambios de TWS (ΔTWS) en un periodo de tiempo (Δt) reflejan el balance de precipitación (P), evapotranspiración (ET) y escorrentía superficial (R) como:

$$\frac{\Delta TWS}{\Delta t} = P - ET - R \quad (1)$$

En este trabajo, se analizaron los ciclos estacionales de P, ET, R y ΔTWS mediante las series temporales durante 17 años de análisis promediadas para la cuenca del Medio y Bajo Paraná.

Respecto del producto GLDAS_CLSM025_DA1_D Versión 2.2 (Li et al., 2020), éste asimila los datos de TWS-Mascons derivados de GRACE con el objetivo de monitorear el almacenamiento

Tabla 1. Descripción de los productos utilizados (variables, nombre del modelo, unidades, DOI y referencia).

Variable	Nombre del modelo	Unidad	Conversión	DOI del modelo	Referencia
TWS	TELLUS_GRAC-GRFO_MASCON_CRI_GRID_RL06_V2	cm	mm/mes	10.5067/TEMSC-3JC62	Watkins et al., 2015; Wiese et al., 2019
P	TRMM_3B43	mm/hr	mm/mes	10.5067/TRMM/TMPA/MONTH/7	Huffman et al., 2010; TRMM, 2011
ET	GLDAS_NOAH025_M	kg m ² s ⁻¹	mm/mes	10.5067/SXAVCZFAQLNO	Rodell et al., 2004; Beaudoin y Rodell, 2020
R	ERA5 monthly averaged data on single levels from 1979 to present	kg m ² s ⁻¹	mm/mes	10.24381/cds.fl17050d7	Muñoz-Sabater et al., 2021; Hersbach et al., 2019

de agua subterránea, sequías y otras aplicaciones. Dichos datos están disponibles a partir de febrero del 2003, en forma diaria y en mallas de 0,25°.

A pesar de que el producto GRACE-TWS (ΔTWS) puede ser directamente utilizado para la detección de sequías (e inundaciones), la asimilación de datos permite la desagregación de las componentes verticales y una mejora en la escala temporal y espacial de las componentes individuales (Li et al., 2019). Por lo tanto, el cambio mensual de ΔTWS obtenido de los datos de GRACE incluye dos partes (Frappart y Ramillien, 2018); la parte sobre el suelo (agua superficial, humedad de suelo y agua de la nieve) y la parte subterránea (agua subterránea), como se muestra en la Ecuación (2) (Wang et al., 2020):

$$\Delta TWS = \Delta GWS + \Delta SM + \Delta SWE + \Delta SW \quad (2)$$

donde, ΔTWS =cambio en el almacenamiento de agua continental; ΔGWS =cambio en el almacenamiento de agua subterránea, ΔSM =cambio en la humedad de suelo; ΔSWE =cambio en el equivalente en agua de nieve, y ΔSW =cambio en el almacenamiento de agua superficial.

En este trabajo se analizaron las variables TWS, GWS y SM promedio para toda la cuenca, y se obtuvo el SW mediante la Ecuación 2. La variable SWE no fue considerada debido a que no presenta influencia en la zona de estudio.

4. Resultados y discusión

Se identificaron tres eventos extremos que se destacaron por la magnitud y extensión (la sequía del 2009, y las inundaciones del 2016 y 2019). Otros eventos importantes de inundaciones y sequías que han afectado parte de la cuenca también han sido detectados por GRACE como las inundaciones ocurridas en los años 2007 y 2010, y la sequía en el año 2011.

4.1. Sequías

Según el Servicio Meteorológico Nacional (SMN, 2009), el déficit de lluvias en Argentina comenzó en el año 2008; los valores más críticos ocurrieron en otoño de 2009, y en algunas localidades los totales anuales de precipitaciones fueron los más bajos de los últimos 47 años. Esta escasez de

precipitaciones estuvo asociada a la presencia de La Niña. En coincidencia con los datos de TRMM, el año 2008 resultó ser, en promedio, el año de menor precipitación en toda la cuenca.

La sequía de 2009 afectó fundamentalmente a Argentina, en especial a la zona de estudio del presente trabajo. Los meses de enero a agosto del 2009 denotan una disminución severa de la masa de agua en gran parte la cuenca (Figura 2), alcanzándose el valor mínimo de TWS en mayo del 2009, de aproximadamente -310 mm. En la Figura 3 puede verse la variación mensual de precipitación, llegando a registrarse 0 mm durante varios meses. En las estaciones de otoño e invierno del 2009 tanto GRACE como TRMM muestran déficits que abarcan casi la totalidad de la cuenca.

Además, en el año 2011 y hasta mediados del 2012, también se detectaron picos mínimos de TWS que afectaron solo al sector sur de la cuenca, por ello el valor promedio de la cuenca no ha sido representativo. El mes de enero de 2012 presentó el mínimo valor de TWS (-210 mm). Según el SMN (2011), el déficit más significativo del año 2011 tuvo lugar en diversas áreas del país, entre ellos, el Litoral argentino (región comprendida por costas y zonas cercanas a los ríos Paraná y Paraguay). En dicha región, las precipitaciones fueron inferiores a los valores normales durante la mayor parte del año, principalmente en los últimos 6 meses de ese año.

Los mapas del índice de sequía de Palmer – PDSI, por sus siglas en inglés– elaborados para Argentina por Ravelo et al. (2014) muestran estas situaciones extremas de déficit hídrico para el mes de abril de 2009 y enero de 2012, donde se destacan las extensas áreas con sequías severas, particularmente en 2009, y moderadas a severas en 2012 (Figura 4).

4.2. Inundaciones

El año 2015 fue un año de gran magnitud de El Niño (ubicado entre los 4 más fuertes de los últimos 50 años) y se han dado lluvias por encima de la normal en la región del Litoral, (SMN, 2015). En concordancia con este evento, los mapas de TWS muestran excesos hídricos de gran magnitud y extensión para los meses de diciembre de 2015 a mayo de 2016 (valores superiores a los 500 mm)

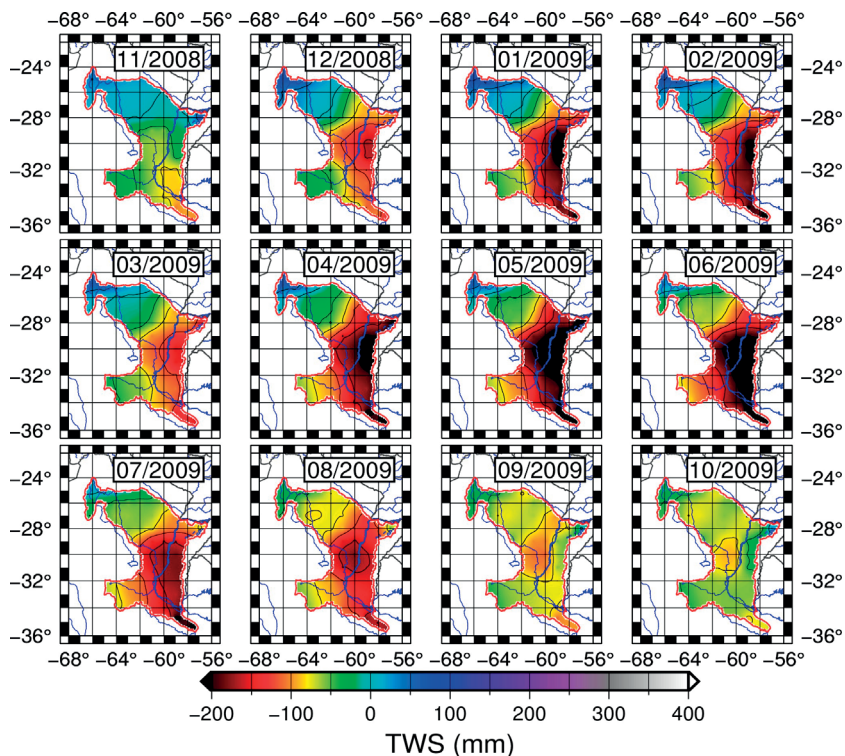


Figura 2. TWS GRACE (mm) 11/2008 al 10/2009.

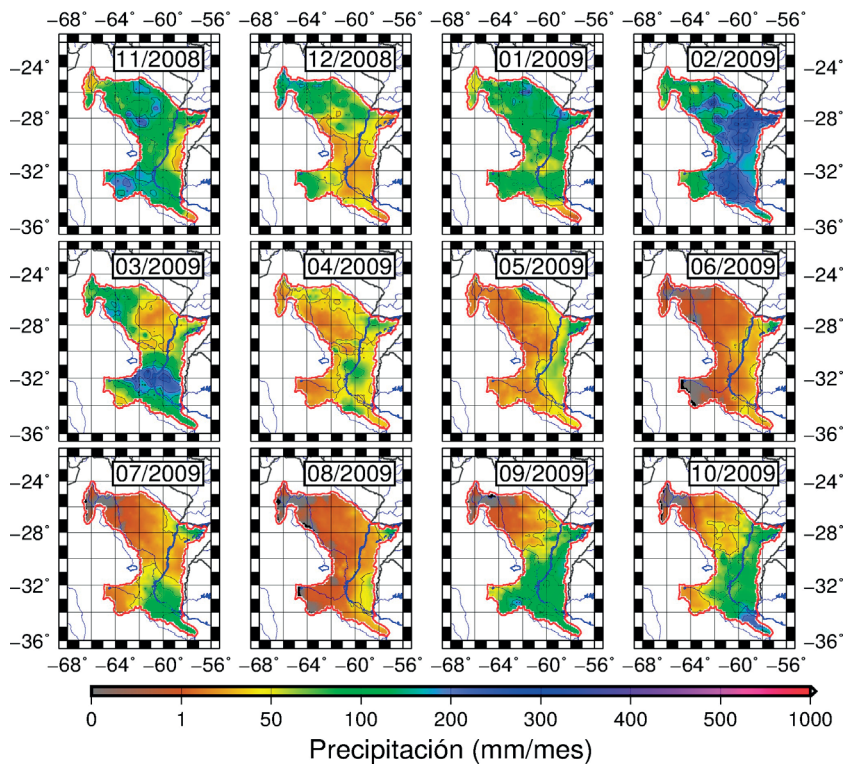


Figura 3. Precipitación mensual TRMM (mm) 11/2008 al 10/2009.

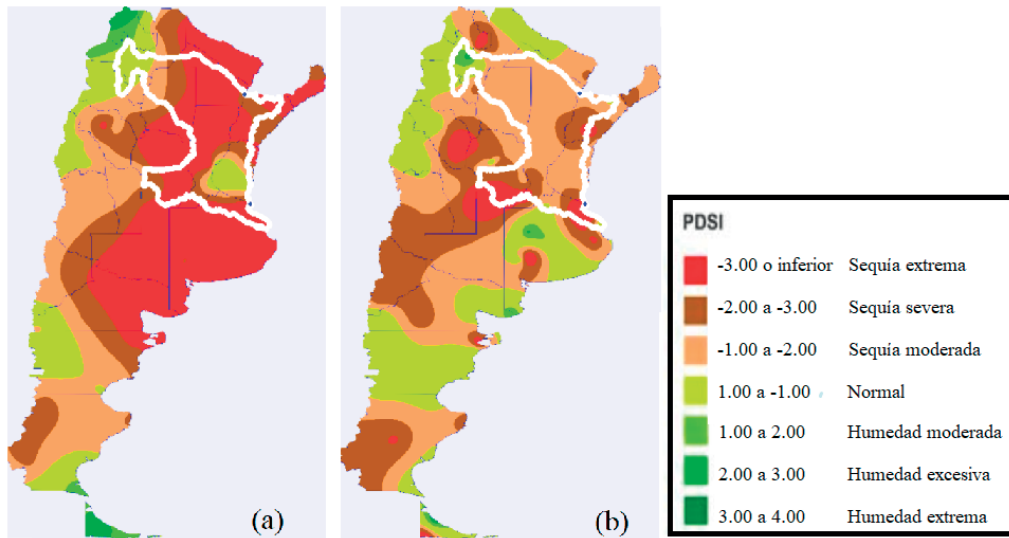


Figura 4. Índice de sequía de Palmer para el mes de abril 2009 (a) y enero 2012 (b). (en blanco, el límite de la cuenca del MyBP) Ravelo et al. (2014).

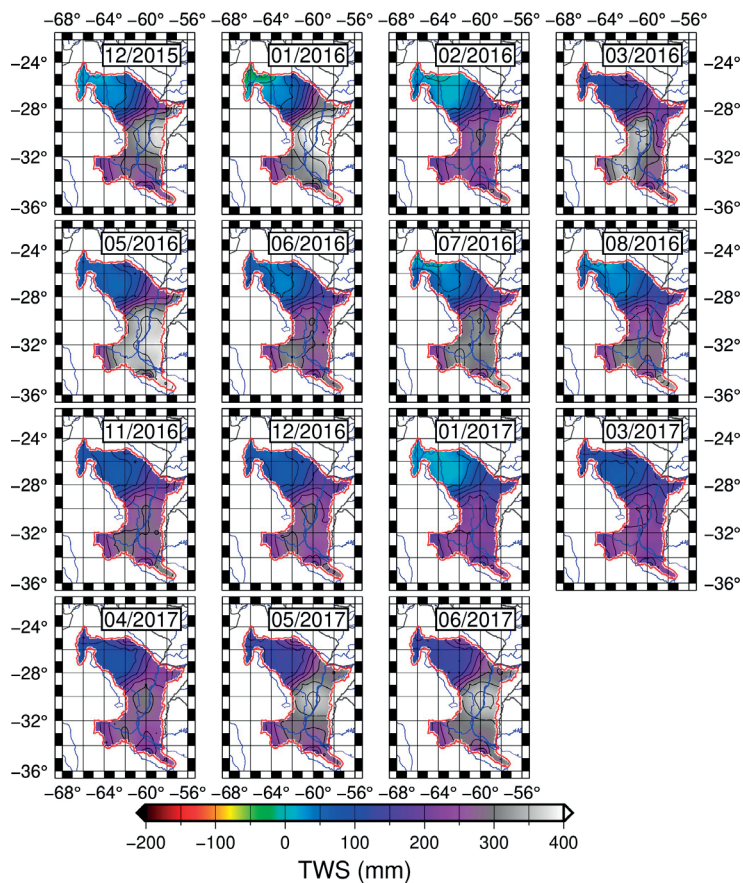


Figura 5. TWS GRACE (mm) diciembre 2015 a junio 2017.

que afectaron principalmente a las provincias de Santa Fe y Entre Ríos, Figura 5.

El mes de abril de 2016 ha registrado excesivas precipitaciones que ocurrieron principalmente en la región del Litoral argentino, lo que contribuyó a empeorar la situación de excedente hídrico sobre la zona produciendo inundaciones que, sumadas a las crecidas de los ríos Paraná, Salado santafecino y Uruguay, provocaron desbordes de ríos, anegamientos, y gran número de evacuados, (SMN, 2016). En los mapas de precipitación de la misión TRMM (Figura 6) puede notarse la

magnitud alcanzada en dicho mes (entre 500 a 900 mm) en la región este del Litoral.

En el mes de abril del 2016, en esa misma región, se registraron valores extremos de precipitación en las estaciones Sunchales Aero (466 mm) y Concordia (605 mm) (<https://www.smn.gob.ar/estadisticas>). Valores altos de TWS se vuelven a repetir en mayo y junio del 2017, mes en que finaliza la misión GRACE (Figura 5), los cuales pueden estar asociados a valores altos de precipitación ocurridos desde diciembre de 2016 a abril del 2017 (Figura 6). En los meses

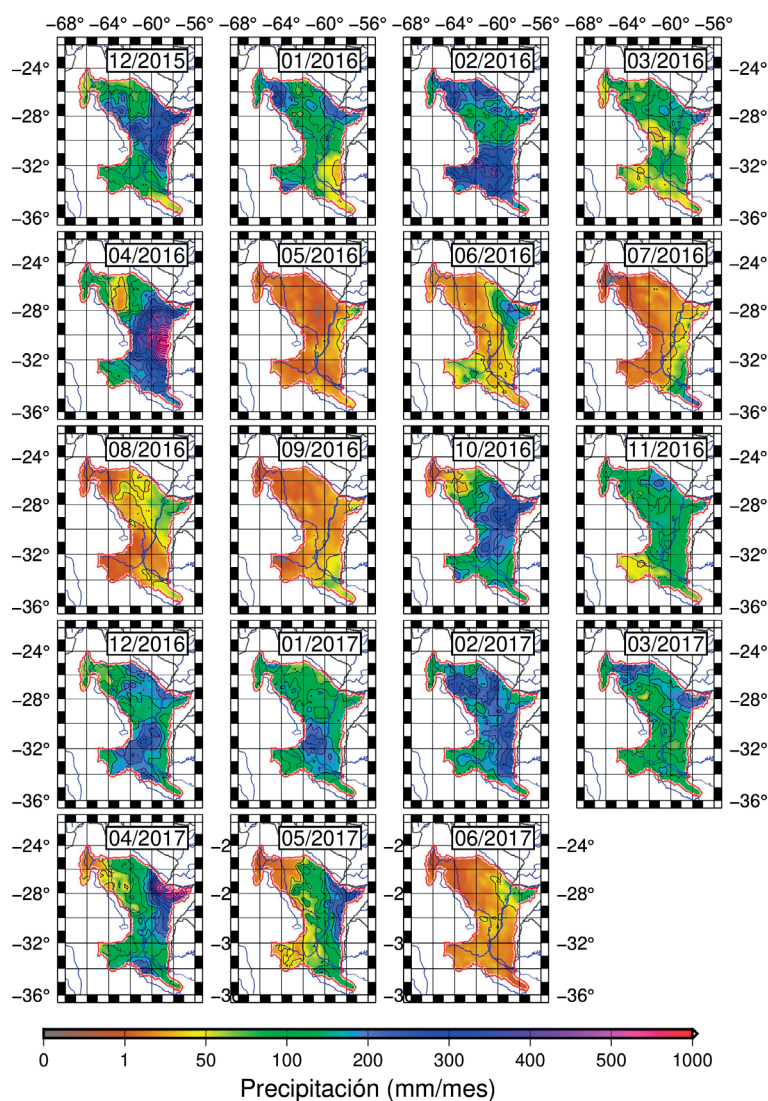


Figura 6. Precipitación mensual TRMM (mm) diciembre 2015 a junio 2017.

10-11/2015, 04-09-10/2016 y 02/2017 no hubo registros de GRACE.

Según el SMN (2019), en el centro del país tuvieron lugar abundantes precipitaciones durante todo el mes de enero de ese mismo año (superiores a los 400 mm), las cuales produjeron inundaciones en las provincias de Corrientes, Chaco, Santa Fe, y Entre Ríos. Asimismo, se registraron crecidas importantes en el río Salado Santafecino y en el Delta del Paraná.

En las estaciones meteorológicas de Gualaguaychú y Resistencia (ubicadas en el Litoral) se produjeron records históricos en enero del 2019 (344,8 mm y 554,8 mm respectivamente) (<https://www.smn.gov.ar/estadisticas>).

Los mapas de TWS de GRACE FO identificaron excesos hídricos en gran parte de la cuenca desde enero a junio del 2019 (Figura 7), en tanto que los mapas de TRMM mostraron abundantes precipitaciones en toda la cuenca desde noviembre de 2018 a enero de 2019 (con valores de 400 a 600 mm), Figura 8.

Además, se han dado dentro del periodo analizado otros eventos de inundación, de menor magnitud y extensión, que tuvieron lugar en otoño del 2007 y verano del 2010, los que pudieron observarse también a partir de los resultados de TWS de GRACE.

Según los valores de precipitación del TRMM, se alcanzaron valores extremos de lluvia en noviembre del 2009 al norte de la provincia de Santa Fe y en la provincia de Corrientes, como también se registró en ese mismo mes un valor máximo de 430 mm en la estación meteorológica de Reconquista, ubicada al norte de la provincia de Santa Fe (<https://www.smn.gov.ar/estadisticas>).

En marzo del 2007, según los mapas del TRMM, se alcanzaron valores altos (500 a 700 mm) en el centro y sur de Santa Fe, y Entre Ríos. Esto también se refleja en las estadísticas del SMN, como por ejemplo en las estaciones meteorológicas ubicadas en dicha región, donde se midieron los siguientes valores: Paraná, 537 mm; Santa Fe, 582 mm; Rosario, 509 mm; Gualaguaychú Aero, 698 mm.

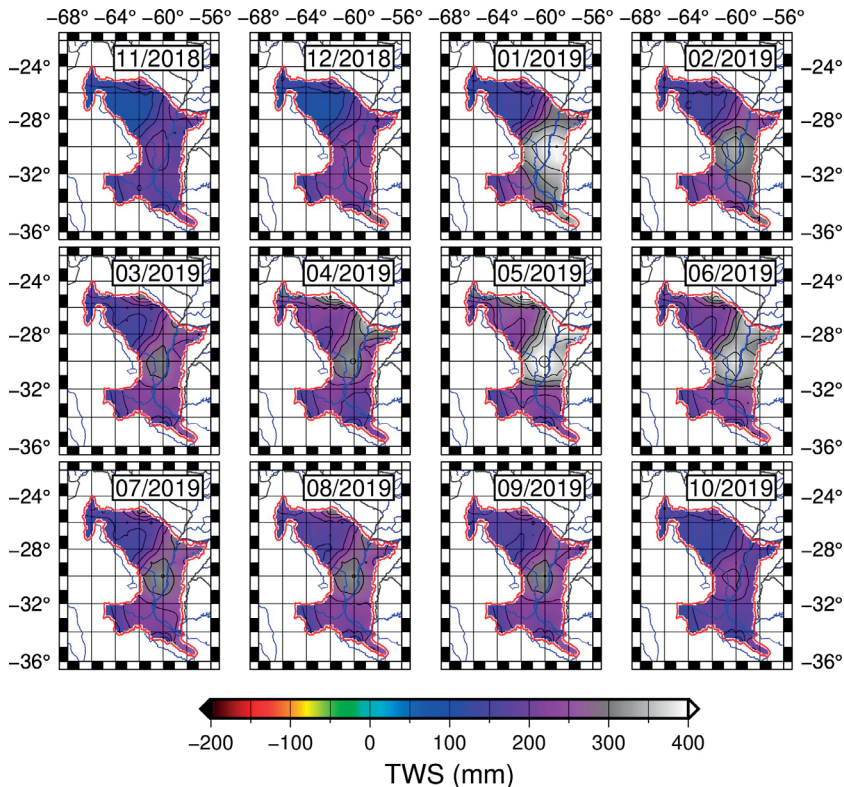


Figura 7. TWS GRACE FO (mm) noviembre de 2018 a octubre de 2019.

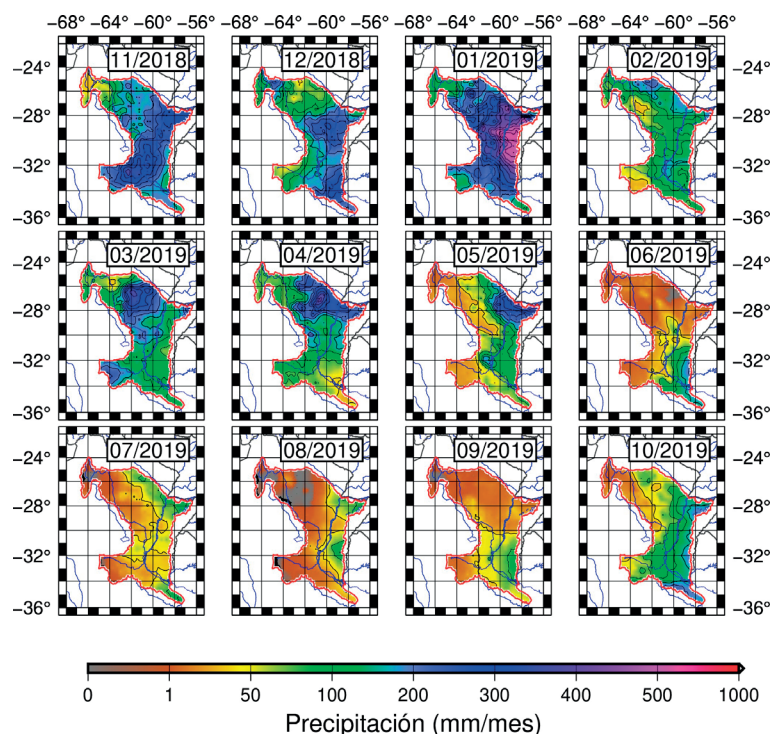


Figura 8. Precipitación mensual TRMM (mm) noviembre de 2018 a octubre de 2019.

4.3. Variación temporal de los componentes del balance hídrico

Los registros de precipitación muestran una fuerte estacionalidad, donde la época más lluviosa corresponde a los meses de verano (diciembre a marzo), con valores mínimos pronunciados durante los tres meses de invierno (junio, julio y agosto), Figura 9-a. La máxima amplitud estacional de P es de aproximadamente 180 mm.

Las tasas más altas de ET ocurren durante la temporada lluviosa de verano e involucran la estacionalidad de manera similar al patrón de precipitación anual (Figura 9-b). Hay un aumento significativo de ET a partir de octubre, después del comienzo de la temporada de lluvias, y la máxima amplitud estacional es de aproximadamente 130 mm. Aunque los valores de ET obtenidos del modelo GLDAS-NOAH son consistentes, pueden ser una posible fuente de incertidumbre sobre el balance hídrico (Long et al., 2014).

Las variaciones estacionales de la descarga de los ríos muestran significativamente menores

amplitudes que las componentes de precipitación y evapotranspiración (Figura 9-c), donde los altos picos de descarga de los ríos se relacionan con las altas tasas de precipitación. El ciclo estacional TWS derivado de GRACE se desplaza de las componentes de precipitación y de descarga de 1 a 2 meses, y muestra también variabilidad interanual, Figura 9-d.

La comparación de los cambios del almacenamiento de agua derivados de GRACE con las componentes independientes del balance hídrico, resultó además consistente con el estudio realizado por Gonçalves et al., 2020, quienes analizaron las componentes sobre el Sistema de Acuífero Urucua ubicado al norte de Brasil. GRACE mostró un retardo respecto de las componentes de precipitación, evapotranspiración y escorrentía superficial de entre 1 a 2 meses. Por otro lado, la comparación de los cambios del almacenamiento total agua obtenidos del balance (P-ET-R) mostraron fuertes correlaciones con los cambios del almacenamiento derivados de GRACE, fundamentalmente en las épocas secas de invierno.

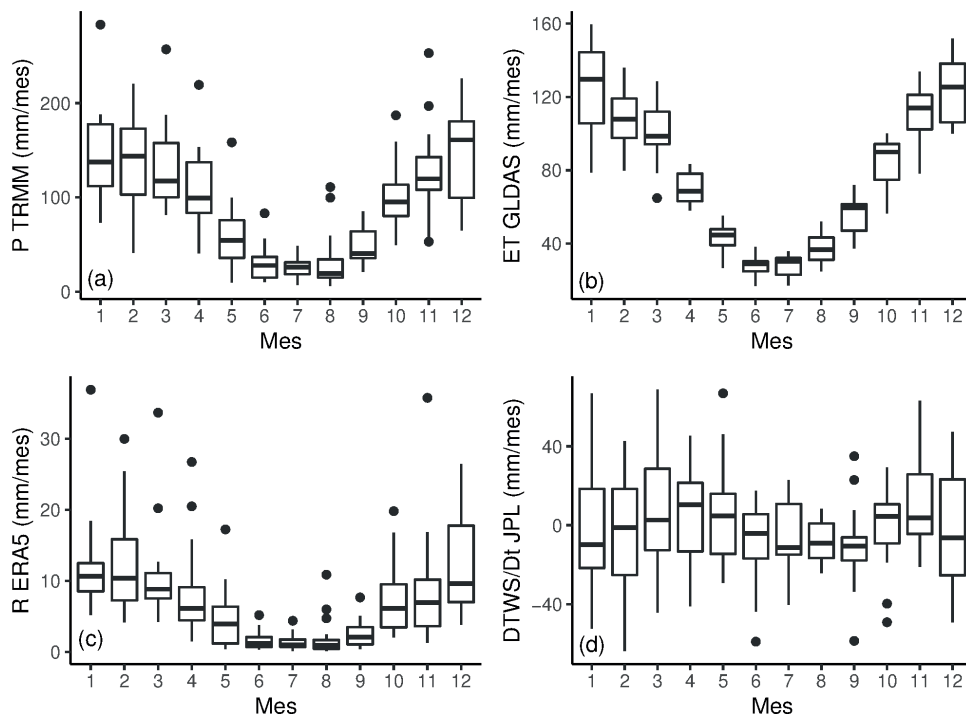


Figura 9. Variación inter-anual de Precipitación (a), Evapotranspiración (b), Escorrentía superficial (c), y anomalía de TWS en el tiempo (d).

4.4. Vinculación de los fenómenos con El Niño y La Niña

El desarrollo de eventos de El Niño y La Niña, fenómenos relacionados con la temperatura superficial del Océano Pacífico Tropical, tiene efectos marcados en el clima de gran parte de la cuenca del Plata, especialmente en la escala de tiempo interanual, afectando la variabilidad de la lluvia. En años Niño se han observado precipitaciones y escorrentías intensas, en tanto que, en años Niña se ha detectado una tendencia a situaciones de déficit pluviométrico (CIC, 2017). Según Pasquini y Depetris (2010), el río Paraná ha incrementado sus caudales en las últimas décadas; el río Paraguay aumentó su flujo a un ritmo superior que el Alto Paraná, elevando significativamente la contribución de agua hacia el Medio y Bajo Paraná; y dichos excesos mostraron coherencia con la ocurrencia de El Niño.

Según Ni et al., (2018), numerosos estudios han analizado las relaciones entre las anomalías

de precipitación y los eventos ENSO (*El Niño Southern Oscillation*). Por otro lado, la evapotranspiración y la escorrentía superficial dependen de cambios de las condiciones de la superficie terrestre (temperatura y humedad); por lo tanto, los tres flujos son influenciados por ENSO, por lo que es esperable que los cambios de TWS también lo sean. Los resultados de dicha investigación demostraron que los cambios interanuales de TWS están fuertemente correlacionados con ENSO en gran parte del mundo, con coeficientes de correlación cruzada máximos de hasta $\sim 0,70$. Las correlaciones más fuertes se dieron en regiones tropicales y subtropicales, especialmente en las cuencas del Amazonas, Orinoco y del Plata.

Las máximas y mínimas variaciones de almacenamiento de agua detectadas con GRACE en la cuenca del Medio y Bajo Paraná pueden relacionarse a los eventos de El Niño y La Niña respectivamente. Es así que los déficits hídricos mostrados en los mapas de TWS en el año 2009, se relacionan al episodio de gran intensidad de

La Niña que tuvo lugar en el periodo 2008-2009, según los valores de anomalía de la temperatura de la superficie del mar (Figura 10).

Por otro lado, los excesos hídricos que evidencian los mapas de TWS, principalmente en el año 2016, tuvieron que ver con el intenso y extendido evento de El Niño que comenzó a mediados del 2014 y se prolongó hasta mediados de 2016 (Figura 10). Por último, la inundación del 2019 coincide con un Niño “débil” declarado a principios del mismo año.

De este análisis, surge que estos eventos de gran importancia han tenido consecuencias hídricas en toda la cuenca del Medio y Bajo Paraná. GRACE además ha evidenciado eventos sectorizados de sequías en 2011-2012 e inundaciones en los años 2007 y 2010, que también se relacionan con La Niña y El Niño respectivamente. En la Figura 10, además, puede observarse la serie temporal promedio de escorrentía superficial (R), confirmando que los picos de descarga coinciden con los eventos extremos de El Niño mencionados anteriormente.

4.5. Análisis de datos GLDAS

El patrón estacional de la serie temporal del almacenamiento total de agua y la de sus tres componentes se grafica en la Figura 11. La variación del almacenamiento de agua subterránea (GWS) se retrasa aproximadamente unos 7 días respecto de la variación del almacenamiento total de agua (TWS). En tanto que la variación de humedad de suelo (SM) se adelanta respecto de ambas. En cada una de ellas se muestra la línea de la media móvil calculada cada 3 años.

La matriz de correlación muestra las correlaciones entre las variables TWS, GWS, SM y SW (Figura 12). En un enfoque visual, la diagonal principal presenta los parámetros en estudio. Los coeficientes de correlación de Pearson (r) están por debajo de la diagonal principal y en la parte superior, se muestran los diagramas de dispersión. Las cuatro variables tienen buena correlación entre sí ($\sim 0,80$), en tanto que SM y SW presentan una menor correlación.

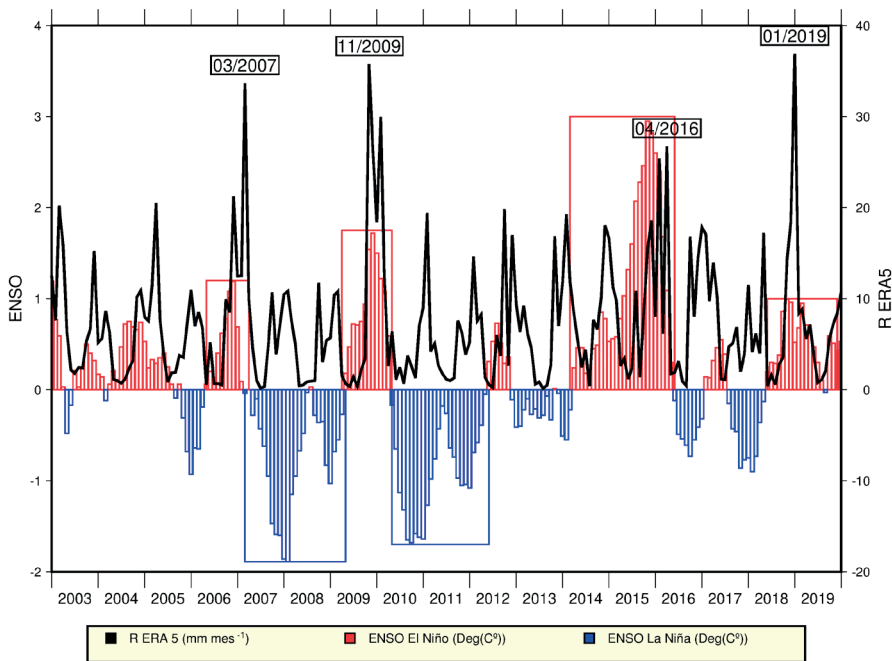


Figura 10. Anomalías de la temperatura de la superficie del mar en la región 3.4 (SST Niño 3.4) y Serie temporal promedio de escorrentía superficial. Se resaltan los eventos más significativos en cuanto a duración y/o magnitud. Las series de datos de SST fueron provistas por la *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/sstoi.indices>.

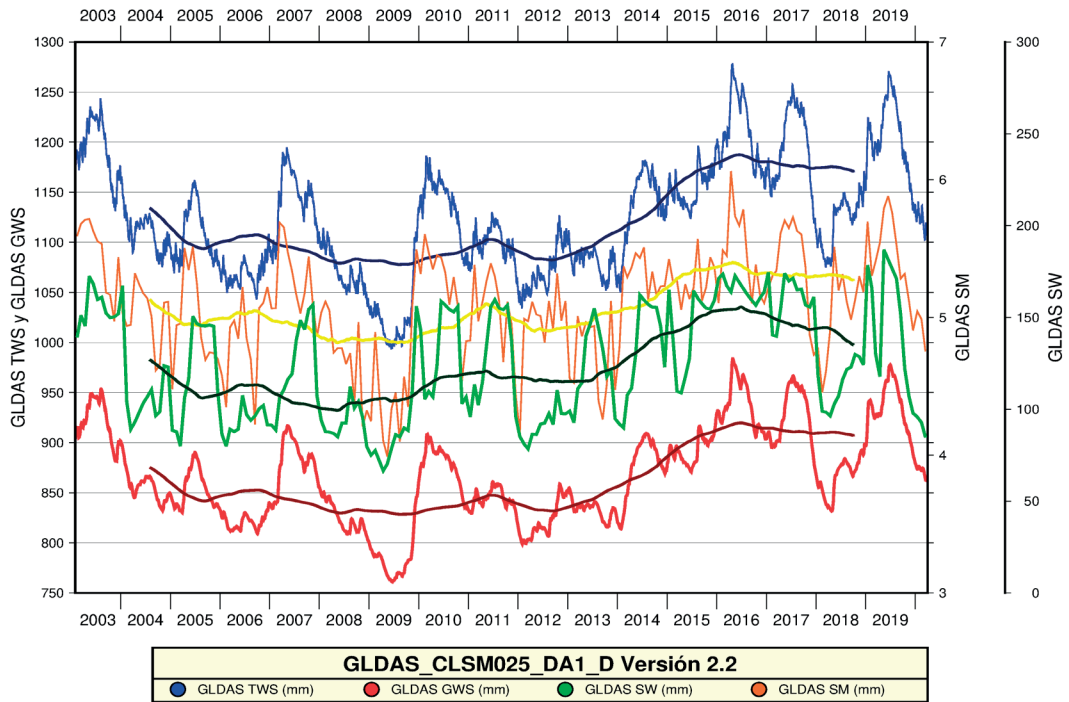


Figura 11. Variación promedio de TWS, GWS, SW y SM del modelo GLDAS.

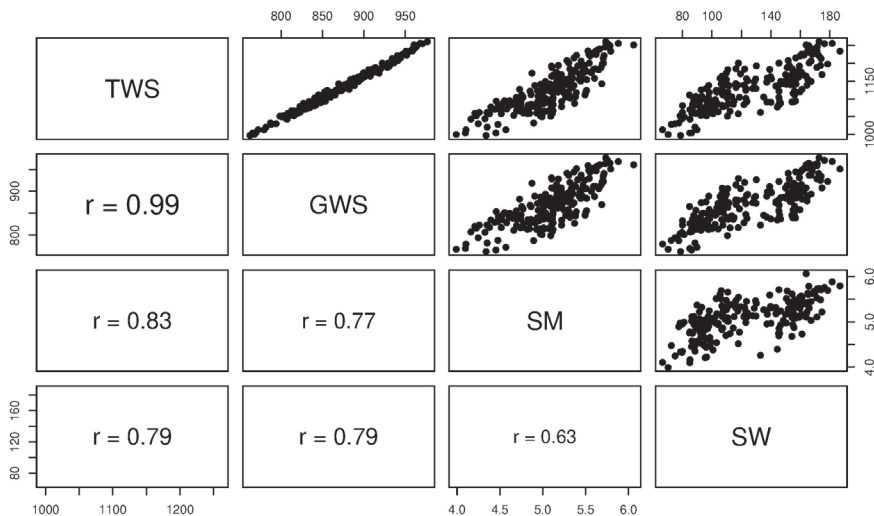


Figura 12. Matriz de correlación y diagramas de dispersión de las variables TWS, GWS, SW y SM.

5. Conclusiones

Las capacidades brindadas por el satélite GRACE complementadas con las tecnologías informáticas para la producción de mapas han permitido profundizar el conocimiento del ciclo de agua

superficial y subterránea, y así fue posible detectar significativas variaciones del almacenamiento de agua acontecidas en la cuenca MyBP.

En el período analizado, las estimaciones de GRACE permitieron comprender y cuantificar

fehacientemente los eventos hidrológicos severos; pudieron interpretarse la distribución, duración y magnitud de estos procesos. De esta manera, se logró evidenciar las inundaciones ocurridas en los años 2016 y 2019, así como también la intensa sequía que tuvo su pico en otoño de 2009, eventos que afectaron la totalidad de la cuenca; y acontecimientos extremos conectados con eventos como El Niño y La Niña, de acuerdo al índice de las anomalías de la temperatura de la superficie del mar (SST 3.4).

Se han registrado otros eventos intensos de inundaciones y sequías en el periodo de estudio que han afectado parcialmente a la cuenca, como pueden mencionarse la sequía en 2011-2012 e inundaciones en los años 2007 y 2010, fenómenos que también tienen vinculación con La Niña y El Niño respectivamente.

Del análisis estacional entre las componentes independientes del balance hídrico, la variación del almacenamiento total de agua derivada de GRACE mostró un desfase respecto de las componentes de precipitación y descarga de entre 1 a 2 meses. Los registros de precipitación revelaron una fuerte estacionalidad, la época más lluviosa corresponde a los meses de verano (diciembre a marzo), con valores mínimos pronunciados durante los tres meses de invierno. Asimismo, las tasas de evapotranspiración más altas se dieron durante la temporada lluviosa de verano de manera similar al patrón de precipitación anual. Por último, las variaciones estacionales de la descarga de los ríos mostraron menores amplitudes que las componentes de precipitación y evapotranspiración.

El modelo de asimilación de datos terrestres GLDAS permitió separar las componentes verticales del TWS posibilitando el análisis temporal de las variaciones hídricas del agua subterránea y la parte de suelo (agua superficial, humedad de suelo) en toda la cuenca del MyBP. Las variables presentaron una buena correlación entre sí, alcanzando valores $r=0,80$, excepto SM y SW que mostraron una correlación menor.

En esta investigación se ha comprobado la viabilidad del uso de los datos derivados de GRACE para la monitorización de los ciclos de agua en una cuenca perteneciente al sistema hidrográfico de la cuenca del Plata; y se pretende

que los resultados obtenidos contribuyan al complejo estudio de la cuenca en su totalidad, como así también al estudio integral de las principales cuencas de Sudamérica, permitiendo una gestión sustentable de los recursos hídricos del territorio.

Por último, se prevé llevar a cabo en futuras investigaciones, un nuevo análisis a partir de la combinación entre las diferentes soluciones GRACE computadas por los centros CSR, GFZ, JPL, y CNES (Centre national d'études spatiales de Francia), con el fin de lograr una mejor precisión en los resultados (Sakumura et al., 2014; Jean et al., 2018).

Agradecimientos

Los autores desean expresar su agradecimiento a la Agencia Santafesina de Ciencia, Tecnología e Innovación (ASaCTeI) por financiar el Proyecto IO-2017- 00009.

Referencias

- Andersen, O., Berry, P., Freeman, J., Lemoine, F.G., Lutsckhe, S., Jakobsen, F., Butts, M. 2008. Satellite Altimetry and GRACE Gravimetry for Studies of Annual Water Storage Variations in Bangladesh. *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences Journal*, 19(1), 47-52. [https://doi.org/10.3319/TAO.2008.19.1-2.47\(SA\)](https://doi.org/10.3319/TAO.2008.19.1-2.47(SA))
- Beaudoing, H., Rodell, M., NASA/GSFC/HSL 2020. *GLDAS Noah Land Surface Model L4 monthly 0.25 x 0.25 degree V2.1*, Greenbelt, Maryland, USA, *Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC)*, <https://doi.org/10.5067/SXAVCZFAQLNO>
- Bettadpur, S. 2018. Level-2 Gravity Field Product User Handbook (Rev. 4.0, April 25, 2018), GRACE 327-734 (CSR- GR- 03- 01), *Center for Space Research*, University of Texas at Austin.
- Carabajal, C.C., Boy, J.P. 2020. Lake and reservoir volume variations in South America from radar altimetry, ICESat laser altimetry, and GRACE time-variable gravity. *Advances in Space Research*, 68(2), 652–671. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.04.022>
- Carignan, R., Neiff, J.J. 1992. Nutrient dynamics in the floodplain ponds of the Paraná River (Argentina) dominated by the water hyacinth *Eichornia crassipes*. *Biogeochemistry*, 17, 85–121.

- 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. *Journal of Geophysical Research*, 115, D22108. <https://doi.org/10.1029/2010JD014689>
- Cheng, M., Ries, J.C., Tapley, B.D. 2011, Variations of the Earth's figure axis from satellite laser ranging and GRACE, *J. Geophysical Research*, 116, B01409, <https://doi.org/10.1029/2010JB000850>
- CIC, Comité Intergubernamental Coordinador de los Países de la Cuenca del Plata. 2017. *Análisis Diagnóstico Transfronterizo de la Cuenca del Plata-ADT*. (1ª ed.) Ciudad Autónoma de Buenos Aires: Comité Intergubernamental Coordinador de los Países de la Cuenca del Plata - CIC; Estados Unidos: Organización de los Estados Americanos - OEA, 2017. Libro digital, PDF. Disponible en https://cicplata.org/wp-content/uploads/2017/09/analisis_diagnostico_transfronterizo_de_la_cuenca_del_plata.pdf. Último acceso abril 2020.
- Cornero, C., Pereira, A., de Matos, A.C.O.C., Pacino, M.C. 2017. Analysis of water mass variation in wetlands using data from grace satellite mission: The pantanal case. *Brazilian Journal of Geophysics*, 35(4), 307–321. <https://doi.org/10.22564/RBGF.V35I4.786>
- Frappart, F., Papa, F., Güntner, A., Tomasella, J., Pfeiffer, J., Ramillien, G., Emilio, T., Schiatti, J., Seoane, L., da Silva Carvalho, J., Medeiros Moreira, D., Bonnet, M.P., Seyler, F. 2019. The spatio-temporal variability of groundwater storage in the Amazon River Basin. *Advances in Water Resources*, 124, 41–52. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2018.12.005>
- Frappart, F., Papa, F., Malbeteau, Y., León, J., Ramillien, G., Prigent, C., Seoane, L., Seyler, F., Calmant, S. 2014. Surface Freshwater Storage Variations in the Orinoco Floodplains Using Multi-Satellite Observations. *Remote Sensing*, 7(1), 89–110. <https://doi.org/10.3390/rs70100089>
- Frappart, F., Ramillien, G. 2018. Monitoring groundwater storage changes using the gravity recovery and climate experiment (GRACE) satellite mission: a review. *Remote Sens.* 10(6), 829. <https://doi.org/10.3390/rs10060829>
- Frappart, F., Ramillien, G., Ronchail, J. 2013. Changes in terrestrial water storage versus rainfall and discharges in the Amazon basin. *International Journal of Climatology*, 33, 3029–3046. <https://doi.org/10.1002/joc.3647>
- Greenbelt, Maryland, USA. https://disc.gsfc.nasa.gov/datacollection/GLDAS_CLSM025_DA1_D_2.2.html
- Gonçalves, R.D., Stollberg, R., Weiss, H., Chang, H.K. 2020. Using GRACE to quantify the depletion of terrestrial water storage in Northeastern Brazil: The Urucuia Aquifer System. *Science of the Total Environment*, 705, 135845. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135845>
- Gulizia, C., Hannart, A., Camiloni, I. 2018. Caracterización de la variabilidad temporal de los caudales de los grandes ríos y de la precipitación en la cuenca del Plata. *Congreso Argentino de Meteorología*. http://cenamet.org.ar/congremet/wp-content/uploads/2018/09/T221_Gulizia.pdf. Último acceso abril 2020.
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Biavati, G., Horányi, A., Muñoz Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Rozum, I., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Dee, D., Thépaut, J.N. 2019. ERA5 monthly averaged data on single levels from 1979 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). <https://doi.org/10.24381/cds.fl7050d7>
- Huffman, G.J., Adler, R.F., Bolvin, D.T., Nelkin, E.J. 2010. The TRMM Multi-Satellite Precipitation Analysis (TMPA). In: Gebremichael M., Hossain F. (eds) *Satellite Rainfall Applications for Surface Hydrology*. Springer, Dordrecht, pp. 3-22. https://doi.org/10.1007/978-90-481-2915-7_1
- Jean, Y., Meyer, U., Jäggi, A. 2018. Combination of GRACE monthly gravity field solutions from different processing strategies. *Journal of Geodesy*, 92(11), 1313–1328. <https://doi.org/10.1007/s00190-018-1123-5>
- Kandus, P., Quintana, R.D., Bo, R.F. 2006. *Patrones de paisaje y Biodiversidad del Bajo Delta del Río Paraná*. Mapa de Ambientes, Buenos Aires, Pablo Casamajor ed., 48págs.
- Landerer, F.W., Swenson, S.C. 2012. Accuracy of scaled GRACE terrestrial water storage estimates, *Water Resources Research*, 48, W04531. <https://doi.org/10.1029/2011WR011453>
- Landerer, F.W., Flechtner, F.M., Save, H., Webb, F.H., Bandikova, T., Bertiger, W.I., Bettadpur, S.V., Byun, S.H., Dahle, C., Dobslaw, H., Fahnstock, E., Harvey, N., Kang, Z., Kruizinga, G.L. H., Loomis, B.D., McCullough, C., Murböck, M., Nagel, P., Paik, M., Pie, N. Poole, S. Strelakov, D. Tamisiea, M.E., Wang, F., Watkins, M.M., Wen, H.Y., Wiese, D.N., Yuan, D.N. 2020. Extending the Global Mass Change Data Record: GRACE Follow-On Instrument and Science Data Performance. *Geophysical Research Letters*, 47(12), 0–3. <https://doi.org/10.1029/2020GL088306>

- Li, B., Beaudoin H., Rodell M., NASA/GSFC/HSL 2020. GLDAS Catchment Land Surface Model L4 daily 0.25 x 0.25 degree GRACE-DA1 V2.2. *Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC)*. Release 2020-02-25
- Li, B., Rodell M., Kumar S., Beaudoin H., Getirana A., Zaitchik B.F., Bhanja S.N., Mukherjee A., Tian S., Tangdamrongsub N., Long D., Nanteza J., Lee, J., Steele-Dunne S., Save H., Bettadpur S.V. 2019 Global GRACE data assimilation for groundwater and drought monitoring: Advances and challenges. *Water Resources Research*, 55, 7564–7586. <https://doi.org/10.1029/2018WR024618>
- Long, D., Longuevergne, L., Scanlon, B.R. 2014. Uncertainty in evapotranspiration from land surface modeling, remote sensing, and GRACE satellites. *Water Resour. Res.*, 50, 1131–1151, <https://doi.org/10.1002/2013WR014581>
- 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(2), 76–87. <http://doi.org/10.2478/v10156-011-0034-7>
- Muñoz-Sabater, J., Dutra, E., Agustí-Panareda, A., Albergel, C., Arduini, G., Balsamo, G., Boussetta, S., Choulga, M., Harrigan, S., Hersbach, H., Martens, B., Miralles, D.G., Piles, M., Rodríguez-Fernández, N.J., Zsoter, E., Buontempo, C., Thépaut, J.N. ERA5-Land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications, *Earth Syst. Sci. Data Discuss.* [preprint], <https://doi.org/10.5194/essd-2021-82>, in review, 2021.
- NASA/JPL. 2019. JPL GRACE and GRACE-FO Mascon Ocean, Ice, and Hydrology Equivalent Water Height Coastal Resolution Improvement (CRI) Filtered Release 06 Version 02. NASA Physical Oceanography DAAC. <https://doi.org/10.5067/TEMSC-3JC62>
- Ni, S., Chen, J., Wilson, C.R., Li, J., Hu, X., Fu, R. 2018. Global Terrestrial Water Storage Changes and Connections to ENSO Events. *Surveys in Geophysics*, 39(1), 1–22. <https://doi.org/10.1007/s10712-017-9421-7>
- Pasquini, A.I., Depetris, P.J. 2010. ENSO-triggered exceptional flooding in the Paraná River: Where is the excess water coming from? *Journal of Hydrology*, 383(3–4), 186–193. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.12.035>
- Peltier, W.R., Argus, D.F., Drummond, R. 2018. Comment on “An Assessment of the ICE-6G_C (VM5a) Glacial Isostatic Adjustment Model” by Purcell et al. *J. Geophysical Research- Solid Earth*, 123(2), 2019–2028. <https://doi.org/10.1002/2016JB013844>
- Pereira, A., Cornero, C., Matos, A.C.O.C., Pacino, M.C., Blitzkow, D. 2019. Study of water storage variations at the Pantanal wetlands area from GRACE monthly mass grids. *Journal of Geodetic Science*, 9(1), 133–143. <https://doi.org/10.1515/jogs-2019-0013>
- R Core Team. 2020. R: A language and environment for statistical computing. *R Foundation for Statistical Computing*, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org>
- Ramillien, G., Frappart, F., Cazenave, A., Güntner, A. 2005. Time variations of the land water storage from an inversion of 2 years of GRACE geoids, *Earth and Planetary Science Letters*, 235(1-2), 283–301. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2005.04.005>
- Ravelo, A.C., Zanvettor, R.E., Boletta, P.E.C. 2014. Atlas de sequía la República Argentina. CREA / Centro de Relevamiento y Evaluación de Recursos Agrícolas y Naturales UNC –CONICET. ISBN 978-950-33-1195-0
- 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., Toll, D. 2004. The Global Land Data Assimilation System. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 85(3), 381–394. <https://doi.org/10.1175/BAMS-85-3-381>
- Sakumura, C., Bettadpur, S., Bruinsma, S. 2014. Ensemble prediction and intercomparison analysis of GRACE time-variable gravity field models. *Geophysical Research Letters*, 41(5), 1389–1397. <https://doi.org/10.1002/2013GL058632>
- Seneviratne, S.I., Nicholls, N., Easterling, D., Goodess, C.M., Kanae, S., Kossin, J., Luo, Y., Marengo, J., McInnes, K., Rahimi, M., Reichstein, M., Sorteberg, A., Vera, C., Zhang, X. 2012. Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment. In: Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, and P.M. Midgley (eds.). *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, pp. 109-230.
- Servicio Meteorológico Nacional (SMN). 2009. *Informes Especiales. Informe sobre Sequía*.
- Servicio Meteorológico Nacional (SMN). 2011. *Boletín climatológico. Volumen XXIII ANUAL*.

- Servicio Meteorológico Nacional (SMN). 2015. *Informe elaborado el 5 de noviembre de 2015*. Disponible en <https://www.smn.gov.ar/clima/vigilancia-informes>. Último acceso abril 2020.
- Servicio Meteorológico Nacional (SMN). 2016. *Informe de las precipitaciones ocurridas en abril 2016*. Disponible en <https://www.smn.gov.ar/clima/vigilancia-informes>. Último acceso abril 2020.
- Servicio Meteorológico Nacional (SMN). 2019. *Informe de las precipitaciones ocurridas en enero 2019*. Disponible en <https://www.smn.gov.ar/clima/vigilancia-informes>. Último acceso junio 2020.
- Singh, A., Seitz, F., Schwatke, C. 2012. Inter-annual water storage changes in the Aral Sea from multi-mission satellite altimetry, optical remote sensing, and GRACE satellite gravimetry. *Remote Sensing of Environment*, 123, 187–195. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.01.001>
- Sun, Y., Riva, R., Ditmar, P. 2016. Optimizing estimates of annual variations and trends in geocenter motion and J2 from a combination of GRACE data and geophysical models. *J. Geophysical Research-Solid Earth*, 121(11), 8352-8370. <https://doi.org/10.1002/2016JB013073>
- Swenson, S., Chambers, D., Wahr, J. 2008. Estimating geocenter variations from a combination of GRACE and ocean model output *J. Geophysical Research*, 113, 8410. <https://doi.org/10.1029/2007JB005338>
- 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)*, <https://doi.org/10.5067/TRMM/TMPA/MONTH/7>
- Vaz de Almeida, F.G. 2009. *Variación temporal do campo gravitacional detectada pelo satélite GRACE: Aplicação na bacia Amazônica*. Tesis de Doctorado en Ingeniería presentada en la Escuela Politécnica de la Universidad de San Pablo, Brasil.
- Vaz de Almeida, F.G., Calmant, S., Seyler, F., Ramillien, G., Blitzkow, D., Matos, A.C.C., Silva, J.S. 2012. Time-variations of equivalent water heights from GRACE Mission and in-situ river stages in the Amazon basin. *Acta Amazonica*, 42(1): 125–134. <https://doi.org/10.1590/S0044-59672012000100015>
- Wang, S, Liu, H, Yu, Y, Zhao, W, Yang, Q, Liu, J. 2020. Evaluation of groundwater sustainability in the arid Hexi Corridor of Northwestern China, using GRACE, GLDAS and measured groundwater data products, *Science of The Total Environment*, 705, 2020, 135829, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135829>
- Watkins, M.M., Wiese, D.N. Yuan, D.N., Boening, C., Landerer, F.W. 2015. Improved methods for observing Earth's time variable mass distribution with GRACE, *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 120(4), 2648-2671. <https://doi.org/10.1002/2014JB011547>
- Wessel, P., Smith, W.H.F., Scharroo, R., Luis, J., Wobbe, F. 2013. Generic Mapping Tools: Improved Version Released, *Eos*, 94(45), 409-420. <https://doi.org/10.1002/2013EO450001>
- Wiese, D.N., Yuan, D.N., Boening, C., Landerer, F.W., Watkins, M.M. 2019. JPL GRACE Mascon Ocean, Ice, and Hydrology Equivalent Water Height RL06 CRI Filtered Version 02. Ver. 02. PO.DAAC, CA, USA. <https://doi.org/10.5067/TEMSC-3JC62>
- Xavier, L., Becker, M., Cazenave, A., Longuevergne, L., Llovel, W., Rotunno Filho, O.C. 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. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.02.005>