

IMPACTO DEL EVENTO EXTREMO ENOS 2015-2016 SOBRE LA GEOMETRÍA DE LA SUPERFICIE TERRESTRE EN LA REGIÓN ECUATORIAL DE SUDAMÉRICA

IMPACT OF THE EXTREME 2015-2016 ENOS EVENT ON THE GEOMETRY OF THE EARTH SURFACE IN THE EQUATORIAL REGION OF SOUTH AMERICA

Romina Galván^{1,2}, Micaela Carbonetti^{1,2}, Mauricio Gende^{1,2}, Claudio Brunini^{2,3}

¹ Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, UNLP. Argentina.
Paseo del Bosque S/N, La Plata, Buenos Aires, Argentina. B1900FWA.

² Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas. Argentina.

³ Observatorio Geodésico Alemán Argentino (AGGO), Berazategui, Buenos Aires. Argentina.
E-mail: romina.delosangeles.galvan@gmail.com

RESUMEN

El fenómeno del Niño-Oscilación del Sur (ENOS) es un fenómeno oceánico-atmosférico que se origina en las aguas ecuatoriales del Océano Pacífico. Existen dos fases, la fase cálida o El Niño y la fase fría o La Niña, y se refieren respectivamente a un aumento o disminución considerable de la temperatura superficial del océano respecto de los valores normales. Una de las consecuencias de esta alteración es un impacto en el ciclo hidrológico de la región de Sudamérica y el Caribe. Dicho fenómeno provoca variaciones no periódicas tanto en los patrones de precipitaciones como en el almacenamiento de las masas hídricas, que se sitúan sobre la superficie o en regiones cercanas a ella. La consecuencia inmediata son cambios en la presión que dichas masas ejercen sobre la corteza terrestre, los que provocan movimientos geométricos de la corteza y cambios en las medidas de gravedad. El objetivo del presente trabajo es analizar el efecto geométrico que dicho fenómeno tiene sobre la posición de las estaciones GNSS que integran la red SIRGAS-CON. En este estudio se reconocen los períodos temporales en donde se produjeron fenómenos de El Niño o La Niña por medio del Índice Oceánico El Niño (ONI), y se analiza el impacto de los eventos más significativos, ocurridos en 2008-2012 y 2015-2016, sobre los patrones de precipitación y sobre el almacenamiento de agua total. Para el análisis de las precipitaciones se utilizaron grillas globales CMAP, encontrando que las mayores diferencias respecto a valores medios se producen entre los meses de diciembre de 2015 y marzo de 2016, en donde se observa una caída de hasta un 60% de las precipitaciones respecto a los valores esperados en la región norte del continente Sudamericano. A partir de la información provista por la misión satelital GRACE, se evaluaron anomalías del almacenamiento hídrico, obteniéndose disminuciones de hasta 60 cm en el norte y aumentos de 40 cm en el sur de Brasil respectivamente durante el evento El Niño 2015-2016. Finalmente, se investigó el efecto sobre la componente vertical de las coordenadas distinguiendo incrementos de la misma durante el evento 2015-2016 en la región norte de Sudamérica mientras, que en la región ecuatorial sur, se detectó un marcado efecto opuesto.

Palabras claves: Geodesia, GNSS, El Niño-Oscilación del Sur, Sudamérica

ABSTRACT

El Niño-Southern Oscillation (ENSO) is an atmospheric-oceanic phenomenon that originates in the equatorial Pacific Ocean. It is characterized by two phases: the warm or “El Niño” phase, and the cold or “La Niña” phase. They respectively refer to a significant increase or decrease of the surface temperature of the Pacific Ocean with respect to normal values. One of the main consequences of this abnormality is an alteration of the hydrological cycle in the rainfall patterns in South American and Caribbean region. Such disturbance can cause non-periodic variations in both the rainfall patterns and water body storages located on the surface or near it. The immediate consequence is the pressure that such bodies exert on the earth's crust change. They can cause geometric movements of the earth's crust and gravity measurement changes. This paper is focused on the geometric effects of this phenomenon on the GNSS station positions of SIRGAS-CON network. Time periods for which El Niño or La Niña occurred are recognized using the Oceanic Niño Index (ONI). The impact of the most significant events, occurred between 2008-2012 and 2015-2016, over rainfall patterns and on total water storage is analyzed. Regions of characteristic behaviour of each phase are recognized using global precipitation model CMAP. The greatest differences with respect to average values occur between December 2015 and March 2016. A decrease up to 60% in rainfall is observed in the northern region of the South American continent. In order to evaluate water storage anomalies GRACE satellite mission data is assessed. A decrease up to 60 cm in Brazil northern region and an increase up to 40 cm in the southern region is observed during 2015-2016 El Niño event. Furthermore, the effect on the vertical component of the coordinates is investigated. Positive anomalies are found in the northern region of South America during the 2015-2016 event, while a significant opposite effect is detected in the southern equatorial region.

Keywords: Geodesy, GNSS, El Niño-Southern Oscillation, South America

INTRODUCCIÓN

Los Sistemas Globales de Navegación por Satélite (GNSS), permiten determinar la posición de una marca geodésica sobre la superficie de la Tierra con una exactitud de muy pocos milímetros (Sánchez et al., 2013). Como la superficie de la Tierra no es estática en el tiempo, sino que se ve deformada por efectos geofísicos de diferentes escalas (e.g. van Dam et al., 1994, van Dam et al., 2001, Dong et al., 2002, Elósegui et al., 2003, Bevis, et al., 2004, Demoulin et al., 2007), es necesario modelar y reducir minuciosamente todas las variaciones causadas por dichos efectos de las coordenadas de las marcas para poder contar con un marco de referencia estable, útil para aplicaciones geodésicas y para la georreferenciación (Brunini et al., 2010, Bevis y Brown, 2014). Estas deformaciones producto de las cargas superficiales pueden afectar las determinaciones de parámetros de transformación entre los marcos de referencia internacionales, lo que trae aparejado un consiguiente error en las posiciones de los sitios asociados a ese marco (Tregoning y van Dam, 2005, Collilieux et al., 2012, Zou et al., 2014).

Actualmente las coordenadas de las estaciones se actualizan por medio de un modelo de velocidades debido al movimiento tectónico de la superficie terrestre, pero no consideran la respuesta elástica de la Tierra al efecto que cualquier carga ejerce sobre la superficie (Altamini et al., 2011, Sanchez y Drewes, 2016). La consecuencia de esto es que se observan variaciones no lineales en las posiciones estimadas de las estaciones. Estudios de la respuesta elástica de la corteza a las variaciones del almacenamiento realizados en la región de Sudamérica (Bevis et al., 2005) muestran una variación estacional anual en la componente vertical de la coordenada con amplitudes que alcanzan los 7 cm en Manaus, sitio en donde se unen el río Negro y el río Amazonas.

Para resoluciones temporales anuales e interanuales, las variaciones del almacenamiento del agua superficial se encuentran controladas principalmente por los cambios en la hidrología y en la atmósfera (Tapley et al., 2004, Seneviratne et al., 2004, Bruinsma et al., 2010, Creutzfeldt et al.,

2012). La cuenca del Amazonas es una de las cuencas hídricas más importantes del mundo en cuanto a almacenamiento, debido a su extensión y a la fuerte variación estacional de los niveles de agua. La misma cubre un 40% del territorio de Sudamérica y representa más del 20% de la descarga total de los ríos del mundo (Bevis et al., 2005, Chen et al., 2010). En un ciclo anual medio la extensión de la red de drenaje varía entre 100.000 km² para la época seca a 350.000 km² durante la época de lluvias (Guo y Jiang, 2006). El factor fundamental que influye en los cambios de los niveles hídricos de la región son las precipitaciones producto del clima tropical (Papa et al., 2013, Frappart, et al., 2008).

Una parte considerable de la lluvia en la cuenca proviene de la evapotranspiración de los ecosistemas, con una contribución media anual del 55% al 60% de la precipitación total (Guimarães et al., 2012). En la región de Sudamérica se observan regímenes de lluvias con ciclos anuales, pero de características locales diferentes en cuanto a amplitud y fase (Ropelewski y Halpert, 1987, 1989, Aceituno, 1988, Grimm et al., 2000, Grimm, 2003). Superpuestos a estos comportamientos armónicos de carácter anual, existen fenómenos climáticos extremos que alteran significativamente dichos patrones. Uno de los fenómenos más importantes es el efecto El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) (Grimm y Tedeschi, 2009, Tedeschi et al., 2015 y 2016). El fenómeno ENOS es un fenómeno natural que se genera debido a la interacción inestable entre el océano y la atmósfera sobre el océano Pacífico ecuatorial central y oriental, y altera los patrones de precipitación, principalmente en las regiones cercanas a la costa oceánica del Pacífico (Philander, 1990, Chang y Battisti, 1998).

En el presente trabajo se estudiará en particular el efecto que tiene un fenómeno climático como ENOS, sobre la geometría de la corteza terrestre. Se analizará el efecto que el evento más fuerte de la década, ENOS 2015-2016, produjo sobre la posición de las estaciones GNSS situadas en el territorio de Brasil que integran la red SIRGAS-CON.

Se considerará en primer lugar el posible impacto del evento ENOS 2015-2016, sobre el patrón de precipitaciones normal para la región. Para ello se utilizaron datos del Climate Prediction Center Merged Analysis of Precipitation (CMAP), provistos por la Administración Nacional del Océano y Atmósfera (NOAA) del Departamento de Comercio de Estados Unidos (Xie et al., 1997). A partir del modelo CMAP se reconocerán comportamientos anómalos de las series de precipitaciones durante la última parte de 2015 y comienzos de 2016, y se examinará espacialmente si existen regiones con comportamientos característicos de épocas secas o húmedas. El mismo análisis se repetirá para los datos de la misión satelital GRACE que estiman variaciones del almacenamiento de agua total en la superficie y se comparará con los resultados obtenidos para las series de precipitación. Este estudio dará una visión del efecto del evento ENOS sobre las masas hídricas que presionan la corteza terrestre, se reconocerán sitios de sequías y sitios en donde el evento extremo provoca inundaciones.

Posteriormente, se estudiará el impacto sobre la componente vertical de las coordenadas de estaciones en las cercanías de la cuenca Amazónica, pertenecientes a la red SIRGAS-CON. Esta red se compone actualmente por más de 400 estaciones GNSS en América (www.sirgas.org), que monitorean en forma continua la corteza terrestre. La misma materializa el Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas (Brunini et al., 2009), que se define de la misma forma que el Sistema de Referencia Terrestre Internacional (ITRS). En la componente vertical se reconocerán modulaciones de las variaciones armónicas estacionales y se las asociará a las regiones donde se produjeron inundaciones y sequías. El trabajo cuantifica las deformaciones debidas a efectos climáticos extremos sobre la componente vertical de las estaciones GNSS. En particular, el impacto que el fenómeno ENSO 2015-2016 tiene sobre la corteza al producir un cambio en el patrón de las precipitaciones sobre Sudamérica.

FUENTES DE INFORMACIÓN

Deformaciones superficiales

La fuente de información utilizada en el siguiente análisis corresponde a las series temporales de coordenadas de alta precisión provistas por la red de estaciones GNSS del Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas de operación continua (SIRGAS-CON).

La red comprende una red principal de cobertura continental (SIRGAS-C) y redes nacionales (SIRGAS-N). Tanto la red continental como las nacionales tienen las mismas características y calidad, y cada estación que compone estas redes es procesada por tres centros de análisis lo que garantiza consistencia, perdurabilidad, y precisión del marco de referencia a través del tiempo. Gracias a estas redes, y a los 4 centros de procesamiento, es posible contar desde el año 2000 con información de los movimientos de la corteza terrestre respecto a un marco de referencia internacional que definen las órbitas precisas de los satélites. La precisión de la posición para la época de referencia se estima que es superior a 1.5 mm en la componente horizontal y 3.8 mm en la componente vertical (Sánchez y Seitz, 2011).

En el presente trabajo se estudiarán los movimientos de la componente vertical de las coordenadas semanales por ser de un orden de magnitud mayor que los movimientos horizontales.

Precipitaciones

Se emplearon datos del Climate Prediction Center Merged Analysis of Precipitation (CMAP) para cuantificar las masas de agua precipitadas sobre la región de estudio. CMAP brinda mallas de precipitación global de alta resolución espacial y temporal y se encuentra disponible en dos versiones. La primera de ellas, CMAP/O, se obtiene de la combinación de fuentes independientes de información. Por un lado, utiliza mediciones de todos los pluviómetros disponibles. Estos valores se ponderan de forma inversamente proporcional con la distancia al punto de medición. Por otra parte, se incorporan observaciones desde satélites geoestacionarios y de órbitas polares en el infrarrojo y con sensores pasivos de microondas. Como esta versión no dispone de observaciones en algunas zonas, en particular las capas polares, también está disponible una versión espacialmente completa, CMAP/A, que incorpora modelos de precipitación de re-análisis NCEP/NCAR. En esta segunda versión, los pesos están restringidos de manera que los valores de re-análisis reciben muy poco peso a menos que no haya otras observaciones disponibles.

En el caso en el que haya un número apropiado de observaciones disponibles en cada área de grilla, el análisis basado en mediciones de pluviómetros es mejor respecto del uso de un modelo. Sin embargo, la distribución de estos sensores es inhomogénea. Las estimaciones basadas en observaciones infrarrojas consisten esencialmente en las variaciones de nubosidad fría y son las más adecuadas para identificar cambios en la precipitación convectiva profunda. Son más precisas en los trópicos, y en latitudes medias durante las estaciones cálidas. Se utilizan dos tipos de estimaciones pasivas basadas en microondas: dispersión (scattering) y emisión. Las estimaciones de dispersión son oportunas para detectar la convección profunda sobre tierra y océano, mientras que las estimaciones de emisiones son sensibles a la lluvia líquida sobre los océanos. Su principal limitación es el bajo muestreo espacial.

En el presente trabajo se utilizaron series de tiempo de precipitación media mensual brindados por CMAP con una distribución global. Los mismos tienen una resolución espacial de 2.5° en latitud y 2.5° en longitud, y abarcan el período desde enero de 2000 hasta diciembre de 2016. El largo período de registro y la cobertura de todo el evento ENOS 2015-2016 fueron las características decisivas al momento de elegir esta fuente de información. Si bien una fuerte limitación de los datos es una mayor incertidumbre a medida que aumenta la latitud, nuestra región de estudio se concentra entre los 30° Sur y 5° Norte, región en la que la información es más robusta.

Variaciones del almacenamiento hídrico

Desde su lanzamiento en 2002, la misión satelital GRACE ha probado ser una herramienta muy útil para estimar variaciones del almacenamiento del agua superficial a partir de las variaciones del campo de gravedad observadas (Tapley et al., 2004, Wahr et al., 2004). Por ser la cuenca del Amazonas la red de drenaje más grande del mundo, se evidencian las mayores amplitudes en variaciones del almacenamiento (Tapley et al., 2004, Bevis et al., 2005, Schmidt et al., 2006). A partir de GRACE se han detectado variaciones estacionales muy importantes y coinciden, en general, con las predicciones hechas a partir de modelos hidrológicos (Schmidt et al., 2006). Además, se han

evidenciado en los datos GRACE variaciones del almacenamiento interanuales causadas por eventos ENOS como las sequías observadas en 2005 y 2010 y las inundaciones en 2009 (Chen et al., 2009, 2010, Frappart et al., 2012).

Se utilizaron datos de la misión satelital GRACE provistos por el centro CNES/GRGS. En particular, se utilizó información de la última versión disponible, RL03-v3, publicada en octubre 2016 (Lemoine et al., 2013). La misma se basa en datos GRACE nivel-1B reprocesados y estándares 2013, que brinda variaciones temporales mensuales y cada 10 días de los coeficientes armónicos esféricos del campo de gravedad terrestre desde el grado 2 al 80.

El coeficiente C_{20} es en un 90% proveniente de datos SLR (Lageos 1 y 2). El resto de los coeficientes son 100% producto de datos en la banda K de la misión GRACE. Los valores de las grillas corresponden al centro del píxel, por ejemplo, (89.5,-179.5) para el píxel ubicado en el extremo superior izquierdo de la grilla y (-89.5°,179.5°) para el nodo inferior derecho. El campo de gravedad medio utilizado para esta versión es el EIGEN-GRGS.RL03-v2. MEAN-FIELD. Este modelo es libre de mareas (Tide Free) debido a que se redujeron en el procesamiento de los datos las variaciones gravitacionales provenientes de las mareas terrestres, oceánicas (FES2012), efectos atmosféricos (ECMWF ERA-Interim, cada 3 hs) y la respuesta oceánica barotrópica (TUGO, cada 3 hs) por lo que las variaciones del campo de gravedad observado provienen exclusivamente de efectos no modelados como hidrología, señales oceánicas baroclínicas, masas de hielo y rebote postglacial (estas dos últimas despreciables en la región de estudio). Las incertezas incluyen los errores en la medición del dato, errores producidos por el procesamiento, la falta de cobertura para algunos sitios y los posibles errores en los modelos utilizados para los efectos que si se han modelado (FES, TUGO y ECMWF). Los detalles del procesamiento se pueden encontrar en (Lemoine et al., 2013).

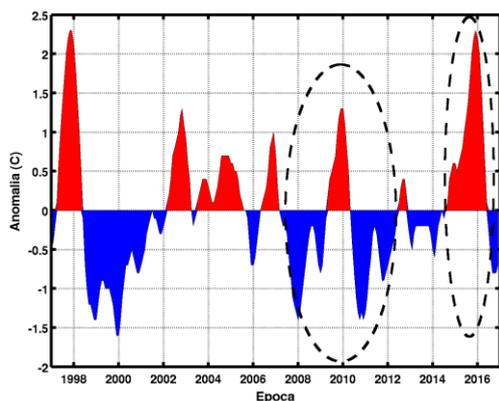
El Índice Oceánico El Niño (ONI)

El Índice Oceánico El Niño (ONI) brinda una medida de la magnitud del fenómeno El Niño-Oscilación del Sur. El valor del Índice para un mes dado representa la temperatura promedio durante 3 meses consecutivos de la superficie del Océano Pacífico en la región denominada 3.4 (es decir, 5N-5S, 120-170 W). Los datos tabulados fueron obtenidos del Centro de Predicción Climática, dependiente de la Administración Nacional del Océano y Atmósfera [CPC-NOAA].

Si se compara cada valor promedio con un valor medio de la temperatura de la superficie del mar durante los últimos 30 años, se reconocen períodos El Niño en el caso en que se suceda que la temperatura promedio fue mayor a +0.5 °C durante 5 meses consecutivos. En el caso de que ocurran períodos en que la temperatura fue inferior a -0.5 °C durante 5 meses consecutivos respecto al valor medio se refieren como eventos La Niña.

Por otro lado, se clasifica la fuerza del evento según la magnitud de la diferencia de temperatura. Si la diferencia está entre 0.5 °C y 0.9 °C se dice que el evento es débil, moderado si está entre 1 °C y 1.4 °C, fuerte entre 1.5 °C y 1.9 °C y muy fuerte para cuando la temperatura del océano aumenta (o disminuye) en más de 2 °C.

La figura 1 muestra los valores del Índice ONI entre 1997 y el presente. Se observan dos eventos El Niño (EN) muy fuertes durante los años 1997-1998 y 2015-2016 que alcanzan el valor de 2.3°C y dos eventos moderados en 2002-2003 y 2009-2010 con máximos de 1.2 y 1.3 °C respectivamente. En el caso de eventos La Niña, es decir cuando la temperatura de la superficie SST del océano es inferior a los valores medios, se registró un evento fuerte en 1999-2001 con una amplitud de 1.6 °C y varios eventos moderados durante los años 2007-2008, 2010-2011 y 2011-2012 con amplitudes de 1.4, 1.5 y 1.0 °C respectivamente (ver tabla de la Fig.1).



Evento	Clasificación	Epoca	Valor máximo
EN	Muy fuerte	05/1997 - 05/98	2.3
		11/2015 - 05/2016	2.3
	Moderado	06/2002 - 02/2003	1.2
		07/2009 - 04/2010	1.3
LN	Fuerte	05/1999 - 02/2001	-1.6
		07/1998 - 04/1999	-1.4
		08/2007 - 06/2008	-1.4
		07/2010 - 04/2011	-1.5
		08/2011 - 02/2012	-1.0

Figura 1. Índice Oceánico El Niño (ONI) 1997-2017
Figure 1. ONI Oceanic Index (ONI) 1997-2017

Al analizar los eventos más importantes posteriores al 2006, época en donde la red GNSS de Sudamérica comenzó a tener una densidad de estaciones importante como para poder realizar el estudio que llevamos a cabo, se pueden mencionar tres eventos La Niña (LN) moderados entre agosto de 2007 y julio de 2008, entre julio de 2010 y abril de 2011 y entre agosto de 2011 a febrero de 2012 y dos eventos El Niño (EN), uno moderado entre julio 2009 y abril de 2010, y uno muy fuerte entre noviembre 2014 y mayo 2016 (al que llamaremos EN 2015-2016).

Es importante notar que entre agosto de 2007 y febrero de 2012 (ver círculo con líneas discontinuas en la Fig.1) se observaron anomalías térmicas en la superficie de la región 3.4 del océano Pacífico, agrupadas en 3 eventos LN moderados y un evento EN moderado (a los que llamaremos eventos moderados 2008-2012).

El evento EN 2015-2016 fue creciendo de débil a fuerte desde noviembre de 2014 a julio 2015. Para octubre 2015, el promedio de la anomalía SST superó los 2 °C y se mantuvo así hasta febrero-marzo de 2016, donde fue debilitándose hasta retomar valores normales en mayo 2016.

METODOLOGÍA Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

Se desea evaluar si la variabilidad de las masas hídricas causada por eventos ENOS es suficiente para causar un efecto importante en la presión ejercida sobre la corteza terrestre y, por lo tanto, poder ser reconocida y cuantificada en las variaciones temporales de la red SIRGAS-CON, dada la precisión alcanzada en la actualidad.

Para el análisis de los cambios temporales en el almacenamiento hídrico se utilizaron tanto precipitaciones diarias provistas por CMAP (2000-2016) como estimaciones cada 10 días de las variaciones del almacenamiento total de agua superficial de la misión GRACE (2003-2016). Se contó, además, con variaciones verticales semanales de las coordenadas GNSS de la red SIRGAS-CON que permite caracterizar las deformaciones corticales en dirección vertical.

Se eligieron como sitios de interés aquellas estaciones GNSS, pertenecientes a la red SIRGAS-CON, ubicadas sobre el territorio de Brasil. La razón de esta elección radica en que estas estaciones no solo se ubican en la región donde se dan las mayores precipitaciones anuales, sino también porque la variabilidad observada en la componente vertical de la coordenada es suficiente para poder discernir cambios respecto a un comportamiento armónico. Se eligieron aquellas estaciones que hayan comenzado a funcionar con anterioridad al 2014 para poder realizar una comparación fidedigna de la variabilidad durante el evento EN respecto de los años previos. De los 121 sitios que componen la red de Brasil, se utilizaron entonces 84 sitios GNSS de prueba (Fig. 2).



Figura 2. Sitios GNSS sobre el territorio de Brasil utilizados en el estudio. Se encuentran indicadas las estaciones POVE y PPTE que se mencionan en el trabajo.
Figure 2. GNSS sites on Brazilian territory used for the study. POVE and PPTE stations are shown in the map.

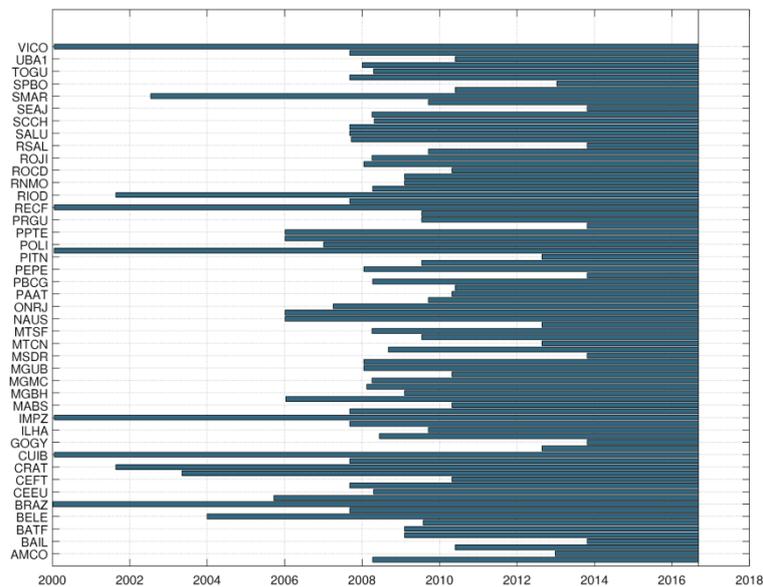


Figura 3. Operatividad de cada sitio GNSS.
Figure 3. GNSS Operability.

La figura 3 muestra los intervalos temporales en los cuales las 84 estaciones seleccionadas estuvieron en operación. La mayoría de las estaciones elegidas comenzaron sus actividades entre 2006 y 2010. Con anterioridad a 2006, funcionaban menos de un 15% de las estaciones actuales.

La metodología general aplicada para cada serie temporal de datos, asociada a cada estación (precipitaciones, almacenamiento de agua y variación vertical de coordenadas) es similar:

- 1) Por medio de un ajuste de mínimos cuadrados, se remueve la tendencia lineal a las series temporales. Cada serie es diferente, y las fuentes que generan los cambios de largo período lineales también (cambio climático, movimientos por deriva continental, efectos locales que sólo se observan en una componente, entre otros). La reducción garantiza que las variaciones estacionales anuales de cada serie sean comparables con las otras 2 fuentes de información analizadas.
- 2) Se calcula una serie media anual a valores mensuales. Esto es, se agrupa cada una de las series según el mes del año y se estima un valor medio de cada grupo. De esta forma se obtienen 12 valores medios para cada serie y cada valor representa el valor medio de toda la serie temporal para ese mes. La ventaja del cálculo de la señal media anual frente al ajuste de alguna función sinusoidal, como es usual (e.g. van Dam et al., 2001, Mangiarotti et al., 2001, Sósnic et al., 2013) es que no se asume ninguna forma funcional para el fenómeno.
- 3) Se replica dicha información para todo el intervalo temporal en donde la estación GNSS haya estado activa y la misión GRACE haya estado en operación, calculando *series medias anuales* por estación.
- 4) Se estiman *anomalías temporales*, sustrayendo de los datos originales las series medias anuales calculadas. Es de esperar que en las series de anomalías estimadas se observen los efectos causados por el evento ENOS.

Análisis de cada serie

Precipitaciones

Los valores de las grillas de precipitaciones mensuales CMAP utilizadas están dados en mm/día, y van desde enero del 2000 hasta diciembre de 2016. En Sudamérica, las mayores precipitaciones se dan en la región ecuatorial y subtropical, con valores que superan los 3000 mm/año y que abarcan parte del noroeste y sureste de Brasil, norte de Perú, Ecuador, Colombia, Venezuela y el Caribe (Fig.4). En las regiones sur de Sudamérica las precipitaciones no superan los 1500 mm/año.

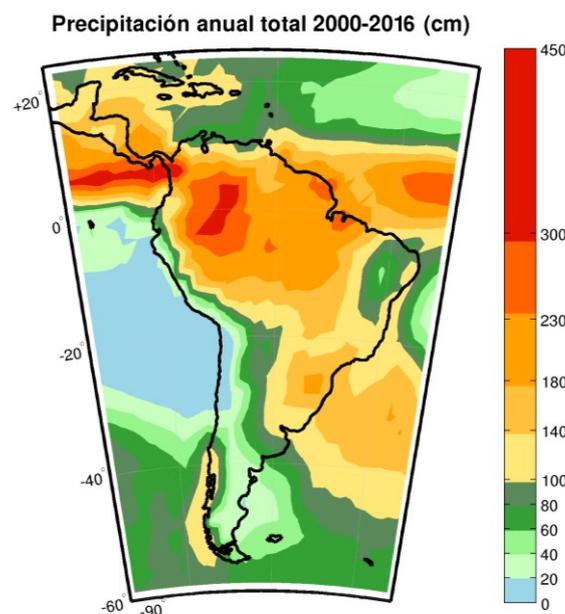


Figura 4. Precipitaciones totales anuales en la región de Sudamérica [cm/año]. Valores medios anuales a partir de datos CMAP 2000-2016.

Figure 4. Annual precipitation in South America [cm/y]. Annual mean values using 2000-2016 CMAP data.

Al analizar el comportamiento temporal de las lluvias, se observa que al norte de Sudamérica los máximos se dan entre marzo y junio, en la parte central entre noviembre y febrero, mientras que en la parte sur se observan máximos entre septiembre y noviembre (Fig.5). Con respecto a las amplitudes, se encuentra que los valores máximos alcanzados para el norte, centro y sur de Sudamérica son 60, 35 y 25 cm mensuales, respectivamente.

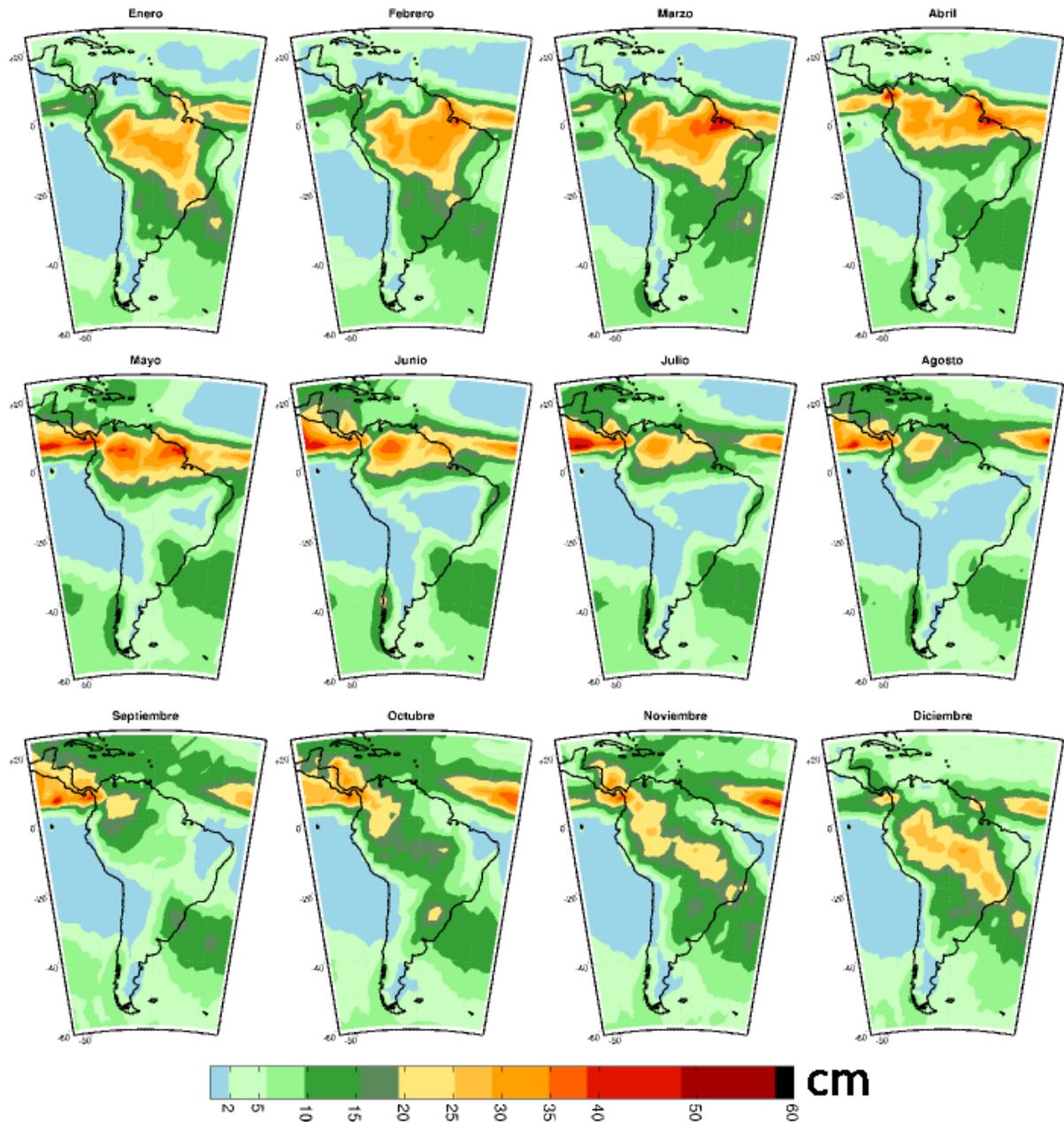


Figura 5. Precipitaciones medias mensuales [cm/mes] a partir de datos CMAP (2000-2016).
Figure 5. Monthly average precipitation [cm/month] using CMAP data sets (2000-2016).

A partir de la serie de precipitación correspondiente para todo el intervalo temporal, se calculó una precipitación media anual como se encuentra detallado en la sección 2. A esta se la utilizó para implementar un filtrado de la serie removiendo la señal anual. Como consecuencia se obtuvo la

anomalía de precipitación, como la diferencia entre la precipitación observada menos la precipitación media anual (sección 4).

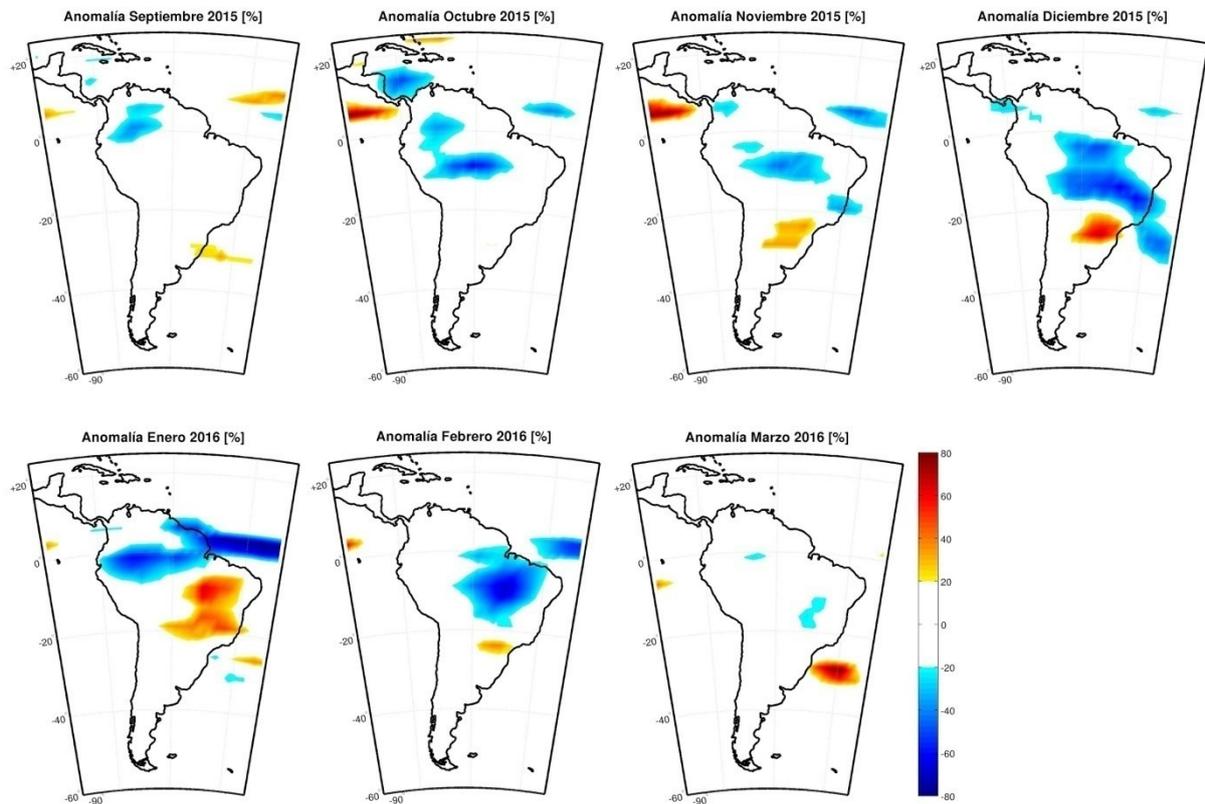


Figura 6. Anomalías de precipitación sucedidas entre septiembre de 2015 y marzo de 2016 [%]
Figure 6. Precipitation anomalies occurred between September 2015 and March 2016 [%]

En la figura 6 se representan las anomalías de precipitación porcentuales obtenidas en la región de Sudamérica entre septiembre de 2015 y marzo de 2016, meses en donde el Índice ONI tomó los valores más grandes de los últimos 17 años (Valores superiores a 1.6). En este caso para cada sitio se calculó el porcentaje de exceso o déficit de precipitación de cada mes, respecto de la precipitación media mensual de la forma (1):

$$Anomalía(\%) = 100 \times [A - \underline{A}] \div \underline{A} \quad (1)$$

siendo A la precipitación observada y \underline{A} la precipitación media mensual de dicho sitio. Se muestran, en colores, sólo aquellos sitios en donde la anomalía porcentual excedió un $\pm 20\%$ los valores medios mensuales. Las mayores diferencias se observan durante los meses de diciembre 2015 y enero-febrero de 2016 coincidiendo con valores del Índice ONI superiores a 2. En estos mapas se evidencia claramente una región en donde las precipitaciones fueron muy inferiores a lo previsto, llegando a alcanzar amplitudes mensuales de menos de un 60% del valor esperado. Dicha región contempla la zona centro, norte y noroeste de Brasil, norte de Perú y Venezuela. Por otro lado, se observa una región en donde las precipitaciones son superiores que los valores medios para esos meses. Este es el caso de la zona sur y sureste de Brasil, norte de Argentina y norte de Uruguay.

Para cada estación GNSS, se definió como precipitación la información asociada al nodo más cercano a la posición promedio registrada respecto al marco de referencia IGS.

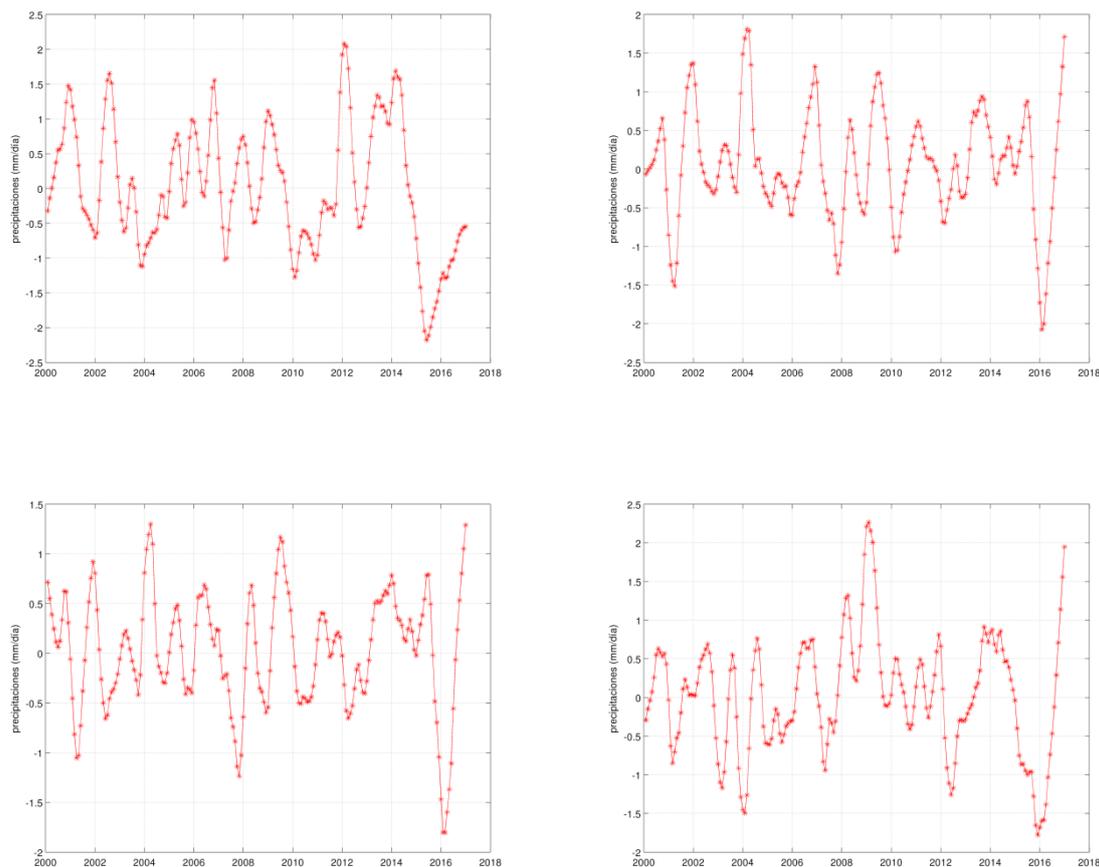


Figura 7. Anomalía de precipitación estimada para 4 sitios en el norte de Brasil.
Figure 7. Precipitation anomaly estimated for 4 sites in the north of Brazil.

En la figura 7 se representan las anomalías estimadas para 4 estaciones en el norte de Brasil, sitios de gran amplitud de precipitación, por lo que se acentúan los cambios de los comportamientos armónicos anuales causados por efectos climáticos no estacionales. Los valores negativos representan épocas de sequía y los valores positivos períodos de inundaciones. El rasgo más visible en las cuatro series es una anomalía negativa entre mediados de 2015 y comienzos del 2016 coincidente con el evento ENOS muy fuerte. No se aprecia en dichos gráficos algún comportamiento característico marcado durante los eventos moderados 2008-2012.

En la figura 8 se volcaron las anomalías estimadas para 31 estaciones GNSS que se encuentran al norte de Brasil seleccionadas según su variación observada en la componente vertical de coordenadas, como se explicará en las secciones siguientes. La superposición de las mismas evidencia un comportamiento similar para la mayoría de las estaciones durante el evento ENOS 2015-2016. Además, se puede observar una anomalía positiva, luego negativa y nuevamente positiva durante los eventos moderados 2008-2012 (ver círculos punteados que marcan dichas épocas).

La figura 9 representa en colores las matrices de correlación entre las series temporales de precipitación para todas las estaciones seleccionadas a) en el norte de Brasil, y b) al sur de Brasil, durante el período temporal que abarca los eventos moderados 2008-2012 y el evento ENOS 2015-2016. De la imagen se desprende que en el caso a) el coeficiente de correlación supera el valor de 0.7 para el 33.5% de las correlaciones y supera el valor de 0.5 para el 67.13% de las mismas. En el caso b) se obtuvo que el 43.1% de las correlaciones supera el valor de 0.7 y que el 70% de los casos supera el valor de 0.5. Este resultado reafirma el comportamiento característico regional de las anomalías de precipitaciones durante eventos ENOS observado en la figura 8.

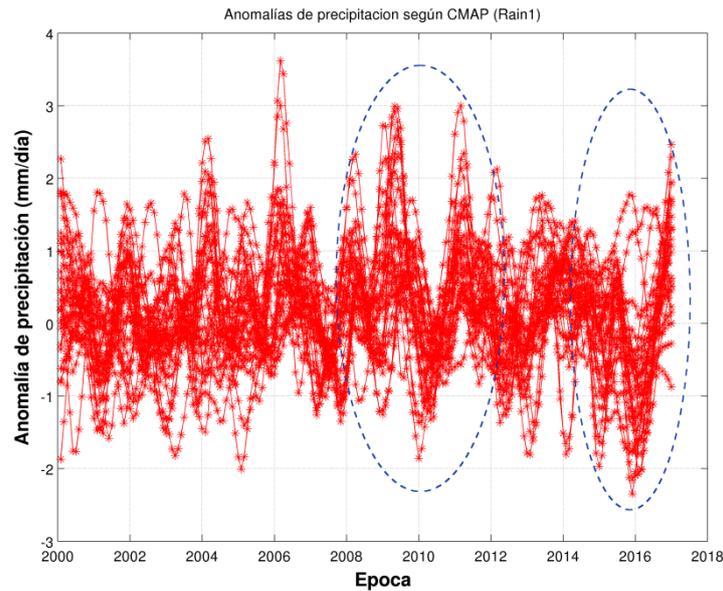


Figura 8. Anomalías de precipitación para sitios en la región norte de Brasil [mm/día].
Figure 8. Precipitation anomalies in the North of Brazil [mm/day].

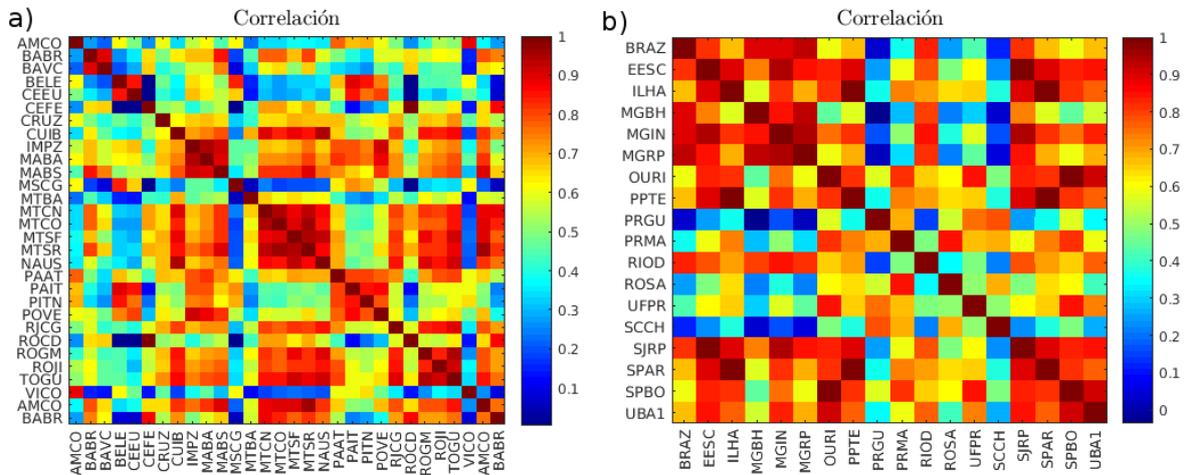


Figura 9. Coeficientes de correlación entre series temporales de anomalías de precipitación para estaciones ubicadas a) en el norte de Brasil y b) al sur de Brasil.
Figure 9. Correlation coefficients between temporal series of precipitation anomalies for stations located at a) North of Brazil, b) South of Brazil.

Almacenamiento total de agua superficial

A partir de los datos de la misión GRACE, versión RL03-v3, provistos por el centro CNES/GRGS se estimaron variaciones del almacenamiento cercanas a los sitios elegidos. Nuevamente, como en el caso de las precipitaciones, se asoció a cada estación la información correspondiente al nodo de la grilla más cercano. Luego, se calculó la variación media anual del efecto promediando el comportamiento en el tiempo, y una anomalía del almacenamiento entre lo observado y la señal media anual que pueda reflejar el efecto extremo ENOS.

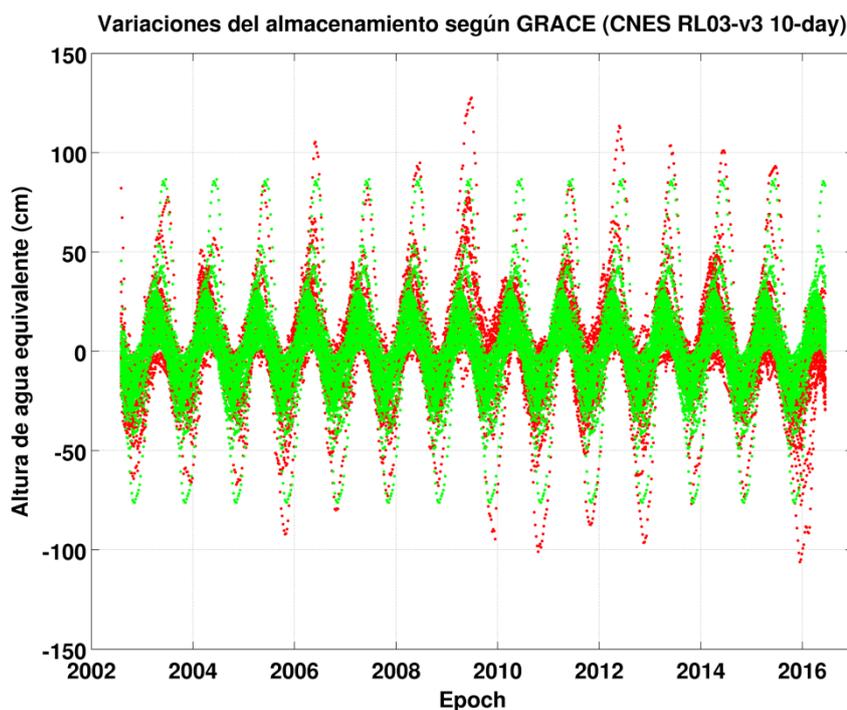


Figura 10. Variaciones temporales del almacenamiento de agua superficial [cm].
Figure 10. Temporal variations of total water storage [cm].

En la figura 10 se muestra la variación del almacenamiento estimada por GRACE para las 31 estaciones seleccionadas al norte de Brasil representadas con puntos rojos y, superpuesta, las variaciones medias estimadas para dichas estaciones, representados con puntos verdes. Se evidencia nuevamente que las mayores separaciones se dan a fines del 2015, principios de 2016. Se observa que el comportamiento estacional se mantiene, lo que se modifica son las amplitudes. Lo mismo se puede concluir al analizar las anomalías del almacenamiento de la figura 11, separadas entre sitios GNSS al norte y al sur de Brasil (en rojo y azul, respectivamente). En el caso de los sitios al norte de Brasil, el evento ENOS 2015-2016 provocó una disminución notoria del almacenamiento superficial, marcando una época de sequías en la región, mientras que al sur se evidencia en el principio del evento un decrecimiento y luego un aumento de la cantidad de agua almacenada en la superficie. Además, se evidencia un cambio en el almacenamiento en la región norte entre 2008 y principios de 2012 que parece estar asociado de la misma forma con los eventos extremos como se vio en las precipitaciones, siendo las anomalías en la región norte más evidentes que en la región sur.

Componente vertical de las coordenadas

Para cada sitio se analizó el desplazamiento de la componente vertical por ser la más afectada por redistribuciones de cargas superficiales (Van Dam et al., 2001, Zygmunt et al., 2016). Se tuvo en cuenta que dichas soluciones están ajustadas a diferentes realizaciones IGS para diferentes épocas. Se aplicó un pre-procesamiento reduciendo la tendencia lineal causada principalmente por movimientos tectónicos y por cambios en el almacenamiento de largo período. Se distinguió cada grupo de coordenadas asociado a cada marco: las posiciones registradas hasta el 16 de abril de 2011 se estimaron utilizando a IGS05 como marco de referencia, las posiciones estimadas con posterioridad a dicha fecha y hasta octubre de 2012 fueron ajustadas al marco de referencia IGS08 y aquellas registradas con fechas posteriores a octubre de 2012 se asociaron a IGB08.

En el gráfico superior de la figura 12 se muestra un ejemplo de las soluciones semanales de la componente vertical para la estación POVE ubicada cercana al río Amazonas (Fig.2). Cada uno de

los puntos negros representan la solución de una semana obtenida por los centros de procesamiento SIRGAS, y las rectas en colores muestran las tendencias lineales estimadas para cada conjunto de soluciones respecto a cada marco (en azul la tendencia lineal cuando se utilizó a IGS05, en celeste el intervalo donde se ajustó a IGS08 y en rosa en el caso en que se tomó a IGb08 como realización IGS). En el caso del ajuste lineal al marco IGb08, se tuvo cuidado de no tomar las épocas en donde el Índice ONI indicara un evento EN para no modificar la tendencia producto de movimientos tectónicos y luego se extendió la pendiente estimada para ese intervalo también.

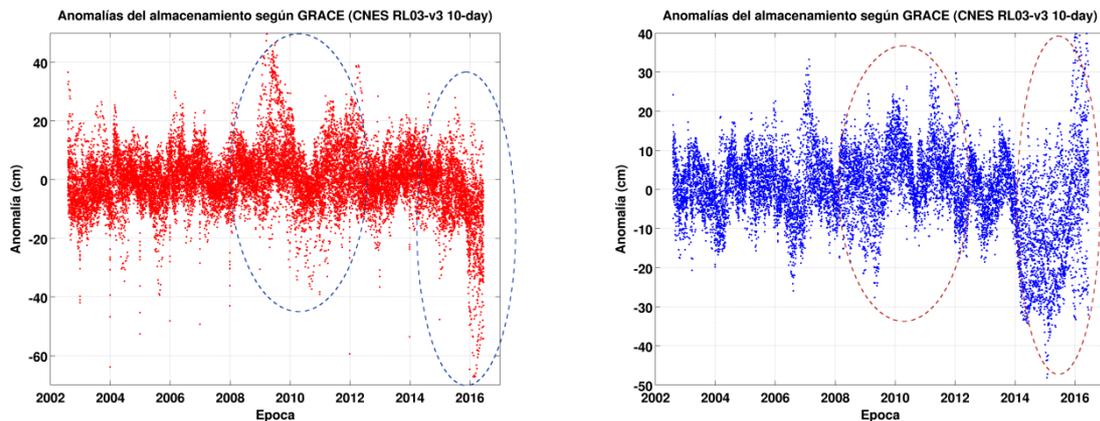


Figura 11. Anomalías observadas en el almacenamiento de agua superficial al norte (rojo) y sur (azul) de Brasil y su relación con los eventos extremos ENOS [cm].

Figure 11. Total water storage anomalies in the north (red) and south (blue) part of Brazil and their relation with ENSO events[cm].

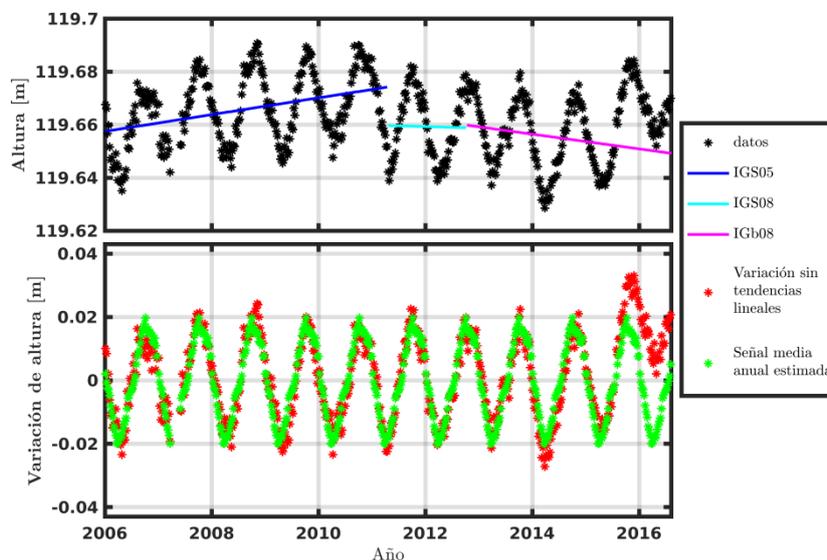


Figura 12.Preprocesamiento de la componente vertical de la estación POVE.

Figure 12.Preprocessing of POVE vertical component.

El gráfico inferior de la figura 12 muestra la variación temporal observada en metros en la componente vertical sin tendencias lineales superpuesta a una señal media anual. En rojo se representan las variaciones calculadas por los centros de procesamientos SIRGAS-CON una vez reducida las tendencias lineales. En verde se muestra una señal media anual estimada por medio del

cálculo de un valor medio para cada semana del año, utilizando todos los datos semanales en el intervalo temporal en que la estación haya tomado datos.

Tal como era esperado, debido a la naturaleza armónica y anual del efecto hidrológico, se observa un comportamiento principalmente estacional de período anual con amplitudes aproximadas pico a pico de 4 cm, con máximos en los meses de octubre-noviembre que indican épocas en donde se reduce el almacenamiento hídrico del suelo. El apartamiento del comportamiento armónico es provocado por alteraciones de los ciclos por cambios en los patrones climáticos, como por ejemplo, debido a eventos ENOS. Esto se hace evidente cuando la serie temporal se aparta de la señal media anual, especialmente en épocas de máximos y mínimos de almacenamiento. La alteración más evidente para este sitio se da durante 2015 y a comienzos de 2016, coincidiendo con el evento ENOS 2015-2016, indicando que la componente vertical fue mayor que lo esperado para esa época del año en esa región. Los cambios en el comportamiento de la estación durante los eventos moderados 2008-2012 no llegan a ser evidentes en este gráfico.

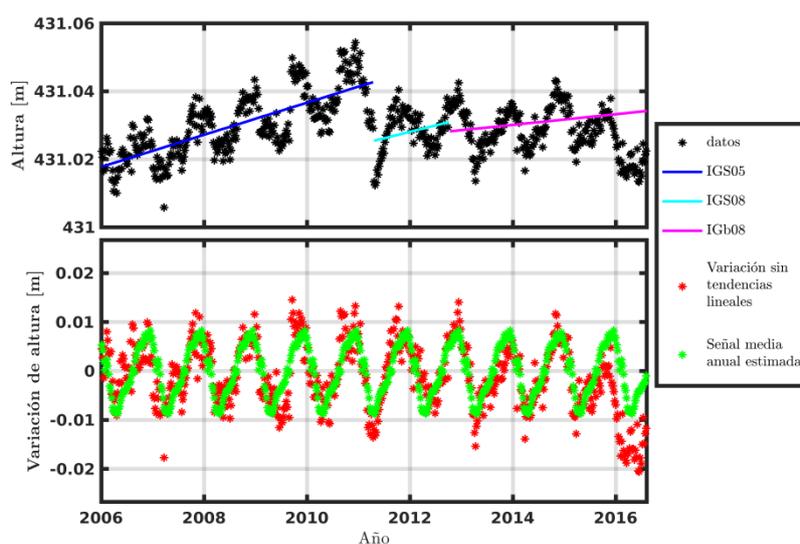


Figura 13. Preprocesamiento de la componente vertical de la estación PPT.

Figure 13. Preprocessing of PPT vertical component.

La figura 13 muestra el mismo análisis para la estación PPT situada al sur de Brasil (ver ubicación en mapa Fig.2). En primer lugar, se observa una variación anual pico a pico de 2 cm indicando que la variación de almacenamiento total del agua sería inferior para esta región que lo observado en el norte. Por otro lado, nuevamente el rasgo más evidente es el apartamiento de la variación vertical respecto de una variación media anual durante 2015 y a principios de 2016 pero, en este caso, la componente vertical se la estima inferior de lo esperado.

De esta forma, se analizaron los movimientos verticales de la corteza para todos los sitios durante el evento ENOS 2015-2016 por ser el más evidente, y se evaluó si esa alteración respecto de una componente armónica era igual en todo el territorio analizado o no. Como los eventos ENOS modifican los patrones de precipitaciones pero el efecto sobre la superficie no es homogéneo, es esperable que las deformaciones tampoco lo sean. Se diferenciaron las estaciones, en primer lugar, cuya componente vertical era afectada por un comportamiento estacional y armónico evidente. Si así lo era, se clasificó la misma según si el patrón anual observado corresponde a épocas más secas, más húmedas, o sin cambios evidentes. Este análisis surgió a partir de evaluar si la posición vertical era mayor o menor que la esperada, o si no era posible discernir entre una alteración u otra.

Para el análisis del comportamiento armónico se estimó nuevamente, para cada estación, la amplitud de la señal media anual. En el gráfico izquierdo de la figura 14 se representa las magnitudes de la amplitud estimada en diferentes colores, discerniendo entre estaciones cuya amplitud es menor

a 0.5 cm, entre 0.5 cm y 1 cm, entre 1 y 1.5 cm, entre 1.5 y 2 cm, entre 2 y 2.5 cm y mayores que 2.5 cm. Se observa que las amplitudes disminuyen en general hacia las zonas de la costa de Brasil y hacia el sur. Las variaciones más chicas corresponden a las regiones externas a las cuencas de Amazonas, Tocantins y Paraná. La única estación que se observa con variaciones medias anuales superiores a 2.5 cm corresponde a la estación NAUS, situada cercana al Río Negro, un afluente del río Amazonas del cual se tienen registros desde el 2006. El resto de las estaciones alejadas de la costa observan movimientos de 1 a 2 cm de amplitud.

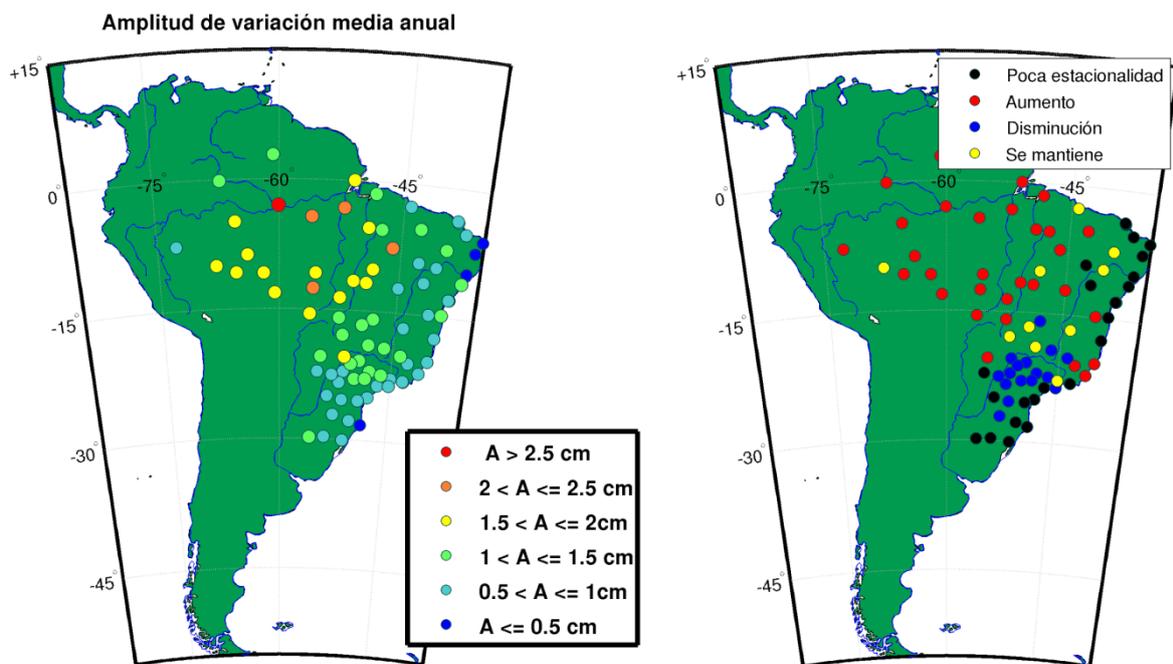


Figura 14. Análisis del comportamiento estacional de la corteza.
Figure 14. Analysis of seasonal behavior of the crust.

En la imagen derecha de la figura 14 se aprecian los resultados de dicha clasificación. En negro se representan aquellas estaciones que observaron poca variabilidad estacional y no fue posible discernir ningún efecto, en rojo aquellas en donde se observa un aumento de la variabilidad anual, en azul aquellas en las cuales se observó una disminución de su ciclo, y en amarillo en donde se observó un comportamiento estacional pero no se evidenció un cambio del comportamiento anual. En general, las estaciones que no tienen una marcada variación armónica se sitúan en las zonas costeras de Brasil y al sur, en la región que limita con Uruguay, externas a las cuencas del Amazonas, Tocantins y Paraná como se percibió en la figura izquierda de la figura 14. Esto concuerda también con la caída de la amplitud de las variaciones medias anuales por debajo de los 10° S respecto de las estimadas en el centro y norte de Brasil. Para la región norte de Brasil, por arriba de los 15 grados de latitud Sur, las variaciones de la componente vertical son mayores que lo esperado indicando posiblemente que el almacenamiento de agua es inferior a los valores medios para cada época y para la región sur el efecto era inverso, es decir, se observan variaciones estacionales de amplitudes menores a lo esperado.

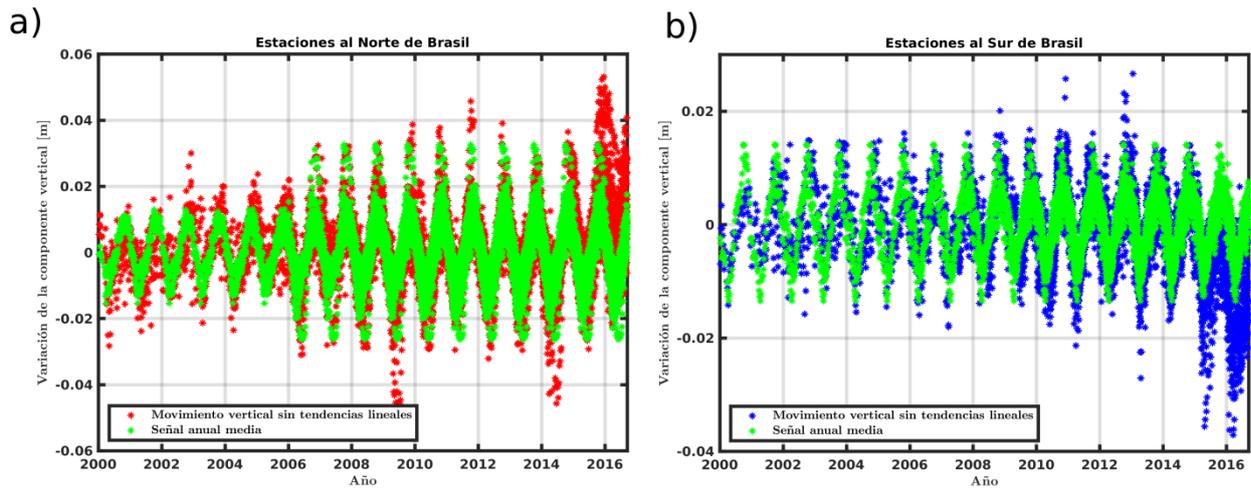


Figura 15. Variaciones temporales de la componente vertical de las estaciones a) al norte de Brasil, b) al sur de Brasil [m].

Figure 15. Temporal variations of seasonal vertical component at a) North of Brazil, b) South of Brazil [m].

Las figuras 15 a) y b) muestran las variaciones verticales observadas para todas las estaciones al norte y al sur de Brasil respectivamente, que hayan observado una alteración en el patrón anual. En la figura 15 a) los puntos rojos representan el movimiento vertical sin tendencias lineales representado ya en las figuras 4 y 5, para todas las estaciones en las que se observa una alteración del patrón positiva y en verde nuevamente la señal anual media correspondiente a cada una de dichas estaciones. La figura 15 b) es similar pero los movimientos verticales sin tendencias lineales se representan en azul. La cantidad de estaciones de la red aumentó con el tiempo por lo que la densidad de puntos que observan alteraciones del patrón también (ver figura 3). Se percibe un aumento de amplitudes en la figura 15 a) a partir de 2006 simplemente porque comenzaron a funcionar estaciones GNSS colocadas más cercanas a los afluentes del río Amazonas por lo que se comenzó a registrar variaciones de almacenamiento del suelo mayores. En el caso de las estaciones al sur de Brasil se ve que el aumento de la densidad de estaciones de la red se hizo evidente a comienzos del 2008.

En ambas figuras la alteración del comportamiento para las épocas en donde se registró el evento ENOS 2015-2016 es notoria. En el caso de las estaciones al norte de Brasil, la componente vertical sufre una deformación que puede alcanzar los 3 cm para fin del año 2015 y comienzos de 2016. Para las estaciones al sur, el suelo sufre también una alteración pero la diferencia es opuesta. Es decir, se estiman posiciones inferiores a los valores esperados y la magnitud de la diferencia puede llegar a 2 cm. Es importante observar que las escalas de ambos gráficos son diferentes. La variabilidad de las componentes al norte puede llegar a 8 cm mientras que al sur no superan los 4 cm.

Posteriormente, se calculó la diferencia entre la variación estimada en la componente vertical de las coordenadas de la red respecto de la señal media anual. Como explicamos en la sección anterior, se utilizaron soluciones semanales y se calculó un valor promedio para cada semana del año utilizando toda la serie temporal de datos disponibles para cada estación. De esta forma, se calcularon 52 valores medios representativos de la variabilidad anual de cada sitio. Luego se redujo de la serie temporal de coordenadas el valor medio calculado correspondiente a cada semana, estimando valores de anomalías de coordenadas. Tales anomalías muestran intervalos temporales en donde las observaciones se apartan del valor medio representativo mensual por encontrarse influenciadas por eventos no estacionales como el evento ENOS.

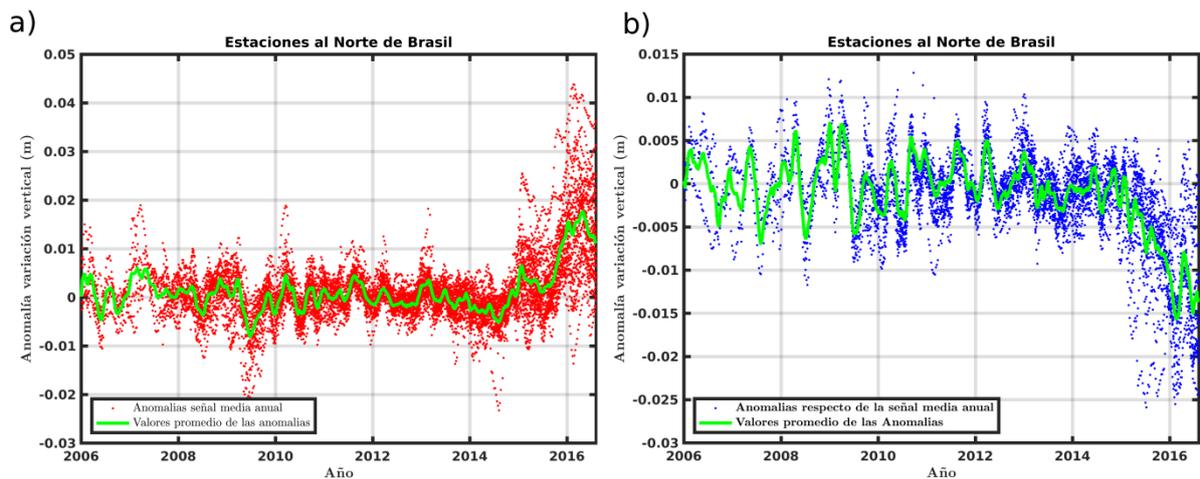


Figura 16. Anomalías entre las componentes verticales observadas y las variaciones anuales medias para estaciones a) al norte de Brasil y b) al sur de Brasil [m].

Figure 16. Anomalies between observed vertical components and average annual variations for stations at a) North of Brazil, b) South of Brazil [m].

En el gráfico de la figura 16a) se muestran, representadas con puntos rojos, las anomalías de la coordenada vertical para el intervalo temporal [2006-2016.6] para todas las estaciones GNSS elegidas como "positivas". Superpuesta a las anomalías, se representa una curva con valores de anomalías medias en verde, calculando la mediana y usando los datos de anomalías de todas las estaciones. Al analizar el comportamiento general del conjunto de estaciones se observa que las amplitudes de las anomalías se mantienen en general inferiores a 1 cm para la mayoría de las estaciones, salvo para el intervalo temporal 2009-2010 donde alcanzan valores cercanos a 2 cm y para el intervalo posterior a 2015 en donde las anomalías superan los 2 cm y llegan a superar en algunos casos los 4 cm. Se observa, además, que el comportamiento de la variación es similar para el conjunto de estaciones. El mismo análisis se efectúa para las estaciones elegidas como "negativas" y los resultados se muestran en la figura 16b). En este caso, las anomalías se mantienen debajo del centímetro para todas las estaciones salvo en épocas posteriores a 2015, en donde puede alcanzar magnitudes de 2.5 cm, indicando que la diferencia entre la posición vertical de la estación respecto de lo esperado es inferior en 2.5 cm. Analizando la curva media verde del gráfico figura 16b) vemos una gran variabilidad temporal antes del 2010 debido a que, como la cantidad de estaciones era chica, la variabilidad promedio de las anomalías copia la variabilidad de las anomalías.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En el presente estudio se evalúa la capacidad de un evento ENOS fuerte de producir cambios en el almacenamiento hídrico lo suficientemente significativos como para modificar en forma evidente la componente vertical de las coordenadas de las estaciones GPS. Para ello se analizaron tanto los cambios observados en las precipitaciones, como en el almacenamiento de agua superficial para luego compararlos con las observaciones de la componente vertical de las coordenadas GPS de estaciones pertenecientes a la red SIRGAS-CON.

Para el análisis de las precipitaciones, se compararon los valores observados entre 2000 y 2016 para toda la región central de Sudamérica respecto a un comportamiento anual "típico". Se encontró que las mayores diferencias se observaron durante los meses de diciembre 2015 y los dos primeros meses de 2016. Estas diferencias coinciden con épocas en donde los valores del Índice ONI fueron superiores a 2. Durante dicho período extremo, las precipitaciones en algunas regiones al norte del continente llegaron a alcanzar una caída del 60% de la precipitación esperada para esa época del

año, mientras que en regiones al sur de Brasil, norte de Argentina y norte de Uruguay se observó un aumento de las mismas pero de menor amplitud. Para otros períodos con ocurrencia de eventos ENOS la alteración en los datos analizados no es suficiente para poder realizar una conclusión similar.

Respecto del almacenamiento hídrico, se analizaron los datos de la misión GRACE para sitios puntuales de Brasil coincidentes con estaciones GNSS de la red SIRGAS-CON. En este caso se separaron anomalías del almacenamiento para el norte y para el sur de Brasil. En el caso de los sitios ubicados al norte, se observan disminuciones evidentes del almacenamiento superficial durante el evento ENOS 2015-2016 que alcanzan los 60 cm de altura, y variaciones durante los eventos 2008-2012 no tan marcados, pero que llegan a alcanzar los 40 cm en algún intervalo temporal pequeño. En la región sur se aprecia también una alteración de los patrones esperados, que comienzan con una brusca disminución del almacenamiento y que luego muestran un aumento respecto a sus valores esperados, que alcanzan los 40 cm de espesor.

Se analizó, por último, la variación temporal de la componente vertical de las estaciones GNSS a través de soluciones semanales brindadas por los centros de procesamiento SIRGAS y se estimó, para cada sitio, una señal media anual utilizando todos los datos disponibles del mismo. Las señales medias anuales estimadas poseen un comportamiento principalmente estacional con amplitudes que alcanzan en algunos sitios los 4 cm pico a pico.

Posteriormente, se clasificaron las estaciones del territorio del Brasil según si el evento fuerte 2015-2016 se manifiesta como un aumento de la componente vertical respecto de los valores esperados, un decrecimiento o si el cambio no era evidente. El análisis espacial de cada conjunto no denota posiciones aleatorias, sino todo lo contrario. Se observa que las estaciones cuyos movimientos fueron mayores que lo esperado se ubican en el centro y noroeste del territorio brasileño, evidenciando una zona de sequías. Las estaciones seleccionadas por observar una disminución de la componente respecto a valores normales en la misma época del año se encontraron ubicadas al sureste de Brasil, en el límite con el norte de Uruguay. Las anomalías observadas en ambos conjuntos parecerían ser algo excesivas en amplitud durante el evento extremo, ya que en algunos casos la diferencia entre los datos estimados y los calculados alcanza los 3 cm. Este exceso en amplitud observado en las anomalías puede deberse a que el evento ENOS 2015-2016 se ubica al final de la serie de tiempo por lo que las tendencias lineales estimadas podrían no ser exactas. Sin embargo, la distribución preferencial encontrada de las estaciones GNSS que observan un efecto por sequías y aquellas que observan cambios esperados en inundaciones es indiscutible, y coinciden con los análisis realizados en las precipitaciones y en las variaciones de la carga hídrica.

Los cambios en el comportamiento de la estación durante los sucesos 2008-2012 no se observan tan claramente como si lo hacen las variaciones en las cargas. A pesar de ello, al analizar las anomalías entre las componentes verticales observadas y las variaciones anuales medias, principalmente para las estaciones seleccionadas entre las que sufrieron un aumento de la componente vertical, se observa una señal importante entre 2009 y mediados de 2010 cuya amplitud no supera los 2 cm. Dicho rasgo coincide con las épocas en que se observaron cambios en el almacenamiento hídrico medido.

Se concluye que en las estaciones GNSS de la red SIRGAS-CON se manifiestan cambios producidos por eventos ENOS y que, en casos en los que el evento sea fuerte como el último sucedido, además es posible diferenciar regiones de sequías y sitios con inundaciones.

Agradecimientos. Los autores agradecen a la red SIRGAS y a sus centros de procesamiento por la provisión de las soluciones semanales de datos GNSS y al centro CNES/GRGS francés por la provisión de los datos de la misión GRACE.

REFERENCIAS

- Aceituno, P., (1988). On the Functioning of the Southern Oscillation in the South American Sector. Part I: Surface Climate. *Monthly Weather Review*, 116, 505.
- Altamimi, Z., X. Collilieux, L. Metivier, (2011). ITRF2008: an improved solution of the international terrestrial reference frame. *Journal of Geodesy*, 85, 457-473.
- Bevis, M., E. Kendrick, A. Cser, R. Smalley, (2004). Geodetic measurement of the local elastic response to the changing mass of water in Lago Laja, Chile. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, Volumen 141, 71-78.
- Bevis, M., D. Alsdorf, E. Kendrick, L. P. Fortes, B. Forsberg, R. Smalley, J. Becker, (2005). Seasonal fluctuations in the mass of the Amazon River system and Earth's elastic response. *Geophysical Research Letters*, 32, 16308.
- Bevis, M., A. Brown, (2014). Trajectory models and reference frames for crustal motion geodesy..*Journal of Geodesy*, 88, 283-311.
- Bruisma, S., J.M. Lemoine, R. Biancale, N. Vales, (2010). CNES/GRGS 10-day gravity field models (release 2) and their evaluation. *Advances in Space Research*, 45, 587-601.
- Brunini, C., S. Costa, V. Mackern, W. Martínez, L. Sánchez, W. Seemüller, A. da Silva, (2009). SIRGAS: ITRF densification in Latin America and the Caribbean. *EGU General Assembly Conference Abstracts*, 11, 2105.
- Brunini, C., H. Drewes, L. Sánchez, V. Mackern, and L. Mateo, (2010). Controlling seasonal effects on the weekly realization of the SIRGAS Reference Frame. *EGU General Assembly Conference Abstracts*, 12, 2006.
- Chang, P., D. S. Battisti, (1998). The physics of El Niño. *Physics World*, 11.
- Chen, J. L., C. R. Wilson, B. D. Tapley, Z. L. Yang, G. Y. Niu (2009). 2005 drought event in the Amazon River basin as measured by GRACE and estimated by climate models. *Journal of Geophysical Research (Solid Earth)*, 114, B05404.
- Chen, J. L., C. R. Wilson, B. D. Tapley, (2010). The 2009 exceptional Amazon flood and interannual terrestrial water storage change observed by GRACE. *Water Resources Research*, 46: W12526,
- Collilieux, X., T. van Dam, J. Ray, D. Coulot, L. Metivier, Z. Altamimi, (2012). Strategies to mitigate aliasing of loading signals while estimating GPS frame parameters. *Journal of Geodesy*, 86, 1-14.
- Creutzfeldt, B., J. Kennedy, P. A. Ferre, (2012). Water-storage change measured with high-precision gravimetry at a groundwater recharge facility in Tucson, USA. *AGU Fall Meeting Abstracts*.
- Climate Prediction Center, Center for Weather and Climate Prediction, NOAA
http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml.
Datos extraídos en 2017.
- Demoulin, A., B. Ducarme, M. Everaerts, (2007). Seasonal height change influence in GPS and gravimetric campaign data. *Journal of Geodynamics*, 43, 308-319.
- Dong, D., P. Fang, Y. Bock, M. K. Cheng, S. Miyazaki, (2002). Anatomy of apparent seasonal variations from GPS-derived site position time series. *Journal of Geophysical Research (Solid Earth)*, 107, 2075.
- Elósegui, P., J. L. Davis, J. X. Mitrovica, R. A. Bennett, B. P. Wernicke, (2003). Crustal loading near Great Salt Lake, Utah. *Geophysical Research Letters*, 30, 11-1.
- Frappart, F., F. Papa, J. S. Famiglietti, C. Prigent, W. B. Rossow, F. Seyler, (2008). Interannual variations of river water storage from a multiple satellite approach: A case study for the Rio Negro River basin. *Journal of Geophysical Research (Atmospheres)*, 113, D21104.
- Frappart, F., L. Seoane, G. Ramillien, (2012). Detection of large flood events using GRACE regional solutions. In A. Abbasi and N. Giesen, editors, *EGU General Assembly Conference Abstracts*, 14, 2593.
- Grimm, A. M., V. R. Barros, M. E. Doyle, (2000). Climate Variability in Southern South America Associated with El Niño and La Niña Events. *Journal of Climate*, 13, 35-58.
- Grimm, A. M., (2003). The El Niño Impact on the Summer Monsoon in Brazil: Regional Processes versus Remote Influences. *Journal of Climate*, 16, 263-280.

- Grimm A. M., R. G. Tedeschi, (2009). ENSO and extreme events of rainfall and stream flow in South America. In D. N. Arabelos and C. C. Tscherning, editors, EGU General Assembly Conference Abstracts, 11, 1042.
- Guimaraes, G. N., D. Blitzkow, A. C. O. C. de Matos, F. G. V. Almeida, A. C. B. Barbosa, (2012). Analysis of the Crust Displacement in Amazon Basin. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, 885-891.
- Guo, H. T. Jiang, (2006). Impacts of Climate Variations on Runoff Coefficients in the Poyang Lake Basin, China, 1955-2002. AGU Fall Meeting Abstracts.
- Lemoine, J.M., S. Bruinsma, P. Gegout, R. Biancale, S. Bourgogne, (2013). Release 3 of the GRACE gravity solutions from CNES/GRGS. EGU General Assembly Conference Abstracts, 15, 11123.
- Mangiarotti, S., A. Cazenave, L. Soudarin, J. F. CreTaux, (2001). Annual vertical crustal motions predicted from surface mass redistribution and observed by space geodesy. *Journal of Geophysical Research*, 106, 4277-4291.
- Papa, F., F. Frappart, A. Güntner, C. Prigent, F. Aires, A. C. V. Getirana, R. Maurer, (2013). Surface freshwater storage and variability in the Amazon basin from multi-satellite observations, 1993-2007. *Journal of Geophysical Research (Atmospheres)*, 118, 11.
- Philander, G., (1990). *El Niño, La Niña, and the Southern Oscillation*, International Geophysics. 46. Academic Press, San Diego, CA.
- Ropelewski, C. F., M. S. Halpert, (1987). Global and Regional Scale Precipitation Patterns Associated with the El Niño/Southern Oscillation. *Monthly Weather Review*, 115, 1606.
- Ropelewski, C. F., M. S. Halpert, (1989). Precipitation Patterns Associated with the High Index Phase of the Southern Oscillation. *Journal of Climate*, 2, 268-284.
- Sánchez, L., M. Seitz, (2011). Recent activities of the IGS regional network associate analysis centre for sirgas. Technical Report 87, DFGI, Munich, Germany.
- Sánchez, L., C. Brunini, H. Drewes, V. Mackern, A. da Silva, (2013). SIRGAS: the core geodetic infrastructure in Latin America and the Caribbean. AGU Spring Meeting Abstracts.
- Sánchez, L., H. Drewes, (2016). VEMOS2015: Velocity and deformation model for Latin America and the Caribbean. *Journal of Geodynamics, PANGAEA*, 102, 1-23, doi:10.1016/j.jog.2016.06.005.
- Schmidt, R., P. Schwintzer, F. Flechtner, C. Reigber, A. Güntner, P. Döll, G. Ramillien, A. Cazenave, S. Petrovic, H. Jochmann, J. Wunsch, (2006). GRACE observations of changes in continental water storage. *Global and Planetary Change*, 50, 112-126.
- Seneviratne, S. I., P. Viterbo, D. Lüthi, C. Schär, (2004). Inferring Changes in Terrestrial Water Storage Using ERA-40 Reanalysis Data: The Mississippi River Basin. *Journal of Climate*, 17, 2039-2057.
- Sosnica, K., D. Thaller, R. Dach, A. Jäggi, G. Beutler, (2013). Impact of loading displacements on SLR-derived parameters and on the consistency between GNSS and SLR results. *Journal of Geodesy*, 87, 751-769.
- Tapley, B. D., S. Bettadpur, M. Watkins, C. Reigber, (2004). The gravity recovery and climate experiment: Mission overview and early results. *Geophysical Research Letters*, 31, 9607.
- Tedeschi, R. G., A. M. Grimm, I. F. A. Cavalcanti, (2015). Influence of Central and East ENSO on extreme events of precipitation in South America during austral spring and summer. *International Journal of Climatology*, 35, 2045-2064.
- Tedeschi, R. G., A. M. Grimm, and I. F. A. Cavalcanti, (2016). Influence of Central and East ENSO on precipitation and its extreme events in South America during austral autumn and winter. *International Journal of Climatology*, 36, 4797-4814.
- Tregoning, P., T. van Dam, (2005). Effects of atmospheric pressure loading and seven-parameter transformations on estimates of geocenter motion and station heights from space geodetic observations. *Journal of Geophysical Research (Solid Earth)*, 110, B03408.
- van Dam, T. M., G. Blewitt, M. B. Heflin, (1994). Atmospheric pressure loading effects on Global Positioning System coordinate determinations. *Journal of Geophysical Research*, 99:23939.
- van Dam, T., J. Wahr, P. C. D. Milly, A. B. Shmakin, G. Blewitt, D. Lavalée, K. M. Larson, (2001). Crustal displacements due to continental water loading. *Geophysical Research Letters*, 28, 651-654.

- Wahr, J. M., S. Swenson, V. Zlotnicki, I. Velicogna, (2004). Time-variable gravity from GRACE: First results. *Geophysical Research Letters*, 31, 11501.
- Xie, P., P. A. Arkin., (1997). Global Precipitation: A 17-Year Monthly Analysis Based on Gauge Observations, Satellite Estimates, and Numerical Model Outputs. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78, 2539-2558.
- Zou, R., J. T. Freymueller, K. Ding, S. Yang, Q. Wang, (2014). Evaluating seasonal loading models and their impact on global and regional reference frame alignment. *Journal of Geophysical Research (Solid Earth)*, 119, 1337-1358.
- Zygmunt, M., M. Rajner, T. Liwosz, (2016). Assessment of continental hydrosphere loading using GNSS measurements. *Reports on Geodesy and Geoinformatics*, 101, 36-53.

Recibido: Setiembre, 2017

Aceptado: Marzo, 2018